

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН, доктор
географических наук, профессор
Фролова Наталья Леонидовна

Москва – 2025

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Общая географическая характеристика исследуемого региона.....	11
1.1 Географическое положение и гидрологическая изученность региона исследований	11
1.2 Климат региона исследований и его изменения.....	21
1.3 Изученность ледотермического режима рек в российской Арктике	26
Глава 2. Материалы и методы.....	31
2.1 Источники информации, используемые в работе	31
2.2 Принципы отбора исходных данных.....	35
2.3 Методы обработки гидрометеорологической информации	37
2.4 Методы оценок характеристик ледотермического режима рек в XXI в.	39
Глава 3. Современные характеристики и многолетняя изменчивость ледотермического режима рек.....	43
3.1 Современные характеристики ледотермического режима рек	43
3.2 Многолетняя изменчивость характеристик ледотермического режима рек	58
Глава 4. Современные характеристики и многолетняя изменчивость теплового стока рек.....	78
4.1 Современные оценки теплового стока арктических рек	78
4.2 Воздействие строительства водохранилищ на тепловой сток в низовьях крупнейших рек	84
Глава 5. Трансформации термического режима в устьевых областях рек	106
5.1 Трансформация температуры воды и теплового стока в устьевых областях Севера ЕТР	106
5.2 Трансформация температуры воды и теплового стока в устьевых областях азиатского сектора российской Арктики	117
Глава 6. Оценка будущих характеристик ледотермического режима рек	123
Заключение.....	130
Список литературы	133

Введение

Актуальность исследования. Ледотермический режим рек оказывает разноплановое воздействие на водные экосистемы и сопряженные с реками природно-территориальные комплексы. Биологическая продуктивность водных экосистем, насыщение воды кислородом, качество воды связаны с характеристиками термического режима на разных временных масштабах. Многие гидрофизические процессы, например, испарение также во многом зависят от температуры поверхностного слоя. Тепловой сток рек оказывает воздействие на микроклимат речных долин, на ледовый и термический режим приёмных водоёмов и нижележащих участков русской сети. Ледовые явления на реках лимитируют водопользование в отдельные сезоны, а также играют значимую роль для функционирования водных экосистем. Освоение ресурсов Арктики, как в сухопутной, так и в морской частях, в условиях наблюдаемых климатических изменений предъявляет повышенные требования к эффективности водопользования и управлению возможными рисками. Наблюдаемые изменения температуры воздуха могут привести к повышению температуры воды в реках. В этом случае может произойти изменение количества, состава и пространственного распространения представителей речной ихтиофауны, в том числе ценных пород рыб. Также повышение температуры воды в реках может привести к снижению количества растворённого в воде кислорода, что может негативно сказаться на запасах промысловых видов рыб и привести к эвтрофикации отдельных участков рек в будущем. Рост температуры воды может привести к увеличению теплового стока рек, оказывающего влияние на термические характеристики прибрежных зон морей, и к интенсификации термоабразии берегов, закреплённых в настоящее время многолетнемёрзлыми породами. Одновременно с необходимостью учёта характеристик термического режима требуется оценка возможного изменения характеристик ледового режима – фаз замерзания, ледостава и вскрытия для определения потенциальной опасности для населения и хозяйства. Наконец, гидроэнергетическое, селитебное и транспортное освоение речных долин при освоении Арктики требует научно обоснованных оценок потенциального изменения состояния природной среды, в том числе при трансформациях ледотермического режима рек.

Несмотря на наличие в России данных многолетних наблюдений за температурой воды и сроками формирования и исчезновения ледовых явлений с достаточно большой сети гидрологических постов, представления о многолетней изменчивости температуры воды, а также представления о географическом распределении различных характеристик ледотермического режима остаются ограниченными. Недостаточны также сведения о величине теплового стока рек и его многолетней изменчивости под влиянием климатических и антропогенных факторов. Не решённым остаётся и вопрос трансформации теплового стока в устьевых областях рек.

В других арктических странах, насколько известно автору, систематические измерения температуры воды проводятся только на единичных постах на Аляске. В зарубежных исследованиях в качестве исходных данных обычно используют высокочастотные записи логгеров. Продолжительность подобных записей обычно не превышает пяти лет. Большая часть исследований многолетней изменчивости температуры воды за рубежом сосредоточена на реках умеренных широт, а основной временной масштаб при таком анализе – среднегодовой. Анализ внутригодовых изменений температуры воды существует только для отдельных рек Центральной и Восточной Европы. В российской Арктике подобные исследования проводились в 50–70-е годы XX в., до начала климатических изменений.

Анализ многолетних изменений обычно проводится по данным наблюдений до 2015 г. Отдельно стоит отметить отсутствие современных картографических обобщений характеристик ледотермического режима рек, а также несогласованность региональных карт, приведённых в изданиях «Ресурсов поверхностных вод СССР» – последних картографических обобщений температуры воды и ледового режима рек российской Арктики.

Состояние изученности. Особенности пространственно-временного распределения температуры воды на мелкомасштабном уровне в современной литературе освещены сравнительно мало. При этом абсолютно большая часть исследований температуры воды посвящена рекам умеренной климатической зоны северного полушария. Существует ряд работ (в том числе выполненных на кафедре гидрологии суши МГУ), посвящённых термическому режиму горных рек, в первую очередь Кавказской и Альпийской горных систем, гор архипелага Шпицберген; рек, имеющих оледенение и многолетнемёрзлые породы в пределах их водосборов [Алексеевский, Магрицкий, 2002; Алексеевский и др., 2014; Михайлов и др., 2009; Самохвалов, Ухов, 2018; Шамов и др., 2023; Brown et al., 2006; Docherty et al., 2019; Fuso et al., 2023; Yang and Peterson, 2017]. Для российской Арктики на уровне макрорегиона подобных работ до сих пор не было.

Первые характеристики термического режима арктических рек приведены в работах начала XX в. [Полилов, 1907; Шостакович, 1911; Антонов, 1936; Зайков, 1936]. Пространственные обобщения были выполнены в СССР первоначально в монографии Е.М. Соколовой в 1951 г. [Соколова, 1951], в различных изданиях «Ресурсов поверхностных вод» [Ресурсы… 1967, 1969, 1970, 1972 (1, 2), 1973 (1, 2)] и не обновлялись до сегодняшнего времени. В зарубежной научной литературе в основном приведены результаты исследований вдольрусловых изменений температуры воды [Beaufort et al., 2015; Pekarova et al., 2008], а также оценки воздействия водохранилищ на температуру воды в реках (например, [Kędra, Wiejaczka, 2018]). Для множества рек, в основном Центральной и Восточной Европы, с 1990-х гг. начало проводиться изучение влияния изменений климата, в первую очередь температуры воздуха на

температуру воды [Webb, Nobilis, 1994, 1995; van Vliet et al., 2011; Chen et al., 2016; Dunea et al., 2022; Worrall et al., 2022; Niedrist, 2023; Ognjen et al., 2024; Shrestha et al., 2024]. Отдельно стоит отметить современные работы по оценке пространственно-временной изменчивости температуры воды для рек Прибалтики, опирающиеся на наблюдения на сети гидрологических постов [Jurgelėnaitė et al., 2012; Jurgelėnaitė et al., 2018; Latkovska, Elga, 2016], результаты которых включены в доклад об изменениях климата МГЭИК [IPCC, 2022]. Также отдельно стоит отметить обобщения характеристик термического режима рек, сделанные, например, в Чехословакии в конце 1960-х [Cermak et al., 1967]. Вероятно, подобные обобщения появлялись в 1960-е и 1970-е годы и в странах Центральной и Восточной Европы, однако данных об этом найти автору не удалось. С учётом ограниченного пространственного охвата многолетних наблюдений (или их отсутствия во многих районах), большое внимание в исследованиях термического режима рек уделяется моделированию температуры воды в реках [Mohseni et al., 1998; Rivers-Moore, Lorentz, 2004; Toffolon, Piccolroaz, 2015]. На основе сформированных рядов часто делаются оценки многолетних изменений температуры воды.

На территории России такие исследования в последние десятилетия сосредоточены в первую очередь на Лене [Магрицкий, 2015; Liu, 2004; Yang et al., 2005]. Большинство исследований временных трансформаций температуры воды связаны с изучением изменений теплового стока, его влиянием на прибрежную зону морей, и они выполнялись для низовий больших рек [Елшин 1981, 1988; Магрицкий, 2009, 2015; Georgiadi et al., 2018; Lammers et al., 2007; Vasilenko et al., 2022; Yang et al., 2005; Yang et al., 2021].

В большинстве исследований термического режима рек, выполненных в XXI в., не использовались данные о температуре воды после 2010 г. Небольшое исключение составляет несколько работ, выполненных в Российском государственном гидрометеорологическом университете и посвящённых термическому режиму Северной Двины, для которой проанализированы данные вплоть до 2018 г. [Двоеглазова и др., 2020; Двоеглазова, Шелутко, 2021]; несколько работ по термическому режиму рек бассейна Колымы [Самохвалов, Ухов, 2018; Ухов, 2023], а также работы с участием автора [Василенко и др., 2020; Vasilenko et al., 2022; Magritsky et al., 2023 (1,2); Vasilenko et al., 2024].

В последние 50 лет достаточно подробно изучались трансформации термического режима и теплового стока рек при строительстве больших водохранилищ на Оби [Орлова, 1984; Одрова, 1987], Енисее [Иванов, 1980, Куржунов, 1984; Космаков, 2001], Лене [Магрицкий, 2015], а также по всем крупнейшим арктическим рекам [Vasilenko et al., 2022]. Существующие оценки воздействий не охватывают период после запуска новых больших водохранилищ на Ангаре, Вилюе и Колыме.

В России практически не используются методы физико-математического моделирования температуры воды, поскольку большинство моделей требует наличия высокочастотных наблюдений, данные которых в России не публикуются. Современные расчёты теплового стока проводятся для замыкающих створов рек, зачастую удалённых от устьевых областей [Gradova, Golubeva, 2023]. Трансформация температуры воды в устьевых областях практически не изучена, за исключением дельты Лены [Магрицкий и др., 2018].

Многолетние наблюдения за ледовыми явлениями ведутся на протяжении почти ста лет в странах СНГ и Центральной Европы [Рыкачев, 1886; Донченко, 1987]. В Канаде прямых наблюдений за сроками формирования и исчезновения ледовых явлений не ведётся, лишь отмечается возможное влияние ледовых явлений на связь $Q=f(H)$ [Rham et al., 2020]. Территориальные обобщения характеристик ледового режима были выполнены в масштабах гидрографических единиц СССР в вышеупомянутых изданиях «Ресурсы поверхностных вод». Во второй половине XX в. для больших рек азиатской части России были также выполнены районные обобщения характеристик ледового режима рек [Антонов, 1962, 1967; Антонов, Маслаева, 1965; Налимов, 1965, 1968; Комов, 1970]. В XXI в. оценки многолетней изменчивости и последствий климатических изменений опубликованы в отдельных региональных работах, в том числе с участием автора [Agafonova et al., 2017; Agafonova, Vasilenko, 2020; Сумачев, Банщикова, 2019, 2020, 2021; Землянскова и др., 2024]. Современных оценок для всей российской Арктики пока нет.

Оценки будущего состояния ледотермического режима рек существуют в основном для ледового режима и базируются по большей части на связи характеристик сроков формирования и исчезновения ледовых явлений и различных характеристик температуры воздуха [Agafonova et al., 2017; Andrishak, Hicks, 2008; Przybylak, 2016; Prowse et al., 2012 (1,2)]. Обычно применяются многомерные регрессии, включающие в качестве входных данных различные метеорологические характеристики и сток воды. Отметим, что на сегодняшний день ещё не началось активное использование данных проекта СМИР6 для оценок будущего состояния ледотермического режима рек, по крайней мере для арктических рек России.

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. **Цель работы** – на основе современной гидрометеорологической информации и методов исследования изучить особенности пространственно-временной изменчивости характеристик термического и ледового режимов рек на территории российской Арктики, выявить факторы их формирования, дать долгосрочную оценку их изменений.

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.

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 увеличивается в последние 20–30 лет, 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.

Научная новизна. 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. Проведенное исследование позволило выявить регионы наиболее интенсивных трансформаций ледотермического режима рек, а также показать внутригодовую изменчивость рассмотренных процессов в современный период. Уточнено воздействие строительства и модернизации больших ГЭС на термический режим рек в последние десятилетия, также уточнены величины теплового стока в Северный Ледовитый

океан. Помимо этого, на основании наиболее современных оценок будущих метеорологических параметров, полученных из моделей проекта CMIP6, включённых в протокол ISIMIP, и наиболее современных гидрологических данных, сделаны оценки будущей продолжительности периода с ледовыми явлениями и ледостава.

Практическая значимость работы. Проведенная оценка момента нарушения однородности данных о термическом и ледовом режимах актуальна для анализа современной ситуации при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий и принятий конкретных управленческих 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.

Результаты работы были использованы при выполнении 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».

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты диссертационного исследования докладывались автором на конференциях памяти Ю.Б. Виноградова «Третья Виноградовские чтения. Границы гидрологии» (Санкт-Петербург, 28–30.03.2018), «Четвертые Виноградовские чтения. «Гидрология: от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, 3–9.12.2020), «Пятое 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).

Личный вклад автора. Автором значительно расширена существовавшая база данных о термическом режиме рек, продлена по времени существующая база данных об их ледовом режиме. 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 Печоре, Колыме, а также многих реках бассейна Белого моря, материалы которых позволили внести ряд уточнений в данную диссертацию.

Публикации. Автором опубликовано 13 печатных работ, в том числе 12 в журналах, определенных положением о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Объем и структура диссертации. 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 работ на иностранном, а также 6 Интернет-источников.

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

Глава 1. Общая географическая характеристика исследуемого региона

1.1 Географическое положение и гидрологическая изученность региона исследований

В работе рассматривается территория, ограниченная с севера и востока береговыми линиями морей Северного Ледовитого и Тихого океанов, а с запада – государственной границей России. Южная же граница определялась в соответствие с различными представлениями о положении южной границы Арктики.

Многие исследователи [Селин и др., 2011; Российская Арктика..., 2019], предлагают устанавливать южную границу Арктики на территории России по Северному полярному кругу, по нулевой среднегодовой изотерме или по северной границе леса.

Согласно Президентскому указу от 2 мая 2014 г. с последующими изменениями [Указ Президента РФ..., 2020] в Арктическую зону РФ входят частично или полностью регионы РФ, в основном расположенные на побережьях арктических морей, при этом в нее периодически добавляются новые административные районы. Данная законодательно установленная территория является основной зоной исследования в данной работе, однако, целесообразным представляется смещение границы на юг до 60° с.ш. Увеличенная таким образом зона исследований, охватывает все природные южные границы Арктики, а также соответствует, как минимум в Европейской части России исторической области Русского Севера. Кроме того, большая часть бассейнов рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, расположена либо полностью, либо в значительной своей части севернее 60° с.ш. Такая граница также принята и в ряде официальных документов, таких как [Распоряжение Правительства РФ..., 2008].

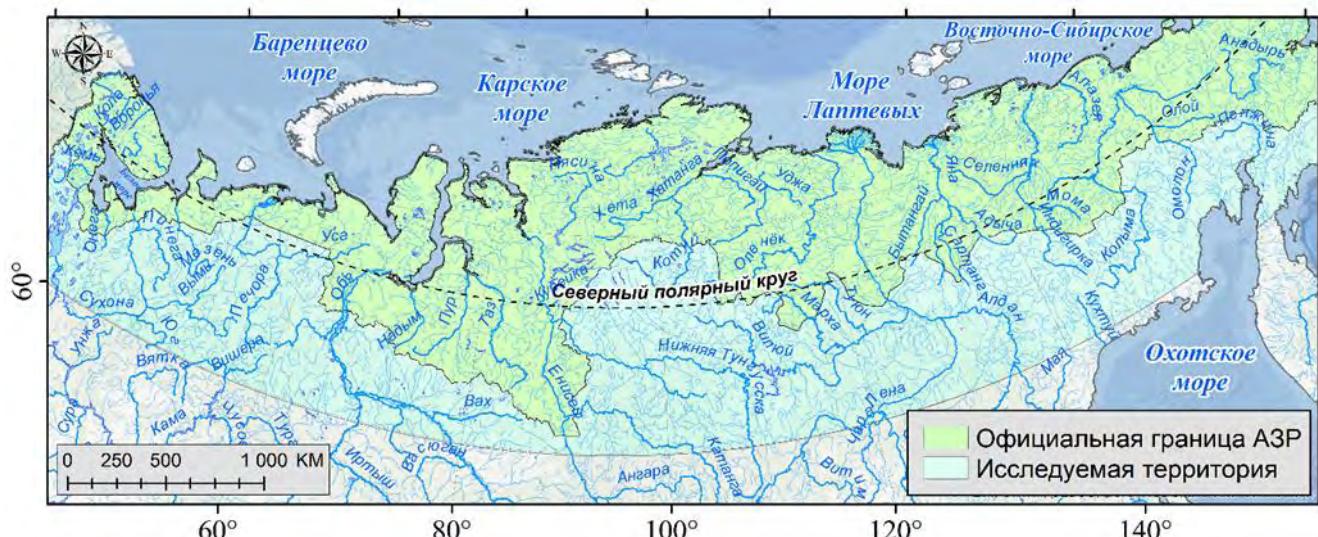


Рисунок 1.1. Официальная граница Арктической зоны РФ и исследуемая в работе территория

Официальная и расширенная (используемая в данном исследовании) границы Арктической зоны приведены на рисунке 1.1 Общая площадь рассматриваемой территории (принятой в работе) составляет 8756050 км², т.е. около 6% площади суши Земли. Территории севернее 60° с.ш. в данной работе будем называть российской Арктикой.

Исследуемая территория охватывает несколько физико-географических стран и характеризуется большим разнообразием климатических и ландшафтных условий. Достаточно значительно различается и гидрометеорологическая изученность отдельных её районов. Важно отметить широкое распространение многолетнемёрзлых пород севернее 60° с.ш. (ММП) (Рисунок 1.2).

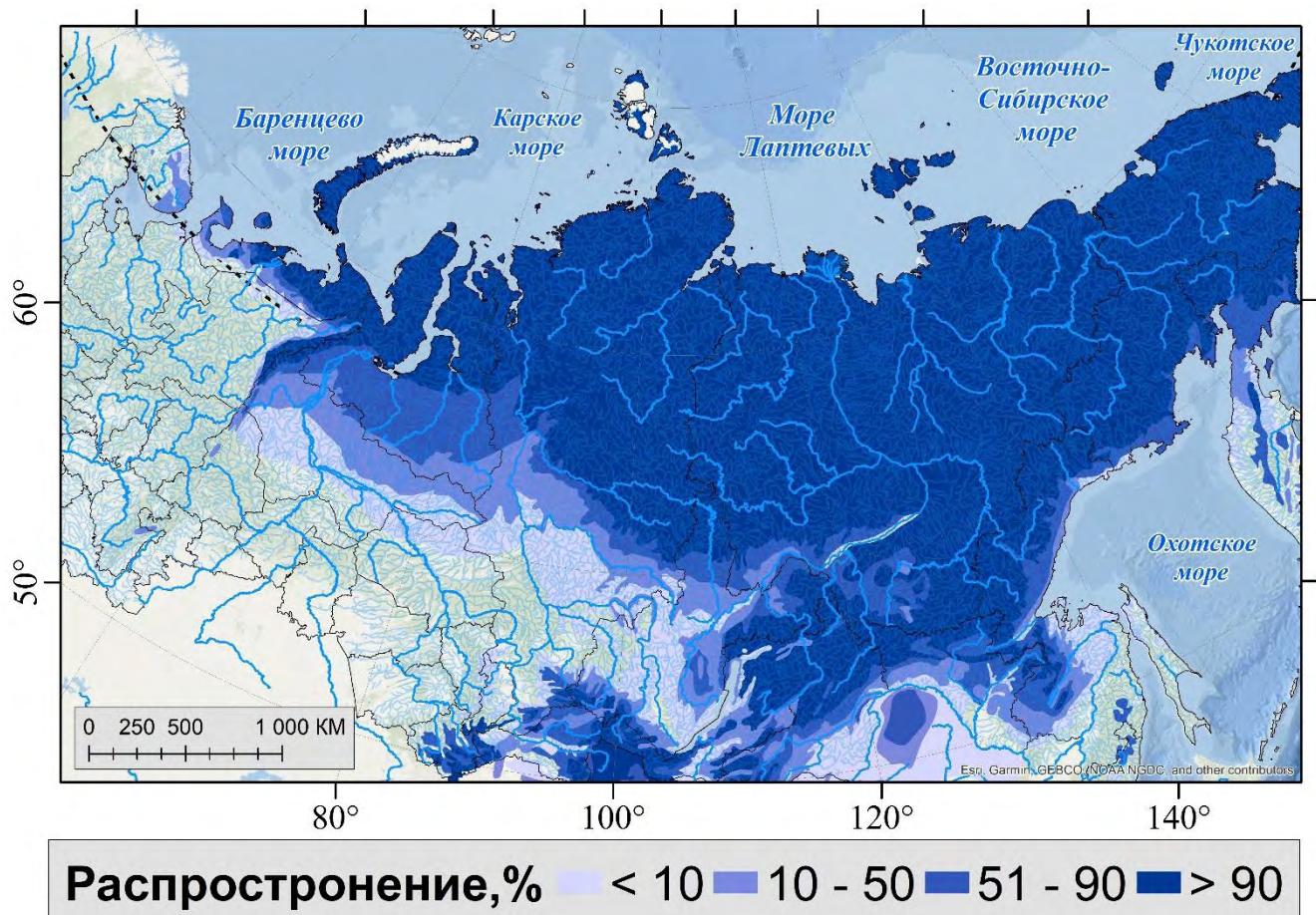


Рисунок 1.2. Распространение многолетнемёрзлых пород на территории России [Obu et al., 2019]

На мелкомасштабном уровне в российской Арктике можно выделить два основных региона: север Европейской территории России (Север ЕТР) или европейский сектор российской Арктики; и север Азиатской территории России (север АТР). Север АТР на том же мелкомасштабном уровне можно разделить на север Сибири (от Уральских гор до р. Лена) или Сибирский сектор российской Арктики; и дальневосточный сектор российской Арктики (от р. Лена на восток до границы России). Однако, в большинстве источников [География Сибири...,

2015], к Сибири как физико-географическому и историко-культурному макрорегиону относят всё пространство от Уральских гор до водораздела Северного Ледовитого и Тихого океанов. В гидрографическом отношении, в изданиях государственного водного реестра, на рассматриваемой территории выделяется 7 регионов (Рисунок 1.3). Ниже приводится описание отдельных регионов российской Арктики.

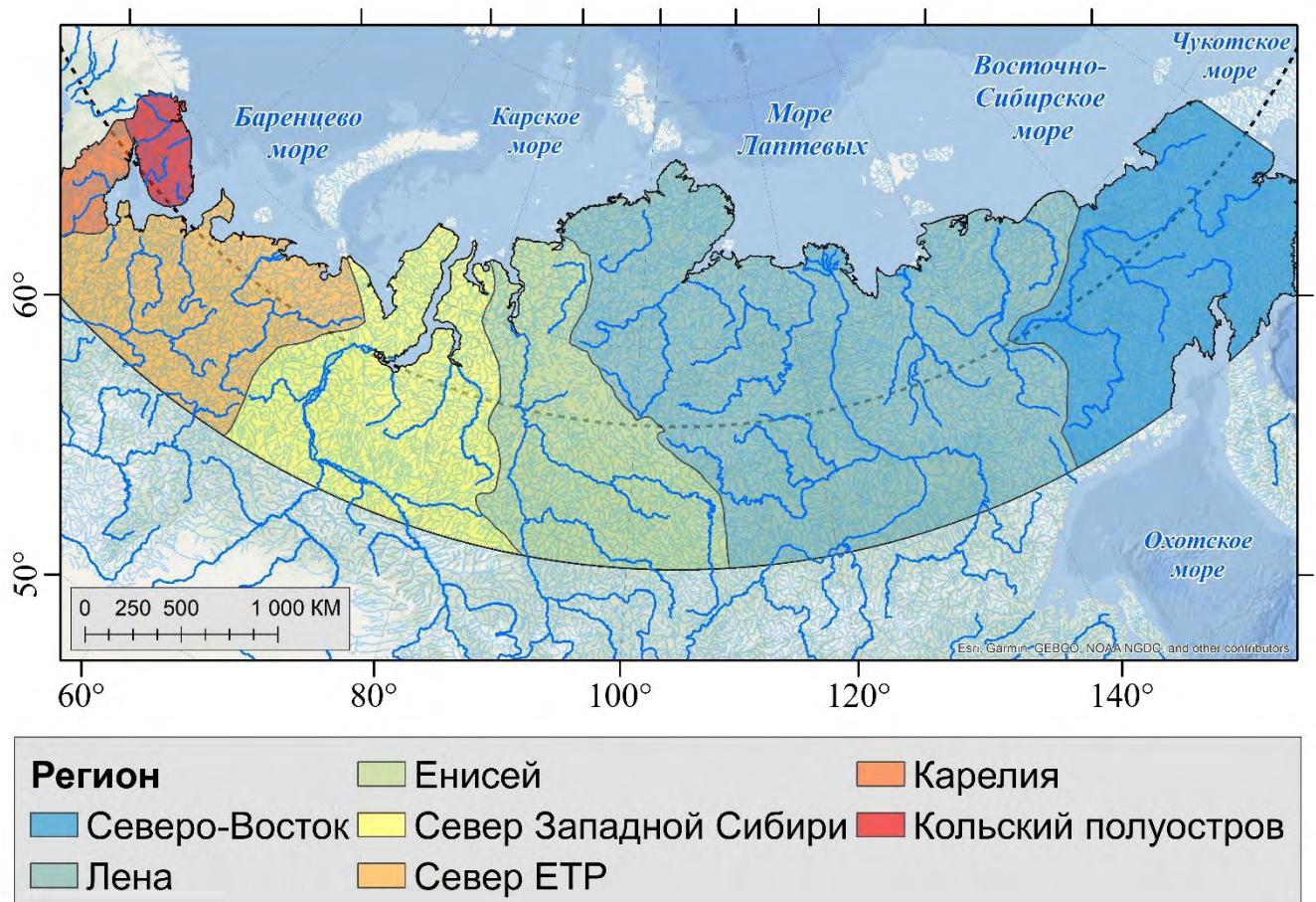


Рисунок 1.3. Гидрографические регионы рассматриваемой территории

Европейский сектор российской Арктики.

Исторически сложилось, что под термином «Север ЕТР» понимаются как территории бассейнов Белого и Баренцева морей (примерно соответствует следующим административным единицам: Мурманская область, Республика Карелия, Архангельская и Вологодская области, Ненецкий автономный округ и часть Республики Коми), так и территории между Беломорско-Балтийским каналом, или кряжем Ветреный пояс, или границами Республики Карелия и Архангельской области до Уральских гор. Во избежание путаницы в данной работе, говоря о всей рассматриваемой части бассейна Баренцева и Белого морей, будем использовать термин «Европейский сектор российской Арктики», а в более узком смысле (территории бассейна Белого моря без Кольского полуострова и Карелии) будем употреблять термин «Север ЕТР». Это ограничение необходимо для различия северных частей отдельных рассматриваемых регионов,

например, севера Западной Сибири и Севера ЕТР. Кроме того, подобное употребление термина «Север ЕТР» в целом соответствует сложившейся гидрологической практике, когда при исследовании гидрологического режима ЕТР Кольский полуостров и Карелия либо не учитываются, либо учитываются единичными водосборами [Варенцова и др., 2022; Григорьев и др., 2024].

Европейский сектор российской Арктики включает в себя части трёх физико-географических стран: Кольско-Карельской, Восточно-Европейской равнины и Уральских гор [Макунина, 1985; Российская Арктика..., 2019].

Кольско-Карельская страна целиком расположена на территории докембрийского Балтийского кристаллического щита, рельеф которого в значительной мере преобразован многочисленными оледенениями. В рельефе выражено множество озёрных котловин преимущественно ледникового генезиса, большинство озёр дренируется реками. Широкое распространение имеют болота. На Кольском полуострове в северной его части долины рек достаточно глубоко врезаны, в отличие от Карелии. Водоразделом Баренцева и Белого морей выступают Кейвы и возвышенности на северных окраинах бассейна озера Имандра. В центральной части Кольского полуострова расположены более молодые массивы Хибинских гор и Ловозерских Тундр, окруженных крупневшими озёрами данной физико-географической страны: Имандрой, Ловозером и Умбозером.

Гидрогеологические¹ условия характеризуются широким распространением разломов и трещинных вод. ММП встречаются только в восточной части полуострова на склонах Кейв, распространение их островное. Сведений о существовании наледей нет. Достоверно известно сокращение площадей ледников в Хибинах вплоть до полной их деградации.

Климат данной страны умеренный, с ярко выраженными чертами морского, особенно на побережьях Баренцева и Белого морей, на южных границах физико-географической страны, вдоль водораздела Белого и Балтийского морей и Беломорско-Балтийского канала. В центральных районах Кольского полуострова, а также в районе водораздела Баренцева и Белого морей климат приобретает черты континентального.

Реки на рассматриваемой территории относятся к бассейнам Баренцева и Белого морей. Больших рек (с площадью водосбора более 50 тыс. км²) нет. Абсолютно большая часть рек или имеет истоки из озёр, или имеет множество озёрвидных расширений, или протекает через озёра. Продольные профили рек при этом преимущественно ступенчатые, русла галечно-валунные, но в Карелии уже встречаются песчаные участки вдоль берегов. Реки характеризуются высоким весенним половодьем (в мае), полноводными меженными периодами (в силу озёрно-болотного

¹ Здесь и далее описание гидрогеологической обстановки приводится в соответствие с Общей гидрогеологической картой РФ [Гидрогеологическая..., 2008]

регулирования). При отсутствии заходов теплых сухих и воздушных масс с юга в летний период, наблюдаются паводки, которые могут накладываться на волну половодья и продолжаться до осени, делая гидрограф похожим на таковой на реках с западно-сибирским типом водного режима, хотя преимущественно распространен восточно-европейский тип (все типы водного режима здесь и далее даны по Б.Д. Зайкову). Сведений о перемерзаниях и промерзаниях рек нет. В силу ступенчатого профиля и озерного регулирования, в ряде случаев, особенно в Карелии, установления полного ледостава на реках не наблюдается. Множество рек зарегулировано, в том числе каскадами водохранилищ. Основные каскады: Туломский, Кемский, Териберский, Серебрянский (на р. Воронья). Водохранилища преимущественно малые и средние. В Карелии существует большое количество малых ГЭС.

В гидрографическом отношении Кольско-Карельская физико-географическая страна делится на регионы Кольский полуостров и Карелия (практически в полном соответствии с административно-территориальным делением). Только бассейн р. Тумча и малый приток оз. Имандра - р. Ёна в разное время относились к разным территориальным подразделениям гидрометслужбы СССР и России.

Кольский полуостров:

На Кольском полуострове в настоящее время наблюдениями охвачены преимущественно реки его западной, центральной и южной-юго-восточной частей, в целом, в соответствии с основной зоной расселения. Большая часть гидрологически изученных рек средняя, вытекает из озёр или протекает через озёра. Отдельные участки наблюдений (реки Монча и Куренъга) представляют собой длинные протоки между озёрами. Наблюдения ниже водохранилищ имеются только на р. Паз, однако доступ к этим данным ограничен, так как по реке проходит государственная граница. К рекам практически без озёрного регулирования (озёра на притоках), охваченных сетью наблюдений, относятся самые большие реки полуострова: Поной и Варзуга, их бассейны, однако, достаточно заболочены. На горных реках многолетние наблюдения ведутся только на р. Малая Белая в районе ж/д станции «Хибины».

Карелия:

Многолетними гидрологическими наблюдениями охвачены в основном нижние, приусտевые участки рек и только в верховьях Тумчи, Кеми и Выга есть наблюдения в верхних частях. С одной стороны, это объясняется тем, что водораздел Белого и Балтийского морей проходит практически через срединный меридиан Карелии, а также высокой заозёрностью рек, многие из которых имеют выраженные долины уже низовьях. Большая часть рек малые, к крупным стоит отнести Кемь, Сегежу, Шую и Выг. Кемь и Сегежа представляют собой цепочки водохранилищ. Все реки с наблюдениями зарегулированы озёрами и болотами.

Северная часть *Восточно-Европейской равнины* представляет собой всхолмлённую равнину, с глубокими речными долинами, ограниченную на севере и востоке невысокими кряжами, плато и возвышенностями. Территория севера Восточно-Европейской равнины в значительной мере заболочена, в первую очередь по долинам рек. Бассейны рр. Онеги и Ваги закарстованы. Беломорско-Кулойское карстовое плато охватывает бассейны рр. Пинеги и Кулоя. В гидрогеологическом отношении в основном выделяются несколько водоносных горизонтов. Подземные воды в долинах залегают обычно неглубоко, что обуславливает заболоченность. В бассейне Онеги расположено множество гидрогеологически значимых разломов. Бассейны Северной Двины и Мезени относятся к Московскому и Мезенскому артезианским бассейнам. По границе водораздела Мезени, Северной Двины и Печоры проходит зона разломов, бассейн Печоры представляет собой отдельную гидрогеологическую структуру - межгорный бассейн с более сложным, относительно артезианских бассейнов, строением. Известны выходы термальных вод в бассейне Усы. Многолетнемерзлые породы существуют только в низовьях Печоры, в Большеземельской тундре, в бассейне Усы.

Климат умеренный, на побережье Белого моря имеет приморские черты. При этом, в бассейнах Мезени, верховьях бассейна Вычегды (то есть на Северных Увалах) и в бассейне Печоры имеет черты континентального. Стоит отметить, что большая часть верховий правых притоков верхней Печоры (до впадения Усы) относится к Уральской физико-географической стране.

На территории данной физико-географической страны представлены реки различных величин. Крупнейшими являются (в порядке увеличения величины стока и площади водосбора): Онега, Мезень, Северная Двина и Печора. Крупнейшие реки протекают преимущественно в северном направлении, в то время как их основные притоки протекают субширотно. В среднем течении Печора также течёт субширотно. В бассейне Онеги, а также на побережье Белого моря множество рек вытекает из озёр (в том числе сама Онега). Большинство рек имеет меандрирующие песчаные русла, в отдельных случаях - песчано-галечные. Искусственного регулирования стока нет. Гидрологический режим -восточно-европейский. Половодье проходит раньше на Онеге и Северной Двине, позже на Мезени и ещё позже на Печоре. Реки Беломоро-Кулойского плато имеют схожий гидрологический режим, то есть река Пинега обычно вскрывается позже и половодье на ней происходит позже, чем на Северной Двине, равно как и раньше замерзает.

В гидрографическом отношении данная часть физико-географической страны полностью относится к региону «Север». Сеть гидрологических постов в этом регионе наиболее плотная во всей российской Арктике. Небольшим исключением является северная часть Большеземельской тундры, п-ов Канин и практически полностью междуречье Мезени и Печоры.

Северная часть *Уральской физико-географической страны* охватывает самую высокую часть Уральских гор - Полярный и Приполярный Урал, и хребет Пай-Хой. Подземные воды распространяются по обширной сети разломов. На обоих склонах распространены многолетнемёрзлые породы. Распространение их меняется от несплошного до сплошного в соответствие с высотной зональностью. Сведений о наледях нет. Существуют небольшие, быстро исчезающие, ледники общей площадью не многим более 5 км² [Носенко и др., 2020]. На момент написания данной работы некоторые ледники, упомянутые в исследованиях 2018-2020 гг., полностью растаяли.

Реки данной физико-географической страны, преимущественно малые, относятся к верховьям Печоры и её правых притоков: Щугора и Усы, а также к бассейнам больших левых притоков Оби: Северной Сосьвы, Сыни, Соби, Щучьей. Притоки больших рек на территории Урала либо остаются малыми, либо становятся небольшими (с площадью водосбора до 10 000 км²) средними. Русла преимущественно разветвлённые, галечно-валунные и галечно-песчаные. При том, что потоки бурные, значительные пороги и ступенчатые профили не распространены (в связи со значительной денудацией гор). Некоторые реки (Уса, Щучья) вытекают из озёр. Антропогенного регулирования стока нет. Тип водного режима рек близок к западно-сибирскому на обоих склонах Уральских гор, в летний период часты быстрые и высокие паводки. Действующих гидрологических постов нет. Ближайшие расположены в предгорьях, на высотах менее 100 м БС и относятся либо к северу Восточно-Европейской равнины, либо уже к Западной Сибири. Именно на Урале начинаются многие реки, в том числе охваченные наблюдениями.

Азиатский сектор российской Арктики.

Северная часть *физико-географической страны Западно-Сибирской равнины* (без полуостровов Ямала и Гыданского) охватывает субмеридионально расположенную долину Оби от её слияния с Иртышом до устья, предгорья Урала в бассейнах левых притоков Оби. Восточнее долины Оби в рассматриваемой части физико-географической страны расположен субширотный возвышенный массив Сибирских Увалов, откуда, с южных его склонов, берут начало правые притоки Оби, а на северных склонах Увалов и прилегающих к ним Верхнетазовской и Полуйской возвышенностей берут начало Надым, Пур, Таз. С востока рассматриваемая часть Западно-Сибирской равнины ограничена Нижнеенисейской возвышенностью. На западе, параллельно Уралу расположена Северо-Сосьвинская возвышенность. При этом, север Западной Сибири весьма слабо расчленён. Рассматриваемая часть бассейна Оби практически полностью заболочена, в том числе на водоразделах. Севернее Сибирских Увалов заболачивание идёт в большей степени по долинам рек. В гидрологическом отношении по Северо-Сосьвинской возвышенности, далее через долину Оби и далее по Сибирским Увалам идёт граница Иртыш-

Обского артезианского бассейна. Это самый восточный артезианский бассейн во всей рассматриваемой российской Арктике. Севернее расположен межгорный бассейн. Степень распространения ММП изменяется от 50% на Сибирских Увалах, до 90% на южных границах полуостровов Ямала и Гыданского.

Климат рассматриваемой части физико-географической страны континентальный, причём в бассейнах Надыма, Пура и Таза степень континентальности выше, поскольку через долину Оби и Северные Увалы затруднён проход как западных влажных и тёплых воздушных масс, так и южных сухих.

Главными реками являются Обь и её крупные притоки: Северная Сосьва, Казым, Собь, Щучья; а также притоки Обской губы: Полуй, Надым, Пур и Таз. Обь протекает в одной из самых широких речных долин в мире, русло её на рассматриваемом участке разветвлено. Притоки же Оби, как и большинство рек данной физико-географической страны преимущественно меандрируют. Восточнее долины Оби, в тундровой и лесотундровой зоне обширное распространение имеют старичные и термокарстовые озёра. Уклоны рек сравнительно невелики, как и общий уклон равнины. Большая часть притоков Оби протекает субширотно. Притоки Надыма, Пура и Таза нельзя определить как субширотные или субмеридианальные. В рассматриваемой части физико-географической страны антропогенно зарегулированы только Обь (Новосибирское водохранилище), и её крупнейший приток - Иртыш (три водохранилища на территории Республики Казахстан).

В гидрографическом отношении рассматриваемая часть физико-географической страны полностью относится к району «Западная Сибирь», подрайону «Нижняя Обь». Уместно, на наш взгляд, называть его «севером Западной Сибири». Гидрологическая изученность здесь значительно ниже, чем на Севере ЕТР. Многолетними наблюдениями практически не охвачены малые реки, за исключением отдельных в бассейне Пура. В основном, гидрологические посты расположены вдоль сравнительно крупных притоков Оби, или на сравнительно больших притоках Надыма, Пура и Таза. Полуострова Ямал и Гыданский не охвачены наблюдениями, за исключением одного сравнительно нового гидрологического поста на северном берегу Тазовской губы.

Северная часть *физико-географической страны Средней Сибири* охватывает территории севернее 60° с.ш. от западной границы бассейна Енисея (субмеридианально расположенные Енисейский кряж и Нижнеенисейская возвышенность) до восточной границы бассейна Лены (также субмеридианально расположенный Верхоянский хребет, хребты и плоскогорья водораздела Тихого и Северного Ледовитого океанов). Данная часть рассматриваемой физико-географической страны относится к Восточной Сибири [География Сибири..., 2015], хотя в экономико-географическом отношении эта территория относится и к Западной, и к Восточной

Сибири и даже к Дальнему Востоку. Левобережье долины Енисея относится (с юга на север) к заболоченной Кетско-Тымской равнине, Верхнетазовской возвышенности, Нижнеенисейскому плоскогорью и прилегающей к нему с востока достаточно заболоченной Туруханской низменности. Западная часть бассейна Енисея, представляет собой достаточно глубоко расчленённую, но невысокую равнину. Восточная же часть бассейна Енисея и западная часть бассейна Лены целиком лежат в пределах глубоко расчленённого Средне-Сибирского плоскогорья и примыкающих к нему с севера плато Пutorана и Анабарского. Бассейны Пясины, Хатанги, Анабара и Оленёка по большей части расположены в пределах Северо-Сибирской низменности, слабовсхолмлённой и заболоченной, преимущественно по долинам рек, с обилием термокарстовых озёр. Бассейн Таймыры и низовья Пясины находятся в пределах гор Барынга. Долина Лены практически полностью находится в пределах Центрально-Якутской низменности всхолмлённой равнине с глубоко врезанными долинами рек.

В гидрологическом отношении данная физико-географическая страна относится к нескольким межгорным бассейнам и массивам. На средних реках (возможно и на более крупных) распространены несковзные талики. Практически вся территория относится к зоне сплошного распространения ММП. Только в бассейнах Нижней и Подкаменной Тунгусок сплошность ММП снижается местами до островного распространения. На плато Пutorана встречаются небольшие ледники, площадь которых, по одним данным, в последние десятилетия сокращается [Kovalenko et al., 2021], но по другим, наиболее актуальным, в том числе экспедиционным данным, ледники плато Пutorана достаточно стабильны [Коваленко и др., 2023]. На некоторых реках в отдельные годы формируются наледи. Климат по всей физико-географической стране резко-континентальный. В горных районах выражена вертикальная зональность. Количество осадков снижается с юга на север.

Ключевыми реками данной физико-географической страны являются Енисей со своими крупнейшими правыми притоками Нижней и Подкаменной Тунгусками, Курейкой и Хантайкой; Пясина, Таймыра, Хатанга, Хета, Анабар, Попигай, Оленёк, и Лена со своими крупнейшими притоками Алданом и Вилюем. Тип водного режима - восточно-сибирский. Реки преимущественно извилистые. В пределах плоскогорья и нагорий преобладают русла галечно-валунные, галечно-песчаные и песчаные. Встречаются порожистые участки, в том числе на больших реках. На больших и крупнейших реках распространены разветвлённые русла, особенно на Лене.

Бассейн Енисея является одним из самых зарегулированных в России. Его гидротехническое освоение, начавшееся в середине XX в. окончилось только в августе 2015 г. с наполнением Богучанского водохранилища. Непосредственно на рассматриваемой территории расположены Курейское и Хантайское водохранилища. На Енисее замыкающим является

Красноярское, замыкающее систему из трёх водохранилищ, а на Ангаре - Богучанское, замыкающее каскад четырёх водохранилищ. В бассейне Лены расположены Вилуйское водохранилище и Светлинское (водохранилище Вилуйской ГЭС-3). На последнем окончательный ввод всех гидроагрегатов в эксплуатацию не проведён к моменту написания данной работы.

В гидрографическом отношении данная физико-географическая страна относится к районам «Енисей» и «Лена». Бассейны Енисея и Лены достаточно широко освещены наблюдениями, однако, наблюдений на малых реках практически нет. В бассейнах Хатанги, Анабара и Оленёка наблюдения проводятся только в низовьях самих этих рек и на отдельных их крупнейших притоках. На Оленёке расположен ряд гидрологических постов, наблюдения охватывают почти всю длину реки. Реки полуострова Таймыр, бассейн Пясины и бассейн Попигая современными наблюдениями не охвачены.

Физико-географическая страна *Северо-Востока* расположена восточнее бассейна Лены и часто ассоциируется с Дальним Востоком. Эту территорию можно назвать дальневосточным сектором российской Арктики. В данной работе рассматривается только часть данной страны, относящаяся к бассейнам морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Берингова. Прибрежная часть физико-географической страны занята заболоченными, слаборасчленёнными низменностями со значительным распространением термокарстовых озёр. При этом, Яно-Индигирская и Колымская низменности распространяются на 500-600 км от побережья. Причём, если Яна протекает по низменности только на самом нижнем участке своего течения, то Индигирка и Колыма протекают по низменностям на значительных своих протяжениях. Верхние участки бассейнов Яны, Индигирки, а также реки правобережья Колымы и Чукотки представляют собой низкогорные районы, в основном горные цепи, (до 2000 м), и только на хребтах Черского и Момского (верхние участки бассейна Колымы и верхние и средние части бассейна Индигирки) отдельные вершины превышают высоту 2000 м. В гидрологическом отношении данная физико-географическая страна относится к складчатым межгорным бассейнам и структурным областям. На реках распространены как сквозные, так и несквозные талики. Повсеместно распространены сплошные ММП. В горных районах распространены небольшие ледники. Широчайшее распространение имеют наледи [Атлас гигантских наледей..., 2021; Макарьева и др., 2023], в том числе многолетние. В этой физико-географической стране расположена и крупнейшая в России Момская наледь, на притоке Индигирки. Большая часть рек зимой перемерзает или промерзает. Климат данной физико-географической страны резко континентальный, в том числе на побережьях, здесь же расположен полюс холода России.

Ключевыми реками данной физико-географической страны являются: Яна, Батагай, Адыча, Сартанг, Дулгалах, Индигирка, Мома, Нера, Алазея, Колыма, Кулу, Аян-Юрях, Омолон,

Большой и Малый Анюй, Амгуэма, Анадырь, Белая. Тип водного режима рек - восточно-сибирский. Реки преимущественно извилистые, с галечными руслами. Встречаются порожистые участки, на больших реках много шивер. Вдоль берегов встречаются едомы. Река Колыма зарегулирована двумя водохранилищами: Колымским и Усть-Среднеканским, введённым в эксплуатацию в 2018 г.

В гидрографическом отношении данная физико-географическая страна относится к регионам «Лена» и «Северо-Восток». Граница между ними проходит по западной границе бассейна Колымы. Наблюдениями охвачены преимущественно горные части бассейнов рек в пределах Якутии и Магаданской области, т.е. наиболее населённые районы. Лучше освещены наблюдениями бассейны Яны и Колымы. Существуют отдельные гидрологические посты на малых реках. Слабоизученными являются крупнейшие правые притоки Колымы - Омолон и Большой и Малый Анюи, где наблюдения сосредоточены в верховьях. Практически не освещена наблюдениями Чукотка. Здесь действующие гидрологические посты расположены на Анадыре и его притоках.

1.2 Климат региона исследований и его изменения

Климат рассматриваемой территории формируется при сравнительно небольшом притоке солнечной радиации (вплоть до нулевого в условиях полярной ночи. В южной части рассматриваемой территории баланс коротковолновой радиации достигает $80-90 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в год, в то время как на побережьях морей Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского приток солнечной радиации составляет $50-60 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в год [Российская Арктика..., 2019]. Перераспределение тепла в регионе происходит благодаря либо циклонической активности в европейском секторе и на восточной Чукотке (перенос тепла из Атлантического и Тихого океанов соответственно), либо под действием значительных по площади антициклонов в Сибири, в зависимости от центра формирования переносящих либо более тёплые воздушные массы из Центральной Азии, либо более холодные из высоких широт.

Температура воздуха закономерно снижается с юга на север, достигая в июле $20-30^\circ\text{C}$ с максимальными значениями в долинах крупнейших рек, по которым распространяются более тёплые воздушные массы из низких широт. Средние температуры воздуха даже в самый теплый месяц практически не достигают 20°C . Сезон с положительными температурами воздуха длится 5-6 месяцев. На Кольском полуострове и в Карелии в отдельные годы до 7 месяцев. За год на рассматриваемой территории выпадает от 400 до 800 мм осадков. Минимальные суммы осадков наблюдаются в восточной части Среднесибирского плоскогорья, в то время как максимальные величины приурочены к побережьям Баренцева и Белого морей, а также к зоне влияния Тихого

океана. Максимум осадков повсеместно летний, обычно в августе, в азиатском секторе выражен больше, чем в европейском. Пространственное распределение климатических параметров осложняется близостью морей и высотной зональностью.

Как отмечено в «Резюме для политиков» «VI оценочного доклада МГЭИК об изменениях климата» [IPCC, 2022]: «(с высокой достоверностью) Глобальная температура поверхности в период 2011-2020 гг. была на $1,09^{\circ}\text{C}$ [$0,95\text{--}1,2^{\circ}\text{C}$] выше, чем в период 1850-1900 гг., причем увеличение температуры было большим над сушей ($1,59^{\circ}\text{C}$ [$1,34\text{--}1,83^{\circ}\text{C}$]), чем над океаном ($0,88^{\circ}\text{C}$ [$0,68\text{--}1,01^{\circ}\text{C}$]). Глобальная температура поверхности в первые два десятилетия XXI в. (2001-2020 гг.) была на $0,99^{\circ}\text{C}$ [$0,84\text{--}1,1^{\circ}\text{C}$] выше, чем в период 1850-1900 гг. С 1970 г. глобальная температура поверхности повышалась быстрее, чем за любой другой 50-летний период, по крайней мере, за последние 2000 лет.».

В «Третьем оценочном докладе об изменениях климата России» [Третий оценочный..., 2022] отмечается, что за период с 1976 (принят как год начала интенсивных изменений климата на территории России) до 2020 г., интенсивность роста среднегодовой температуры приземного воздуха составила $0,51^{\circ}\text{C}/10$ лет. Наиболее значительные изменения выявлены весной ($0,67^{\circ}\text{C}/10$ лет) и осенью ($0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет), а наименьшие зимой ($0,48^{\circ}\text{C}/10$ лет) и летом ($^{\circ}\text{C}/10$ лет).

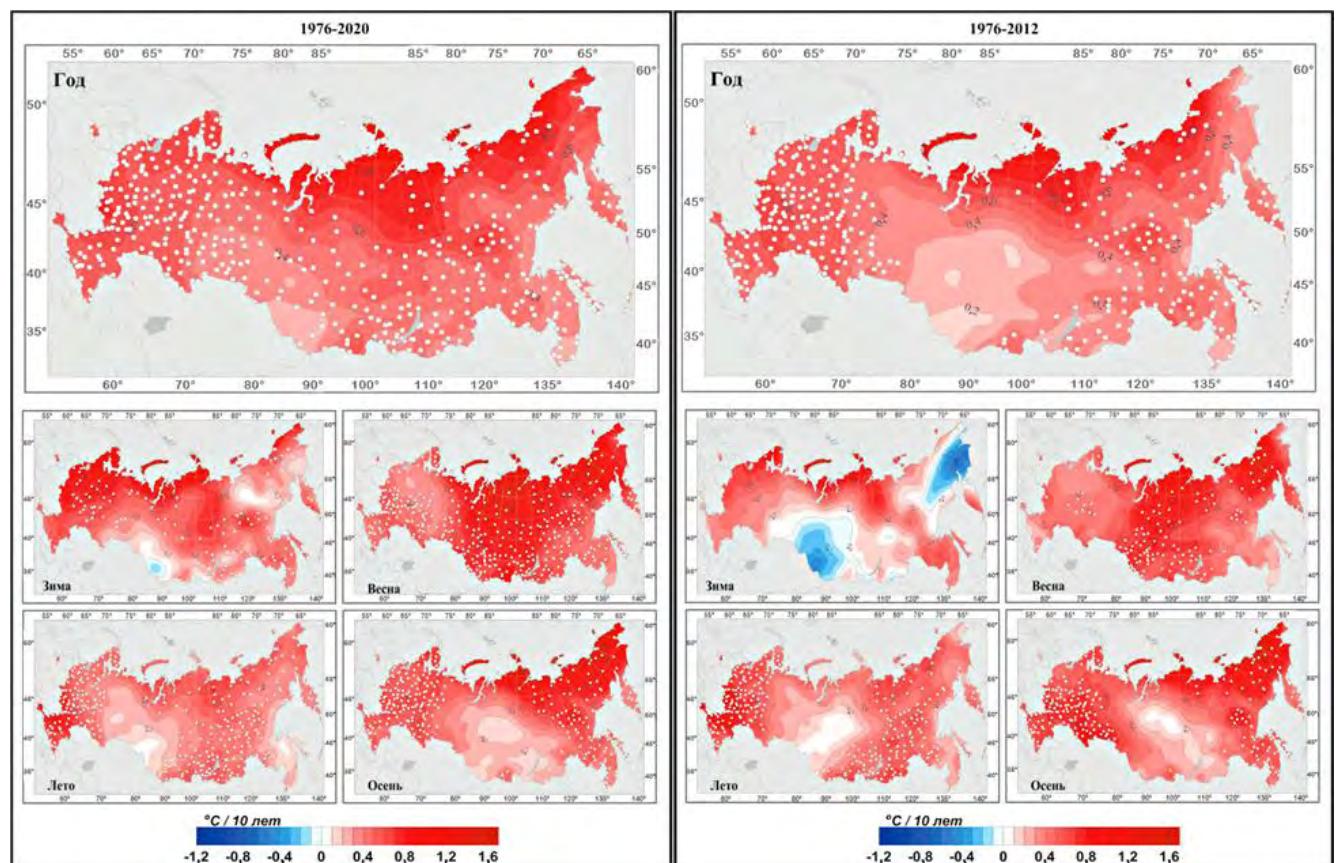


Рисунок 1.4. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период 1976-2020 гг. [Третий оценочный... 2022]

Там же отмечено, что область роста среднегодовой температуры воздуха на величину $0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет распространилась после 2012 г. от северного побережья России (от Ямала до Чукотки) на юг до 60 с.ш., и на северо-западную часть ЕТР, включая побережье Баренцева и Белого морей. Географическое распределение коэффициентов линейного тренда температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) приведено на рисунке 1.4.

Как видно из представленных карт, среднегодовая температура растет наиболее интенсивно в высоких широтах в азиатской части страны. Рост её на побережье Северного Ледовитого океана более значителен, чем в расположенных южнее континентальных районах. Дальнейшее описание изменений сезонной температуры воздуха дано только для гидрологически изученных территорий (без полуостровов Ямала, Гыданского и.т.д.).

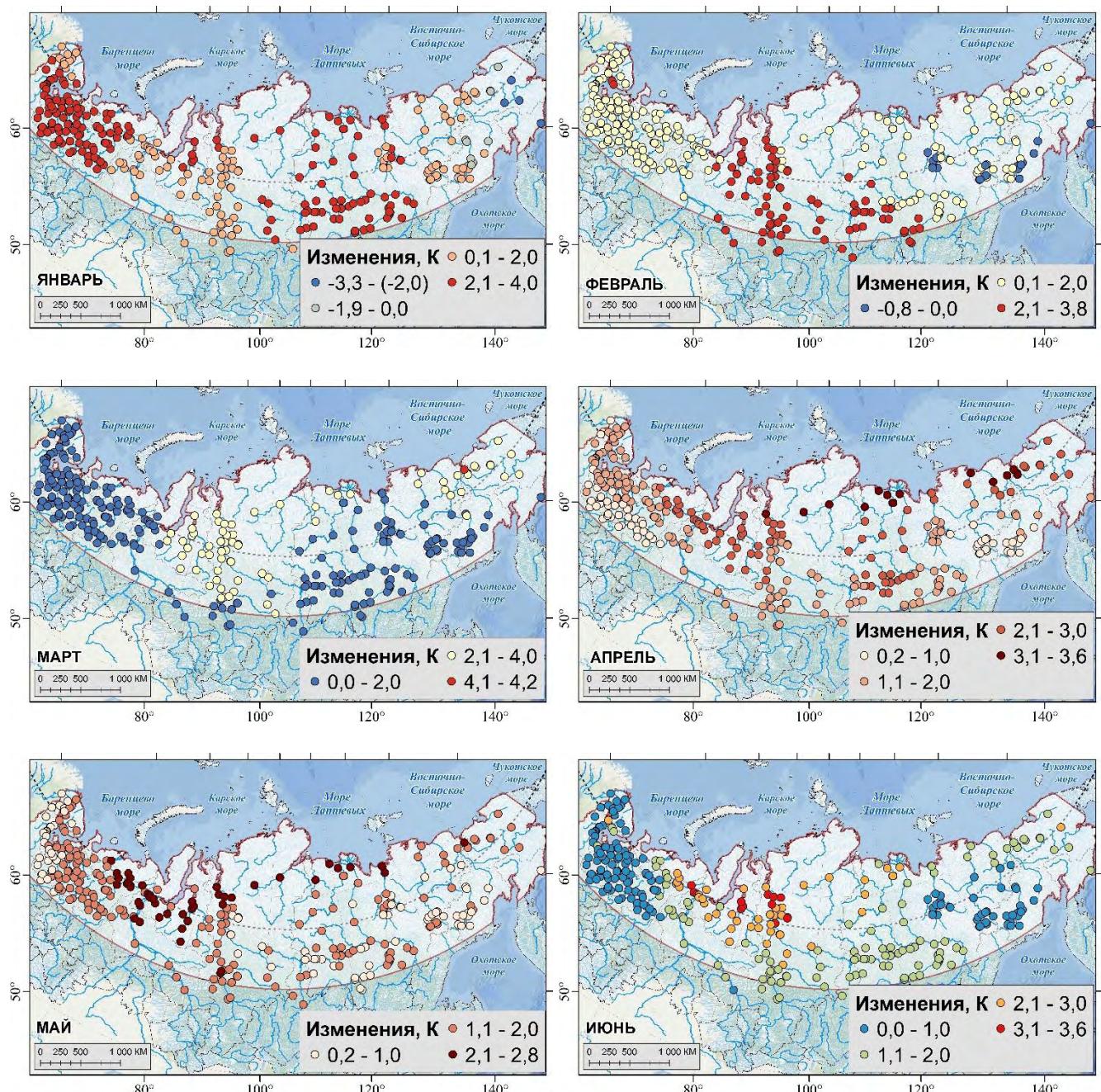
Осенний период становится повсеместно более теплым. Наибольшее значение тренда ($1,0-1,2^{\circ}\text{C}/10$ лет) на побережьях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского, в горах Северо-востока, восточнее Яно-Индигирского хребта. Интенсивность роста тренда в Арктической части Сибири снижается с северо-востока на юго-запад до $0,2-0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет вплоть до Сибирских Увалов, к центральной части Сибирского антициклона, где тренд снижается до $0,2^{\circ}\text{C}/10$ лет. Западнее указанной территории величина тренда продолжает расти в северо-западно-западном направлении, составляя $0,5-0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет на Полярном Урале. Западнее Уральских гор тренд субмеридианально возрастает, достигая в бассейнах Северной Двины и Мезени значения $0,7^{\circ}\text{C}/10$ лет. Аналогичные значения наблюдаются на Кольском полуострове и в Карелии. На крайнем западе Арктической зоны тренд незначительно уменьшается (до $0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет). В период 1976-2020 гг. в сравнении с периодом 1976-2012 гг. изменения в пространственном распределении трендов температуры воздуха осенью практически не произошли, отмечается исключительно небольшой рост величины интенсивности изменений.

Тренды изменения температуры воздуха в зимний период могут быть отрицательными и оклонулевыми в отдельных районах. До 2012 г., более холодные зимы отмечались в горных районах Северо-Востока ($0 - -0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет). Естественными границами зоны похолодания на западе служили хребты Сунтар-Хаята и Джугджур; на севере - Чукотское нагорье и южные границы Колымской и Яно-Индигирской низменностей. К 2020 г. описываемое снижение зимней температуры воздуха прекратилось. В восточной части бассейна Лены и на побережьях Чукотского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых наблюдается небольшое потепление ($0,2-0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет). Значительное увеличение зимней температуры воздуха происходит на территории Арктической зоны, ограниченной с запада Уральскими горами, а с востока долиной Лены. При этом наблюдается усиление тренда с юга ($0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет) на север ($0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет). Наибольшее потепление отмечается в верховьях Оленека, Анабра и Хатанги. На запад от

Полярного Урала тренд потепления повсеместно составляет $0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет. В сравнении с периодом 1976-2012 гг. картина потепления зимнего периода стала более однородной.

В весенний период потепление на Севере ЕТР распространяется с юго-запада на север и северо-восток (приблизительно от г. Архангельска), и величины его изменяются от $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет до $1^{\circ}\text{C}/10$ лет. В азиатском секторе российской Арктики рост весенней температуры воздуха составляет $1-1,2^{\circ}\text{C}/10$ лет практически повсеместно. Пространственное распределение за в период 1976-2020 гг. стало более однородным в сравнении с периодом 1976-2012 гг.

Интенсивность изменений летних температур воздуха невелика, она достигает $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет побережьях арктических морей и на приморских равнинах, на южной же границе рассматриваемой территории температура воздуха растет с интенсивностью $0,2-0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет.



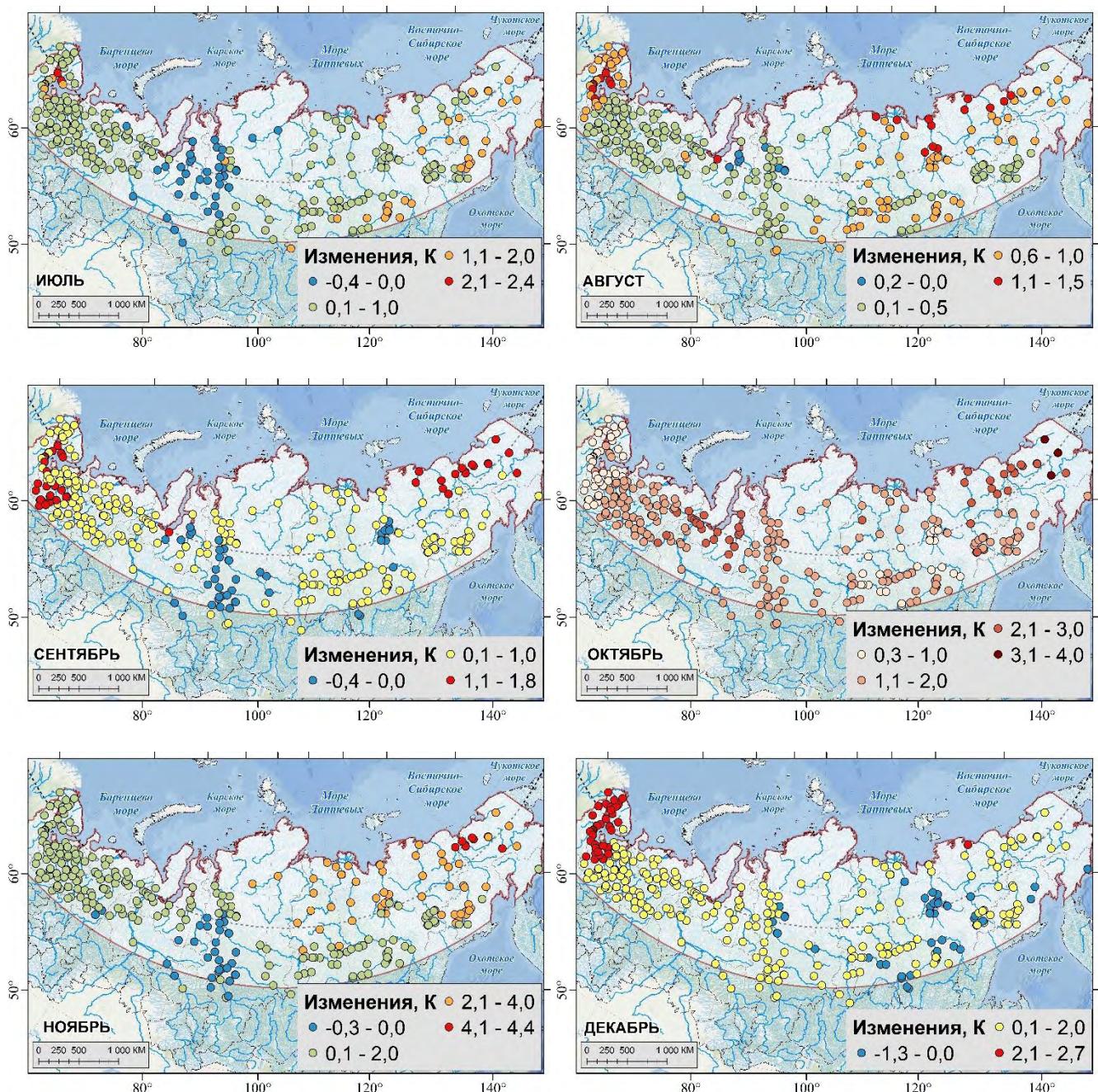


Рисунок 1.5. Пространственное распределение изменений среднемесячной температуры воздуха в узлах сетки реанализа ERA5, ближайших к использованным в работе гидрологическим постам за период 1991-2020 гг. по сравнению с периодом 1961-1990 гг.

Для данной работы были проанализированы изменения температуры воздуха на ближайших к гидрологическим постам узлах сетки реанализа ERA-5 за тридцатилетние периоды 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. в соответствие с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (Рисунок 1.5).

Наибольшие изменения среднемесячной температуры воздуха в первую половину года отмечаются в марте-апреле и в июне. Самый значительный рост характерен 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.

Во второй половине года наибольшие изменения температуры воздуха наблюдаются в октябре, также на низменных территориях Сибири. В бассейнах Оби и равнинной части бассейна Енисея отмечается небольшое снижение температуры воздуха в июле, сентябре и октябре.

1.3 Изученность ледотермического режима рек в российской Арктике

В России первые исследования температуры воды в реках стали проводиться в рамках изучения влияния стока воды и тепла на температурный режим и ледовитость морей Северного Ледовитого океана [Полилов, 1907; Шостакович, 1911]. Эти исследования были продолжены в 1930-1940-е годы в рамках реализации планов ГОЭЛРО и развития Северного морского пути. Тогда же были получены и первые оценки теплового стока отдельных арктических рек в моря [Антонов, 1936; Зайков, 1936]. В эти же годы произошло значительное расширение сети гидрологических постов и была начата публикация данных о температуре воды (осреднённой за 10 дней и за месяц) в изданиях Государственного водного кадастра (ГВК). В 1951 г. была опубликована работа Е.М. Соколовой [Соколова, 1951], в которой впервые для большей части территории СССР были систематизированы данные о суточном ходе и вертикальном распределении температуры воды в руслах, о распределении температуры воды по ширине потока, а также о пространственном распределении температуры воды на территории СССР (с учётом нехватки информации по значительной части Арктики).

Период с 1960 по 1990 гг. характеризуется ростом количества публикаций, посвященных физическим процессам формирования температуры воды в реках, воздействию водохранилищ на термический режим рек, а также роли теплового стока в динамике побережий арктических морей [Готлиб и др., 1976; Леонов, 1977; Назаренко, Сахарова, 1982; Ноговицын, Кусатов, 1984; Одрова, 1987]. Тогда же для всей территории СССР были изданы «Ресурсы поверхностных вод СССР» [Ресурсы..., 1967; 1969; 1970; 1972 (1,2); 1973 (1,2)], в которых, в частности, были обобщены и картированы данные о температуре воды рек. Разделы о температуре воды рек от региона к региону различаются степенью подробности рассмотрения значимости климатических и физико-географических факторов, а также длиной рядов, использованных при обобщении, часто небольшой. Для изучаемой территории степень подробности изложения средняя. Карты температуры воды не связаны друг с другом на границах. Тем не менее, данные издания являются важнейшими источниками информации о термическом режиме рек.

В конце XX и в начале XXI в. новой темой исследования термического режима рек стало изучение их многолетней динамики и трансформаций при изменениях климата. Большинство

этих исследований в Арктической зоне посвящено низовьям больших рек, непосредственно впадающих в моря Северного Ледовитого океана, трендам и циклам температуры воды и теплового стока [Геоэкологическое..., 2007; Космаков, 2001; Магрицкий, 2009, 2015; Magritsky et al., 2023 (1,2); Василенко и др., 2020; Georgiadi et al., 2018; Lammers et al., 2007; Liu et al., 2004; Liu et al., 2005; Park et al., 2017; Vasilenko et al., 2024, Yang et al., 2005]. Часть вышеуказанных исследований посвящена отдельным большим рекам, в первую очередь Лене. Большая часть работ базируется на гидрологических данных до 2010-2012 гг. Показано, что потепление климата сопровождается некоторым увеличением теплового стока больших и крупнейших рек в моря Северного Ледовитого океана, но величины вычисленного прироста теплового стока разнятся.

Различия оценок обусловлены как количеством исходных данных, так и различными методами вычисления теплового стока - по среднедекадным или среднемесячным данным [Lammers et al., 2007; Магрицкий, 2009, 2015, Vasilenko et al., 2022], или на базе моделей различной степени детализации и пространственного охвата [Wanders, 2019; Park et al., 2020], в первую очередь глобальных. На Лене применяются физико-математические модели термического режима для локальных участков нижнего течения, базирующиеся на данных экспедиционных наблюдений (данные самописцев) [Liu et al., 2005], либо на данных наблюдений на постах [Gradova, Golubeva, 2023].

Нерешенным остаётся вопрос о правильности вычисления теплового стока больших рек (вопрос выбора места измерения температуры воды). Для Лены показано, например, что температура воды на гидрологическом посту (г/п) Кюсюр занижена из-за влияния вод малой реки Еремейки, стекающей с Верхоянского хребта [Tananaev et al., 2019].

Для российской Арктики антропогенное воздействие на термический режим рек рассмотрено сравнительно подробно в случае строительства и эксплуатации водохранилищ, в том числе во время происходящих климатических изменений [Магрицкий, 2015; Magritskiy et al., 2023 (2); Vasilenko et al., 2022]. Показано, что, несмотря на строительство больших водохранилищ, их роль в тепловом стоке и температуре воды в устьевых частях крупнейших рек практически не прослеживается, но анализа данных после ввода в эксплуатацию Богучанского и Светлинского водохранилищ не проводилось.

В литературе практически не уделяется внимание процессам трансформации температуры воды и теплового стока в низовьях и в устьевых областях больших арктических рек. Отдельные исследования, в том числе представленные выше, показали, что снижение температуры ниже замыкающих створов может быть достаточно значительным [Магрицкий и др., 2018; Vasilenko et al., 2022].

Малоизученной остаётся роль многолетнемёрзлых пород в формировании термического режима. Некоторые локальные исследования проводятся в последние годы в Якутии [Шамов и др., 2023] и в верховьях Колымы [Самохвалов, Ухов 2018; Ухов, 2023].

Основной проблемой изучения термического режима рек на сегодняшний день остаётся ограниченность данных [Ficklin et al., 2023], как в географическом, так и во временном аспектах. Для российской Арктики практически не доступны данные о суточных температурах воды, а метеорологические станции и гидрологические посты часто отстоят друг от друга на значительном расстоянии. Отсутствие доступа к ежедневным наблюдениям за температурой воды часто сопровождаются отсутствием данных о ландшафтных характеристиках водосборов, что затрудняет построение математических моделей (с учётом большого количества факторов, воздействующих на температуру воды суточного разрешения).

Использование данных дистанционного зондирования Земли для оценки термического режима рек представляется на сегодняшний день весьма перспективным, однако, до сих пор мало реализованным [Ficklin et al., 2023]. Кроме того, пространственное разрешение снимков не позволяет применять их для оценок температур воды малых и ряда средних рек. В России была реализована оценка температуры воды Енисея в районе Красноярска по данным Landsat-7 [Геопортал ИВМ СО РАН, [сайт]. URL: <http://gis.krasn.ru>] в 2015 г. В мировой практике начинается использование БПЛА с TIR-датчиками, однако, на сегодняшний день это единичные исследования.

Изучению термического режима рек различных по площади водосбора и географическому положению в российской Арктике посвящена данная работа и непосредственно связанные с ней публикации [Василенко и др., 2020, Vasilenko et al., 2022, Magritsky et al., 2023 (1,2), Vasilenko et al., 2024].

Исследования ледового режима рек России были начаты во второй половине XIX в. [Рыкачев, 1886; Шостакович, 1906] и до Великой Отечественной войны были направлены в основном на географические обобщения данных наблюдений за речным льдом: сроками его появления и исчезновения, толщиной льда. Во второй половине XX в. было разработано большое количество методов расчетов и прогнозов различных ледовых явлений. Были изучены процессы охлаждения и замерзания водных объектов [Нежиховский, Бузин, 1977; Шуляковский, 1960; Devik, 1932]. В тот же период были подробно исследованы процессы вскрытия [Булатов, 1952, 1970]. Тогда же, за рубежом на базе изучения динамики морского льда начали моделироваться процессы замерзания и вскрытия водных объектов [Harlow, 1964; Hibler, 1979; Wake, Rumer, 1983]. Знания о ледовых явлениях пополнялись рассмотрением вопросов шугообразования [Рымша, Донченко, 1962, 1965; Arden, Wigle, 1972], образования наледей [Алексеев, 1978; Чижов, Бородулин, 1984], расчетов нарастания толщины ледяного покрова [Чижов, 1990; Michel, 1971],

динамики потока при замерзании, вскрытии и ледоставе [Гришанин, Спецов, 1968; Панфилов, 1968 (1,2), Панфилов, 1972; Prowse, 1995]. Изучались проблемы образования и прогнозов заторов и зажоров льда [Естифьев, Соколов, 1970; Донченко, Щеголева, 1985; Донченко и др., 1982; Prowse, 1995], формирования полыней в нижних бьефах водохранилищ [Донченко и др., 1989]. В конце XX- начале XXI вв. результаты большинства исследований были обобщены в ряде монографий и обзорных статей [Бузин, 2004; Бузин и Зиновьев 2009; Донченко, 1987; Козлов, 2000; Huokuna et al., 2020; Brooks et al., 2013], в которых пространственному распределению характеристик ледового режима уделялось сравнительно меньше внимания.

Особенности ледового режима рек различных регионов были подробно проанализированы и представлены в виде картографических обобщений в конце 1960-х - начале 1970-х годов в официальных изданиях «Ресурсов поверхностных вод СССР» [Ресурсы... 1967, 1969, 1970, 1972 а,б, 1973 а,б]. В начале 1970-х годов Б.М. Гинзбургом было выполнено последнее географическое обобщение характеристик ледового режима рек и водохранилищ для всей территории СССР [Гинзбург, 1973]. К аспектам пространственного распределения ледовых явлений обращался целый ряд авторов, но большинство исследований носило региональный [Антонов, 1962, 1967; Антонов, Маслаева, 1965; Налимов, 1965, 1968; Комов, 1970], а чаще локальный характер [Чижов, Бородулин, 1984], либо было посвящено какому-либо одному виду ледовых явлений или одному процессу, или группе процессов [Донченко и др., 1989]. Карты, построенные Б.М. Гинзбургом для территории Советского Союза, а также карты, представленные в изданиях «Ресурсов поверхностных вод», используются для оценки пространственного распределения характеристик ледовых явлений и в XXI вв. Их обновление началось только во втором десятилетии XXI в. В первую очередь обновляется картографический материал для всей АЗР [Агафонова, 2017], а также производится региональные обобщения [Сумачев, Банщикова, 2020, 2021; Prowse et al., 2007; Alfredsen, Stickler, 2013].

Последняя четверть XX в. и начало XXI в. ознаменовались исследованиями антропогенных и климатических изменений ледового режима рек (весьма подробный обзор, но без учёта современных данных по территории России приведён в [Fukś, 2023]). Множество работ в этот период времени посвящены совершенствованию методов прогнозов и возможностей моделирования, а также всесторонним изучением опасных ледовых явлений, в первую очередь заторов льда и зажоров (подробные анализы приведены в [Beltaos et al., 2021; Burrell et al., 2021]. В России большая часть исследований к моменту написания диссертации, была обобщена в монографиях В.А. Бузина [Бузин, 2015] и коллективной монографии [Опасные ледовые..., 2015], в ряде региональных обобщений [Сумачев, Банщикова, 2021] и отдельных публикаций [Вуглинский, 2014; Agafonova, Vasilenko, 2020]. Продолжается изучение возможностей математического моделирования опасных ледовых явлений, в первую очередь заторов [Атавин и

др., 2000, 2014; Атавин и др., 2020; Бузин, Зиновьев, 2009; Prowse et al., 2007; Oveisy et al., 2015; Newton et al., 2024]. Ряд исследований посвящен возможностям применения методов дистанционного зондирования для оценок ледовой обстановки, а также разработке методов прогнозирования различных ледовых явлений.

Глава 2. Материалы и методы

2.1 Источники информации, используемые в работе

Основными источниками информации о термическом и ледовом режимах рек России являются издания государственного водного кадастра СССР и государственного водного реестра России.

В изданиях «Гидрологических ежегодников» приводятся среднедекадные значения температуры воды. Для большей части месяцев тёплого (для конкретной территории) периода года по среднедекадным вычислены и среднемесячные значения. В изданиях «Ресурсов поверхностных вод» оперируют исключительно среднемесячными значениями.

Число электронных баз данных о температуре воды в реках Арктической зоны крайне ограничено. Наиболее известная описана в [Whitefield, 2015] и касается исключительно больших и крупнейших рек на их приусыревых участках. Период наблюдений в этой базе данных ограничен 2005-2007 гг. Дискретность по времени 1 декада. Под декадой здесь и далее понимается период в 10 суток.

В период 2020-2021 гг. базы данных непрерывных наблюдений за температурами воды в реках России, с дискретностью в 1 сутки и меньше в России, насколько известно автору, не существовало. С весны 2021 г. данные о температурах воды можно в оперативном режиме получать на сайте Единой системы информации о Мировом Океане (ЕСИМО) [Портал Единой государственной системы информации о Мировом Океане (ЕСИМО) [Электронный ресурс]. URL: <http://esimo.ru/portal/>], однако срочные данные в каких-либо архивах не представлены.

Существуют отдельные наборы записей самописцев уровней и температуры воды, полученные различными научными группами в ходе экспедиционных или стационарных исследований. Изучение температуры воды чаще всего не является основной задачей полевых работ, и установка самописцев обычно происходит в прибрежных частях рек, без учёта возможных воздействий на температуру воды. С учётом ограниченности времени экспедиционных исследований, а также с учётом продолжительных периодов с ледовыми явлениями на реках, длина подобных массивов данных ограничена в лучшем случае, 1-3 месяцами.

В свободном доступе электронных баз данных о характеристиках ледотермического режима рек практически не существует. Исключение составляет опубликованная база данных по рекам Канады [Rham et al., 2020]. В России сведения о ледовых явлениях публикуются на специализированных интернет-ресурсах, к примеру, для туристов [Уровень воды онлайн [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info/>]. Данные о ледовых явлениях регулярно,

примерно с 2015-2016 гг. публикуются в гидрологических бюллетенях отдельных подразделений ФГБУ «Росгидромет». Однако, такие данные не имеют единого формата, и часто описания ледовой обстановки разными территориальными организациями даются за различные периоды времени, что затрудняет их совместное использование при значительном пространственном охвате исследований.

С учётом цели и пространственного охвата проводимого исследования, основным источником данных для данного исследования стали издания «Гидрологических ежегодников». В некоторых случаях информация была уточнена по результатам экспедиционных исследований кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова, в том числе с участием автора. Уточнения в силу краткосрочности полевых исследований в Арктике в основном касаются надёжности использованных данных. Часть наиболее современных данных была получена по запросу во ВНИИГМИ-МЦД.

В изданиях «Гидрологических ежегодников», как было отмечено выше, представлены данные о средних за 10 суток (декаду) температурах воды. Обычно данные публикуются, начиная с декады, в которую произошел переход температуры воды через 0,2°C. Информация о переходах температуры воды через 0,2°C доступна с 1967 г. В изданиях приводятся также максимальная срочная температура воды за год и дата (или даты) наблюдения этой температуры. Средняя за декаду температура воды вычисляется при наличии не менее 8 среднесуточных наблюдений. Во многих зарубежных публикациях рассмотренный способ публикации данных рассматривается как результат единичных измерений каждый 10-й день месяца [Wanders et al., 2019; Yang et al., 2021], что методически неверно.

В 1950-е годы производился анализ правильности выбора мест измерений температуры воды. Целью проведённых работ было определение репрезентативности прибрежной температуры воды средней температуре в потоке. К 1960 г. на многих арктических реках был проведён перенос места измерений с прибрежной части на стрежень потока. Тогда же были уточнены некоторые особенности термического режима участков постов, такие как искажения температуры воды выходами грунтовых вод или воздействием притоков.

Экспедиционный опыт автора, однако, показывает, что наблюдения за температурой воды в реках ведутся наиболее «удобным» образом, то есть с берегов при измерениях уровней воды.

Собранныя для данной работы информация касается именно прибрежной температуры воды.

Если для большинства средних и малых рек, не считая участков с воздействием на температуру воды грунтовых вод, различия в температуре воды на стрежне и у берегов могут быть не очень большими, то на больших реках, они могут достигать величин в первые градусы [Рейнберг, 1938; Антонов, 1941; Соколова, 1951; Магрицкий и др., 2022]. Примеры

неоднородности температуры воды по ширине потока приведены на рисунке 2.1. Таким образом, репрезентативность наблюдений на больших реках находится под некоторым сомнением.

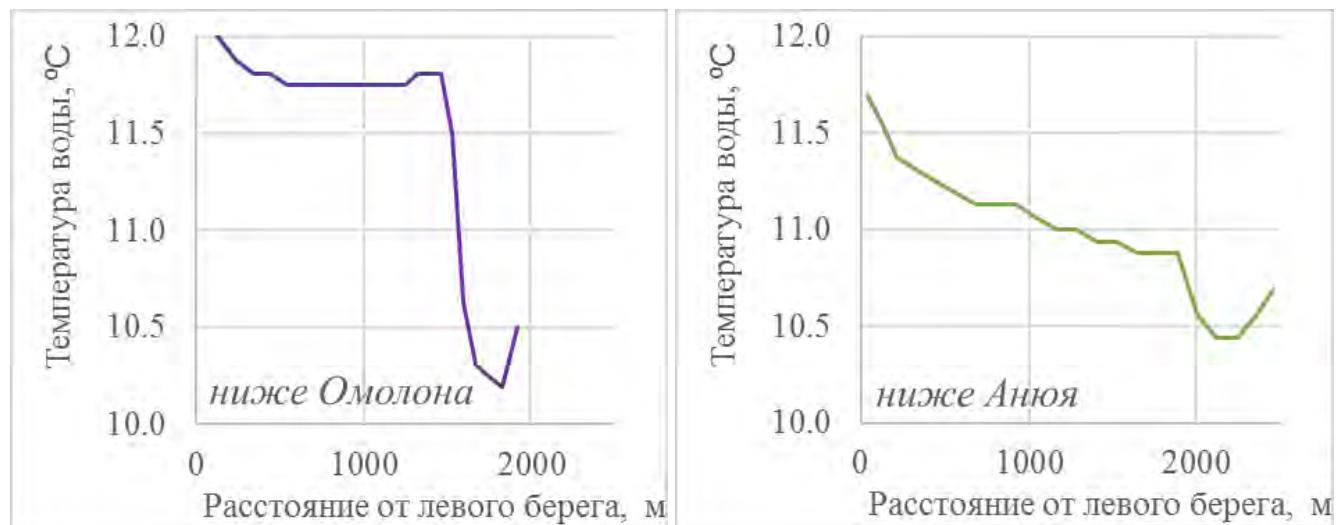


Рисунок 2.1. Распределение температуры воды Колымы по ширине. Слева - ниже впадения Омолона, 1.08.2019, справа - ниже впадения Анюя, 4.08.2019 (данные датчика температуры ADCP «River Ray»)

Ряд гидрологических постов, в особенности в азиатской части российской Арктики, приурочен к населённым пунктам и зачастую посты находятся ниже устьев ручьёв или более крупных притоков, что может приводить к искажениям наблюдаемого термического режима рек. Уточнения данного вопроса в изданиях «Гидрологических ежегодников» приводятся, однако, в недостаточно объеме.

При обнаружении фактов переноса гидрологических постов автором проводился анализ генетической однородности рядов по каждому месяцу (апрель-ноябрь) до и после переноса поста. При нарушении однородности рядов гидрологические посты исключались из анализа. Методы анализа описаны в разделе 2.3.

Наблюдения за термическим режимом рек проводятся дважды в сутки в 8 и 20 часов [Руководящий документ..., 2018], хотя исследование [Соколова, 1951] показало, что наиболее репрезентативным было бы измерение температуры воды в 18:00. По различным причинам в некоторые декады на ряде постов измерения в отдельные дни проведены только в утренние часы. В данном исследовании не учтены различия между односрочными и двухсрочными наблюдениями за температурой воды в связи с недостаточностью материалов для сравнения результатов вычисления среднемесячных температур по данным только утренних, утреннего и вечернего времени наблюдений. Такое сравнение, проведенное автором для сроков в изданиях «Гидрологических ежегодников» для Кольского полуострова за 1958-1962 гг. показало, что при вычислениях средней температуры декады и месяца при использовании только утренних сроков происходит занижение на 0,1-0,3°C. На большей части рассматриваемой территории, по крайней

мере в период прогрева водных масс, наблюдается полярный день, что может нивелировать указанную разницу. Также в связи с тем, что даже при систематическом занижении температуры воды возможно отслеживать общие тенденции происходящих изменений, наблюдения на этих постах также использованы в работе.

Искажения термического режима также могут быть вызваны работой местных гидротехнических сооружений, тепловых и дизель-электрических электростанций, промышленных предприятий. Вопросы антропогенного теплового загрязнения, не связанного с крупными гидроузлами, являются малоизученными [Горчаков, Милаев, 2017]. По нашему мнению, возможности для оценки подобных воздействий ограничены, особенно в восточных районах Арктической зоны, в связи с отсутствием наблюдений на реках-аналогах. При наличии упоминаний об антропогенном тепловом загрязнении, посты также рассматривались отдельно, но никаких особенностей термического режима на них выявлено не было.

Ледовые явления представлены в изданиях «Гидрологических ежегодников» достаточно подробно. Сроки формирования и исчезновения ледовых явлений отмечаются в таблицах «Уровни воды». В ежегодниках приводятся данные о датах появления льда, начала ледостава, начала весеннего ледохода, очищения ото льда, количества дней с шугоходом и ледоходом, а также о подвижках льда, заторах и зажорах ниже и выше постов. В разные периоды в таблицах также указывались сведения о густоте ледохода и шугохода, наличии полыней в окрестностях постов, характеристиках весенних процессов, причем перечень последних постоянно эволюционировал, добавлялись новые процессы, уточнялись уже публикуемые (к примеру, градации густоты шугохода).

Полнота данных менялась со временем. До 1980-х в таблицах приводились сведения только о ледоставе, подвижке льда, ледоходе, заторах и зажорах льда, а также о шугоходе. Сведения об иных ледовых явлениях, таких как пятры, разводья, полыньи, выход воды на лёд, ярусный лед, наледи и т.д. приводились в примечаниях к таблицам. Позже в таблицах вводится понятие «несплошной ледостав», без подробной definиции, многообразие ледовых явлений замерзания и вскрытия переносится в условные знаки при уровнях воды, однако не публикуется более двух знаков при суточной величине уровня воды. Таким образом, возникает ряд ограничений на использование данных о подробностях процессов вскрытия и замерзания.

Переносы постов на расстояния в пределах нескольких километров мало отражаются на сведениях о ледовом режиме. Большая часть переносов постов пришлась на 1950-е и 1960-е годы. В случаях переносов постов оценивалась однородность рядов данных статистическими методами, описанными в разделе 2.3.

В настоящей работе для анализа изменчивости температуры воды на устьевых участках рек использовались данные 38 морских гидрологических постов, где наблюдения за

температурой воды производятся также, как и на речных гидрологических постах. Данные о температуре воды на морских гидрологических постах получены из «Единой системы информации о Мировом Океане» [Портал Единой государственной системы информации о Мировом Океане (ЕСИМО) [Электронный ресурс].

Данные о стоке воды получены из гидрологических ежегодников и из системы АИС ГМВО [Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1> (дата обращения: 01.09.2025)] (отключена полностью на момент завершения диссертации).

Густота метеорологических станций, находящихся в пределах 80 км от гидрологических постов, достаточно низкая, особенно, в азиатской части рассматриваемой территории, и не охватывает всех гидрологических постов. В связи с этим было принято решение использовать для анализа роли метеорологических факторов в формировании характеристик ледотермического режима рек, данных ближайших к гидрологическим постам узлов сетки реанализа ERA-5, который достаточно хорошо воспроизводит температуру воздуха в российской Арктике, в том числе в горных районах [Титкова, Ананичева, 2023; ECMWF Forecast User Guide: Regional temperature biases [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/81307-ecmwf-forecast-user-guide>].

2.2 Принципы отбора исходных данных

С учетом высокой инерционности температуры воды, а также значительной их климатообусловленности на реках с порядками выше третьего по Хортону-Штальлеру [Beaufort et al., 2015], ориентируясь на общемировую практику использования недельных и месячных значений температуры воды для исследования влияния изменений климата на термический режим рек в работе была выбрана дискретность по времени один месяц.

Из характеристик ледового режима для исследования были выбраны сроки появления льда, установления ледостава, начала весеннего ледохода и очищения рек ото льда. Выбор данных характеристик связан с их высокой климатообусловленностью. В работе [Prowse et al., 2012] показана тесная связь сроков установления ледостава и сроков вскрытия рек с датой перехода температуры воздуха через 0°C. Наличие тесной связи сроков появления льда, установления ледостава, начала ледохода и очищения ото льда с датой перехода температуры воздуха через 0°C в современных климатических условиях на изучаемой территории было проверено автором [Vasilenko et al., 2019].

Открытие большого количества гидрологических постов на востоке российской Арктики пришлось на 1970-е годы. С учётом данного факта, а также с учётом произошедшего в конце XX-

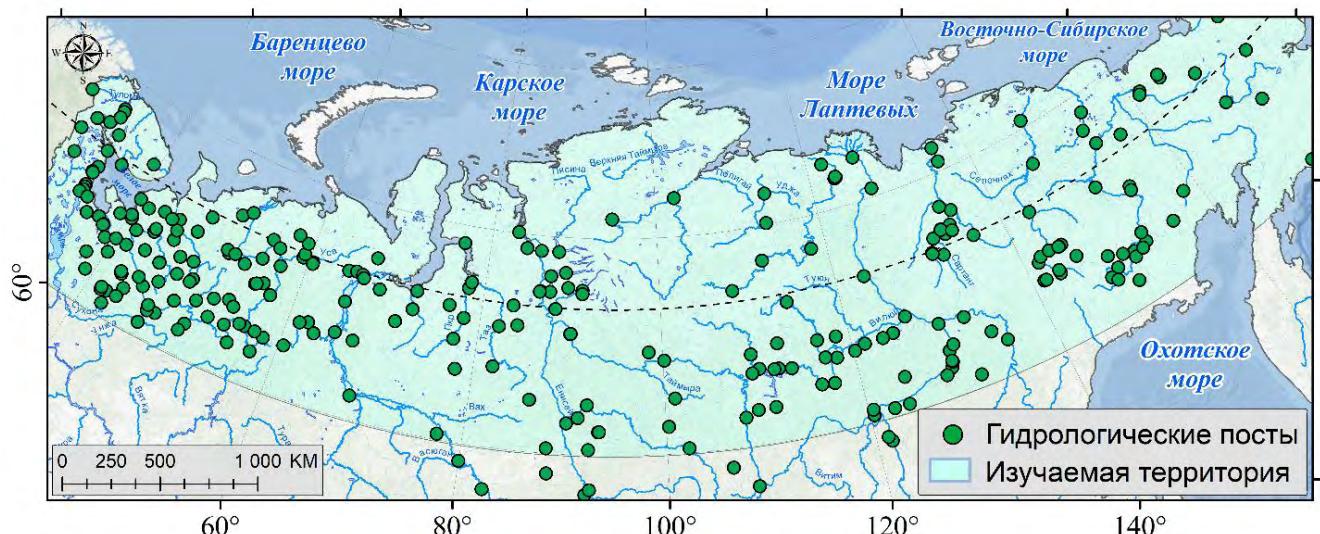
начале XXI в. снижения количества гидрологических постов и значительных пропусков в данных в 90-е годы XX в. были выбраны некоторые ограничения по полноте данных, используемых в работе:

- 1) не использовались в работе данные гидрологических постов, на которых за период 1991-2020 гг. опубликованы наблюдения менее, чем за 10 лет;
- 2) не использовались в работе данные гидрологических постов, для которых в последнюю декаду XX в. опубликованы данные менее, чем за 5 лет;
- 3) не использовались в работе данные гидрологических постов, для которых за период 1961-1990 гг. опубликованы наблюдения менее, чем за 10 лет.

При сборе данных по температуре воды, если данные по гидрологическому посту были представлены менее, чем за половину месяцев периода без ледовых явлений, или не было опубликовано данных за летние месяцы, годопункт выбраковывался целиком.

В работе использовались только 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. Такое ограничение было наложено для максимально полной оценки происходящих многолетних изменений характеристик ледотермического режима рек. Это привело к некоторому снижению пространственного охвата в исследовании ледового режима рек, по сравнению с предыдущими работами, выполненными с участием автора [Agafonova, Vasilenko, 2020; Vasilenko et al., 2019], однако позволило повысить надёжность проведённого анализа.

По совокупности всех ограничений итоговая база данных о температуре воды содержит информацию с 287 гидрологических постов. База данных о ледовых явлениях содержит информацию со 144 гидрологических постов (Рисунок 2.2). Данные собраны в таблицы MS Excel. Девяносто гидрологических постов в двух базах данных совпадают.



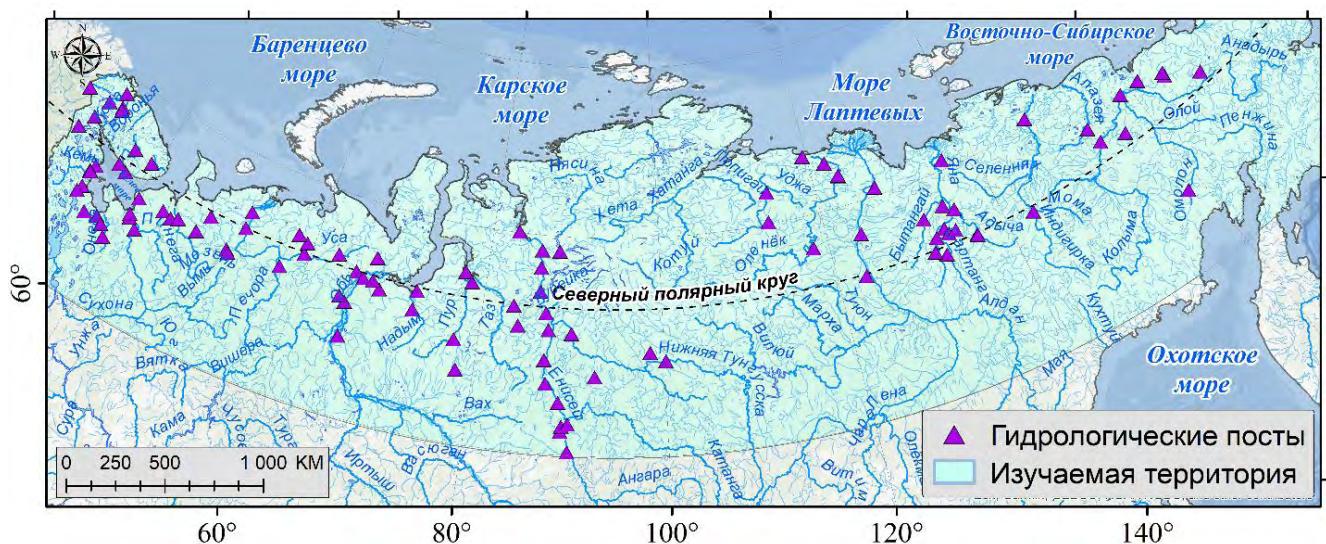


Рисунок 2.2. Географическое положение гидрологических постов на реках российской Арктики, использовавшихся для анализа термического режима рек (сверху) и ледового режима рек (снизу)

Обе базы данных одни из крупнейших и наиболее полных, среди упомянутых в современной научной литературе.

2.3 Методы обработки гидрометеорологической информации

В работе реализовано три подхода к оценке значимости изменений термического режима рек:

1. Выявление статистически значимого линейного тренда в рядах наблюдений;
 2. Выявление нарушений однородности в рядах наблюдений;
 3. Сравнение средних значений температуры воды за условно современный и предшествующий базовый период времени.

Оценка наличия или отсутствия значимого тренда в рядах наблюдений проводилась с использованием непараметрического теста Манна-Кендалла. Расчеты наличия или отсутствия статистически значимых трендов проводились при длине рассматриваемого ряда не менее 8 (ограничение расчёта теста Манна-Кендалла).

В связи с достаточно малыми длинами рядов различия средних арифметических за различные периоды уточнялись с использованием стандартной ошибки среднего арифметического. В данной работе при обсуждении величин изменений имеются в виду только такие, которые больше по модулю, чем стандартные ошибки вычисления среднего как для всего рассматриваемого периода, так и периодов до и после переломного года. Помимо средних и их изменений вычислялись также стандартные отклонения и их изменения.

Оценка нарушения однородности проводилась с использованием критерия Манна-Уитни, который как робастный непараметрический критерий отражает в первую очередь различия функций распределения вероятности относительно выбранного года разделения, однако часто воспринимается как критерий различий по математическому ожиданию.

Статистическое исследование рядов температуры воды проводилось без модификаций рядов, в том числе без нормализации. Для сроков ледового режима даты заменялись на количество суток от начала года. В случаях, если замерзание рек происходило в новом календарном году, отсчет производился от начала предшествующего календарного года. Период ледостава и период с ледовыми явлениями вычислялся с учетом нахождения начала и конца периода (обычно) в разных календарных годах.

Уровень значимости всех статистических тестов 5%.

Анализ и визуализация данных производились с использованием MS Excel и пакетов языка программирования Python: numpy, pandas, pymannkendal, pyhomogeneity, scipy, matplotlib, seaborn, xarray. Построение карт выполнялось в среде ArcGIS.

Важнейшим вопросом является разделение рядов наблюдений на части для вычисления средних (и других характеристик) и их последующего сравнения. В данной работе был впервые проведен анализ относительно переломных лет по критерию Буишанда [Buishand, 1982], активно применяемого в гидрометеорологических исследованиях [Frolova et al., 2022; Aldrees et al., 2023]. Дополнительное сравнение выявленных нарушений однородности рядов относительно переломного года и относительно 1991 г. (т.е. выявление нарушений однородности в 30-летних периодах 1961-1990 и 1991-2020 гг.) показало, что относительно переломных лет в отдельных гидрографических регионах (за небольшим исключением) выявлено большее количество случаев нарушений однородности рядов (Таблица 2.1).

Тепловой сток рек вычислялся по формуле [Михайлов, Добролюбов, 2017]:

$$W_t = c_p \rho \bar{T}_b W,$$

где: W_t - тепловой сток, Дж; c_p - удельная теплоемкость воды, Дж/[кг·°C], в работе в силу малой изменчивости принята как 4,2108 Дж/[кг·°C]; \bar{T}_b - средняя температура воды за выбранный период, °C; W - объем стока за выбранный период, м³.

В работе тепловой сток представлен в Эксоджоулях ([ЭДж] = [Дж*10¹⁸]).

Проведение оценок величин теплового стока путем сравнения средних за отдельные периоды не во всех случаях является корректным в связи с тем, что полнота рядов данных о температуре и стоке воды отличается в различные периоды. Наиболее полные данные относятся к 80-м годам XX в. К середине первого десятилетия XXI в. ряд постов с измерением стока воды в низовьях больших рек был закрыт, к примеру, на Яне, Индигирке, Колыме, Хатанге. Во втором десятилетии XXI в. были прекращены измерения в низовьях Енисея, а также в летний период в

низовьях Лены. В связи с этим в данной работе сравниваются как период 1981-2010 гг. и для ряда постов 1981-2021 гг. Причем, в последний период включаются все данные периода 2011-2021 гг., как минимум 2011-2014 гг.

Таблица 2.1. Количество (%) гидрологических постов с выявленными нарушениями однородности по Манну-Уитни относительно переломного года (верхние ряды) и относительно 1991 г. (нижние ряды)*

Регион	Сроки		Температура воды						Сроки	
	Начала ледохода	Очищения ото льда	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Появления льда	Установления ледостава
Северо-Восток	67	83	60	43	53	53	80	77	100	92
	33	33	43	30	33	37	53	60	50	58
Лена	74	78	84	73	58	41	58	40	85	93
	22	22	33	40	51	26	22	25	48	56
Енисей	82	77	84	84	65	43	46	65	91	73
	64	64	54	65	43	27	22	41	36	59
Север Западной Сибири	94	100	87	87	27	50	60	73	94	81
	75	75	97	90	23	37	37	63	75	69
Север ЕТР	83	57	44	44	40	44	74	78	87	87
	70	70	32	34	7	16	52	71	70	48
Карелия	100	100	33	33	58	75	100	100	91	73
	64	64	58	17	8	67	100	92	45	18
Кольский полуостров	83	100	100	100	50	100	100	90	100	83
	50	50	90	80	20	60	90	70	42	17

*цветовая схема дана для улучшения читаемости

2.4 Методы оценок характеристик ледотермического режима рек в XXI в.

Основные характеристики ледотермического режима рек, величины которых оценивались на середину и конец XXI в. - продолжительность периода с ледовыми явлениями и периода ледостава. Их потенциальное изменение связано с удлинением или сокращением периода с ненулевой температурой воды и периода формирования теплового стока, а также предполагаемого периода навигации на реках. В ряде работ [Вуглинский, Гронская, 2006; Prowse

et al., 2012 (1,2); Agafonova et.al., 2017] выявлены достаточно тесные связи метеорологических параметров и продолжительностей периодов с ледовыми явлениями и ледостава.

Для оценок будущих величин рассматриваемых характеристик использовалась связь скользящих 10-летних средних продолжительностей периодов с ледовыми явлениями и ледостава со скользящими 10-летними средними суммами отрицательных температур воздуха и с количеством дней с отрицательной температурой воздуха за период с октября по май. Подобный подход с использованием двумерной регрессии использовался в работе [Agafonova et.al., 2017], в которой представлены наиболее полные оценки будущей продолжительности периода с ледовыми явлениями и периода ледостава для рек российской Арктики на сегодняшний день. В нашей работе использовано несколько видов регрессионных зависимостей (Таблица 2.2).

Метеорологические параметры для построения зависимостей были получены из ближайших к гидрологическому посту узлов реанализа ERA5. Связи между характеристиками ледового режима и метеорологическими предикторами (Рисунок 2.3) оказались достаточно устойчивыми во времени, что было подтверждено построением зависимостей за периоды 1961-2000, 1961-2010, 1961-2020. Коэффициенты детерминации этих зависимостей за разные периоды времени отличаются в пределах сотых.

Таблица 2.2. Коэффициенты детерминации уравнений регрессии, устанавливающих связь между рассматриваемыми характеристиками ледового режима рек и метеорологическими параметрами

<i>Вид регрессии</i>	<i>Продолжительность периода с ледовыми явлениями</i>	<i>Продолжительность периода ледостава</i>
<i>Линейная с суммой отрицательных температур воздуха</i>	0,71	< 0,7
<i>Линейная с количеством дней с отрицательной температурой воздуха</i>	0,86	0,80
<i>Двухмерная регрессия с суммой отрицательных температур воздуха и количеством дней с отрицательной температурой воздуха</i>	0,86	0,80
<i>Полином 2 степени с суммой отрицательных температур воздуха</i>	0,77	< 0,70
<i>Полином 2 степени с количеством дней с отрицательной температурой воздуха</i>	0,90	0,81

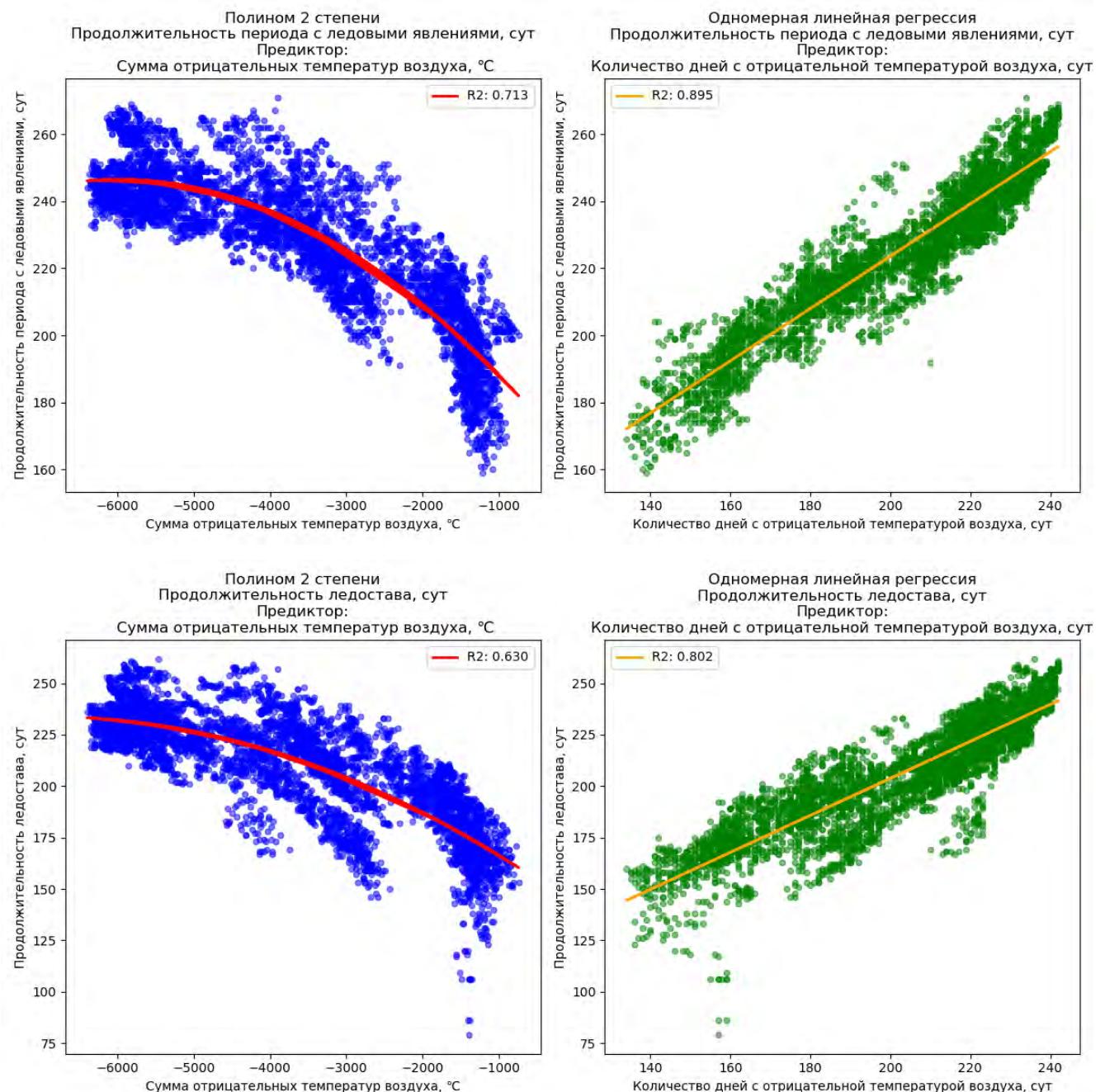


Рисунок 2.3. Точечные графики связи продолжительности периода с ледовыми явлениями (сверху) и периода ледостава (снизу) с суммами отрицательной температуры воздуха за октябрь-май и количеством дней с отрицательной температурой воздуха за октябрь-май с нанесёнными линейными графиками регрессий. Все величины даны в форме 10-летних скользящих средних

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) [ISIMIP - Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project [Электронный ресурс]. URL: <https://www.isimip.org/>] 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 и SSP585 проекта CMIP6. Сценарии данного проекта использованы для оценок будущего ледового режима рек российской Арктики впервые. Данные сценарии в дальнейшем будут обозначаться как «мягкий» и «жёсткий». Оценки были даны на 2031-2060 гг. и 2071-2100 гг.

Расчёты проводились по каждому уравнению и результаты осреднялись сначала по всем уравнениям для каждой характеристики и затем по всем использованным моделям.

Глава 3. Современные характеристики и многолетняя изменчивость ледотермического режима рек

3.1 Современные характеристики 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. (Рисунок 3.1).

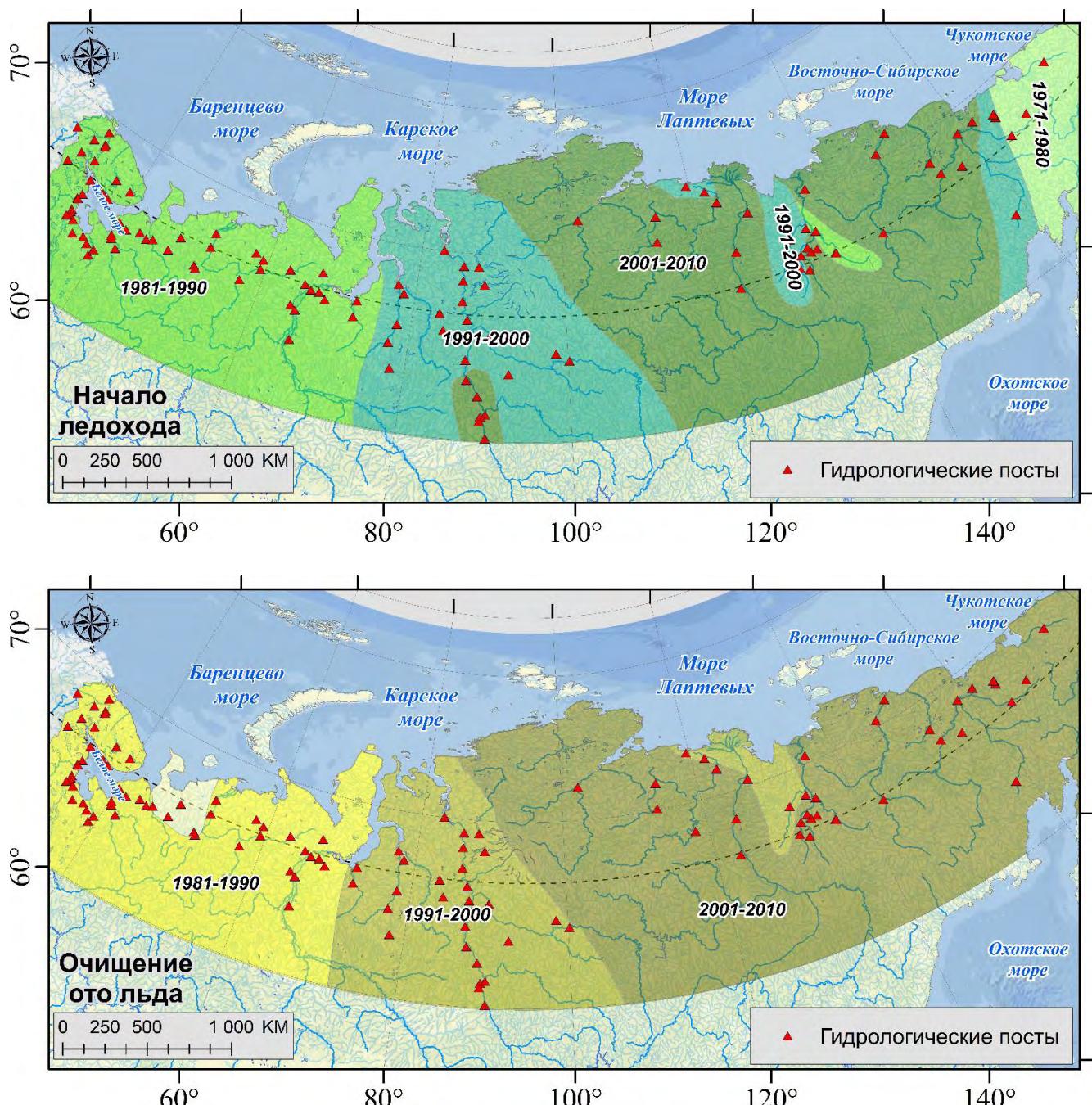


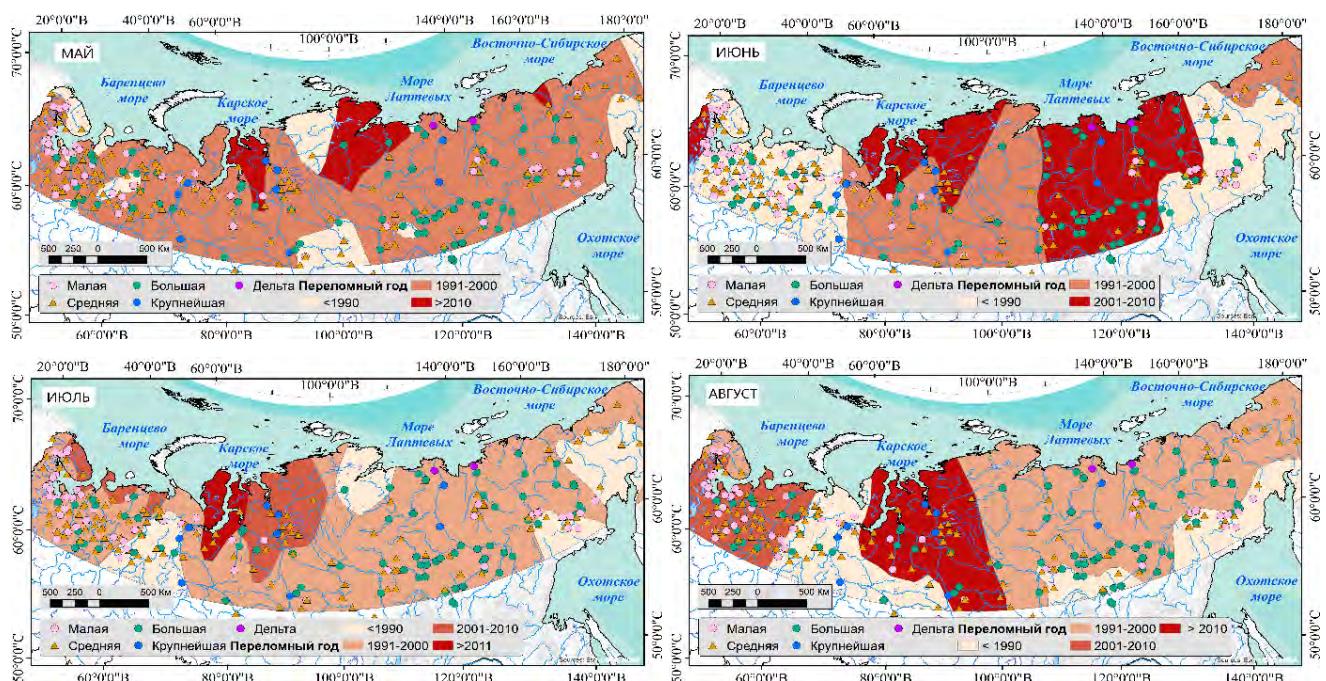
Рисунок 3.1. Пространственное распределение переломных лет сроков начала ледохода (сверху) и сроков очищения ото льда (снизу) после 1961 г.

На 1980-е годы указанные характеристики приходятся только в европейском секторе российской Арктики, в других частях рассматриваемой территории переломные годы преимущественно наступили в 1990-е. Исключением является Чукотка, где переломные годы сроков начала ледохода произошли в 1970-е.

В период вскрытия переломные годы произошли раньше, чем в период замерзания во всех гидрографических регионах, кроме Лены и Енисея. Наиболее поздние переломные годы отмечаются в низовьях Енисея, а также на реках Ленского региона. Наиболее ранние изменения произошли в бассейнах Яны и Индигирки. На крупнейших реках Сибири переломные годы произошли практически в те же годы, что и на реках их водосборов. Переломные годы в рядах сроков ледового режима случились позже, чем в рядах годового и максимального стока воды.

Переломные годы для рядов температуры воды произошли, в основном, позже переломных лет годового стока и максимального стока [Frolova et al., 2022]. Различия по времени могут достигать 10-20 лет.

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 водностью. 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. Наиболее ранние сроки в большинстве случаев выявлены для рек горных районов. В мае-августе изменения произошли преимущественно в период 1991-2000 гг., в сентябре и октябре в период 2001-2010 гг. Пространственное распределение переломных лет температуры воды (по Буишанду $\alpha=0,05$) в отдельные месяцы приведено на рисунке 3.2.



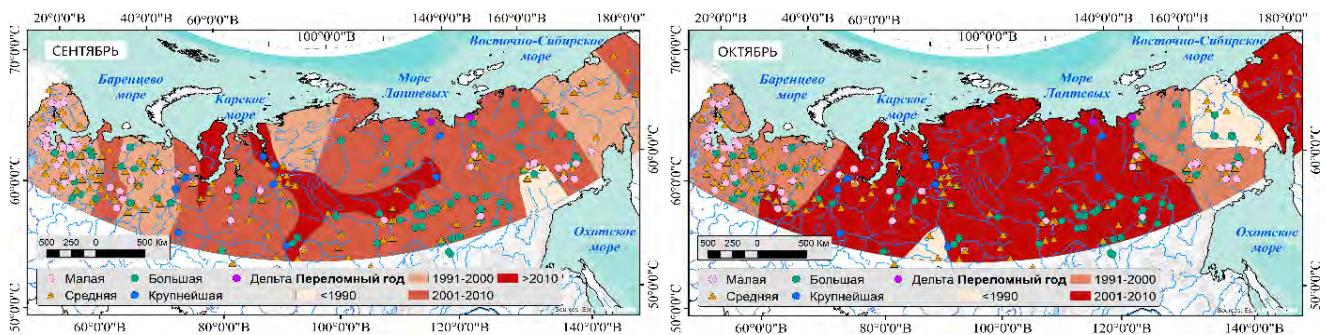


Рисунок 3.2. Пространственное распределение переломных лет температуры воды в реках рассматриваемой территории в отдельные месяцы периода открытого русла

Конкретные переломные годы температуры воды во многом зависят от локальных условий, а время их наступления частично регулируется физико-географическими факторами: широтой, долготой, площадью водосбора и высотой местности. Сроки переломных лет смещаются на более поздние с продвижением на север и на восток, с увеличением площадей водосборов и их высот.

Переломные годы сроков появления льда они пришлись (на большей части гидрологических постов) на 1997-2005 гг., а сроков установления ледостава на 2001-2008 гг. (Таблица 3.1). То есть, переломные годы сроков формирования льда в среднем более поздние, чем у сроков исчезновения льда.

Таблица 3.1. Переломные годы сроков появления льда и сроков установления ледостава

Регион	Характеристика	Дата появления льда	Дата установления ледостава
<i>Северо-Восток</i>		1998	2003
<i>Лена</i>		2001	2000
<i>Енисей</i>		1996	1993
<i>Север ЗС</i>		2000	1998
<i>Север ЕТР</i>		1995	1998
<i>Карелия</i>		1999	1997
<i>Кольский п-ов</i>		1998	1996

Наиболее ранние переломные годы в рядах осенних ледовых явлений выявлены для средней части бассейна Енисея, в бассейнах обеих Тунгусок. В этом районе на начало изменений в режиме замерзания могли оказать влияние в том числе и антропогенные факторы (лесозаготовки и гидроэнергетика, приведшие к трансформации стока воды). За исключением указанного района, переломные годы рассматриваемых характеристик произошли позже, чем таковые для годового и максимального стока [Frolova et al., 2022]. Позднее всего переломные

годы отмечаются на отдельных гидрологических постах на северо-востоке России. Пространственное распределение переломных лет сроков появления льда и установления ледостава приведено на рисунке 3.3.

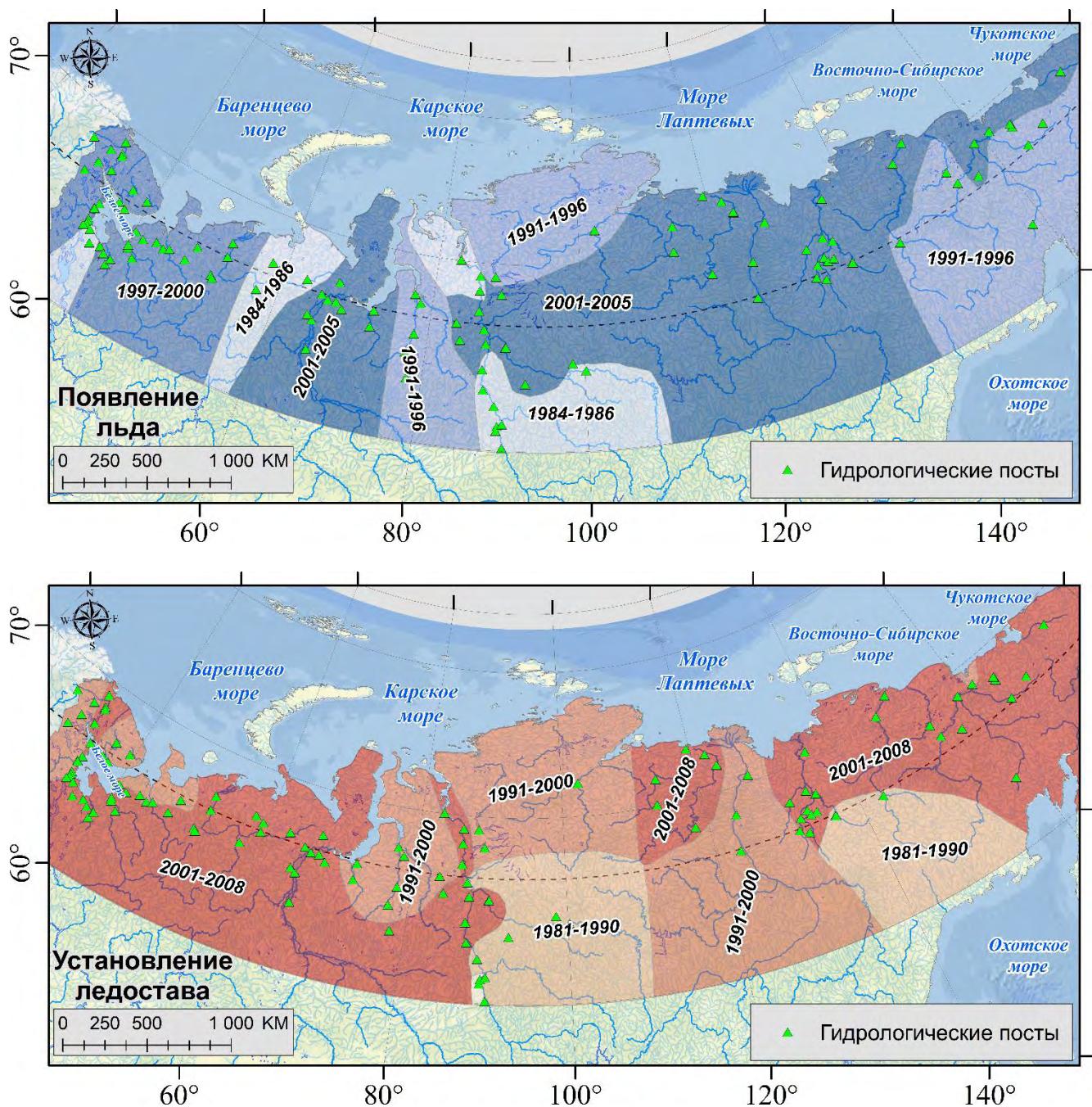


Рисунок 3.3. Пространственное распределение переломных лет сроков появления льда (сверху) и сроков очищения ото льда (снизу)

Статистическое описание характеристик ледотермического режима рек в различных районах российской Арктики приведено в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Осреднённые по районам российской Арктики переломные годы (зелёные строки) в отдельных регионах российской Арктики и их стандартные отклонения (жёлтые строки) в рамках регионов

Регион	Сроки исчезновения ледовых явлений		Среднемесячная температура воды						Сроки формирования ледовых явлений	
	Начала ледохода	Очищения ото льда	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Появления льда	Установления ледостава
Северо-Восток	1991	1996	1999	1994	1992	1993	1999	1997	1998	2003
	13	10	11	13	11	12	8	12	11	4
Лена	1998	2000	2003	1999	1995	1994	2002	1999	2001	2000
	11	10	9	10	11	10	11	12	8	7
Енисей	1999	1996	1999	1999	1997	2002	2003	1999	1996	1993
	5	11	12	8	9	13	14	11	10	11
Север Западной Сибири	1991	1992	1998	1995	1995	1999	2003	2002	2000	1998
	6	5	8	10	14	14	6	8	7	8
Север ЕТР	1988	1987	1997	1987	1995	1998	1997	1997	1995	1998
	7	10	9	8	9	9	7	7	7	9
Карелия	1984	1990	2003	1993	1995	2000	2000	1997	1999	1997
	10	5	12	15	14	9	7	2	8	9
Кольский полуостров	1983	1985	1992	1985	1997	1996	1999	1993	1998	1996
	3	3	8	3	14	8	8	10	4	8

Процессы вскрытия рек в современных условиях происходят в течение мая, сроки смещаются на более поздние с юго-запада на северо-восток (Рисунок 3.4). На Севере ЕТР наблюдается субмеридиональное смещение сроков на более поздние с продвижением к Уралу. Подобное пространственное распределение сроков фазы вскрытия рек характерно для российской Арктики, оно отмечалось уже в работах М.А. Рыкачева [Рыкачев, 1886] и Б.М. Гинзбурга [Гинзбург, 1973], а также в работах, выполненных на большем количестве гидрологических постов с участием автора [Agafonova, Vasilenko, 2020]. Оно сохраняется на протяжении более 140 лет. Современные стандартные отклонения сроков начала ледохода и очищения ото льда малы в сибирской и дальневосточной частях рассматриваемой территории, где они составляют в основном 5-10 дней, при этом наименьшие наблюдаются в верховьях

бассейна Яны и в низовьях бассейна Колымы, а наибольшие на малых и средних реках побережья Белого моря.

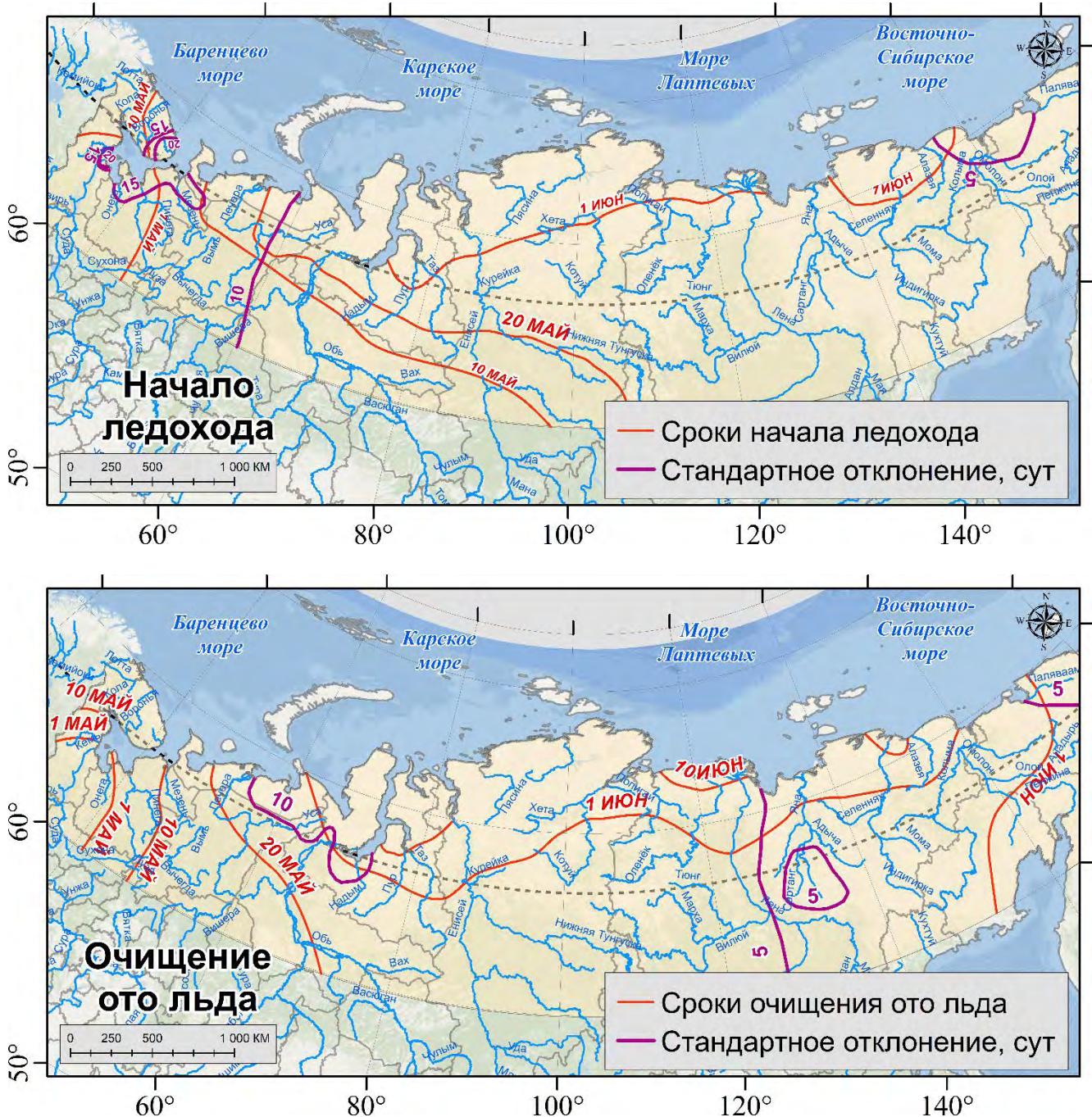


Рисунок 3.4. Современные (после переломных лет) сроки и стандартные отклонения сроков начала ледохода (сверху) и очищения ото льда (снизу)²

Точность карт характеристик фазы вскрытия рек составляет двое суток для средних величин и одни сутки для стандартного отклонения на больших и малых реках. Точность карт проверялась методом выбрасываемых точек, выбранных случайным образом.

² Здесь и далее приводятся средние величины за период после переломных лет, если не оговорено иное

Значимым фактором вскрытия рек является температура воздуха (Рисунок 3.5), причём в основном либо средняя месячная температура воздуха в мае, либо средняя декадная температура воздуха в одну из декад мая, обычно ближайшую к срокам исчезновения ледовых явлений. Западнее Енисея также выявляется тесная связь с температурой воздуха в апреле. При этом, восточнее Енисея роль температуры воздуха в исчезновении ледовых явлений не является определяющей.

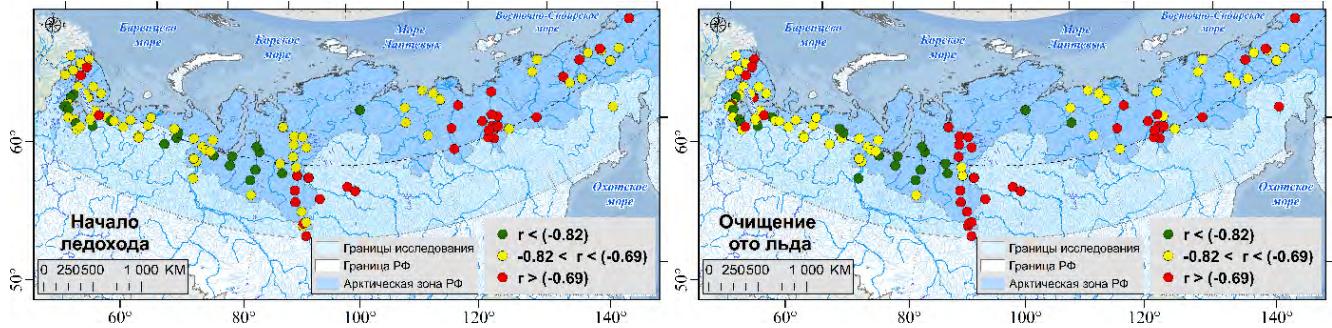


Рисунок 3.5. Максимальный выявленный коэффициент корреляции сроков начала ледохода (слева) и очищения ото льда (справа) со среднемесячной и среднедекадной температурой воздуха (1961-2021)

Отметим, что для исчезновения ледовых явлений значимым является также фактор стока воды, однако среднемесячные расходы воды тесной связи со сроками начала ледохода и очищения ото льда не имеют.

Пространственное распределение значений температуры воды в мае и частично в июне соответствует времени вскрытия рек - температура воды снижается с юго-запада на северо-восток (Рисунок 3.6).



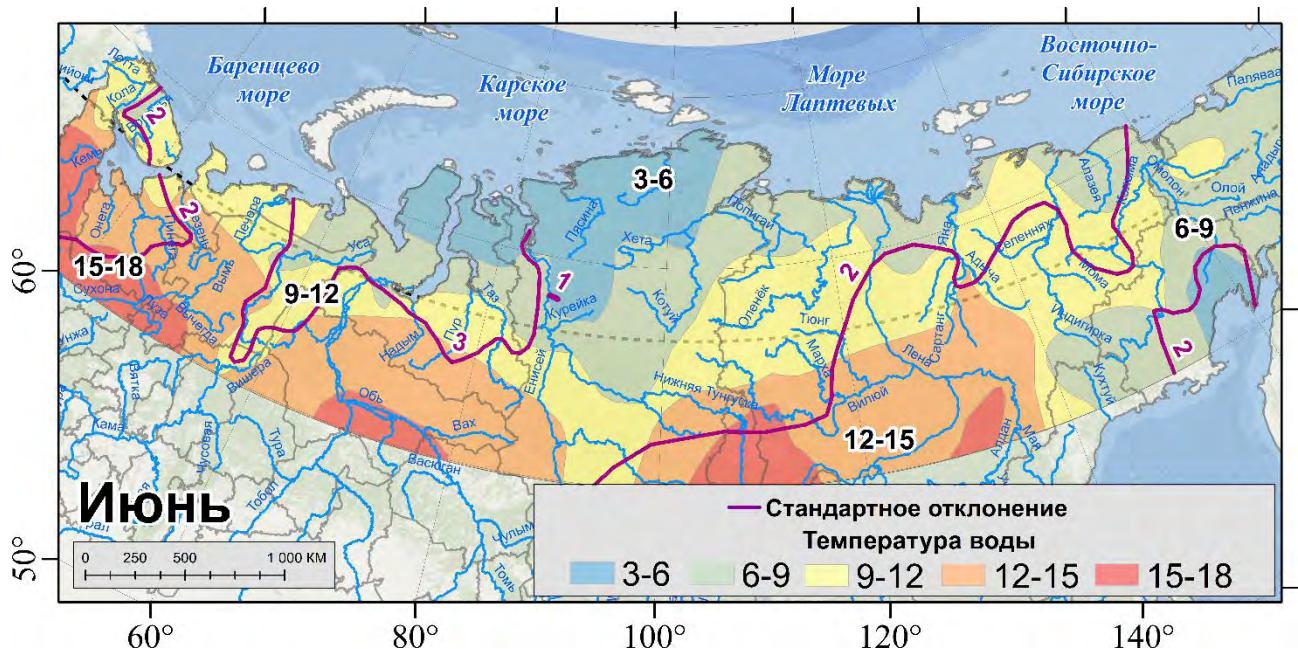
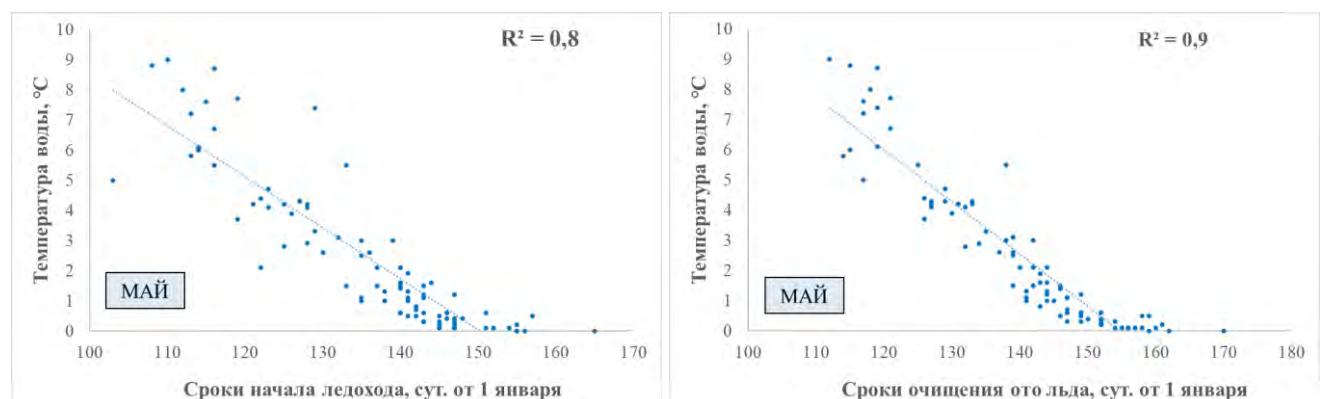


Рисунок 3.6. Современная (после переломных лет) температура воды и её и стандартное отклонение в мае (сверху) и в июне (снизу)

Стоит отметить зону сравнительно более высокой температуры воды в бассейне Сартанга в мае, где наблюдаются и сравнительно малые величины стандартного отклонения сроков очищения ото льда. В данном бассейне в целом наблюдается сравнительно более высокая температура воды относительно других рек, стекающих с Верхоянского хребта и протекающих по Яно-Оймяконской возвышенности.

Температура воды в мае и июне достаточно тесно связана со сроками начала ледохода и сроками очищения ото льда, с коэффициентами корреляции $r < -0,77$ на 90 гидрологических постах, для которых имеются данные как по характеристикам ледового, так и термического режимов (Рисунок 3.7).

Наиболее тесная связь температуры воды в первые месяцы тёплого периода года ($r < -0,82$) наблюдается на больших и крупнейших реках, а также на малых реках, представленных в данной выборке преимущественно реками Карелии.



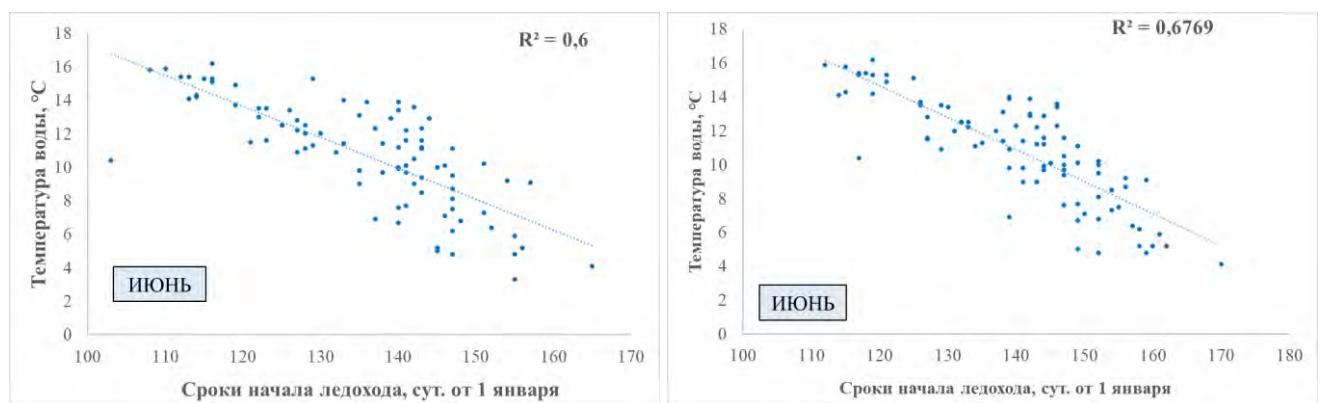
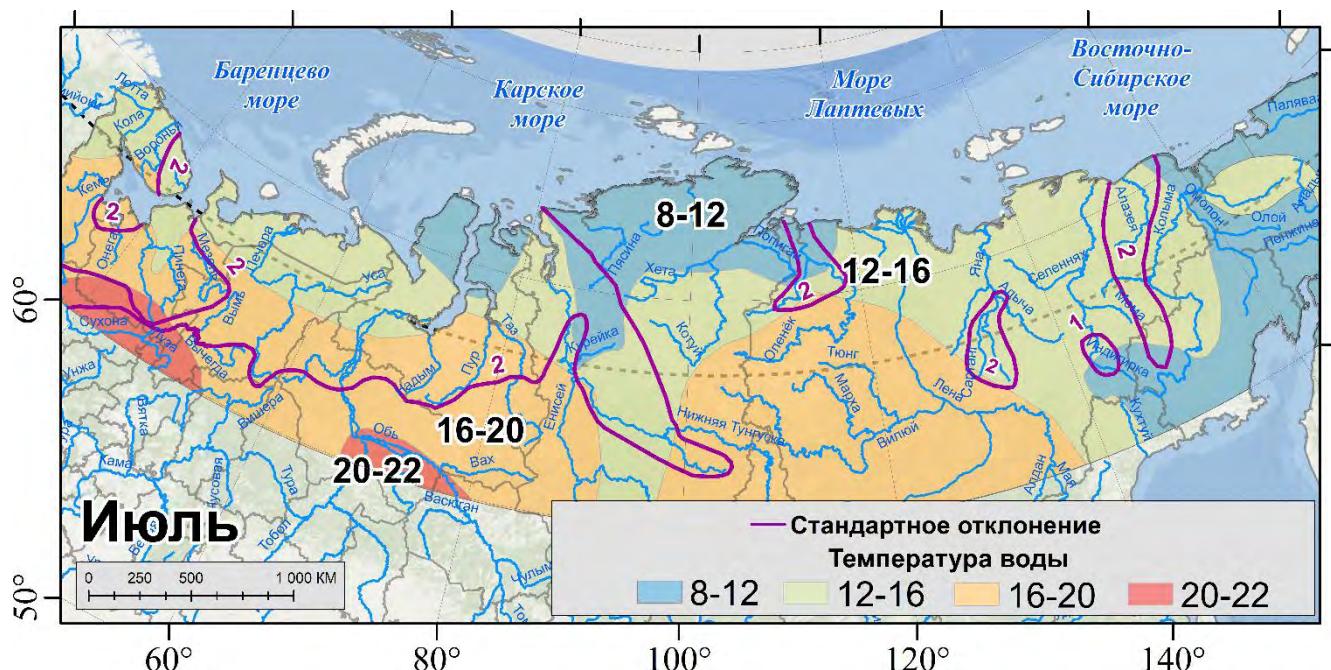


Рисунок 3.7. Связь температуры воды в мае (верхний ряд) и температуры воды в июне (нижний ряд) со сроками начала ледохода (левый столбец) и сроками очищения ото льда (правый столбец)

Температура воды в июле и августе, в период максимального нагрева воды увеличивается с севера на юг практически субширотно (Рисунок 3.8). Нарушение данного пространственного распределения наблюдается восточнее Лены, на реках горных районов, а также на Чукотке. Здесь наблюдается субмеридиональное снижение температуры воды и в июле, и в августе. Низовья Лены, реки Яно-Индигирской и Колымской низменностей имеют достаточно однородные термические условия. Отмечается также нарушение субширотной изменчивости температуры воды в июле в бассейнах обеих Тунгусок, что, вероятно, связано с большим количеством субмеридиональных притоков данных рек, протекающих в зоне темнохвойной тайги, что обуславливает сильное затенение и слабый прогрев данных рек.



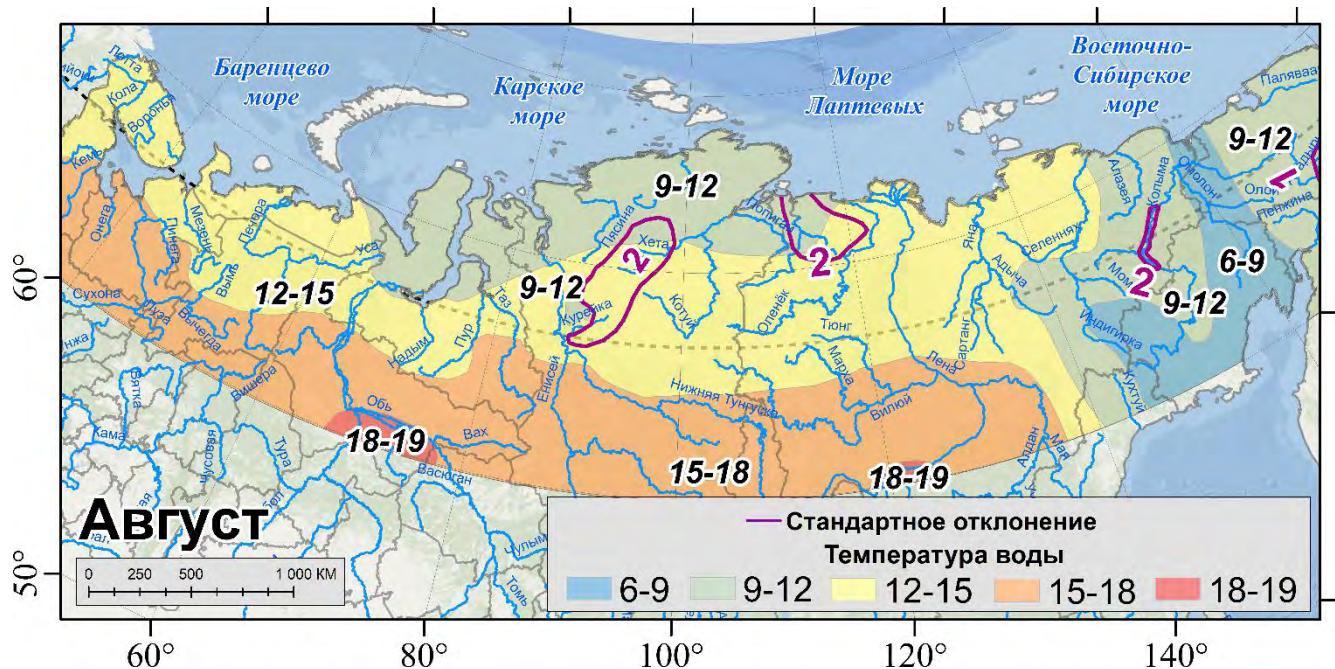
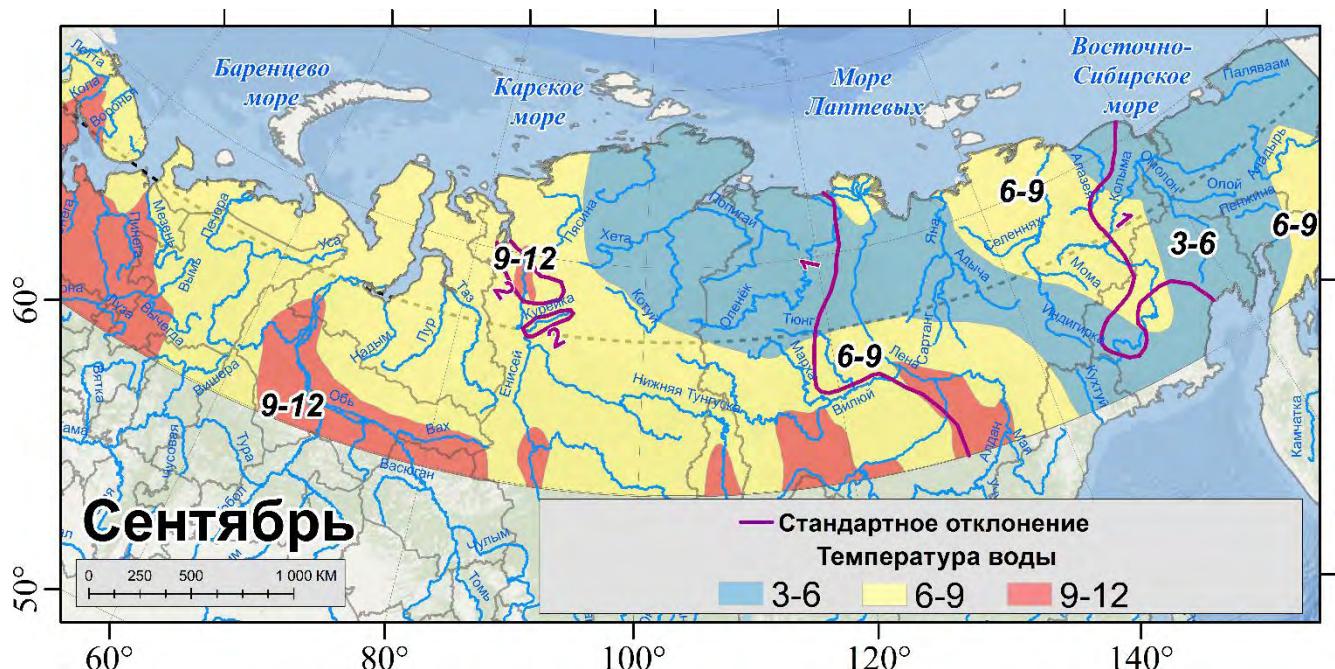


Рисунок 3.8. Современная (после переломных лет) температура воды её и стандартное отклонение в июле (сверху) и августе (снизу)

Низовья Лены, реки Яно-Индигирской и Колымской низменностей имеют достаточно однородные термические условия. Отмечается также нарушение субширотной изменчивости температуры воды в июле в бассейнах обеих Тунгусок, что, вероятно, связано с большим количеством субмеридиональных притоков данных рек, протекающих в зоне темнохвойной тайги, что обуславливает сильное затенение и слабый прогрев данных рек.

В сентябре температура воды сравнительно однородна на достаточно большой территории российской Арктики 6-9°C (Рисунок 3.9).



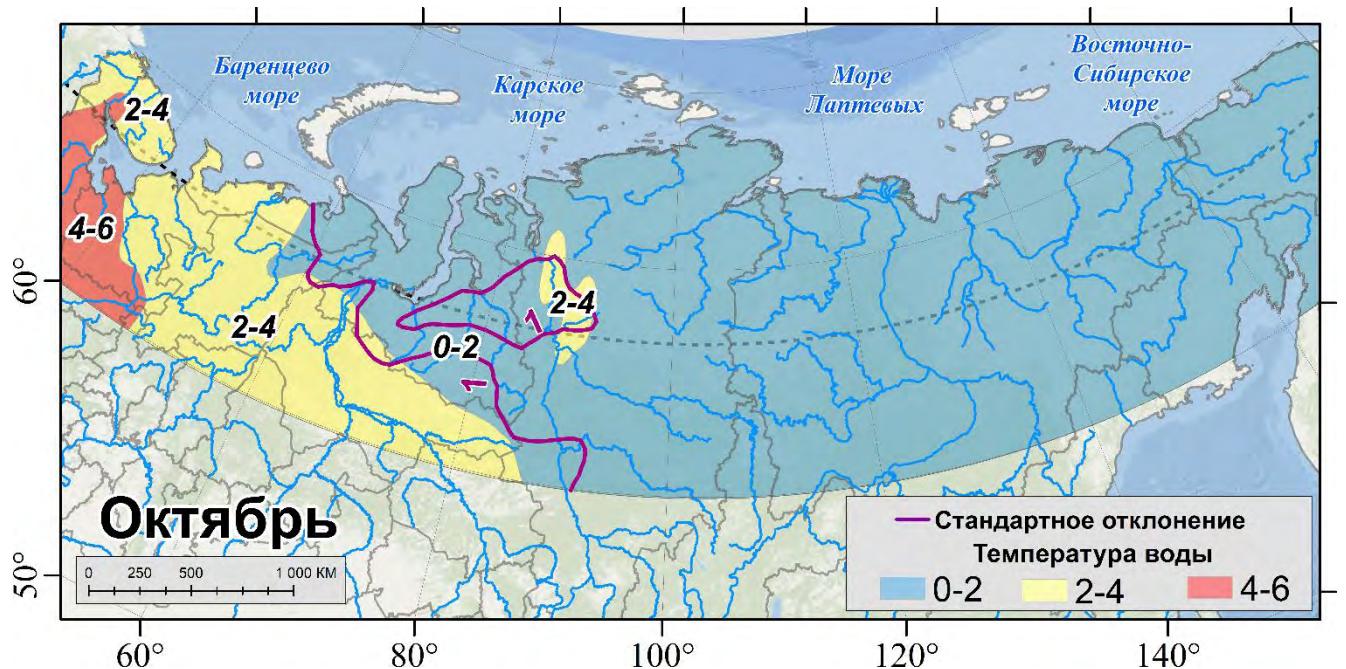


Рисунок 3.9. Современная (после переломных лет) температура воды и её стандартное отклонение в сентябре (сверху) и в октябре (снизу)

Более высокая температура воды наблюдается в бассейнах Северной Двины и Онеги, в Карелии, на реках Коле, Умбе и реках бассейна оз. Имандра на Кольском полуострове. Также более высокая относительно соседних районов температура воды характерна для долины Оби и низовий впадающих в неё рек, что может объясняться как микроклиматом долины, так и более медленным остыванием рек с ростом водности. Также увеличение температуры воды наблюдается на отдельных участках Алдана и Подкаменной Тунгуски. Сравнительно более низкая температура воды характерна для приморских равнин моря Лаптевых и рек горных районов северо-востока. При этом, на реках заболоченной Восточно-Сибирской низменности температура воды в сентябре выше, чем в горных районах и соседних низменностях.

В октябре на дальневосточной и частично в сибирской частях рассматриваемой территории наблюдается низкая, стремящаяся к нулю температура воды. Границей этой зоны выступает восточная граница бассейна Оби, приблизительно до Полярного Круга, а также граница бассейна Усы, одного из крупнейших правых притоков р. Печоры. Самые теплые речные воды наблюдаются в бассейнах Северной Двины и Онеги, в Карелии, на реках Коле, Умбе и реках бассейна оз. Имандра на Кольском полуострове.

Заметим, что стандартное отклонение температуры воды во все месяцы тёплого периода года весьма мало 1-3°C.

Формирование температуры воды в реках под влиянием температуры воздуха, особенно на месячном масштабе времени, считается установленным фактом [Соколова, 1951; Garner, Hannah, 2015; Ficklin et al., 2023], однако линейность данной связи в Арктике ранее не

проверялась. Анализ показал, что линейная связь температуры воды и температуры воздуха в среднемесячном временном масштабе в наибольшей степени выражена в июле-сентябре, в большей степени в европейской части рассматриваемой территории (Рисунок 3.10).

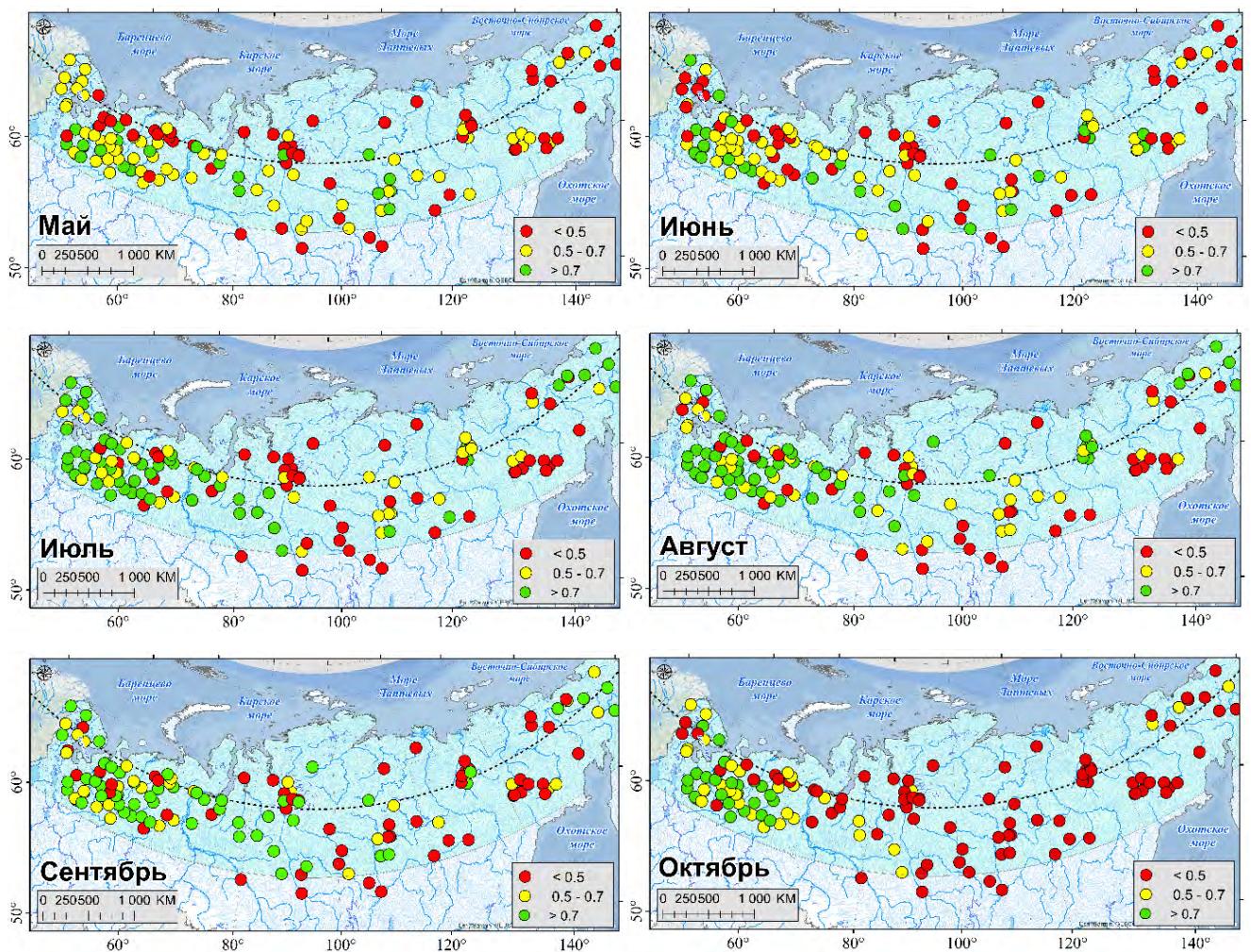


Рисунок 3.10. Коэффициенты корреляции температуры воды и воздуха (ближайшие узлы ERA5) в отдельные месяцы в период 1961-2021 гг.

В мае, июне и октябре в азиатской части рассматриваемой территории происходит разрушение и формирование ледовых явлений, а в мае и июне происходит значительное изменение объема водной массы при прохождении половодья. Линейная связь среднемесячной температуры воздуха со среднемесячной температурой воды с $r < 0,5$ выявлена в районах субарктического климата (реки плато Пutorана, гор Барынга, Анабарского нагорья, Оленёкского хребта), а также в горных районах Северо-Востока. Указанные территории также характеризуются значительным распространением ММП.

Оценка связи среднемесячной температуры воды со среднемесячной температурой воздуха на водосборе (полученной по узлам реанализа ERA-5) показала, что достаточно тесные связи этих величин формируются только на отдельных реках Севера ЕТР.

Сроки появления льда и установления ледостава на реках российской Арктики достаточно тесно связаны ($r > 0,72$) с температурой воды в сентябре и преимущественно в октябре (Рисунок 3.11). Связь температуры воды и сроков ледовых явлений осенью несколько более тесная, чем весной. Связь со сроками установления ледостава менее тесная, чем со сроками появления льда. Отметим, что при сравнительно тесных связях среднемесячной температуры воды и сроков формирования и исчезновения ледовых явлений, формирование температуры воды линейно мало зависит от температуры воздуха, особенно в Сибири, как в мае-июне, так и в сентябре-октябре, что говорит, с одной стороны, о вероятно сложном многофакторном формировании температуры воды в этот период, а с другой стороны, позволяет предположить достаточно большую роль транзита тепла из расположенных южнее регионов.

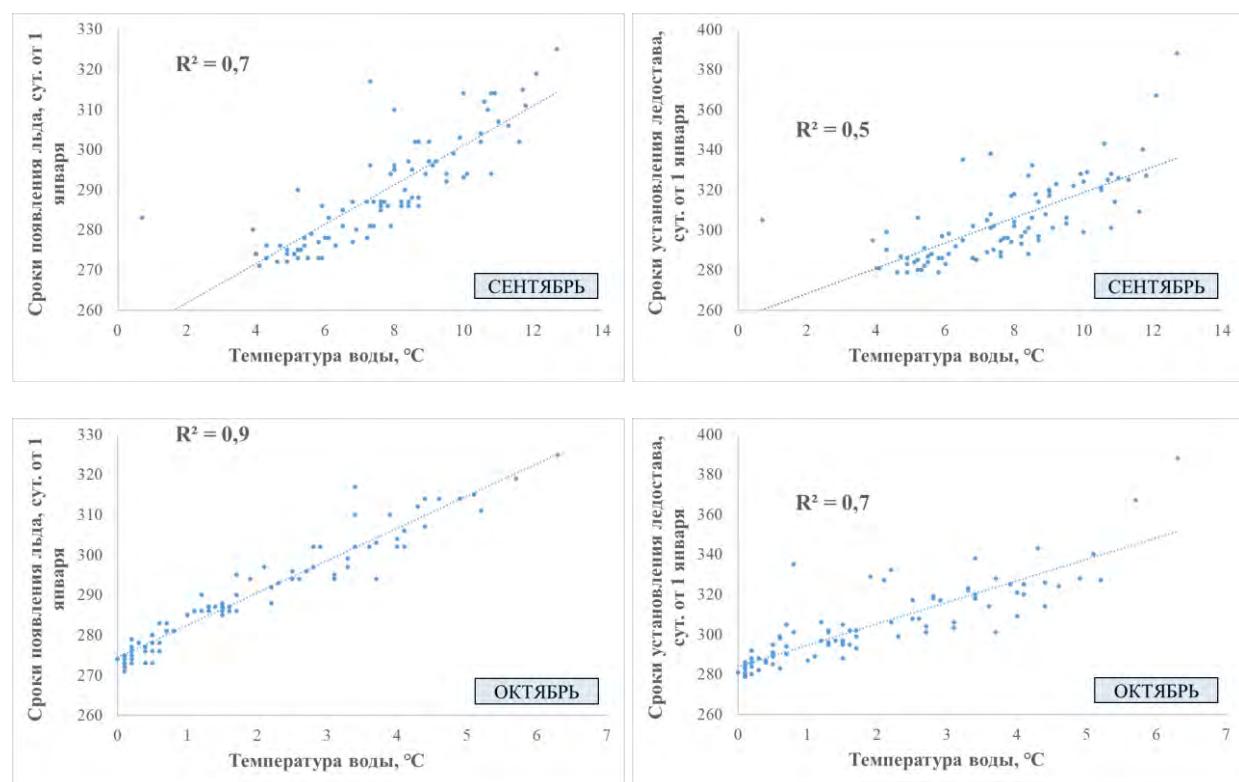


Рисунок 3.11. Связь температуры воды в сентябре (верхний ряд) и температуры воды в октябре (нижний ряд) со сроками появления льда (левый столбец) и сроками установления ледостава (правый столбец)

Важно отметить, что линейной связи сроков формирования ледовых явлений с температурой воздуха на среднемесячном и декадном масштабах времени практически не выявлено (Рисунок 3.12), в отличие от связи сроков исчезновения льда с температурой воздуха на тех же масштабах времени.

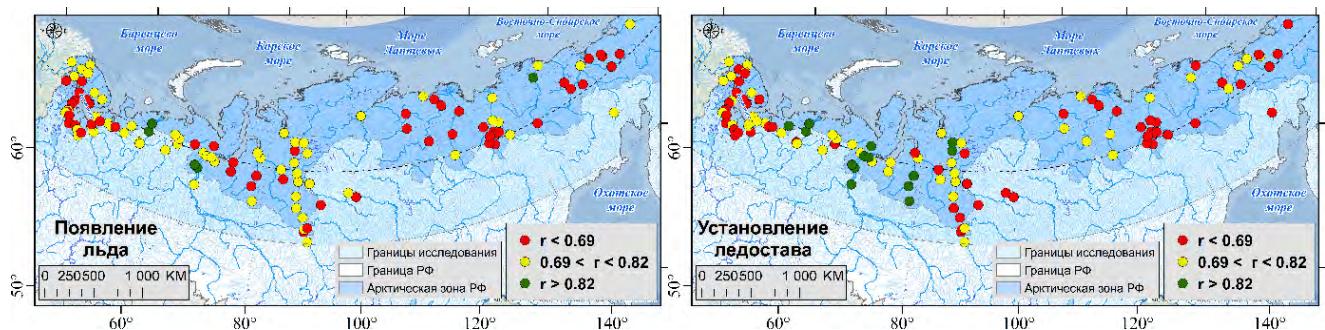


Рисунок 3.12. Максимальный выявленный коэффициент корреляции сроков появления льда (слева) и установления ледостава (справа) со среднемесячной и среднедекадной температурой воздуха (1961-2021)

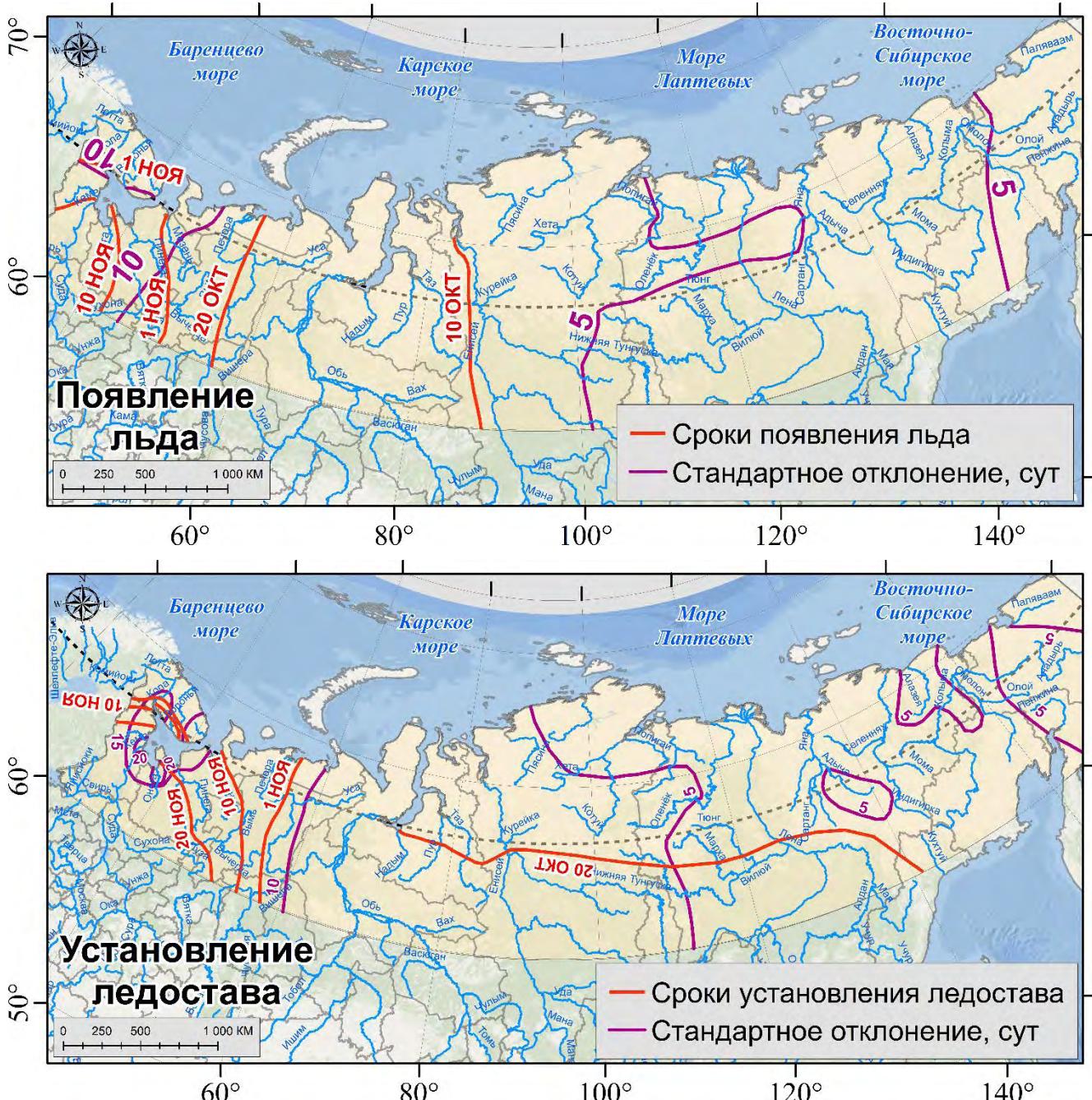


Рисунок 3.13. Современные (после переломных лет) сроки и стандартное отклонение сроков появления льда (сверху) и установления ледостава (снизу)

Появление льда на реках начинается в первую декаду октября практически на всей рассматриваемой территории восточнее Енисея. На Западно-Сибирской равнине и в Уральских горах ледообразование начинается во второй декаде октября (Рисунок 3.13).

Стоит отметить, что на полуостровах Таймыре, Ямале и Гыданском, вероятно, появление льда происходит в более ранние сроки, но данные территории не освещены наблюдениями. 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. Не исключено, что появление льда в верховьях Кулоя, не освещённых наблюдениями, может происходить позже, чем в низовьях. 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.

В бассейне Онеги и в южной части Карелии наблюдается наиболее позднее ледообразование во второй декаде ноября. Сроки появления льда имеют высокие межгодовые различия только на реках Карелии. Стандартные отклонения здесь достигают 10 суток. Это обусловлено как большими теплозапасами в озёрвидных расширениях и озёрах, которыми данные реки значительно зарегулированы. Сроки появления льда на крупнейших реках отличаются от таковых на средних в пределах ± 10 дней. Различия сроков на средних и малых реках могут быть больше на озёрных реках Карелии, но такие случаи единичны.

Установление ледостава происходит на средних и малых реках российской Арктики в течение одной декады. Волна замерзания распространяется с северо-востока на юго-запад и западнее Уральских гор распространяется субмеридионально. На северо-западе ЕТР волна замерзания распространяется с севера на юг от побережья Баренцева моря к южной границе бассейна Кеми. При этом, на ряде рек Карелии и Кольского полуострова (независимо от величины), ледостав может не устанавливаться или устанавливается в январе-марте на истоках из озёр, на широко распространённых порогах и стремнинах.

Малые стандартные отклонения сроков установления ледостава (до 5 суток) характерны для территорий восточнее границы Средне-Сибирского плоскогорья и Анабарского плато. Стандартные отклонения сроков установления ледостава достигают десяти суток на западных склонах Уральских гор, а максимальная изменчивость сроков установления ледостава наблюдается на реках западного и юго-западного побережья Белого моря.

Сроки установления ледостава на реках различных размеров различаются достаточно мало, в пределах одной декады, на крупнейших реках с большими теплозапасами - обычно позже, чем на средних и малых, что отражено на рисунке 3.14. Для крупнейших рек (площадь водосбора

более 100 000 км²) существует тесная связь сроков установления ледостава с широтой, а для больших рек (площадь водосбора от 50 000 до 100 000 км²) с долготой (нелинейная, описывается полиномом второй степени).

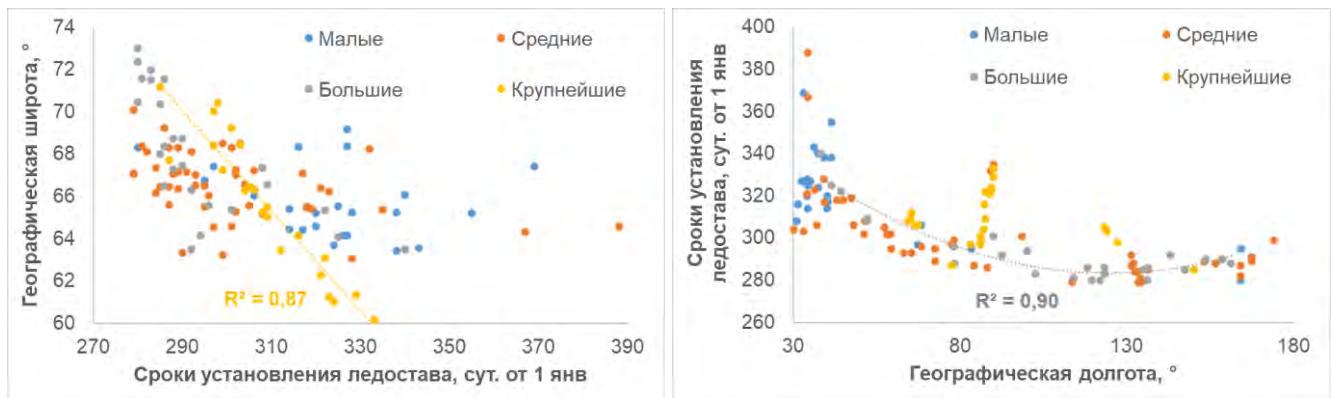


Рисунок 3.14. Сроки установления ледостава на реках различных размеров в зависимости от географической широты (слева) и от географической долготы (справа)

Представленные на рисунках 3.4, 3.6-3.8, 3.13 карты имеют точность для средних величин порядка 3 суток для карт ледового режима и до 1°C для карт температуры воды (оценка точности выполнена методом «выбрасываемых» точек). Точность изолиний стандартного отклонения составляет около 1°C и около одних суток для соответствующих карт.

3.2 Многолетняя изменчивость характеристик ледотермического режима рек

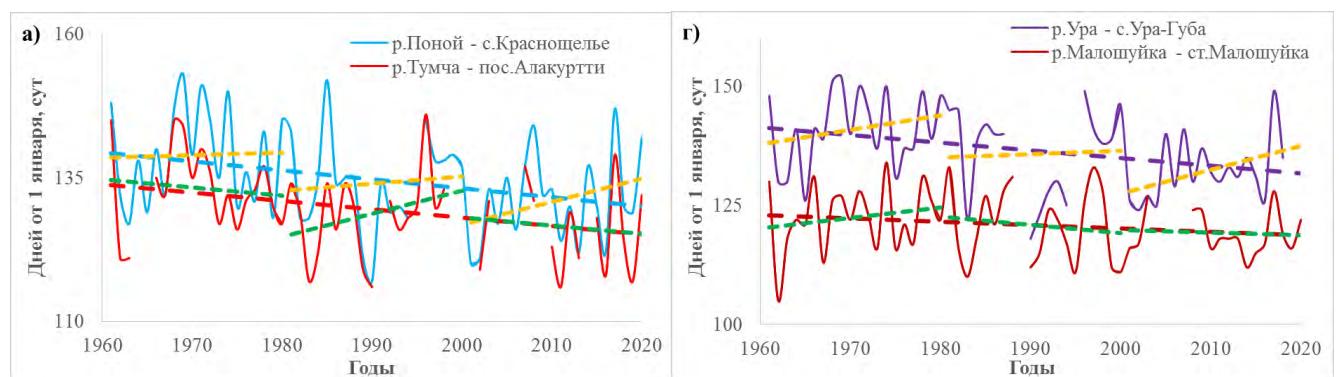
Статистически значимые тренды (по Манну-Кендаллу, $\alpha=0,05$) рассматриваемых характеристик ледотермического режима рек выявлены в основном для многолетнего периода 1961-2021 гг., что отражено в таблице 3.3. Анализ данных этой таблицы демонстрирует, что наибольшее число значимых трендов приходится 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. Исключение составляют три гидрологических поста (среди 90 гидрологических постов, для которых имеются данные как по характеристикам ледового, так и термического режимов) в бассейне Мезени и на левобережье Печоры. 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. Исключения наблюдаются в случаях продолжительного замерзания в Карелии, на отдельных малых и средних реках бассейна

Северной Двины, Мезени, на отдельных средних реках бассейна Пура, на реках Нижняя Тунгуска и Турухан в бассейне Енисея, в низовьях Лены, и верховьях Омолона (приток нижней Колымы).

Таблица 3.3. Процент гидрологических постов со статистически значимыми трендами рассматриваемых характеристик ледотермического режима за период 1961-2021 гг.

Регион	Сроки исчезновения ледовых явлений		Среднемесячная температура воды						Сроки формирования ледовых явлений	
	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
Север ЕТР	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

Многолетние (1961-2021 гг.) статистически значимые тренды сроков ледового режима в осенний период возрастающие, то есть характеризующие смещение сроков на более поздние даты, а тренды в весенний период убывающие, характеризующие смещение на более ранние даты (Рисунки 3.15, 3.16).



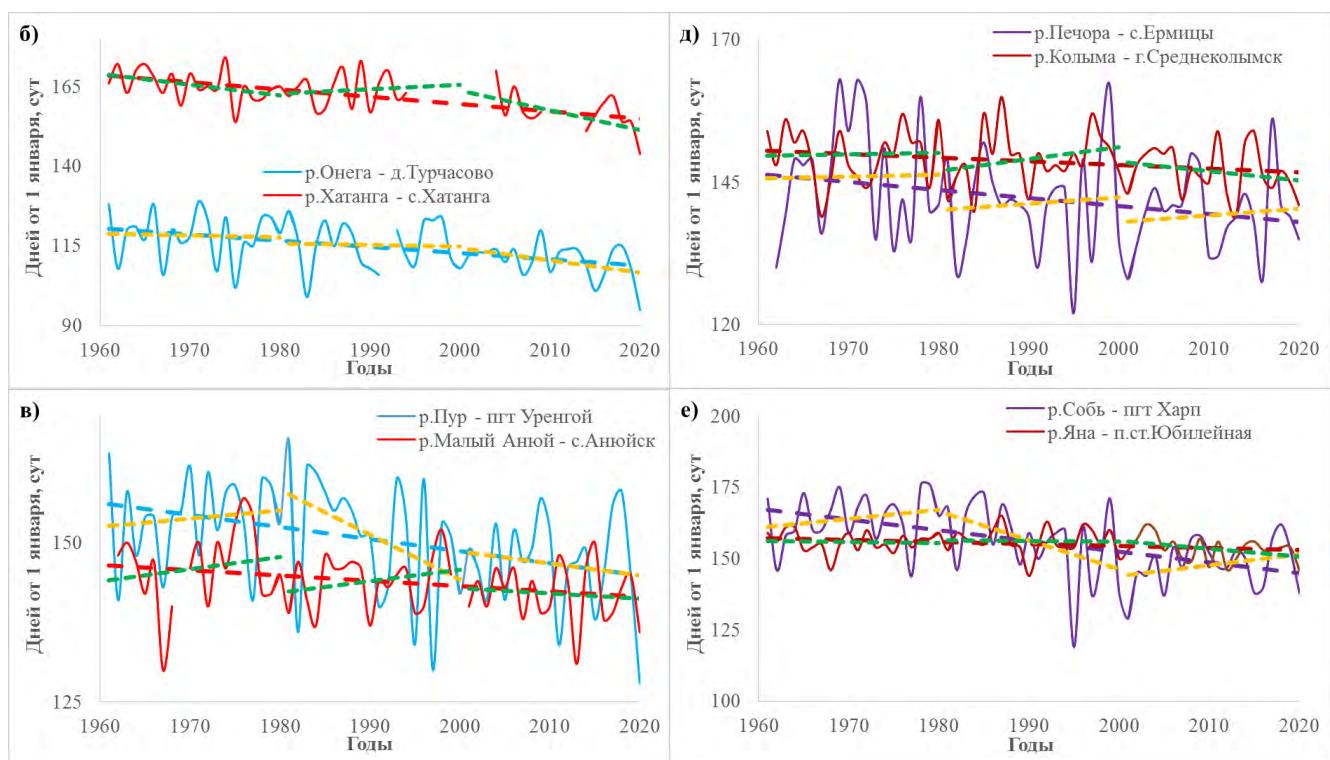
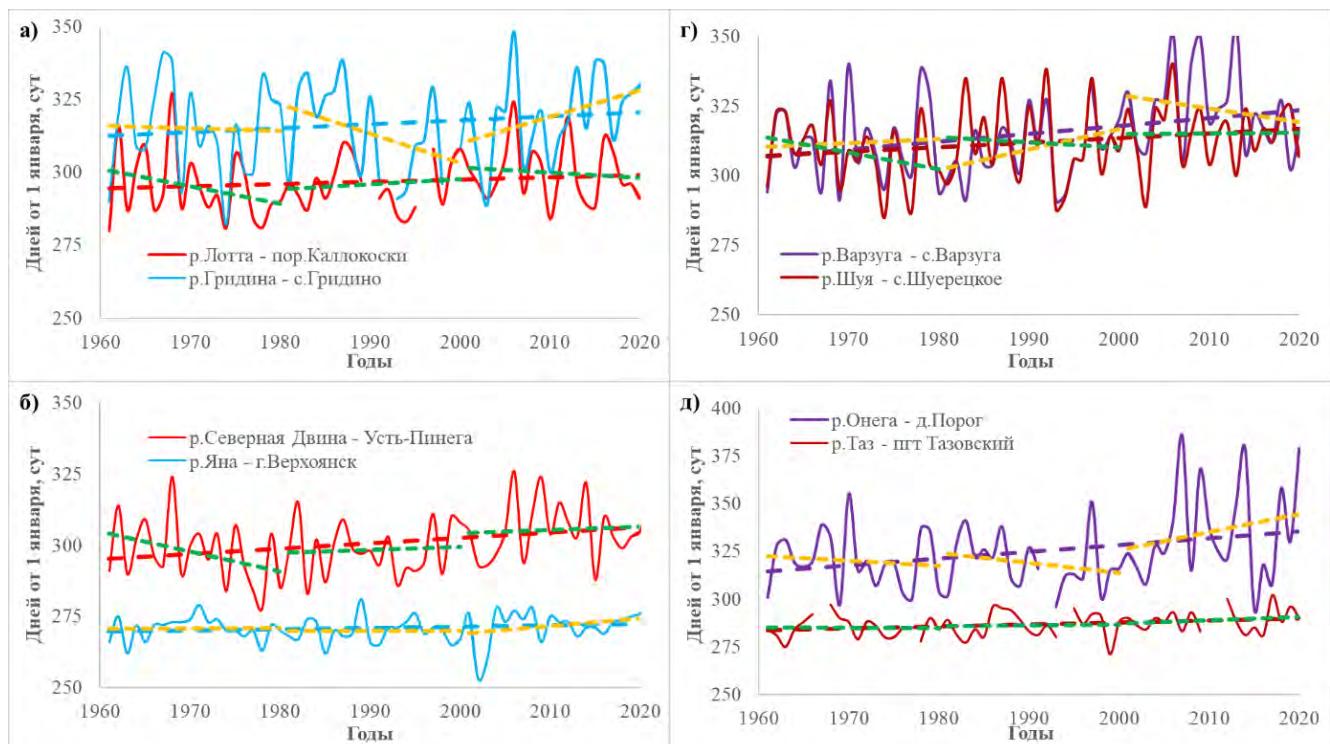


Рисунок 3.15. Многолетний ход на реках российской Арктики сроков начала ледохода (а, б, в) и сроков очищения ото льда (г, д, е). Мелкой штриховкой линиями показаны тренды за 1961-1980 гг., 1981-2000 гг., 2001-2021 гг. Крупной штриховкой показаны тренды за 1961-2021 гг.

Выявлены лишь единичные значимые тренды на более коротких (20-30 лет) периодах, что связано с достаточно большими межгодовыми колебаниями сроков формирования и исчезновения ледовых явлений.



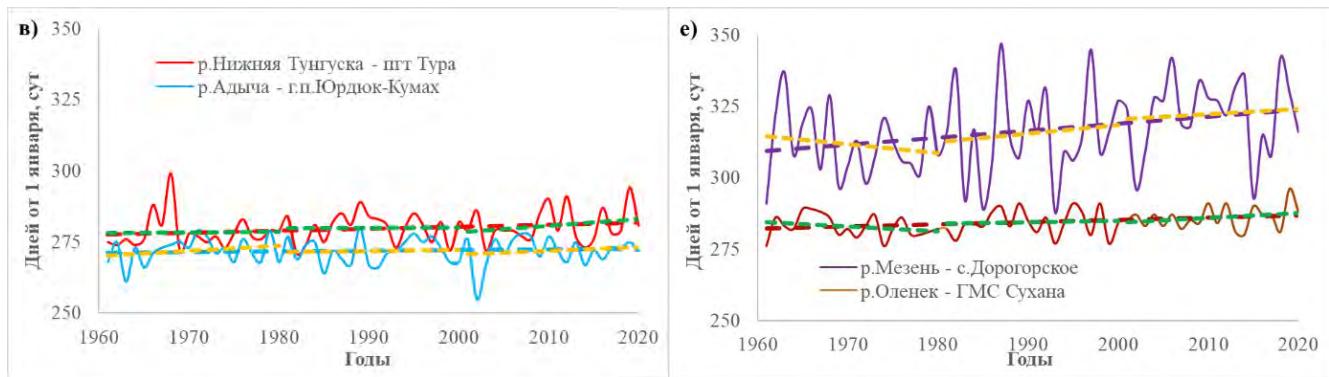


Рисунок 3.16. Многолетний ход на реках российской Арктики сроков появления льда (а, б, в) и сроков установления ледостава (г, д, е). Мелкой штриховкой показаны тренды за 1961-1980 гг., 1981-2000 гг., 2001-2021 гг. Крупной штриховкой показаны тренды за 1961-2021 гг.

Большая часть многолетних (1961-2021 гг.) трендов среднемесячной температуры воды – возрастающие, особенно, как уже было отмечено, в мае-июне и сентябре-октябре. В ряде случаев, особенно в период наиболее высокой температуры воды (июль-август) в дальневосточной части рассматриваемой территории наблюдаются многолетние тренды снижения температуры воды (Таблица 3.4).

Таблица 3.4. Процент гидрологических постов со статистически значимым многолетним убывающим трендом для рядов температуры воды в реках после переломных лет

Регион	Температура воды					
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Северо-Восток	7	13	17	10		
Лена	4		2	1	1	1
Енисей			5	8		
Север Западной Сибири			3	3	3	
Север ETP			1			
Карелия				8		
Кольский полуостров						

Наибольшее количество гидрологических постов с подобными трендами выявлено в верховьях Колымы и непосредственно на ней. Отдельные гидрологические посты с подобными нисходящими трендами выявлены в бассейне Вычегды. Отметим, что для рек с трендами охлаждения температуры воды в мае-июне и сентябре-октябре в базе данных о ледовых явлениях наблюдений нет и особенности связи значимых трендов термического и ледового режимов не выявлены.

После переломных лет количество выявленных статистически значимых трендов в рядах характеристик ледотермического режима резко уменьшается (Таблица 3.5). Наклон линии тренда

(не обязательно значимого) при этом меняется относительно многолетнего периода на большинстве гидрологических постов в 2-3 раза, а в отдельных случаях в 20-30 раз как для сроков ледовых явлений, так и для температуры воды.

Таблица 3.5. Процент гидрологических постов со статистически значимыми трендами характеристик ледотермического режима за период от переломного года до 2021 г.

Регион	Сроки исчезновения ледовых явлений		Среднемесячная температура воды						Сроки формирования ледовых явлений	
	Начала ледохода	Очищения от льда	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Появления льда	Установления ледостава
Северо-Восток			10		3	3		10		17
Лена	7	4	8	9	5	2	9	4		7
Енисей	5	9	8	11	11	8	3	5		9
Север Западной Сибири										
Север ЕТР					10		6	1	13	9
Карелия		9				8			18	
Кольский полуостров				20				10		

После переломных лет значимые тренды сроков ледовых явлений выявлены на Севере ЕТР на малых и небольших средних реках (площадь водосбора до 10 тыс. км²), а в азиатской части российской Арктики на крупнейших и больших реках, в первую очередь на Енисее и Колыме, что может быть косвенно связано с изменениями стока воды новыми водохранилищами, введёнными в эксплуатацию после 2010 г.

Значимые возрастающие тренды температуры воды после переломных лет выявлены на средних и больших реках. Отметим, что значимые отрицательные тренды выявлены в бассейнах Ваги и Вычегды, а также на малых притоках Белого моря между реками Онега и Северная Двина. Также отрицательные тренды после переломных лет выявлены для летнего периода на горных участках рек восточнее Енисея, преимущественно на больших реках: Яне, Оленёке.

Значимым трендам температуры воды после переломных лет не обязательно соответствуют статистически значимые тренды в многолетнем периоде (1961-2021 гг.). Для случаев отрицательных трендов температуры воды после переломных лет в многолетнем периоде тренды практически во всех случаях не выявлены, или в малом количестве случаев выявлены положительные (Рисунок 3.17).

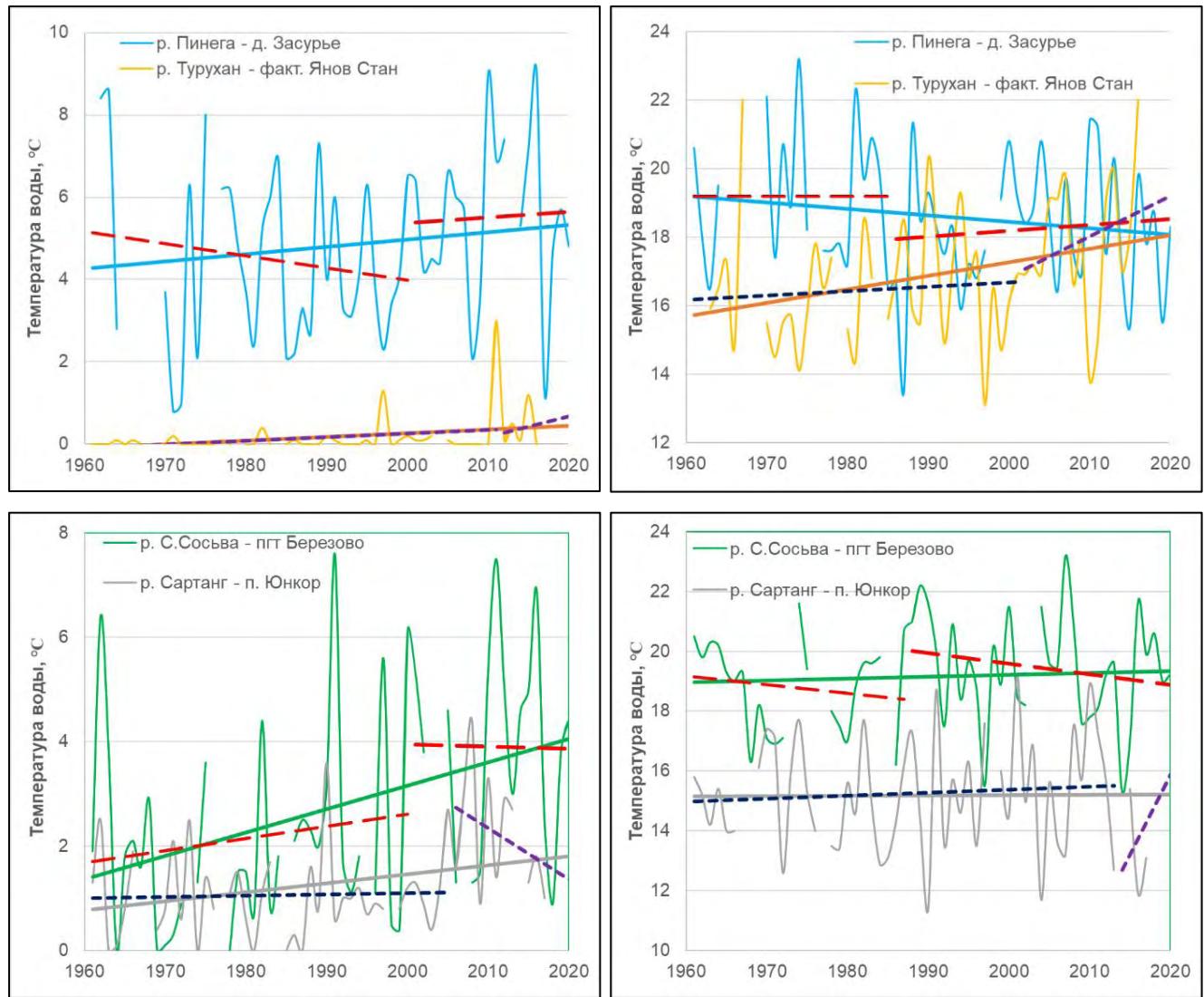


Рисунок 3.17. Тренды температуры воды за периоды 1961-2021 гг. до и после переломного года в мае (левый столбец) и июле (правый столбец) на средних реках различных регионов АЗР: Пинеге (приток Северной Двины), Северной Сосьве (приток Оби ниже Иртыша), Турухане (приток Енисея ниже Нижней Тунгуски), Сартанге (правая составляющая Яны)

Важно заметить, что на разных участках больших рек могут наблюдаться разнонаправленные тренды как в многолетнем (1961-2021 гг.) периоде, так и после переломных лет, что связано с локальными условиями на этих реках и, вероятно, влиянием притоков.

Величины изменений характеристик сроков исчезновения ледовых явлений в большинстве случаев невелики. Сроки начала весеннего ледохода и очищения ото льда сместились на более ранние на большинстве рек на величины до 10 суток после переломных лет.

Большие величины изменений характерны для равнин западнее Енисея и приморских низменностей моря Лаптевых, меньшие (до 5 суток) для горных рек дальневосточной части рассматриваемой территории (Рисунок 3.18).

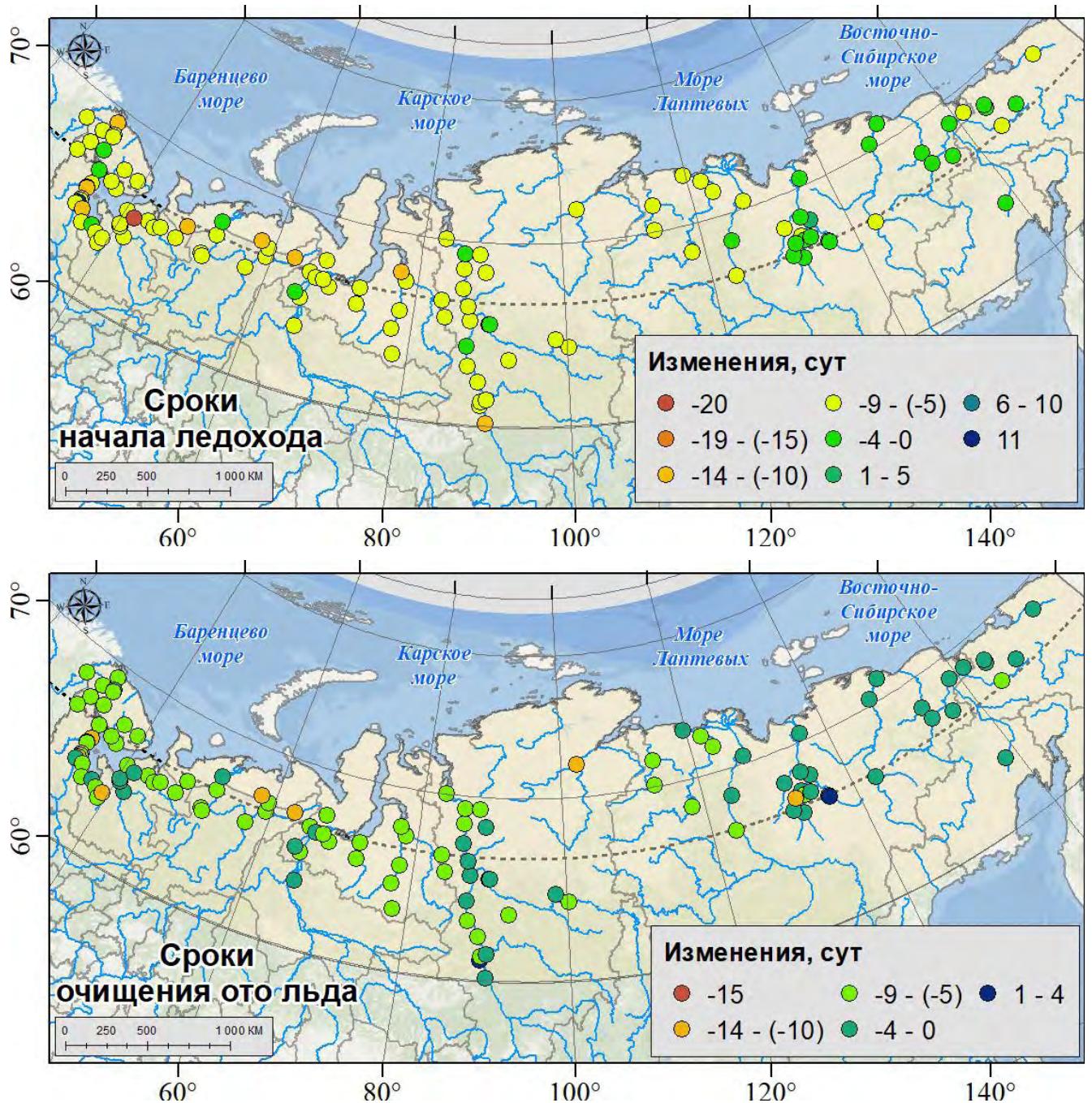


Рисунок 3.18. Изменения сроков начала ледохода (вверху) и сроков очищения ото льда (внизу)³

Продолжительность вскрытия на реках изменилась практически повсеместно в пределах ± 3 дней. Мода и среднее изменений продолжительности вскрытия при этом равны нулю.

³ Здесь и далее на картах изменений приводятся изменения после переломного года относительно периода от 1961 г. до переломного года, все величины изменений на картах больше по модулю величин стандартной ошибки вычисления среднего арифметического за периоды до и после переломных лет и в 1961-2021 гг.

Наибольшие изменения наблюдаются на Енисее ниже устья Ангары, а также на Хантайке в истоке из озера.

С величинами изменений рассматриваемых сроков весенних ледовых явлений не связаны линейно ни величины изменений температуры воды в мае-июне, ни средняя температура воды в эти месяцы. Поскольку переломные годы отличаются у различных рассматриваемых характеристик ледотермического режима, был проведён дополнительный анализ для одинакового периода 1991-2021 гг., однако линейной связи и в этом случае выявлено не было.

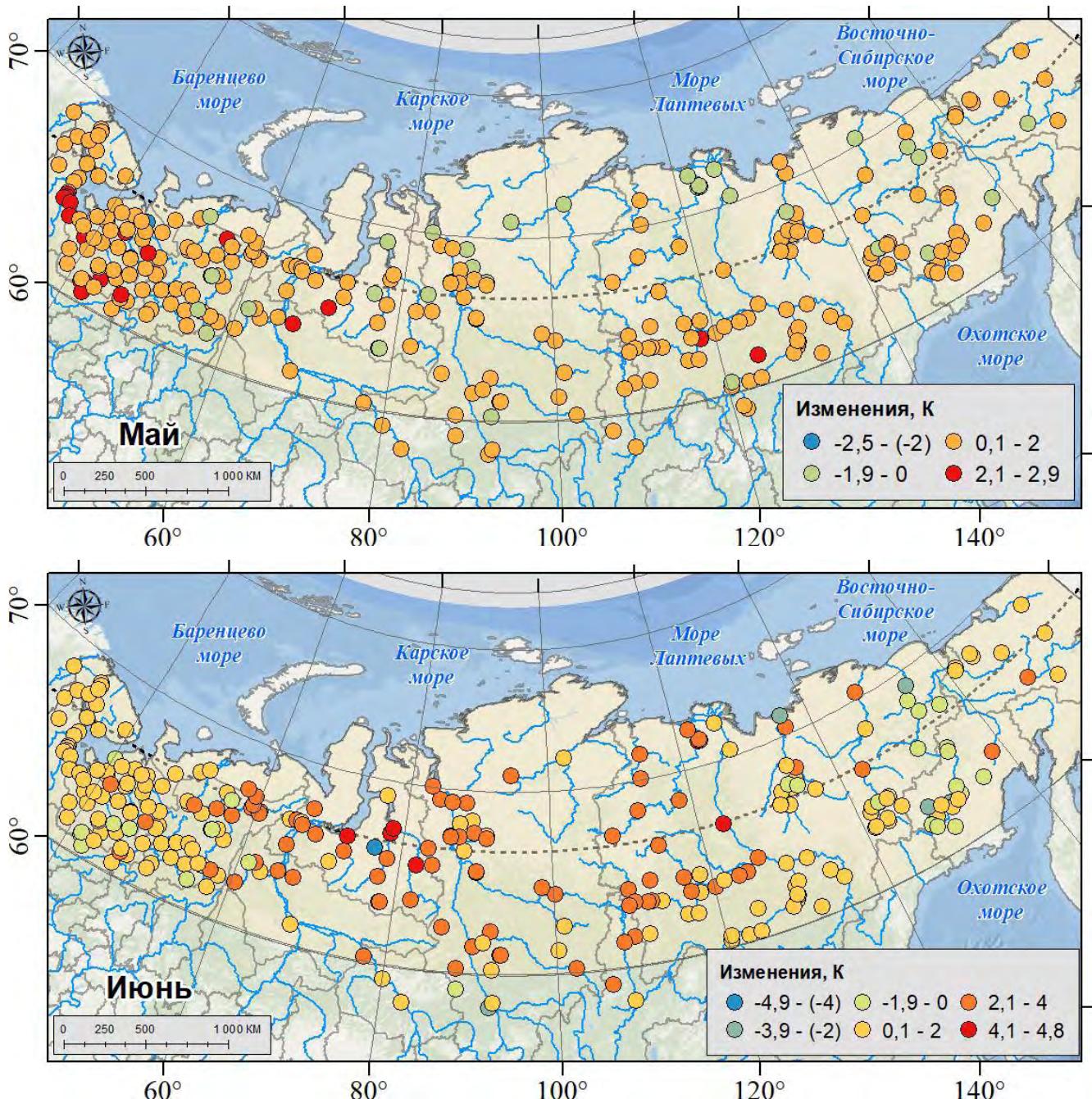


Рисунок 3.19. Изменения температуры воды в мае (вверху) и в июне (внизу)

Изменения температуры воды в мае и июне приведены на рисунке 3.19. В мае они преимущественно положительные и составляют 0,1-2 К. Наибольший рост характерен для рек

Карелии, рек бассейна Онеги, преимущественно средних, малых рек бассейна Ваги и отдельных малых рек бассейна Мезени (на участках интенсивных рубок леса), в верховьях Пинеги, на р. Ижме (левый приток Печоры), а также отдельных средних рек бассейнов Оби и Надыма, граничащих друг с другом на западных склонах Сибирских Увалов, а также отдельных больших и средних рек бассейна Вилюя. Все участки максимального изменения температуры воды в мае расположены южнее Полярного круга, для большинства из них характерны значимые многолетние (положительные) тренды температуры воды в мае, и их отсутствие после переломных лет. Значительный рост температуры воды может быть обусловлен локальными факторами. Переломные годы на данных реках разнообразны, и не могут быть отнесены к какому-либо конкретному периоду.

Снижение температуры воды характерно в мае для средних рек Северо-Сибирской низменности, для ручьёв (с площадью водосбора менее 50 км^2) в бассейнах Яны и Индигирки (в горных их частях); для очень малых (с площадью водосбора менее 100 км^2) рек верховьев Колымы, для средних рек-притоков Енисея, стекающих с плато Пutorана (Курейка) и протекающих через озёра; на средних реках в восточной части Сибирских увалов. При этом, для большей части данных участков рек характерны положительные многолетние тренды, но после переломного года тренды либо отсутствуют, либо наблюдаются значимые отрицательные, как на отдельных малых реках в бассейне Колымы. Какой-либо группировки переломных лет не выявлено.

Изменения температуры воды в июне на большей части рассматриваемых гидрологических постов составляет до 2 К: на Севере ЕТР за исключением бассейна Усы (наиболее холодной части Севера ЕТР), в бассейне Лены выше устья Вилюя, на ряде рек бассейна Вилюя, на ряде рек верховьев Яны и Индигирки, а также Чукотки. Более значительный рост температуры воды, на величину до 4 К наблюдается на реках бассейна р. Уса, на реках Западно-Сибирской равнины, Северо-Сибирской низменности, Средне-Сибирского плоскогорья, Северо-Восточной низменностей. Наиболее значительный рост температуры воды в июне происходит не на тех участках, на которых значительной рост наблюдается в мае. Величина изменений температуры воды в июне выше, чем в мае. Наибольший рост температуры воды наблюдается в бассейнах Пура и Таза, а также в низовьях Енисея и среднем течении Лены, однако, на крупнейших реках данный прирост может быть связан с многолетней трансформацией берегов.

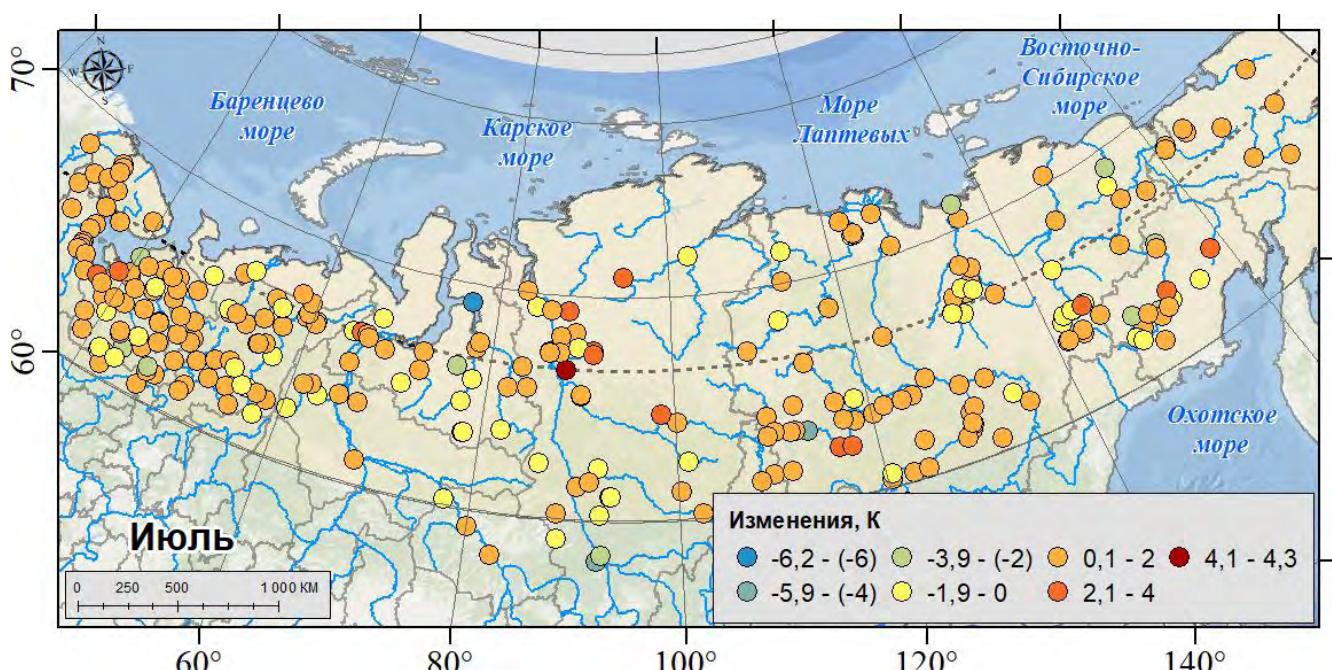
Снижение температуры воды в июне характерно для реки Колымы, как минимум в верхнем и среднем её течении, что обусловлено регулированием стока водохранилищами. Снижение температуры воды также характерно для одной малой реки в бассейне Вычегды, для Енисея ниже впадения зарегулированной реки Ангары, для низовий Яны и отдельных малых рек

в её верховьях, а также для Алазеи. При этом, на некоторых реках, для которых после переломных лет выявлены снижающиеся тренды, в многолетнем периоде (1961-2021 гг.) выявлены возрастающие тренды. Наибольшее охлаждение наблюдается на реке Седе-Яхе в г. Уренгой и, скорее всего, данное снижение обусловлено спецификой температуры воды на городских территориях.

Таким образом, в период нагрева вод, совпадающий по большей части с периодом половодья на реках, наиболее значительные изменения температуры воды происходят на реках, стекающих с Сибирских Увалов, в криолитозоне Западной Сибири, а также в горной криолитозоне бассейна Колымы, причём на Колыме происходит преимущественно охлаждение, что может быть связано с усилением таяния многолетних наледей в бассейнах или усиливающегося таяния многолетнемёрзлых пород.

Изменения температуры воды в период максимального нагрева, в июле и августе показаны на рисунке 3.20. Рост температуры воды, как в июне, так и в мае составляет в пределах 2 К на большей части рассматриваемых участков рек.

Увеличение температуры в эти периоды несколько менее выражено, однако снижение температуры воды на отдельных участках рек выражено в большей степени, чем в июне. Самый значительный рост температуры воды в июле выявлен на Курейке ниже Курейского водохранилища (4,3 К), а также на Непе, притоке верховий Нижней Тунгуски, однако это изменение (3,2 К) может быть связано с трансформацией русловых условий, поскольку гидрологический пост находится в излучине реки. При этом только на Непе выявлены значимые тренды (положительные) для многолетнего периода и после переломного года.



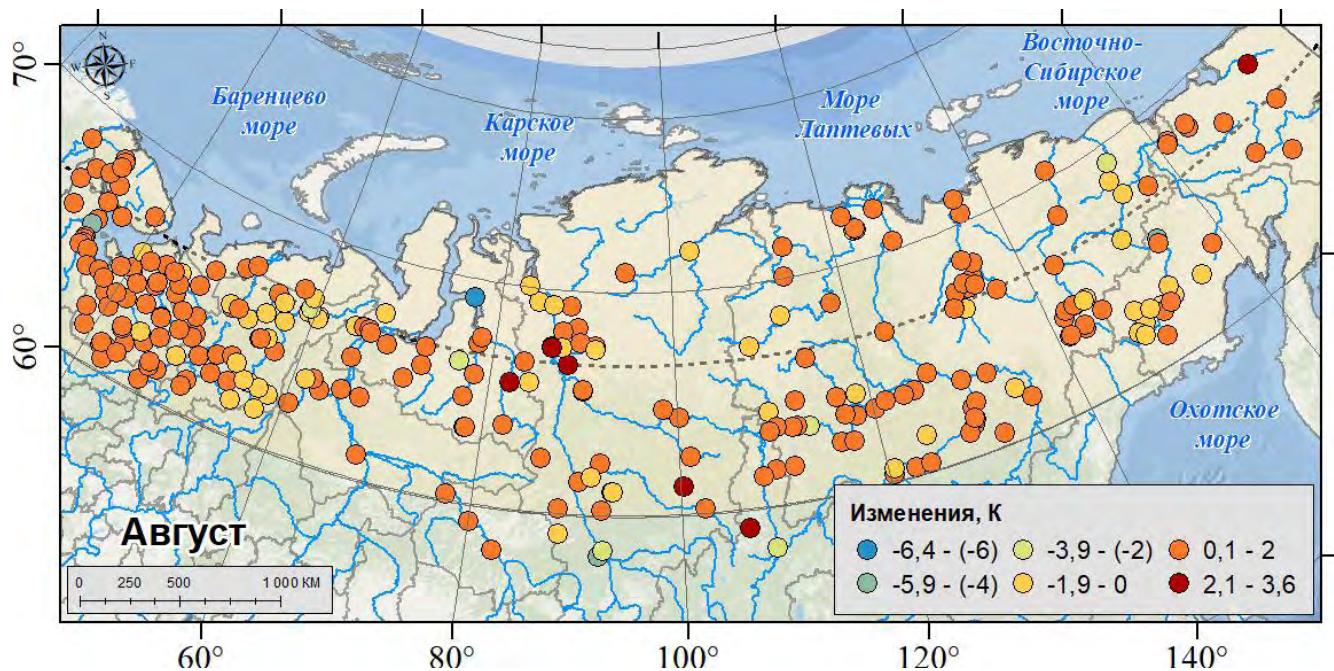


Рисунок 3.20. Изменения температуры воды в июле (вверху) и в августе (внизу)

Снижение температуры воды в июле выражено более значительно после переломных лет. Самое существенное снижение наблюдается на реке Антипаюта-Яхе, впадающей с севера в Тазовскую губу. Реки со снижающейся температурой воды можно условно разделить на несколько групп, в первую очередь на реки Севера ЕТР и на реки азиатского сектора рассматриваемой территории.

Для Севера ЕТР реки со снижением июльской температуры воды можно также разделить на несколько групп. Во-первых, это Печора до, как минимум, впадения Щугор. Река здесь протекает по болотистой местности, принимает притоки, стекающие с Полярного Урала и интенсивно меандрирует. Скорее всего, снижение температуры воды происходит вследствие комплекса причин, таких как медленное оттаивание болот, изменения водности в районе гидрологических постов и поступления более холодных вод со снежников Уральских гор. При этом на самих притоках, в их низовьях, по крайней мере на средних реках, величины изменений меньше, чем величины ошибок вычислений средних арифметических. При этом в верховьях Печоры (при площади водосбора 4430 км²) наблюдается значимый положительный многолетний тренд, а ближе к границе верхнего и среднего течений (при площади водосбора 35600 км²) наблюдается значимый отрицательный многолетний тренд.

Ко второй группе на Севере ЕТР можно отнести реки карстовых районов участки малых и средних рек в бассейне Вычегды, а также реки Устью, Емцу и Пинегу в верховьях. Снижение температуры отмечается и на отдельных малых реках побережья Белого моря.

Среди рек азиатского сектора со снижением температуры воды в июле в первую очередь выделяются зарегулированные большие реки: Колыма, Вилой, Енисей и Обь в средних своих

течениях. Здесь снижение температуры воды весьма вероятно обусловлено регулированием стока. К следующей группе относятся реки условно южной границы криолитозоны, в лесных ландшафтах возвышенностей: верховья реки Северная Сосьва (Северо-Сосьвинская возвышенность), Амня (Сибирские Увалы). К этой же группе можно реки средних и нижних частей бассейнов обеих Тунгусок, а также притоков Енисея: Большого Пита и Большой Хеты, протекающих в схожих с Тунгусками природных условиях.

В схожую группу можно с определённой условностью отнести участки притоков средней Лены и Алдана: Наманы, Олёкмы и Амги. В бассейнах этих рек, однако, большее распространение имеют ММП и существуют наледи, режим таяния которых может влиять на термический режим рек в июле. К следующей группе могут быть отнесены участки больших и средних рек, стекающих со Средне-Сибирского плоскогорья по Северо-Сибирской низменности: низовья Анабара и река Буур (приток Оленёка). Здесь преобладает переход от возвышенного рельефа к низменному и преобладает сплошное распространение многолетнемёрзлых пород и тундровые биомы. Для обеих рек характерно достаточно интенсивное меандрирование, что может быть фактором изменения условий в районах гидрологических постов, помимо потенциального таяния многолетнемёрзлых пород и изменений стока воды. К последней группе стоит отнести реки верховьев Яны, Индигирки и Колымы, охлаждение которых, вероятно, связано с таянием снежников и наледей.

Изменения температуры воды в августе, также как и в другие месяцы преимущественно составляют менее 2 К. Особенности пространственного распределения величин изменений среднемесячной температуры воды сходны с таковыми в июле. Самые большие изменения температуры воды произошли на Курейке, а также на Непе. При этом ни многолетних, ни после переломного года значимых трендов не выявлено. Значительные изменения отмечены также в низовьях Таза и Енисея.

Реки со снижающейся температурой воды в августе попадают в те же выделенные группы, что и в июле, но их количество сокращается. В бассейне Печоры в августе выявлено снижение температуры воды на Усе и её притоках. На реках лесной зоны Западно-Сибирской равнины снижения температуры воды в августе, в отличие от июля, не наблюдается, что может быть связано с завершением таяния снежников в горах, и прогреве болотных вод к августу. Снижение августовской температуры воды также выявлено на малых и небольших средних притоках обеих Тунгусок и вдоль Енисея. Интересно, что в Антипаута-Яхе, в которой в июле наблюдался наибольший рост температуры воды, в августе наоборот начинается её снижение. Обусловленность данного явления требует дополнительных исследований. В целом, некоторая перестройка набора гидрологических постов со снижением температуры воды, по-видимому,

связана в азиатской части рассматриваемой территории, а также на Усе с более поздним завершением половодья, окончание которого приходится на ряде средних и больших рек на июль. Величины изменений температуры воды в сентябре и октябре приведены на рисунке 3.21.

Как и в предшествующие месяцы тёплого периода года в сентябре величины изменений температуры воды составили до 2 К на большей части рассматриваемых речных участков. При этом максимальные изменения составили всего 2,4 К в низовьях зарегулированной водохранилищами реке Кеми (Карелия).

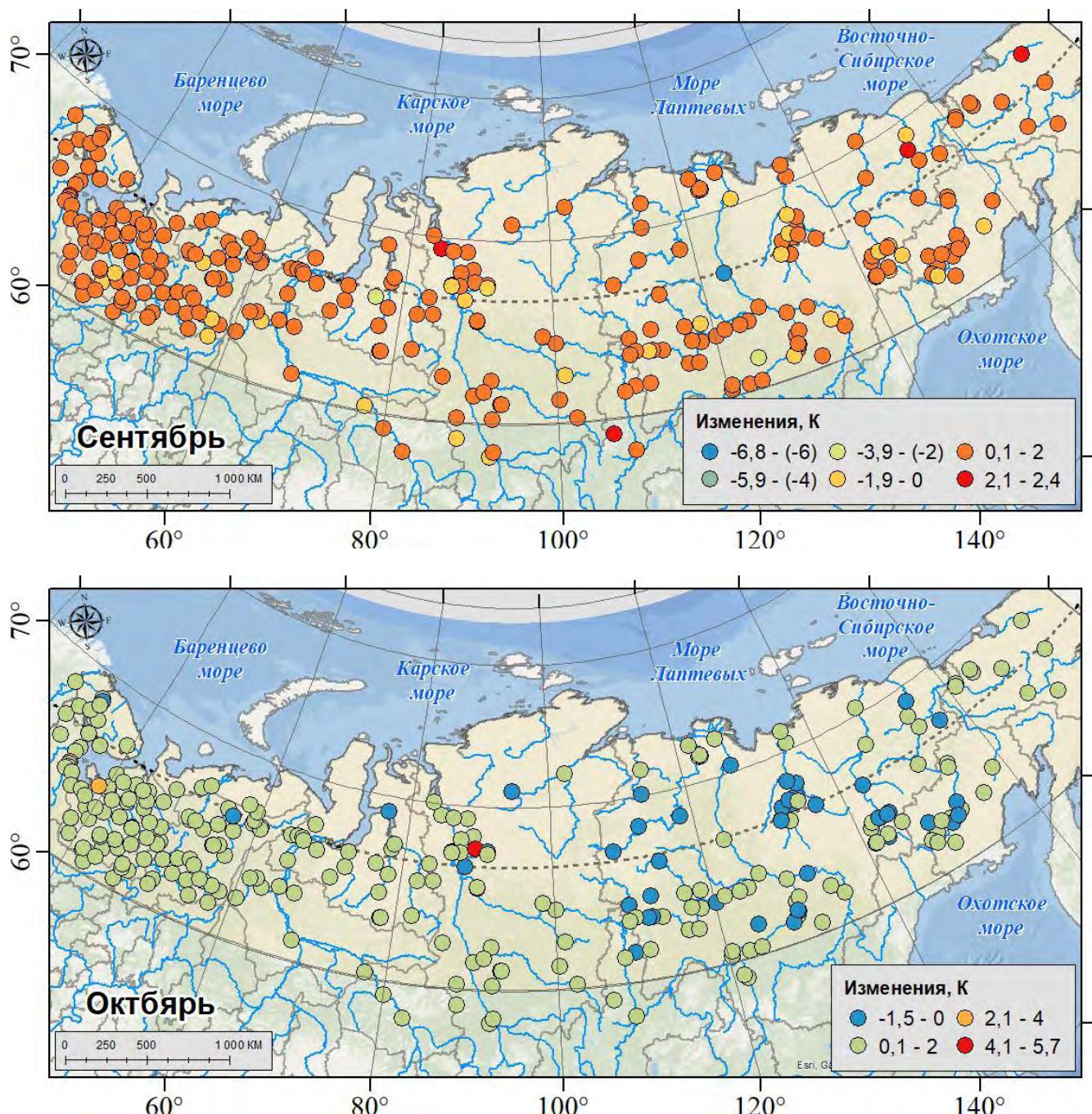


Рисунок 3.21. Изменения температуры воды в сентябре (вверху) и в октябре (внизу) в период после переломных лет относительно периода с 1961 г. до переломного года

Снижение температуры воды наблюдается только на 15 гидрологических постах. Четырнадцать из них находятся в азиатском секторе рассматриваемой территории. Практически на всех таких постах наблюдалось снижение температуры воды и в другие месяцы. Снижение температуры воды наблюдается в сентябре на отдельных реках верховий Колымы в горной криолитозоне; на малых реках бассейнов Яны и Индигирки и реках бассейна средней Лены, где, по-видимому, продолжается до осени стаивание наледей и снежников. Снижение температуры воды наблюдается на малых реках в районе г. Игарка, возможно в силу антропогенного влияния, и на Енисее. Кроме того, снижается температура воды на Сэдэ-Яхе в г. Новый Уренгой.

В октябре температура воды на большинстве рек выросла также в пределах 2 К. При этом значительный рост отмечен вновь на Кеми (2,5 К), а наибольший - на Дэгене, малом притоке Курейского водохранилища, на 5,4 К. Объяснение последнего феномена требует дополнительных исследований. Снижение температуры воды в основном происходит в верховьях Колымы, в бассейне Алдана, на малых реках бассейнов Яны и Индигирки, а также на Хете (крупнейший приток Хатанги), на всём протяжении Курейки, как выше, так и ниже водохранилища, а также на одной малой реке на Кольском полуострове. Отметим, что тренды снижения температуры воды в октябре практически во всех случаях значимы в многолетнем периоде.

С величинами изменений температуры воды в сентябре и октябре линейно не связаны величины изменений сроков появления льда и установления ледостава, как после переломных лет, так и в период 1991-2021 гг.

Величины изменений сроков формирования ледовых явлений на реках в многолетнем разрезе в большинстве случаев сравнительно невелики.



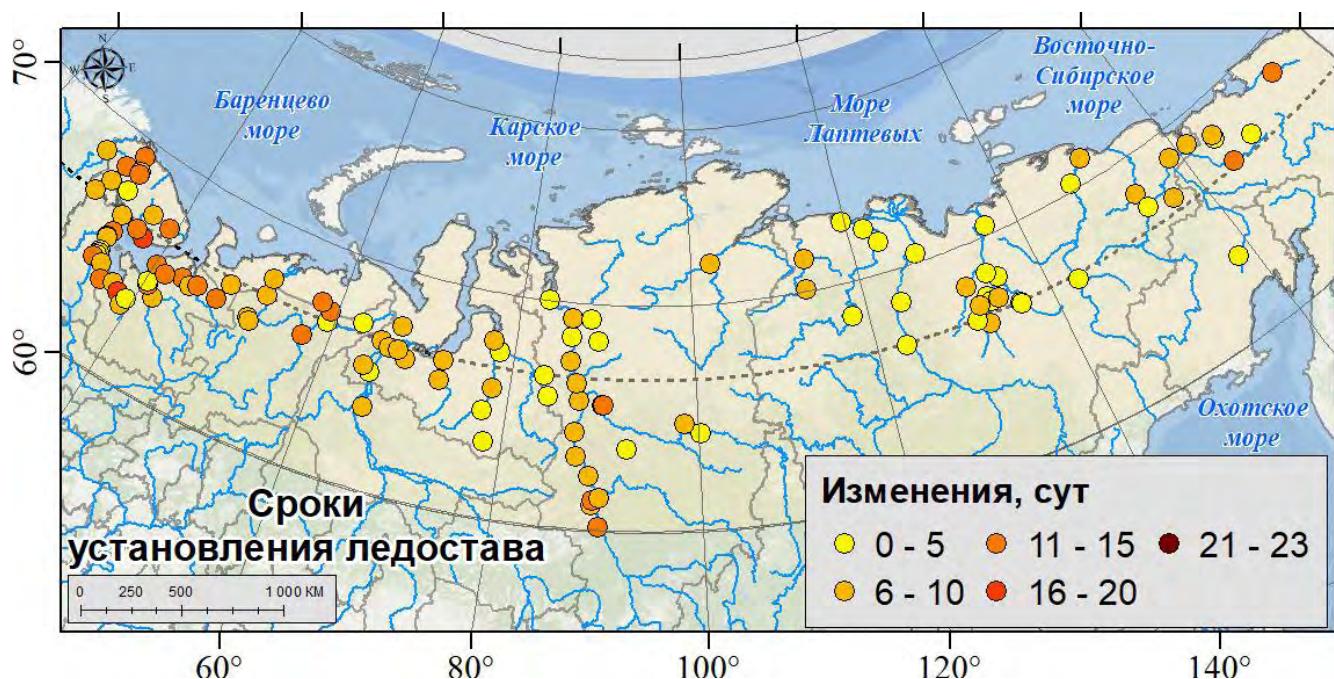


Рисунок 3.22. Изменения сроков появления льда (вверху) и сроков установления ледостава (внизу)

Сроки появления льда и установления ледостава сместились на более поздние на большинстве рек на величины до 10 суток. Большие величины изменений характерны для Севера ЕТР, меньшие - для равнин западнее Енисея и приморских низменностей моря Лаптевых (Рисунок 3.22).

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.

Таким образом, температура воды на реках российской Арктики меняется достаточно мало, в пределах 2 К в последние десятилетия. Среди рек с изменениями в пределах 2 К можно условно выделить малые и средние реки горной криолитозоны, на которых величины изменений сравнительно малы, однако это выделение имеет высокую долю условности, локальные факторы, могут оказывать значительное воздействие на изменения температуры воды. Наибольший рост температуры воды отмечается в период с мая по июнь, т.е. в период половодья. В период максимального нагрева воды в ряде случаев на речных участках с присутствием карста, наледей, вероятно, вытаивания ММП, а также ниже водохранилищ может наблюдаться снижение температуры воды для многолетнего периода. Однако, даже наибольшее снижение и увеличение температуры воды не соответствуют по направлению значимым трендам за период 1961-2021 гг. Изменения сроков появления и исчезновения ледовых явлений составляют в пределах 10 суток,

несколько меньше восточнее Енисея, больше - западнее. Значительные искажения в ледовый режим вносят озёра.

Продолжительность фазы замерзания по большей части сократилась на величину до пяти суток, но в некоторых районах её продолжительность увеличилась. Увеличение продолжительности замерзания в основном составила от одного до трёх суток на востоке Кольского полуострова, в низовьях Северной Двины, Мезени и Печоры (и в нижних частях их бассейнов), в низовьях притоков Оби, стекающих с Полярного Урала, в низовьях рек бассейна Тазовской губы, на Малой Куонамке (правая составляющая Анабара), на Лена, в верховьях Яны, Индигирки, Алазеи, в среднем течении Колымы, а также на Енисее. На отдельных реках Кольского полуострова и бассейна Енисея увеличение продолжительности замерзания достигает 4-12 суток.

Изменения в многолетнем плане величины продолжительности замерзания несколько больше, чем изменения величины продолжительности вскрытия, но только западнее Северо-Сибирской низменности.

Весной интенсивность наблюдаемых изменений как сроков начала ледохода, так и сроков очищения ото льда, определённая с помощью уравнений линейной регрессии, достигает 0,6-2 сут/10 лет в период 1961-2021 гг.

Смещение сроков вскрытия, которое может быть ассоциировано с началом ледохода и сроков очищения ото льда характерно для замерзающих рек Северного полушария. Ряд исследований, базирующихся на рядах данных с серединами XIX, серединами XVII и даже конца XVII вв. демонстрируют, что данный процесс смещения сроков вскрытия рек на более поздние продолжается не одно столетие [Rannie, 1983; Williams, 1970; Magnuson et al., 2000; Kuusisto, Elo, 2000; Takács et al., 2018; Sharma et al., 2016]. Существование разнонаправленных трендов при этом подтверждалось только на данных до 1990-х в России [Soldatova, 1993] и в Северной Европе [Gebre, Alfredsen, 2011]. Полученные в нашей работе оценки интенсивности изменений как сроков начала ледохода, так и сроков очищения ото льда можно назвать средними среди всех оценок изменений сроков начала ледохода и очищения ото льда на реках различных районов Северного полушария [Fukś, 2023], составляющих 1-3 сут/10 лет.

На локальном и районном уровнях полученные оценки характеристик периода вскрытия, в целом, сопоставимы с полученными ранее в других работах. Так, для низовий Печоры (г/п Ермицы и г/п Оксино) получена меньшая продолжительность весеннего ледохода после переломных лет (3-4 суток), чем в период 1991-2021 гг. (6 суток) [Агафонова и др., 2025]. Весенние сроки в районе г/п Салехард в низовьях Оби сместились на более ранние больше на 1-2 дня после переломных лет, чем в период 1976-2017 гг. в сравнении с 1936-2017 гг. [Магрицкий и др., 2019]. Выявленное нами смещение сроков вскрытия на более ранние на Северо-Востоке

России сопоставимо с выявленным для периода после 2000 г. [Землянскова и др., 2024], что объяснимо близкими периодами для вычисления характеристик.

Интенсивность роста температуры воды в отдельные месяцы, определенная по уравнению регрессии (за период 1961-2021 гг.), составляет (при наличии значимого тренда по Манн-Кендаллу при $\alpha=0,05$) от $0,11^{\circ}\text{C}/10$ лет (в июле в Арктической части Западной Сибири это единственный выявленный случай значимого убывающего тренда температуры воды за рассматриваемый период) до $0,74^{\circ}\text{C}/10$ лет (в июне в том же регионе). Интенсивность роста температуры воздуха на метеорологических станциях этого региона по модулю ниже в тот же период: $0,09^{\circ}\text{C}/10$ лет и $0,59^{\circ}\text{C}/10$ лет для июля и июня соответственно. Ситуация, в которой температура воды в многолетнем разрезе увеличивается быстрее температуры воздуха в целом характерна для большей части рассматриваемой территории в теплые месяцы года (Таблица 5.10). Исключение составляют майские и октябрьские температуры воды в азиатской части страны, однако в этой части рассматриваемой территории в данные месяцы среднемесячная температура воды часто около нуля. Обращает на себя внимание и превышение интенсивности роста температуры воздуха над интенсивностью изменений температуры воды почти во все месяцы на Северо-Востоке.

Сопоставление полученных оценок изменений температуры воды в реках, с оценками для регионов, расположенных южнее, показало следующее. В работах [Jurgelénaitė et al., 2012; Jurgelénaitė et al., 2017] показано очень медленное повышение среднегодовой температуры воды на $\pm 0,01-0,02^{\circ}\text{C}/10$ лет (1945-2010 гг.) в реках Прибалтики. Температура воды в этот период повышается со скоростью $\pm 0,02-0,03^{\circ}\text{C}/10$ лет в июле. В гидрографических районах севера европейской части России и севера Западной Сибири фактические средние температуры июля на $1-2^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в странах Балтии, но повышение температуры воды за период 1961-2021 гг. составляло в среднем $0,41-0,49^{\circ}\text{C}/10$ лет, что на порядок больше. В то же время в этом регионе стран Балтии была подтверждена значительная и почти повсеместная тенденция к повышению среднегодовой температуры воды (с использованием тех же технологий измерения) [Latkovska et al., 2016]. На сегодняшний день, насколько известно, не было описано внутригодовое распределение температуры воды и его изменение в течение каждого месяца теплого сезона. В работе [Liu et al., 2005] описываются изменения температуры воздуха в северо-западном Китае и интенсивность этих изменений, которые аналогичны тем, что наблюдаются в южных частях рассматриваемых гидрографических регионов Лена и Северо-Восток.

Анализ долгосрочных наблюдений за температурой воды в Европе и Китае был проведен для многих рек, в основном на основе ежедневных измерений. Интенсивность изменений температуры воды за последние несколько десятилетий, изученная в некоторых районах Китая и Южной Европы, показала, что повышение среднегодовой температуры воды значительно ниже,

чем в некоторых арктических регионах (например, [Pekarova et al., 2008; Arora et al., 2016; Chen et al., 2016; Lorenzo-Gonzalez, 2023]). Анализ многолетних данных по Дунаю с некоторыми его притоками [Pekarova et al., 2008] показал, что среднегодовое повышение температуры воды происходит медленнее, чем повышение температуры воздуха.

Анализ результатов, полученных с помощью глобальных моделей температуры речной воды, является сложной задачей, прежде всего потому, что они в основном предоставляют информацию о среднегодовой температуре [Wanders et al., 2019] или используют данные гидрологических станций только на крупнейших реках [Tokuda et al., 2019]. Однако для среднегодовой температуры воды глобальные модели с высоким разрешением показывают тенденции в Арктическом регионе (1960-2014 гг.), которые аналогичны тем, которые наблюдались для среднемесячной температуры в нашем исследовании (десятие доли градуса), по крайней мере для основных притоков крупных арктических рек. Согласно отчету МГЭИК [IPCC, 2022], температура воды в реках по всему миру в период с 1901 по 2010 гг. колебалась от -1,21 до +1,076 °C/10 лет. На территориях севернее 60° с.ш. скорость изменения составляла приблизительно +0,35°C/10 лет. Для Российской Арктики в этом отчете использовалась информация о низовьях крупных рек, в основном из [Lammers et al., 2007]. В отчете проанализирована тенденция изменения среднегодовой температуры воды рек. По нашим данным в период 1961-2021 гг. динамика изменения среднемесячной температуры воды в целом была аналогична среднегодовой, за исключением мая и июня, когда месячные тренды превышали среднегодовое значение. Наибольшие различия наблюдались в азиатской части российской Арктики.

На локальном и районном уровне для российской Арктики результаты оценок пространственно-временной изменчивости термического режима рек сопоставимы с ранее полученными и описанными в литературе. Так, для Северной Двины нами обнаружены большие контрасты в температуре воды (0,8-3,9°C) на различных гидрологических постах в отдельные месяцы в современный (после переломных лет) период, по сравнению с полученными для периода 1976-2015 гг. (0,5-1,0°C) [Двоеглазова, Шелутко, 2021]. Величины изменений температуры воды отдельных месяцев, показанные в нашей работе для Северной Двины, также выше (0,7-2,1°C), чем было показано в упомянутой работе (0,8-1,7°C), что мы связываем с иным выбором периодов времени для сравнения средних величин. Для низовий Оби нами получены значительно большие величины изменений температуры воды относительно переломного года (1961-2021 гг.), в сравнении с периодами до и после 1976 г. (1936-2017 гг.) [Магрицкий и др., 2019], особенно в мае-июне и сентябре-октябре (различия оценок изменений достигают 1,5 К), при том, что средние месячные температуры воды близки как в период после 1976 г., так и после

переломных лет. Отмечены некоторые различия оценок современной температуры воды в бассейне верхней Колымы, полученные для одних и тех же постов в нашей работе и в работе [Самохвалов, Ухов, 2018]. В нашей работе современная температура воды за май-сентябрь выше, чем за период 1989-2014 гг. на большинстве рек на величины до $0,7^{\circ}\text{C}$, но на отдельных реках различных размеров наблюдаются и более низкие, на величину до $1,5^{\circ}\text{C}$, температуры воды, по сравнению с более продолжительным периодом времени, что может быть связано с локальными условиями её формирования. Сравнение трансформации температуры воды на водотоках верхней Колымы в нашей работе и в работе [Ушаков, Ухов, 2020] показало, что направленность изменений температуры воды меняется. Если для периода 1981-2010 гг. в сравнении с периодом 1951-1980 гг. наблюдалось охлаждение рек, то в нашем исследовании для тех же рек наблюдается потепление вод. Единственным исключением является река Берелех, которая как в нашем исследовании, так и в [Ушаков, Ухов, 2020] становится холоднее.

Осенью интенсивность наблюдаемых изменений как сроков появления льда, так и сроков установления ледостава, определённая с помощью уравнений линейной регрессии, достигает 2-3 дней/10 лет в период 1961-2021 гг. Наибольшая интенсивность изменений (до 10 сут/10 лет) рассматриваемых сроков характерна для горных рек и рек, вытекающих из озёр, в первую очередь европейской части рассматриваемой территории и рек, стекающих с плато Пutorана, а также на отдельных малых реках Чукотского нагорья. Однако на ряде подобных постов ряды наблюдений имеют достаточно много пропусков, что является источником дополнительной погрешности расчётов. Стандартное отклонение интенсивности изменений по всей рассматриваемой территории составляет 1 и 1,4 для сроков появления льда и сроков установления ледостава соответственно.

Смещение сроков появления льда и установления ледостава на более поздние характерно для замерзающих рек Северного полушария. Причём, в некоторых исследованиях отмечается, что этот процесс начался в 1950-е годы, например, [Magnuson et al., 2000; Rokaya et al., 2019]. Отмечается и существование разнонаправленных трендов сроков появления льда и установления ледостава [Smith, 2000; Burn, Elnur, 2002; Gebre, Alfredsen, 2011]. Полученные в нашей работе оценки интенсивности изменений как сроков появления льда, так и сроков замерзания, можно назвать средними среди всех оценок изменений сроков появления льда и замерзания на реках различных районов Северного полушария [Fukš, 2023], в том числе оценок, данных по материалам наблюдений, не охватывающим XXI в. [Smith, 2000]. Данный результат свидетельствует о достаточно медленных, монотонных изменениях ледового режима рек на протяжении более 70 лет.

На локальном уровне, в низовьях Печоры и Оби нами показано немного большее, на 1-2 дня, смещение сроков замерзания рек [Агафонова и др., 2025; Магрицкий и др., 2019].

Выводы по главе:

- в последние 60 лет наблюдается монотонная значимая тенденция сокращения периода с ледовыми явлениями, в среднем на 5-6 суток в дальневосточном секторе российской Арктики и на 7-11 суток в сибирском и европейском секторах, которая статистически незначима в последние 2-3 десятилетия (4 десятилетия в европейском секторе рассматриваемой территории осенью);
- весной и осенью фактические смещения характерных сроков ледового режима практически равны друг другу и составляют 5-10 суток. Наибольшие изменения в азиатском секторе рассматриваемой территории наблюдаются на Северо-Востоке, а в европейском секторе на Кольском полуострове;
- схожие величины изменений характеристик сроков ледового режима рек весной и осенью обеспечивают достаточно небольшие изменения продолжительности вскрытия и замерзания рек, в среднем ± 3 суток, при этом изменения продолжительности замерзания несколько больше, чем продолжительности вскрытия;
- изменения температуры воды в реках в среднем невелики и во все месяцы составляют до +2 К. При этом в летний период может наблюдаться охлаждение вод. Наибольшие изменения характерны для рек равнинной криолитозоны Западно-Сибирской равнины и малых и средних рек верховьев Яны, Индигирки и Колымы;
- характеристики средних величин температуры воды в мае и июне линейно связаны со сроками ледовых явлений весной; а осенью сроки ледовых явлений линейно связаны со сроками формирования ледовых явлений; при этом величины изменений рассматриваемых характеристик друг с другом линейно не связаны.

Глава 4. Современные характеристики и многолетняя изменчивость теплового стока рек

4.1 Современные оценки теплового стока арктических рек

Под тепловым стоком в данной главе понимается приток тепла к низовьям, в ряде случаев непосредственно к вершинам устьевых областей рек (УОР). Метод вычисления теплового стока описан в главе 2.

Примеры внутригодового распределения теплового стока в российской Арктике приведены на рисунке 4.1.

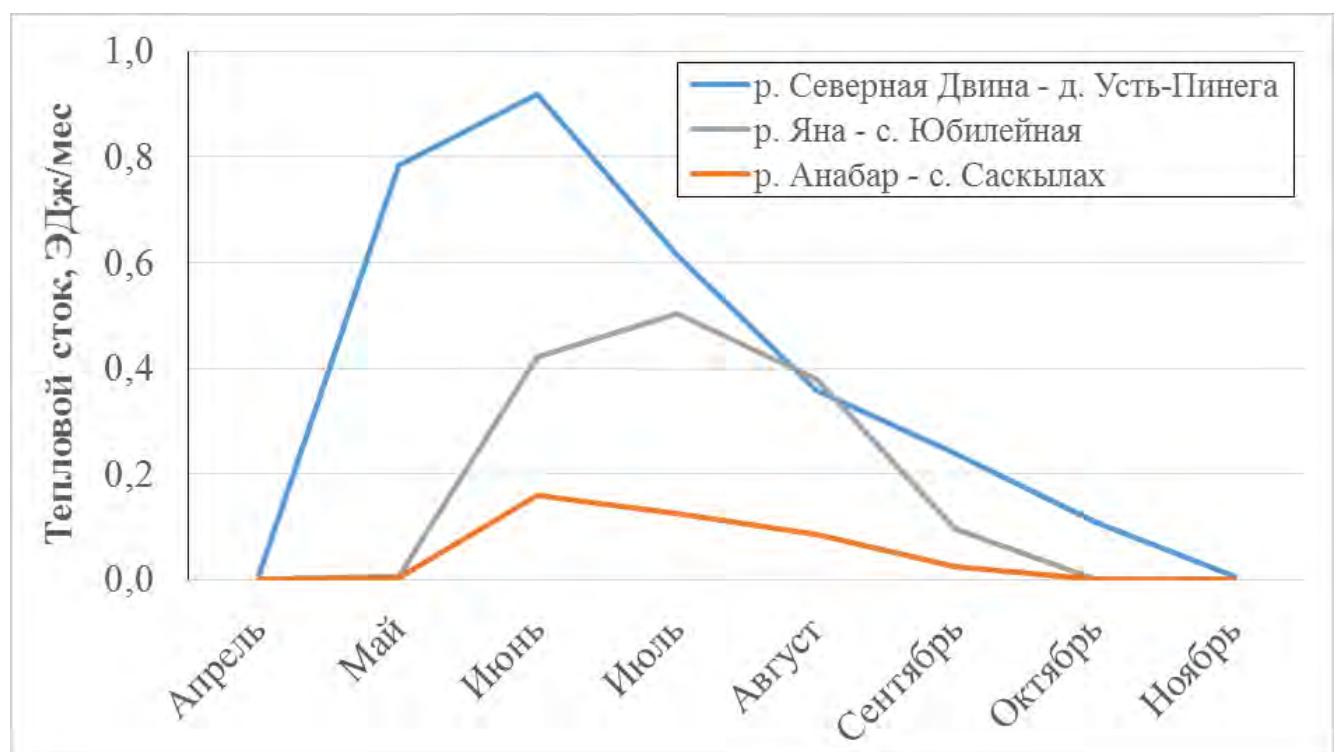


Рисунок 4.1. Внутригодовое распределение теплового стока в низовьях отдельных рек рассматриваемой территории

Максимальный месячный тепловой сток формируется в европейском и сибирском секторах рассматриваемой территории в июне, в период половодья и его спада, в то время как в дальневосточном секторе - в июле, позже периода снеготаяния и прохождения волны половодья.

Наиболее полно освещён наблюдениями за стоком и температурой воды период 1981-2012 гг. Средние величины годового и месячного теплового стока за этот диапазон лет приведены в таблице 4.1. Тепловой сток Алазеи, Хатанги, Пясины, Пура, Таза, Пёши не вычислялся, так как гидрологические посты в замыкающих створах либо закрыты, либо измерения стока на них не проводятся, в связи с чем информация по данным рекам не помещена в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Внутригодовое распределение теплового стока (ЭДж) в замыкающих створах рек рассматриваемой территории за период 1981-2012 гг.

Река-Пост	Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
р. Колыма - с. Колымское	3,6	0	1,4	1,1	0,8	0,4	0
р. Яна - с. Юбилейная	1,4	0	0,4	0,5	0,4	0,1	0
р. Лена - г/п Кюсюр	16,5	0	4,4	6,4	4	1,7	0,1
р. Оленек - пос. Таймылыр	0,9	0	0,3	0,3	0,2	0,1	0
р. Анабар - с. Сасылах	0,4	0	0,2	0,1	0,1	0	0
р. Енисей - г. Игарка	15,1	0,2	5,5	4,4	3	1,8	0,3
р. Надым - г. Надым	0,4	0	0,2	0,1	0,1	0	0
р. Обь - г. Салехард	13,9	0,2	3,6	5,4	3,3	1,2	0,2
р. Печора - с. Усть-Цильма	2,8	0,2	1,2	0,8	0,4	0,3	0,1
р. Мезень - с. Дорогорское	0,6	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0
р. Северная Двина - д. Усть-Пинега	3	0,8	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1
р. Онега - д. Порог	0,48	0,13	0,11	0,11	0,07	0,06	0,03
р. Малошуйка - д. Малошуйка	0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0004	0,0003
р. Нюхча - д. Нюхча	0,01	0,004	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001
р. Сума - с. Сумский посад	0,02	0,003	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001
р. Шуя - с. Шуерецкое	0,01	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0
р. Кузема - ст. Кузема	0,01	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0
р. Умба - пор. Паялка	0,08	0,007	0,02	0,02	0,02	0,01	0,004
р. Варзуга - с. Варзуга	0,07	0,015	0,02	0,01	0,01	0,01	0,004
р. Поной - д. Каневка	0,11	0,022	0,03	0,02	0,02	0,01	0,003
р. Кола - ст. 1429 км Октябрьской ЖД	0,04	0,005	0,02	0,01	0,01	0,01	0,001

Тепловой сток р. Колыма вычислен по данным г/п Колымское, поскольку измерения на г/п Черский нерепрезентативны, так как измерения фактически ведутся в притоке. Измерения температуры воды на г/п Колымское не учитывают воздействие Анюя, впадающего напротив данного поста. Кроме того, этим постом не учитывается водный и тепловой сток Стадухинской протоки, которая отделяется выше г/п Среднеколымск и сливается с основным руслом Колымы в вершине дельты.

Тепловой сток Оленёка вычислен по данным о температурах воды г/п Таймылыр, и стоку воды г/п 7,5 км ниже устья р. Буур. Тепловой сток р. Печора вычислен для г/п Усть-Цильма, поскольку измерения температуры воды на г/п Оксино проводятся летом в затоне с широкой отмелю. Тепловой сток Мезени вычислен по данным о суммарном стоке воды на г/п Малонисогорская и г/п Игумново на реке Пёзе и температуре воды на г/п Дорогорское.

Суммарный тепловой сток, вычисленный по данным гидрологических постов в низовьях рек, составляет за 1981-2012 гг. 59,6 Эдж/год. Представленные результаты вычислений соответствуют ранее приводимым оценкам теплового стока рек как для всей российской Арктики [Магрицкий, 2015], так и для отдельных рек [Tananaev et al., 2019].

Наблюдения за стоком воды Индигирки (в среднем и нижнем течениях) прекращены в 1996 г. За период 1961-1996 гг. при вычислениях с использованием температуры воды на г/п Чокурдах тепловой сток данной реки колебался от 1,48 до 2,8 ЭДж/год, за период с 1981-1996 гг. от 1,48 до 2,04 ЭДж/год.

За период 1981-1996 гг. суммарный тепловой сток Яны, Индигирки и Колымы составил 45% от теплового стока Лены. В пентады 1981-1985 гг., 1986-1990 гг. и 1991-1995 гг. соотношение теплового стока трех указанных рек и Лены менялось в пределах 41-46%. С учетом ещё трёх более поздних пентад, тепловой сток Колымы составлял от 16 до 26% теплового стока Лены, а тепловой сток Яны 6-9% от теплового стока Лены. Большая вариабельность теплового стока Колымы может быть связана как с антропогенным воздействием, так и с особенностями изменений стока данной реки в многолетнем периоде, связанных с полным покрытием водосбора многолетнемерзлыми породами [Frolova et al., 2022], а также со строительством и эксплуатацией водохранилищ. Относительная стабильность соотношения годового теплового стока Яны и Лены указывают на значительную роль климатических факторов его формирования. С учётом малой изменчивости соотношений теплового стока Лены с тепловым стоком Яны, Индигирки и Колымы, можно предположить, что средний тепловой сток Индигирки составляет 2,1 ЭДж/год, или 13,5% теплового стока Лены.

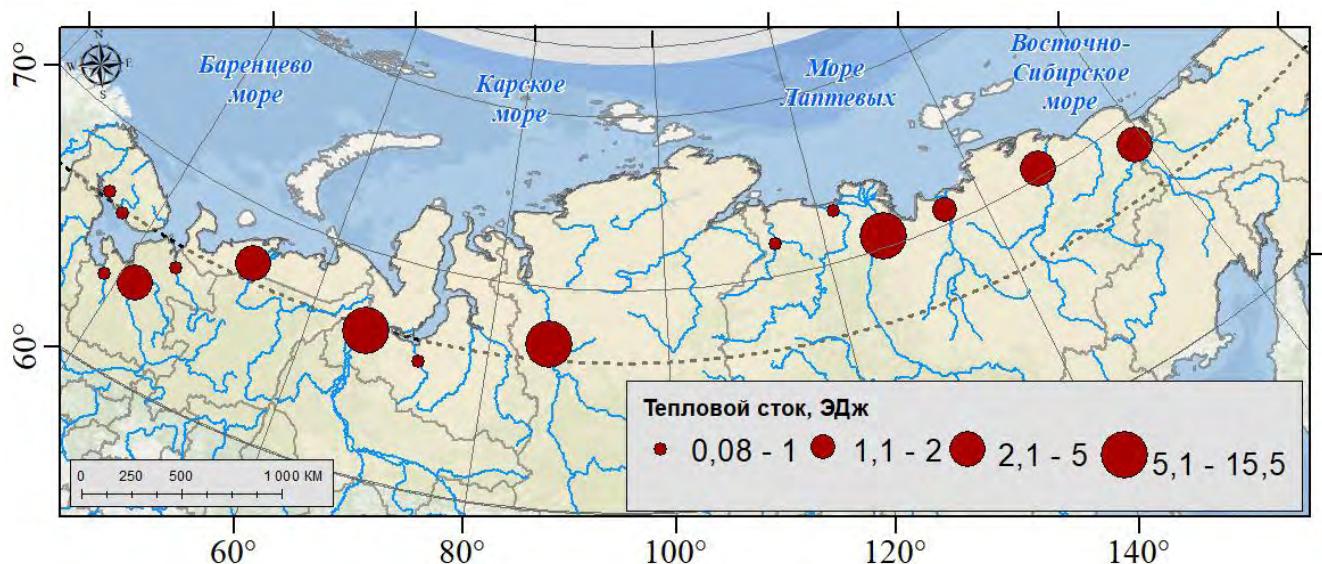


Рисунок 4.2. Тепловой сток рек российской Арктики величиной более 0,08 ЭДж/год и выше

Тепловой сток гидрологически изученных рек с территории российской Арктики в этом случае составляет 61,7 ЭДж/год. Следует также отметить, что полученные результаты вычисления теплового стока рек, впадающих в Белое море, сопоставимы с результатами, представленными в [Толстиков и др. 2021], в том числе для тех же рек, которые имеются в нашем исследовании для 1990-2014 гг. В связи с этим рационально принять приведенную в работе [Толстиков и др. 2021] оценку теплового стока рек бассейна Белого моря, не представленных в

нашем исследовании и приведённую в нашей работе оценку увеличить на 1 ЭДж/год, до 62,7 ЭДж/год. Пространственное распределение современного годового теплового стока приведено на рисунке 4.2.

Таблица 4.2. Сравнение величин теплового стока рек (ЭДж) российской Арктики в периоды 1981-2012 и 1981-2021 гг.

Река-Пост	1981-2012	1981-2021	Δ , ЭДж/год	Δ , %
<i>p. Оленек - пос. Таймылыр</i>	0,9	0,9	-0,02	-2
<i>p. Анабар - с. Саскылах</i>	0,4	0,4	-0,005	-1
<i>p. Надым - г. Надым</i>	0,4	0,4	-0,001	0
<i>p. Обь - г. Салехард</i>	13,9	14,4	+0,55	+4
<i>p. Печора - с. Усть-Цильма</i>	2,8	2,9	+0,04	+1
<i>p. Мезень - с. Дорогорское</i>	0,6	0,6	+0,01	+2
<i>p. Северная Двина - д. Усть-Пинега</i>	3	3	+0,001	0
<i>p. Онега - г/п Порог</i>	0,5	0,5	+0,06	+11
<i>p. Малошуйка - д. Малошуйка</i>	0,004	0,004	+0,0004	+9
<i>p. Нюхча - д. Нюхча</i>	0,01	0,01	+0,001	+8
<i>p. Сума - с. Сумский посад</i>	0,02	0,02	+0,001	+7
<i>p. Шуя - с. Шуерецкое</i>	0,01	0,01	+0,001	+10
<i>p. Кузема - ст. Кузема</i>	0,01	0,01	-0,0002	-2
<i>p. Умба - пор. Паялка</i>	0,08	0,08	+0,002	+3
<i>p. Варзуга - с. Варзуга</i>	0,07	0,07	+0,0004	+1
<i>p. Поной - д. Каневка</i>	0,11	0,11	+0,01	+5
<i>p. Кола - ст. 1429 км Октябрьской ЖД</i>	0,04	0,04	-0,0005	-1

Оценки величины теплового стока для более продолжительного периода 1981-2021 гг. можно провести для ограниченного количества гидрологических постов, причем на крупнейших реках наблюдения сохранились только на Оби, в районе Салехарда. Сравнение теплового стока за период 1981-2012 гг. и 1981-2021 гг. приведены в таблице 4.2.

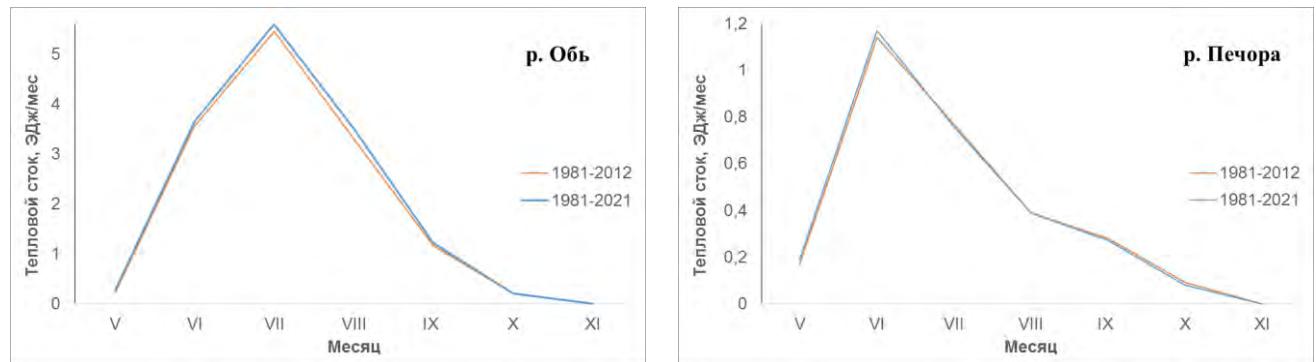


Рисунок 4.3. Внутригодовое распределение теплового стока рек Оби (слева) и Печоры (справа) в периоды 1981-2012 и 1981-2021 гг.

Средний годовой тепловой сток рек, перечисленных в таблице 4.2, составил 22,8 ЭДж/год в 1981-2012 гг., и 23,4 ЭДж/год в 1981-2021 гг. Большая часть годовых различий обусловлена крупнейшей из представленных рек - Обью (Рисунок 4.3). При этом прирост теплового стока

здесь максимален в июле, после периода половодья, в то время как, например, на Печоре рост теплового стока происходит как-раз в период максимальной водности.

Изменения теплового стока малых рек бассейна Белого моря на величины от -2 до 11% значительного вклада в трансформацию общего теплового стока не внесли в силу небольших абсолютных величин.

Тепловой сток испытывает достаточно значительные межгодовые колебания. Переломные годы в замыкающих створах приходятся на период после переломных лет годового и максимального стока воды, обычно в пределах $\pm 3\text{-}5$ лет от переломного года в рядах температуры воды в мае или июне. На малых реках (оценка по рекам Севера ETP), переломные годы теплового стока произошли раньше, чем на больших. На больших и крупнейших реках переломный год наступил раньше на реках азиатского сектора российской Арктики, чем на реках европейского сектора. Средний переломный год - 1992, без учёта пунктов, где наблюдения были возобновлены после 2005 г. Абсолютные и относительные величины изменений теплового стока относительно переломных лет приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Абсолютное и относительное изменение теплового стока и наличие значимого тренда рек 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 - с. Юбилейная	0,3	+26	Возрастающий
р. Лена - г/п Кюсюр	1,8	+12	Нет
р. Оленек - пос. Таймыры	0,2	+29	Нет
р. Анабар - с. Сасылах	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 - д. Усть-Пинега	0,4	+17	Возрастающий
р. Малошуйка - д. Малошуйка	0,00	-18	Нет
р. Сума - с. Сумский посад	0,00	+73	Возрастающий
р. Шуя - с. Шуерецкое	0,00	+25	Нет
р. Кузема - ст. Кузема	0,01	+12	Нет
р. Умба - пор. Паялка	0,02	+24	Возрастающий
р. Варзуга - с. Варзуга	0,01	+14	Нет
р. Поной - д. Каневка	0,00	+2	Нет

Наиболее значительные изменения наблюдаются в низовьях малых и средних рек западного и юго-западного побережий Белого моря. Эти результаты согласуются с оценками, полученными в работе [Толстиков и др., 2021], в которой указывается интенсификация роста

теплового стока рек Белого моря после 1990 г. При этом наблюдается снижение теплового стока на отдельных малых реках данного района. Снижение теплового стока наблюдается и на Надыме, в его низовьях, но на этой реке при снижении теплового стока не выявлено значимых трендов, что позволяет говорить, что данные изменения не носят направленный характер. Значимый возрастающий тренд теплового стока характерен либо для больших рек в низовьях, либо для сравнительно коротких рек с истоками из озёр - Умбы, Сумы (Рисунок 4.4).

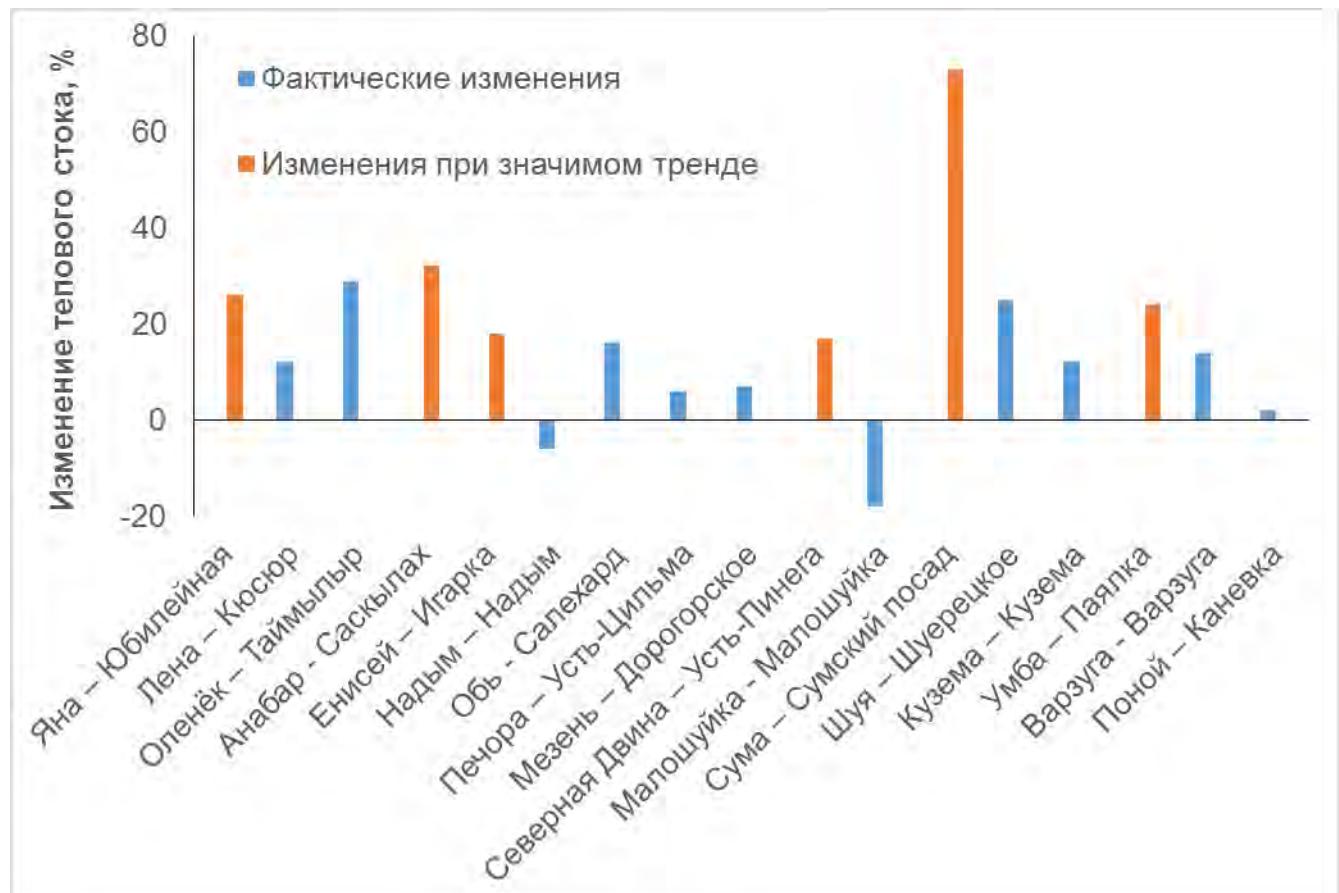


Рисунок 4.4. Относительное изменение теплового стока и наличие значимого тренда рек на реках российской Арктики после переломного года, без учёта рядов короче 10 лет после переломного года

Внутригодовое распределение теплового стока также претерпело определенные изменения. В первую очередь, наблюдается рост теплового стока рек в мае и октябре, причем в отдельных случаях в разы, что отражено в таблице 4.4.

На Енисее рост майского теплового стока почти в 11 раз обусловлен в районе г. Игарка увеличением количества случаев, когда в мае наблюдается ненулевая температура воды (данный процесс наблюдается также в низовьях Лены и Оби, но масштабы изменений ниже). В то же время, на малых и средних реках, впадающих в Белое море, двукратный рост майского теплового стока обусловлен как снижением стока воды половодья, так и значительным ростом температуры

воды в мае. Та же тенденция увеличения числа лет с ненулевой температурой воды, но менее выраженная в сравнении с маем, наблюдаются и в октябре.

Таблица 4.4. Относительное изменение месячного теплового стока (%) рек российской Арктики после переломного года без учета рядов годового и месячного теплового стока длиной меньше 10 лет

Река-Пост	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
<i>p. Яна - с. Юбилейная</i>		+34	+16	+30	+53	
<i>p. Лена - г/п Кюсюр</i>	+208	+29	-3	+8		
<i>p. Оленек - пос. Таймырыр</i>		+70	-26	+55	+86	
<i>p. Анабар - с. Сасылах</i>		+38	-43	+44	+119	
<i>p. Енисей - г. Игарка</i>	+1043	+47	-16	-6	+12	+69
<i>p. Надым - г. Надым</i>			-19	-12	-14	
<i>p. Обь - г. Салехард</i>	+147	+32	+6	+14	+15	+85
<i>p. Печора - с. Усть-Цильма</i>		+21	-20	+19	+7	+98
<i>p. Мезень - с. Дорогорское</i>	+39	-24	-25		+13	+88
<i>p. Северная Двина - д. Усть-Пинега</i>	+46	-10	+19	+24	+25	+77
<i>p. Малошуйка - д. Малошуйка</i>	+18	-30	-66		-49	
<i>p. Сума - с. Сумский посад</i>	+114	+43	+73	+149		+208
<i>p. Шуя - с. Шуерецкое</i>	+94	+10	-28	+18	-39	+84
<i>p. Кузема - ст. Кузема</i>	+85	+10		-7	-23	+34
<i>p. Умба - пор. Паялка</i>	+100		+17	+35	+22	+89
<i>p. Варзуга - с. Варзуга</i>	+117		-8	+14	-15	+102
<i>p. Поной - д. Каневка</i>	+117	-23	+24	+25	-29	+53

В низовьях рек Севера ЕТР (без учета бассейна Печоры), тепловой сток июня снижается на средних и больших реках, равно как и снижается тепловой сток сентября практически на всех реках этого региона. Снижение теплового стока сопряжено с ростом водности в июне и сентябре.

4.2 Воздействие строительства водохранилищ на тепловой сток в низовьях крупнейших рек

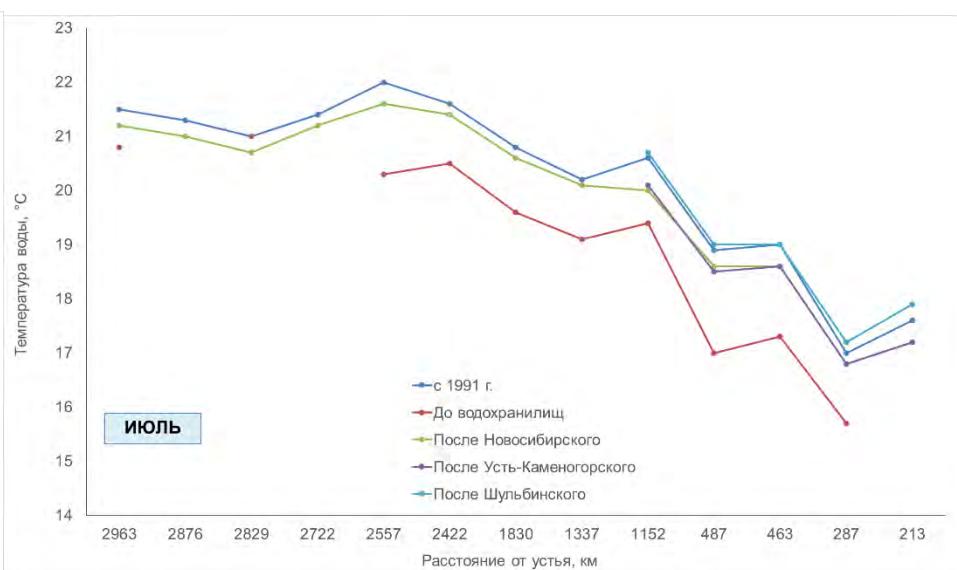
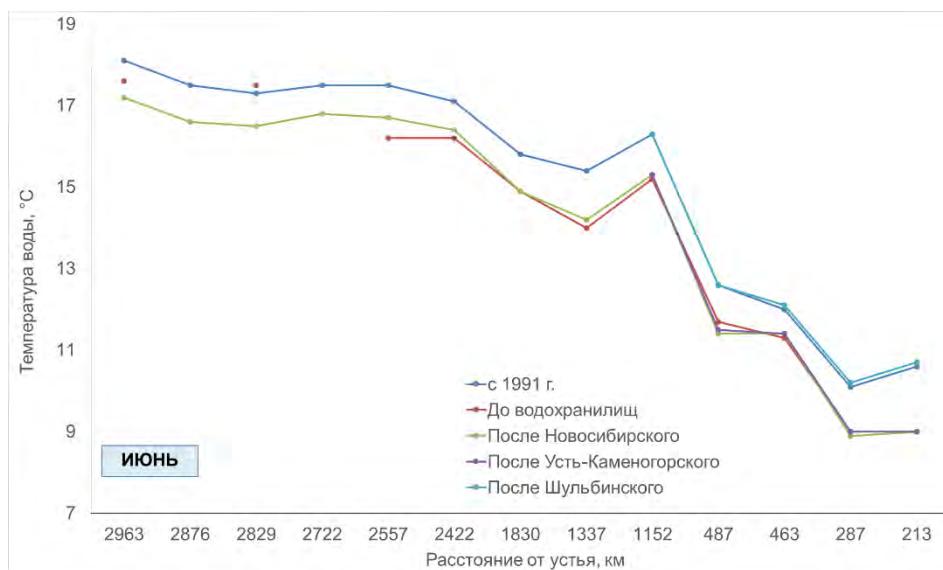
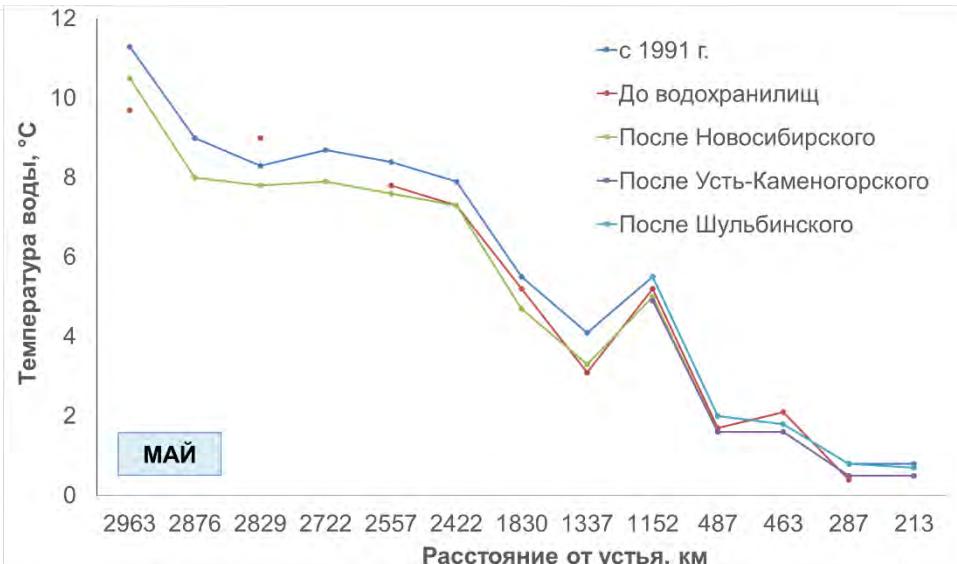
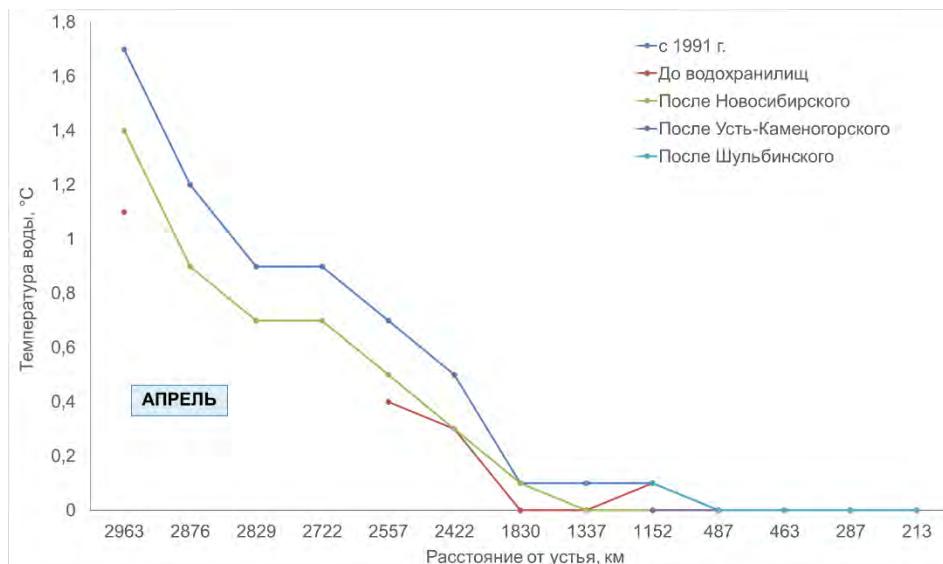
Увеличение теплового стока крупнейших рек, как показано выше, может быть искажено при вводе в эксплуатацию различных водохранилищ.

В бассейне Оби в настоящее время действуют Новосибирское водохранилище непосредственно на Оби (наполнено в 1959 г.), а также Бухтарминское (наполнено в 1965), Усть-Каменогорское (наполнено в 1954 г.) и Шульбинское (наполнено в 1989 г.) на р. Иртыш на территории республики Казахстан.

Температура воды в Оби относительно периода до гидротехнического освоения бассейна (1936-1954 гг.) изменилась только в июле-октябре, причём величины изменений не превышают

1 К. В июле температура воды выросла после строительства водохранилищ, а в августе-октябре на большей части пунктов наблюдений, наоборот, снизилась. При этом, температура воды в 1991-2010 гг. выше, чем во все прочие рассматриваемые периоды.

Важно также отметить, что роль теплового стока притоков Оби, с годами может меняться и корректировать снижение температуры воды вниз по течению. Так, на рисунке 4.5 можно выделить рост температуры воды ниже впадения Чулымы (между г/п Молчаново и Колпашево), а также, ниже впадения Иртыша (выше г/п Белогорье). Отметим также, что во всей рассматриваемой Арктической территории температура воды в 1991-2010 гг. выше, чем в периоды после строительства водохранилищ, во все рассмотренные месяцы.



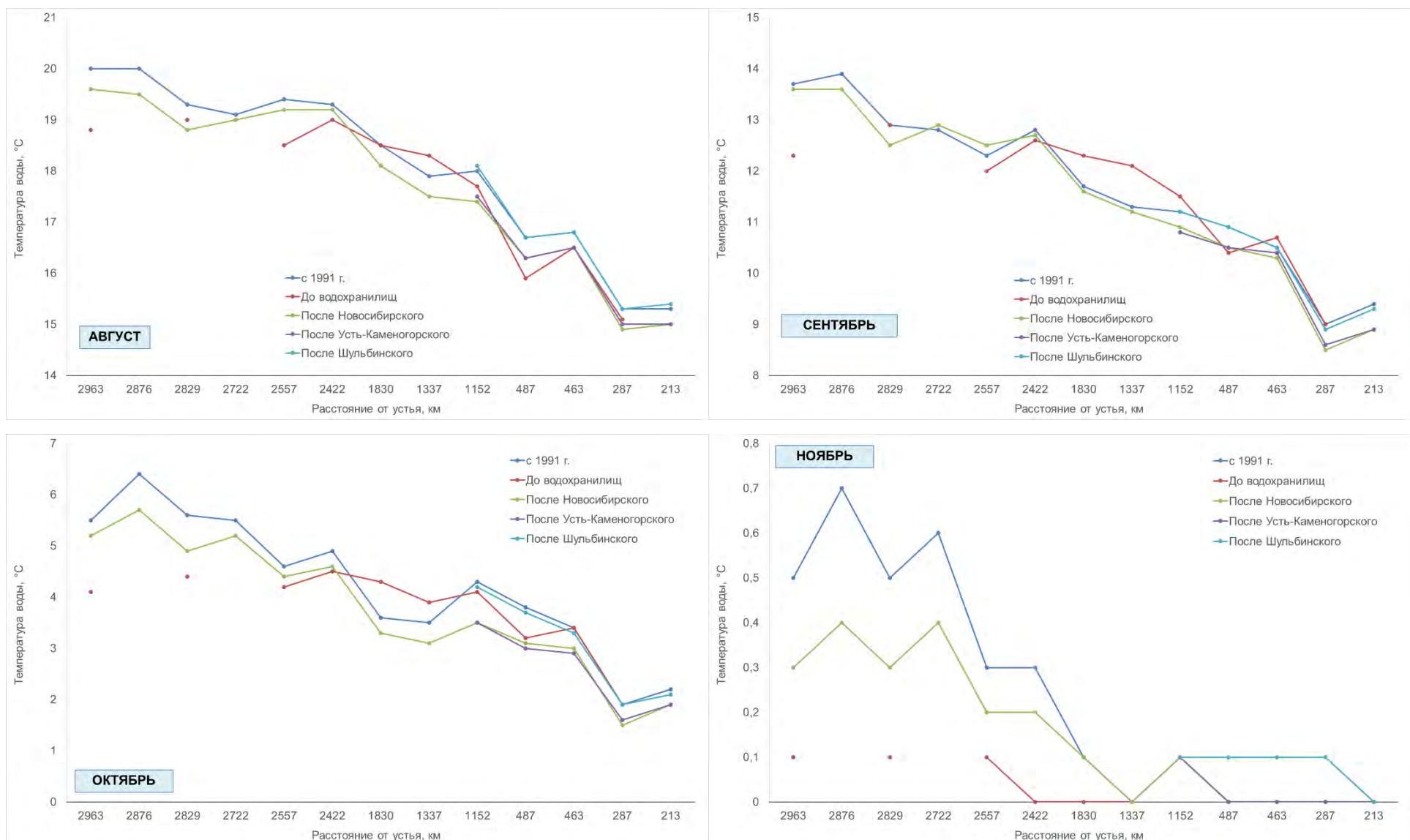


Рисунок 4.5. Вдольрусловые изменения температуры воды р. Обь за отдельные периоды времени до и после строительства водохранилищ

Таблица 4.5. Аномалии температуры воды и воздуха ($^{\circ}\text{C}$ относительно периода до строительства водохранилищ на Оби и Иртыше (1936-1954 гг.) на разных этапах гидротехнического освоения бассейна Оби*

Действующие водохранилища	Месяц	Тип аномалии	Новосибирск	Кругликово	Молчаново	Колпашево	Александрово	Сытомино	Белогорье	Горки	Мужи	Салехард
Усть - Каменогорское (1955-1959)	Май	Твод	0,2	-0,3	-0,7	-1,5	-1,6	-0,8	-1	-0,1	-1,3	0,1
		Твозд	0,6	0,3	0,3	0,5	1	1,1	1,4	1,2	1,4	0,8
	Июнь	Твод	-0,1	0,2	0,1	0	0,6	0,8	0,7	0,4	0,5	1
		Твозд	0,7	0,7	0,7	0,8	1,7	1,7	1,8	1,6	1,6	1,4
	Июль	Твод	0,2	0	0,5	0,3	0,7	0,8	0,9	1	1,3	1,7
		Твозд	0,5	0,6	0,6	0,6	1,1	1,9	1,5	2	1,9	2,2
	Август	Твод	0,4	0,1	0,4	-0,3	-0,7	-0,7	-0,1	0,6	0,2	1,3
		Твозд	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	0,3	0,4	0,4	0,2	0,5
	Сентябрь	Твод	0	-0,6	-0,1	-0,5	-0,6	-0,9	-1,4	-0,2	-0,3	0,9
		Твозд	-1,4	-1,5	-1,5	-1,2	-1,3	-1,7	-1,3	-1,5	-1,5	-1,4
	Октябрь	Твод	0,1	-0,2	-0,5	-0,9	-1	-1	-1,3	-0,8	-0,9	0,1
		Твозд	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	0	0,3	0,2	0,1	-0,1	-0,7
Усть - Каменогорское и Новосибирское (1960-1989)	Май	Твод	0,2	-1,6	-0,8	-0,6	-1,1	-0,2	-0,6	-0,4	-0,6	-0,1
		Твозд	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,2	-0,2	0,2	-0,3	0	-0,6
	Июнь	Твод	-1,1	-1,6	-0,2	-0,3	-0,6	-0,5	-0,7	-1,2	-0,5	-1
		Твозд	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	-0,2
	Июль	Твод	0,1	-0,6	1	0,8	0,8	0,8	0,2	1,3	1,1	0,8
		Твозд	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2	1,7	1,6	1,7	1,7	1,9
	Август	Твод	0,5	-0,5	0,5	0,1	-0,7	-1,1	-0,7	0,1	-0,2	-0,5
		Твозд	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,9	-1,1	-0,9	-0,9	-0,3
	Сентябрь	Твод	1,2	-0,7	0,7	0	-0,7	-1	-0,9	-0,2	-0,4	-0,7
		Твозд	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,2
	Октябрь	Твод	0,8	-0,1	0,1	-0,1	-1,3	-0,9	-1	-0,5	-0,7	-0,6
		Твозд	-1,1	-1,2	-1,2	-1,1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,8	-0,8	-1,3
Все водохранилища (1990-2010)	Май	Твод	1,7	-0,6	0,7	0,7	0,3	1	0,3	0,3	-0,3	0,4
		Твозд	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	2	2,1	2,2	1,5
	Июнь	Твод	0,5	-0,2	1,4	1	0,9	1,5	1,1	0,9	0,8	1,2
		Твозд	0,9	0,8	0,8	0,9	1,6	1,7	1,7	1,9	1,9	2
	Июль	Твод	0,7	0,1	1,7	1,1	1,2	1,2	2	1,7	1,7	1,5
		Твозд	0,6	0,6	0,6	0,7	1,4	1,7	2,2	2,2	2,2	2,3
	Август	Твод	1,2	0,3	0,9	0,3	0	-0,4	0,4	0,8	0,3	0,2
		Твозд	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,5	-0,7	0,4	-0,4	0
	Сентябрь	Твод	1,4	0,1	0,3	0,2	-0,6	-0,8	-0,3	0,5	-0,2	-0,1
		Твозд	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,4	-1,1	-1	-0,6	-0,5	-0,4
	Октябрь	Твод	1,5	1,2	0,5	0,5	-0,7	-0,4	0,1	0,5	-0,1	0
		Твозд	0,7	0,6	0,6	0,7	1,1	1,3	1,2	1,2	1	0,7

*гистограммы и цветовая схема дана для улучшения читаемости

Наибольшее антропогенное воздействие на температуру воды Оби оказывается в августе-сентябре, а в середине века в низовьях реки оно проявлялось и в мае. Аномалии (относительно периода до строительства водохранилищ) температуры воды в эти месяцы имеют разный знак с аномалиями температуры воздуха (Таблица 4.5) или аномалии температуры воды больше аномалий температуры воздуха (по модулю). Второй вариант мы связываем с изменениями теплового стока притоков, действующих на температуру воды Оби. На современном этапе (после строительства Шульбинской ГЭС в период климатических изменений), изменения аномалий температуры воды севернее 60° с.ш. в бассейне Оби превышают $0,5^{\circ}\text{C}$ только в июне и июле при больших по модулю аномалиях температуры воздуха, а воздействие водохранилищ потенциально проявляется в августе-сентябре, когда температура воды несколько растёт при снижении температуры воздуха. Таким образом, воздействие гидротехнического освоения бассейна Оби в Арктической его части значимо только в августе-сентябре, в период охлаждения воды.

Годовой тепловой сток Оби перед устьевой областью после строительства водохранилищ менялся сообразно трансформациям стока воды в теплые месяцы года, что отражено на рисунке 4.6.

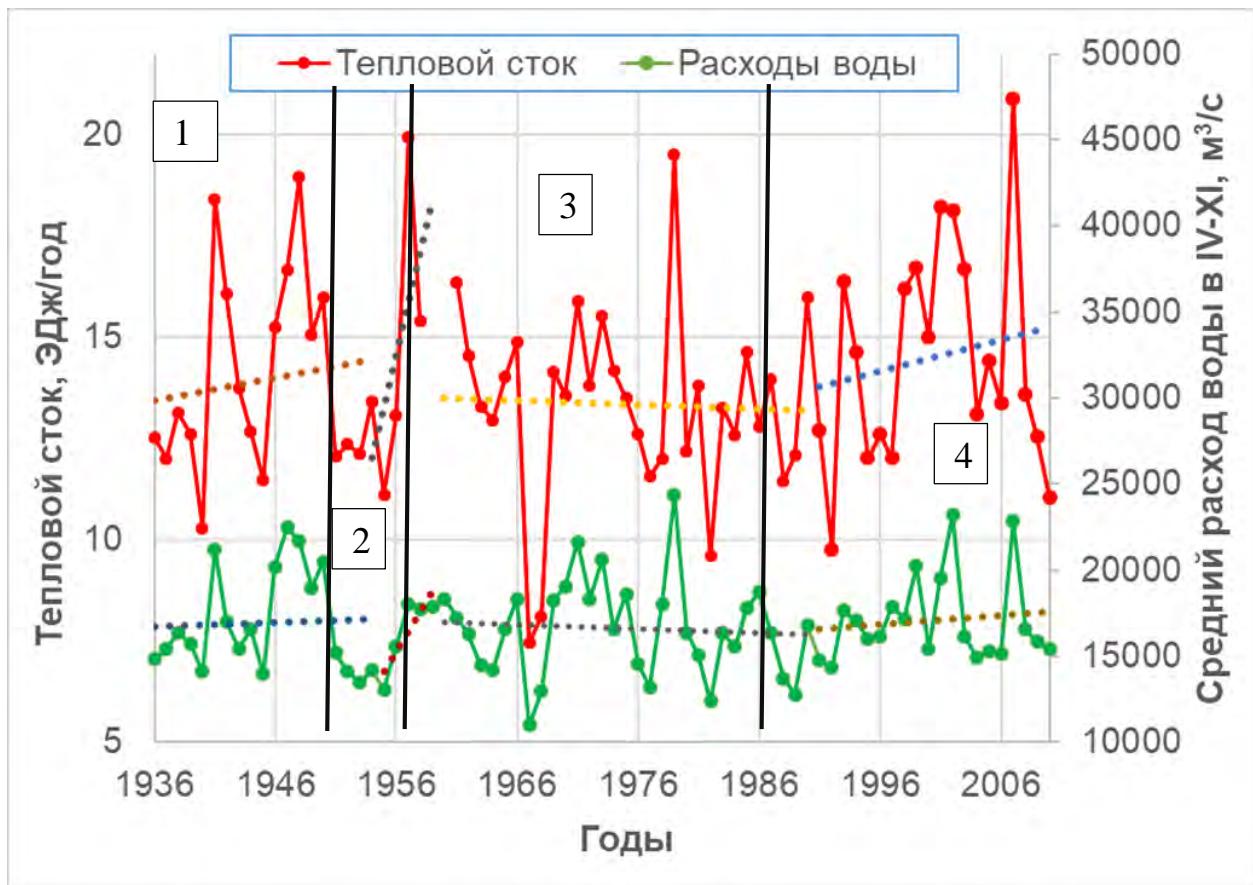


Рисунок 4.6. Многолетний ход годового теплового стока и средних расходов воды на г/п Салехард за период с мая по октябрь. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения бассейна Оби (1), в период работы только Усть-Каменогорской ГЭС (2), в период одновременной работы Новосибирской и Усть-Каменогорской ГЭС (3), в период 1991-2010 гг. (4)

Выраженные трансформации стока воды водохранилищами отмечаются только после ввода в эксплуатацию Новосибирского водохранилища. Это объяснимо значительным отдалением Усть-Каменогорского водохранилища от г. Салехарда и влиянием притоков. При этом, до конца 1980-х наблюдался тренд к снижению как стока воды, так и теплового стока в устьевой области. Однако уже к началу 1990-х гг. начался рост теплового стока и менее значительное увеличение стока воды. В это же время стала повышаться температура воды на реках Западной Сибири.

Тепловой сток отдельных месяцев при строительстве водохранилищ также изменился вместе с трансформациями стока воды (Рисунок 4.7). Исключением является тепловой сток июня и октября.

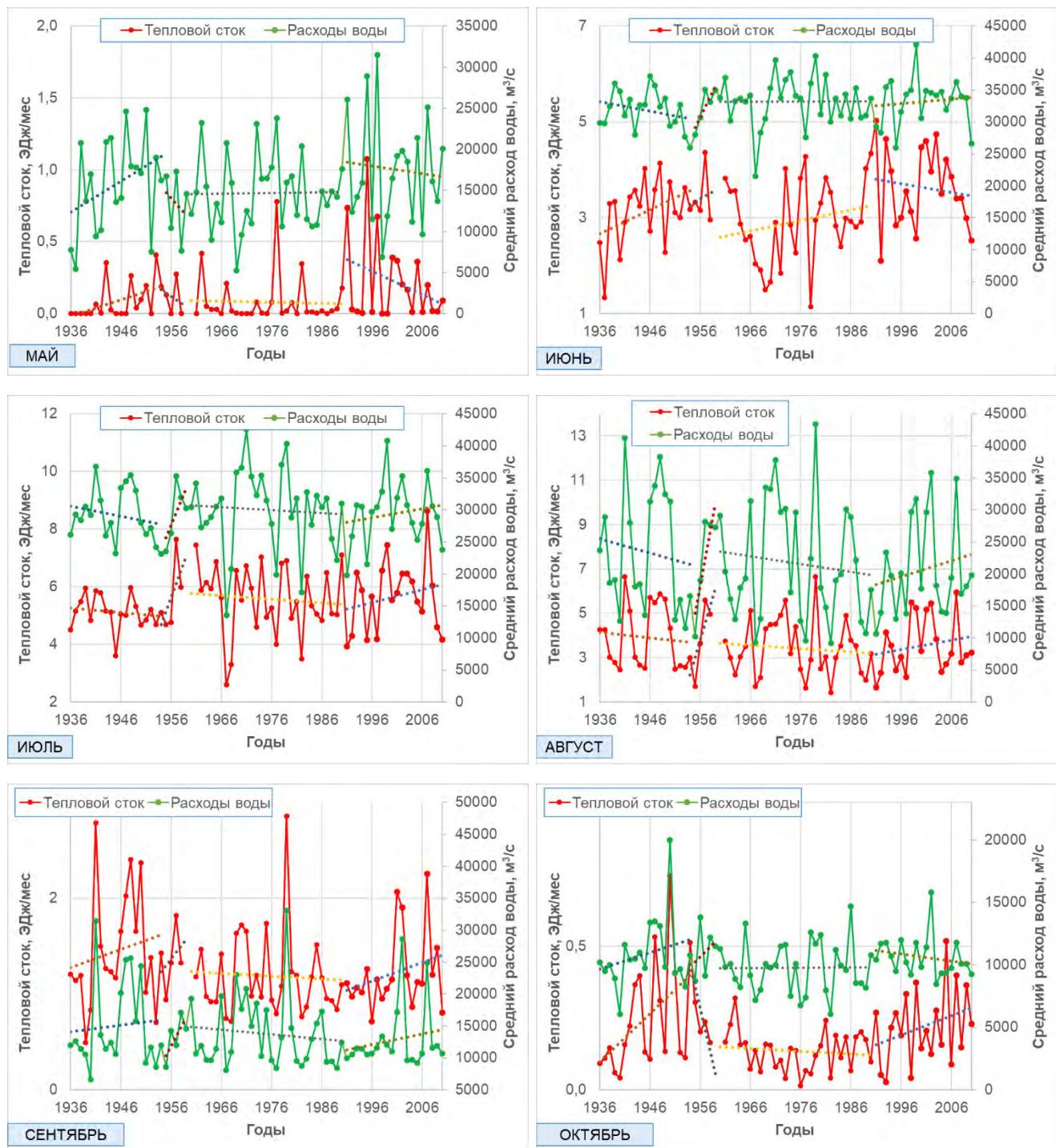


Рисунок 4.7. Многолетний ход месячного теплового стока и средних расходов воды за месяц на г/п Салехард. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения бассейна Оби, в период работы только Усть-Каменогорской ГЭС, в период одновременной работы Новосибирской и Усть-Каменогорской ГЭС, в период 1991-2010 гг.

В июне, в период половодья увеличению стока воды соответствует снижение теплового стока (и наоборот), что связано с необходимостью затрат большего количества тепла на нагрев большей водной массы на достаточно протяжённом участке реки. В октябре же, только после

1990 г. наблюдается значительный рост теплового стока при уменьшении стока воды, что обусловлено достаточно значительным ростом температуры воды в этом месяце в низовьях Оби.

Описанная выше сонаправленность трендов теплового стока и расходов воды не приводит к соразмерным изменениям этих характеристик в современный период по сравнению с периодом до климатических изменений и гидротехнического освоения бассейна. В ряде случаев тепловой сток изменился более, чем вдвое, при малом изменении расходов воды (Таблица 4.6).

Таблица 4.6. Изменения характеристик термического и водного режима Оби на г/п Салехард в 1991-2010 гг. по сравнению с 1936-1954 гг. (до гидротехнического освоения бассейна реки)

Характеристика	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Изменения теплового стока, %	0	144	17	10	-9	-16	-12	0
Изменения расходов воды, %	41	11	4	1	-12	-15	-2	30

Таким образом, в низовьях Оби тепловой сток в современных климатических условиях растёт, как и в период до гидротехнического освоения бассейна. В период современных климатических изменений, наблюдавшееся почти во все тёплые месяцы года снижение температуры воды на Оби после строительства водохранилищ было полностью скомпенсировано, равно как и снижение теплового стока, что частично было обусловлено достаточно малым изменением температуры воды в реке по сравнению с периодом до строительства водохранилищ. Обе характеристики термического режима в среднем стали больше в современный период. Наибольшие изменения отмечаются в осенний период, в августе-октябре, в остальные месяцы тёплого периода года воздействие строительства ГЭС практически не выражено.

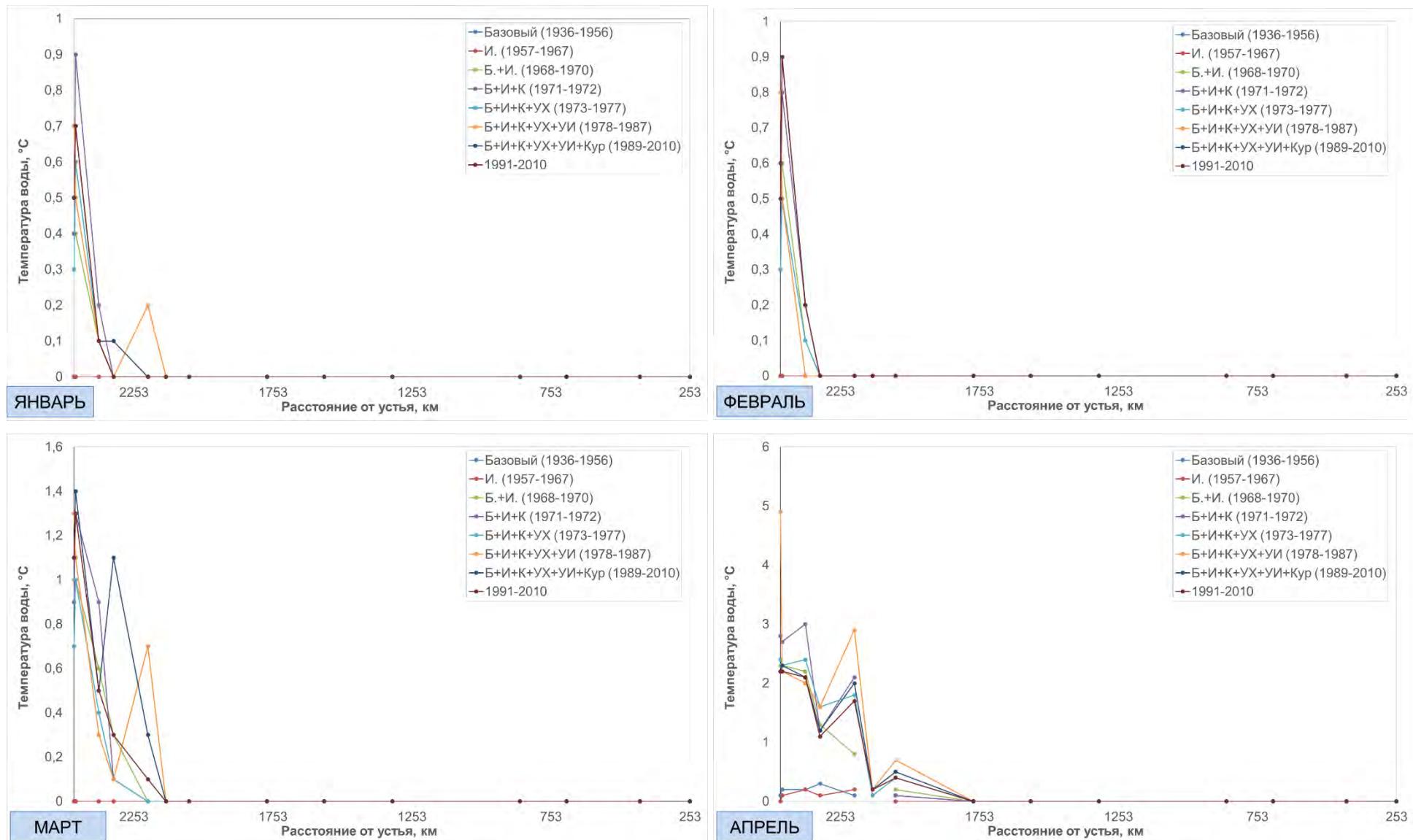
В бассейне Енисея история гидротехнического освоения - наибольшая среди больших арктических рек. В 1956 г. было наполнено Иркутское водохранилище на Ангаре, а в 1967 г. ниже него Братское, затем Красноярское на Енисее (1970), и Усть-Илимское на Ангаре (1977). В 2015 г. на Ангаре было наполнено Богучанское водохранилище. В Арктической части бассейна водохранилища расположены на правых притоках – это Курейское (наполнено в 1987 г.) и Усть-Хантайское (1972 г.). Выше Красноярского водохранилища на Енисее расположены также Саяно-Шушенское и Майнское водохранилища, но они построены позже Красноярского водохранилища. Стоит заметить, что за исключением Курейского и Усть-Хантайского водохранилищ, плотины в бассейне Енисея имеют глубинные водозаборы, что приводит к сбросу сравнительно более теплой (относительно нижнего бьефа) воды зимой и сравнительно более холодной летом. Соответственно, часть изменений термического режима Енисея связана с появлением постоянной температуры выше 0°C зимой в полынях ниже плотин.

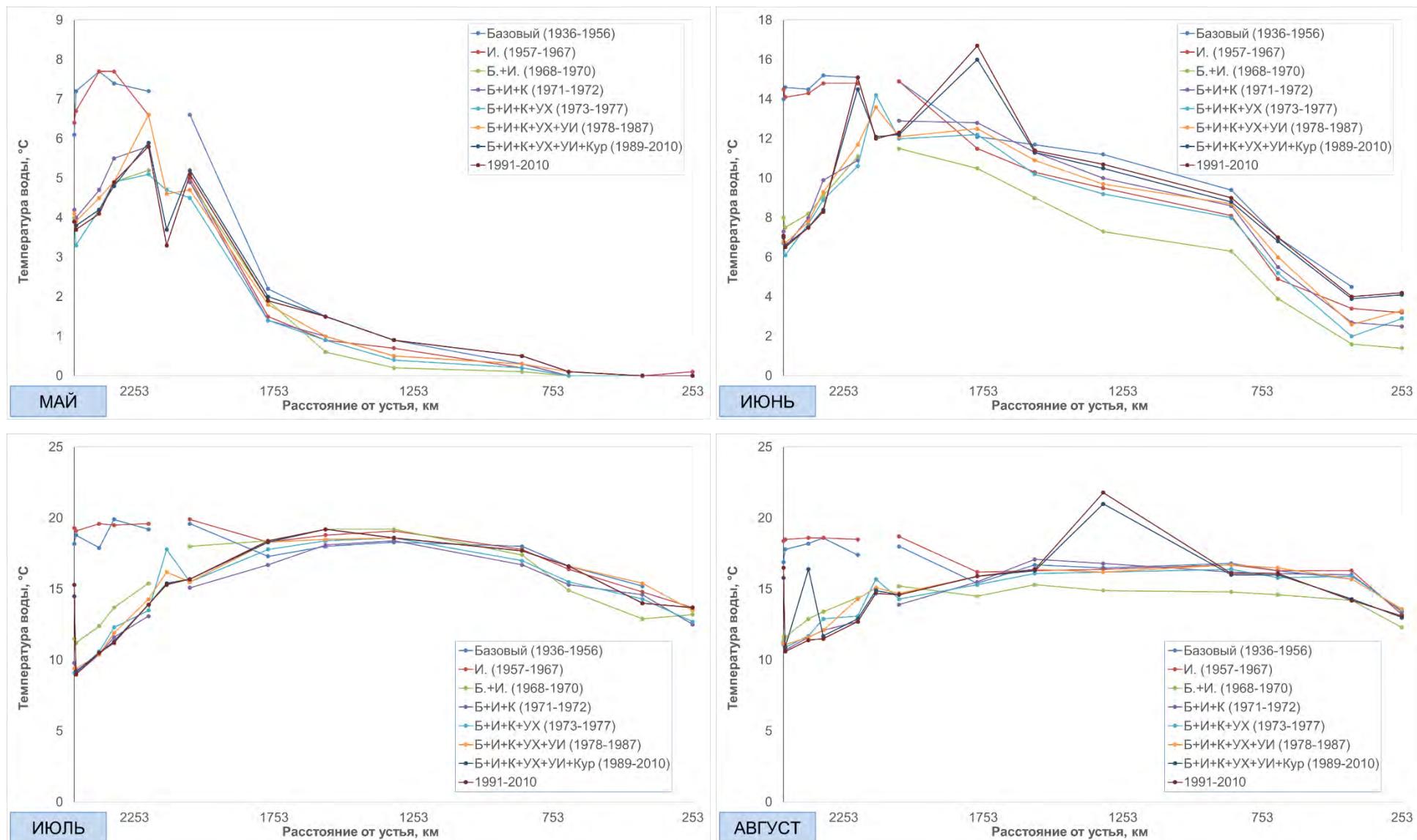
Наибольшее влияние на температуру воды Енисея оказал ввод в эксплуатацию крупнейших гидроузлов: Братского и Красноярского. В низовьях реки также может быть прослежено влияние Усть-Хантайского водохранилища. На участке от Красноярского водохранилища до впадения р. Ангара, наибольшие изменения температуры воды произошли в 1970-е годы, после ввода в эксплуатацию Красноярской ГЭС, положительные температуры воды стали наблюдаться в течение всего года. Величина изменений температуры воды во все месяцы года относительно базового периода сопоставима (± 1 К) как в первые годы после начала эксплуатации Красноярской ГЭС, так и в период 1991-2010 гг. Схожая ситуация наблюдается на участке от устья Ангары до устья Курейки. Ниже устья Курейки различия в изменениях температуры воды могут превышать 1 К (в мае-сентябре), при этом наибольшие различия наблюдались до начала эксплуатации Красноярской ГЭС (то есть при эксплуатации только Иркутской и Братской ГЭС).

Анализ вдольрусовой изменчивости температуры воды показал, что температура воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, практически до устья Ангары, снизилась в апреле-октябре, а в январе-марте и ноябре-декабре выросла (до значений в основном менее 1°C). Наиболее тёплыми воды Енисея были в 1970-х и 1980-х. Современные температуры воды сопоставимы с температурой воды в эти периоды ниже устья Ангары. В низовьях Енисея, ниже устья Курейки, температура воды снизилась в тёплые месяцы года относительно базового периода.

На графиках вдольрусовой трансформации температуры воды (Рисунок 4.8) в летний период отмечаются локальные экстремумы ниже впадения больших притоков Енисея. Особенно заметен экстремум ниже впадения Подкаменной Тунгуски.

Анализ аномалий температуры воды и воздуха на различных этапах гидротехнического освоения бассейна р. Енисей показал, что наибольшее влияние на температуру воды в р. Енисей оказало строительство Красноярской ГЭС, причём разнонаправленные тенденции изменения температуры воды и воздуха начали появляться уже в период перекрытия Енисея. Влияние Красноярской ГЭС на термический режим, по-видимому, в отдельные периоды достигает Енисейска, в первую очередь осенью, однако, на этом участке оно неотделимо от влияния ГЭС Ангарского каскада.





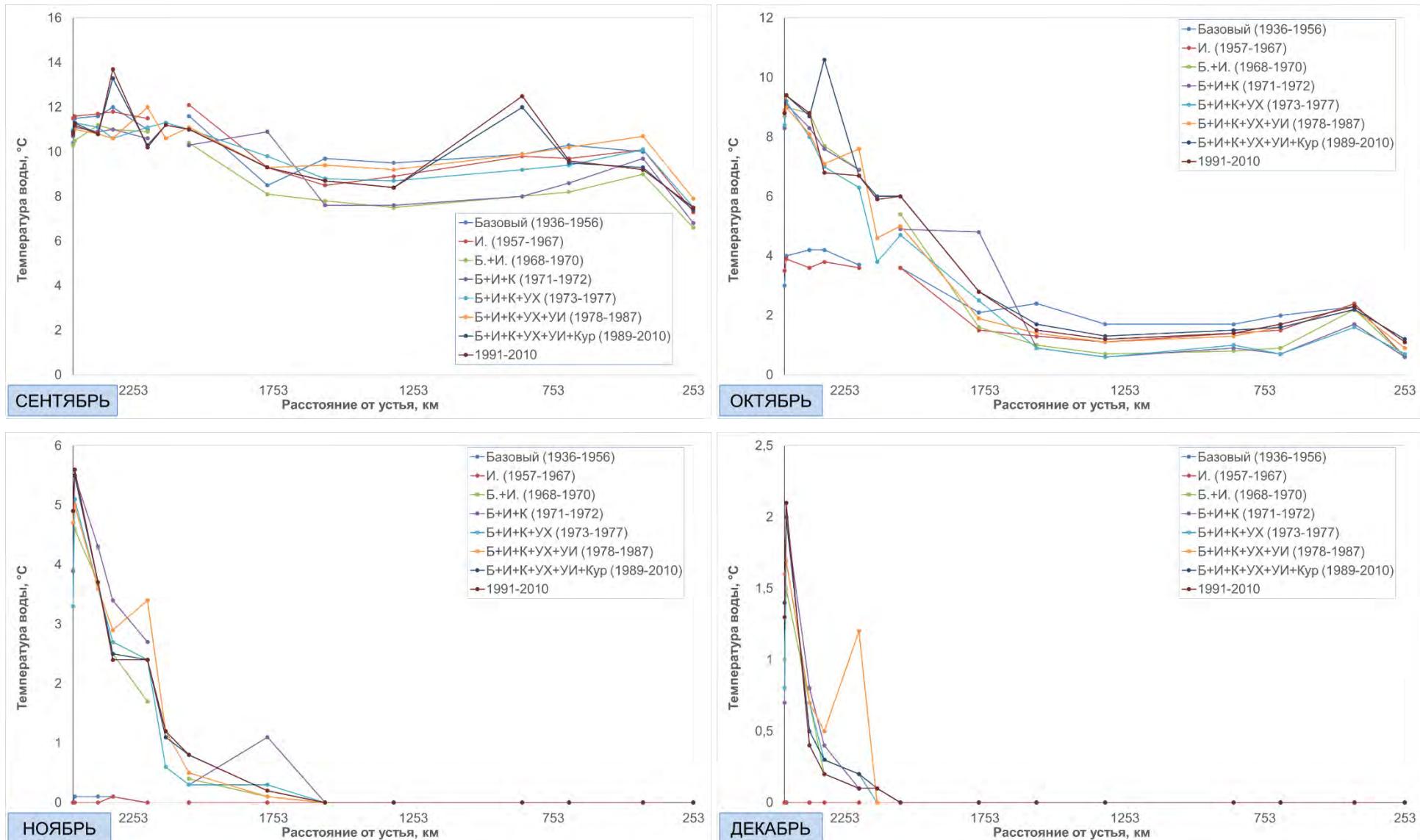


Рисунок 4.8. Вдольрусловые изменения температуры воды Енисея за отдельные периоды времени до и после строительства водохранилищ (И Иркутское, Б Братское, УИ Усть-Илимское, К Красноярское, УХ Усть-Хантайское, Кур Курейское)

Годовой тепловой сток в замыкающем створе Енисея изменялся сообразно изменениям расходов воды до конца 1970-х (Рисунок 4.9), т.е. приблизительно до введения в эксплуатацию Усть-Илимской ГЭС. В более позднее время тепловой сток в замыкающем створе имел тенденцию к росту, в то время как сток воды тёплого периода имел тенденцию к снижению. К моменту установления различных тенденций теплового стока и стока воды в эксплуатацию были введены Красноярская ГЭС, Усть-Хантайская ГЭС и три ГЭС на р. Ангара.

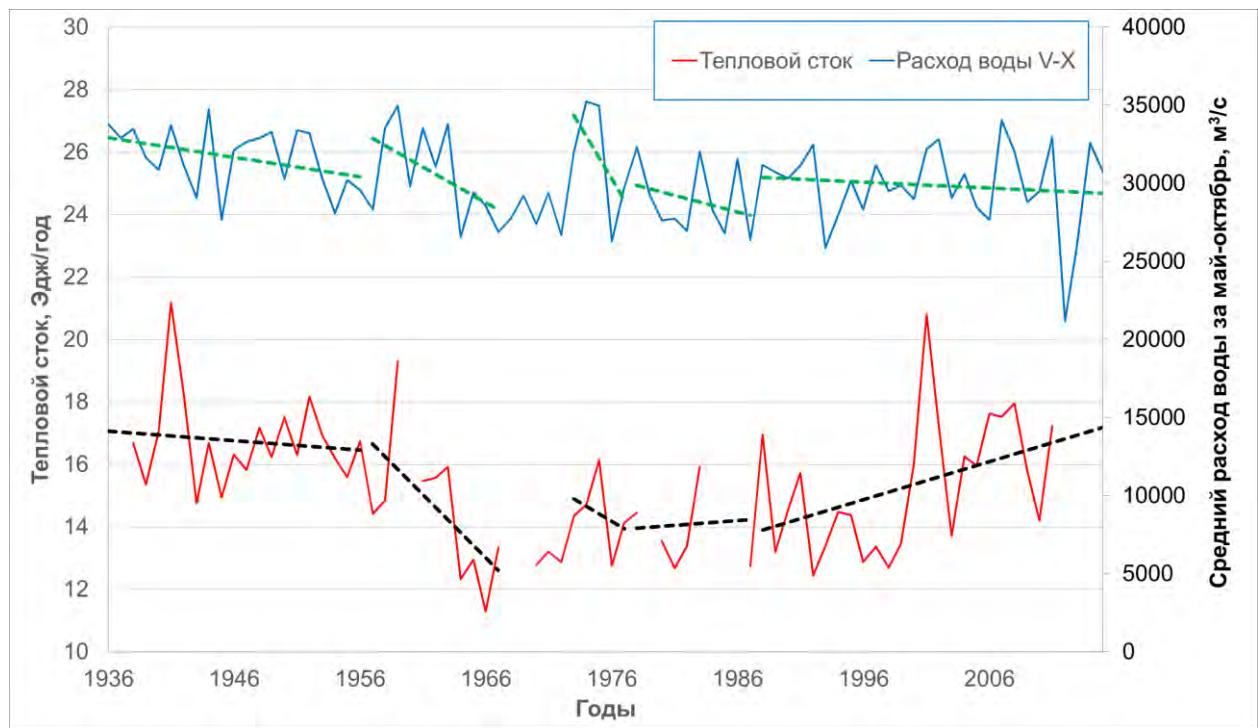


Рисунок 4.9. Многолетний ход годового теплового стока и средних расходов воды на г/п Игарка за период с мая по октябрь. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения бассейна Енисея и в периоды совместной работы ГЭС бассейна по мере их введения в эксплуатацию (за исключением Богучанской ГЭС, введенной в эксплуатацию одновременно с прекращением измерения стока на г/п Игарка)

Рост теплового стока в низовьях Енисея, связан как со снижением стока воды в последние десятилетия, так и интенсивным повышением температуры воды в июне (Рисунок. 4.10), достигающем в период 1991-2021 гг. $1,1^{\circ}\text{C}/10$ лет. А также совместным ростом стока и температуры воды в мае и сентябре-октябре. В любом случае современный тепловой сток Енисея соизмерим с тепловым стоком до гидротехнического освоения бассейна реки.

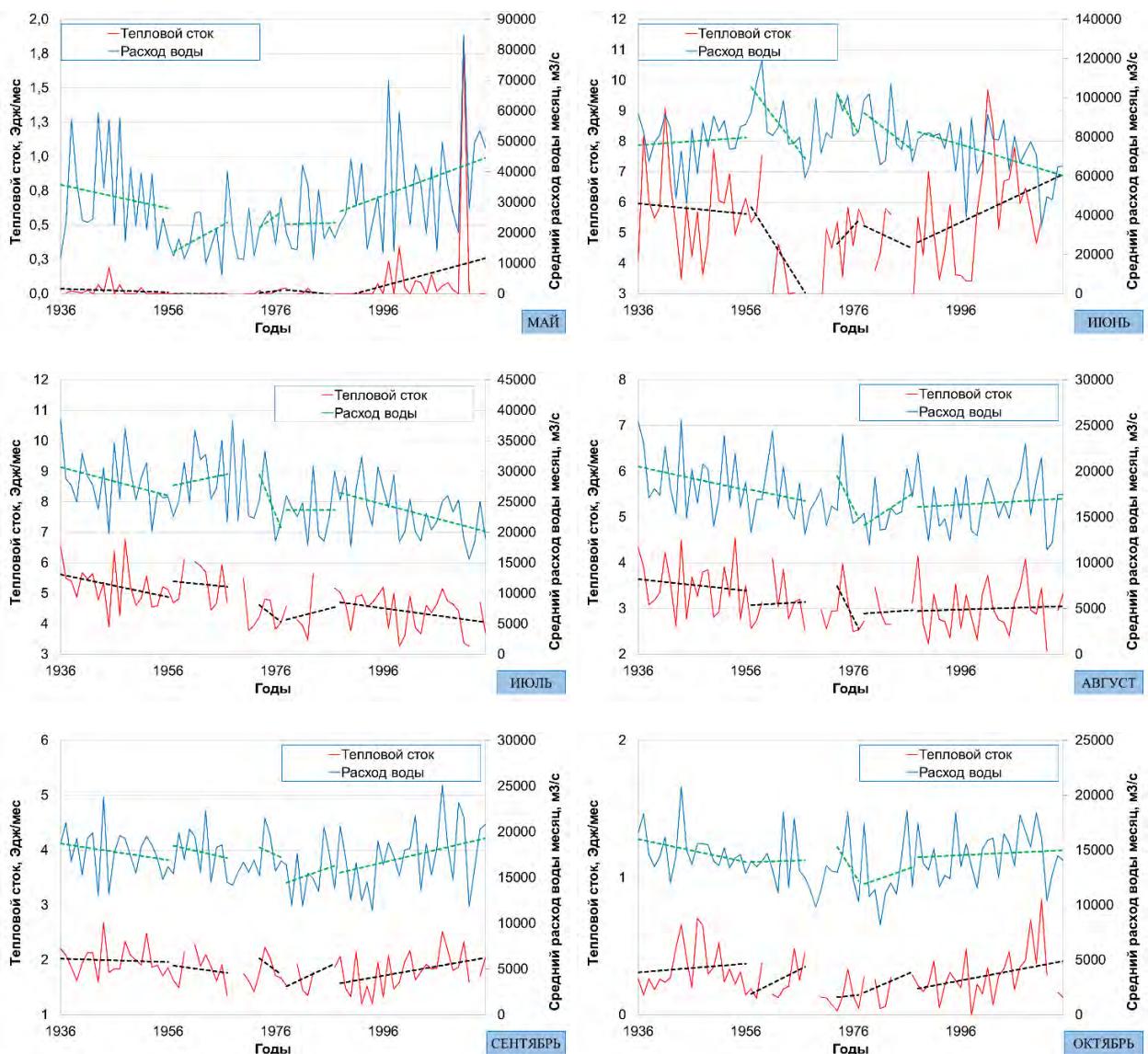
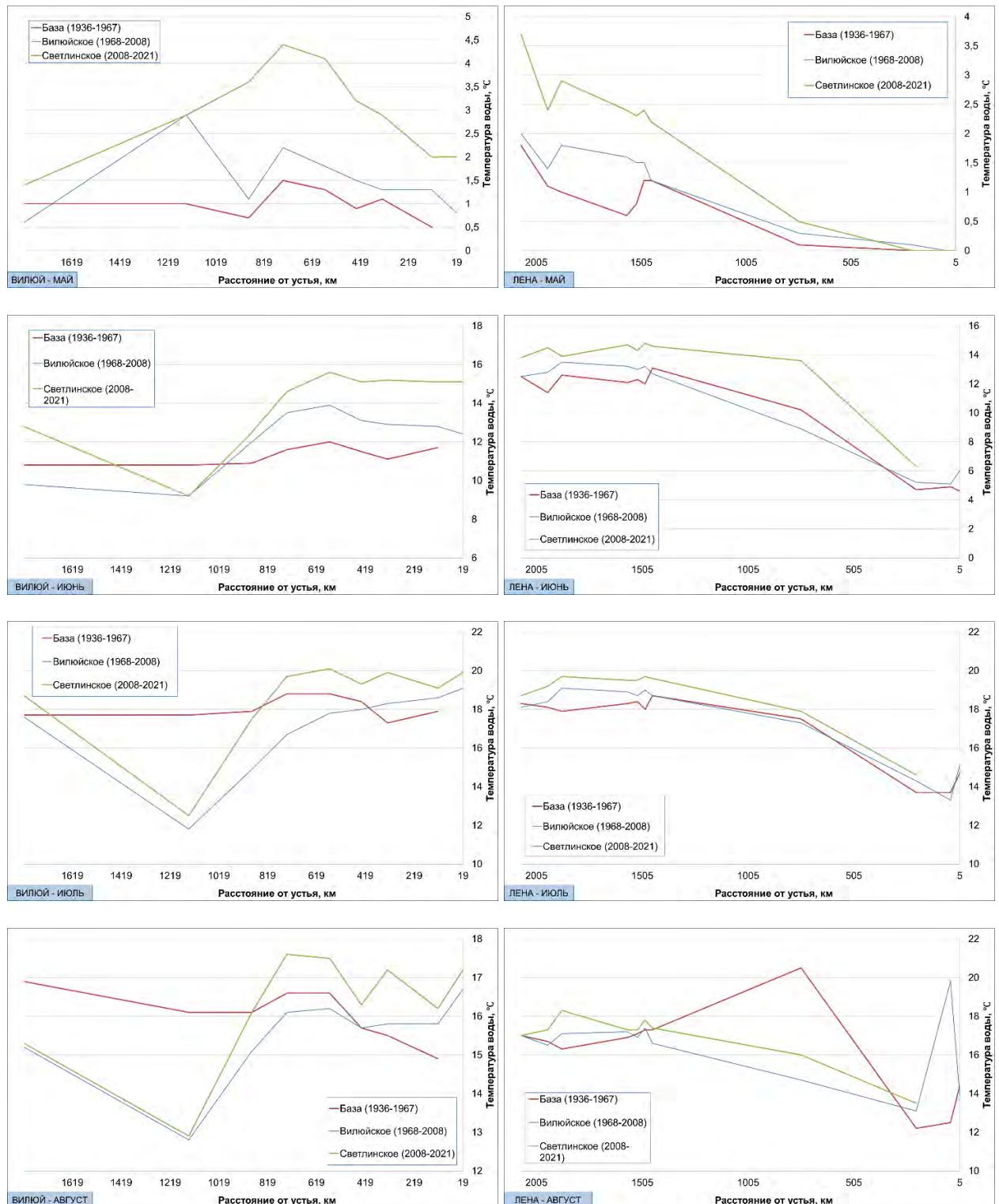


Рисунок 4.10. Многолетний ход месячного теплового стока и средних расходов воды за месяц на г/п Игарка. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения бассейна Енисея и в отдельные периоды его гидротехнического освоения

В бассейне Лены водохранилища расположены только на крупнейшем левом притоке – Вилюе. Долгое время единственным водохранилищем было Вилюйское, наполненное в 1967 г. В 2008 г. частично введено в эксплуатацию Светлинское водохранилище (известно также как водохранилище Вилюйской ГЭС-3), до сих пор (2025 г.) ожидается ввод в эксплуатацию ещё одного гидроагрегата. Светлинское водохранилище низконапорное, руслоное.

Анализ вдольрусовой изменчивости температуры воды в Вилюе и Лене показал, что температура воды снизились в июне-августе после строительства водохранилищ, особенно, после строительства Светлинской ГЭС на участке протяженностью около 200 км

от плотины Вилуйских ГЭС (Рисунок 4.11). В мае и сентябре температура воды на этом участке, наоборот, выросла в те же периоды. На нижележащих участках Вилюя температура воды увеличивалась во все месяцы тёплого периода года, и данный рост, вероятно, климтаообусловлен. На Лене можно отметить только увеличение притока тепла из Вилюя, связанного с потеплением вод ниже зоны влияния водохранилищ Вилуйского каскада.



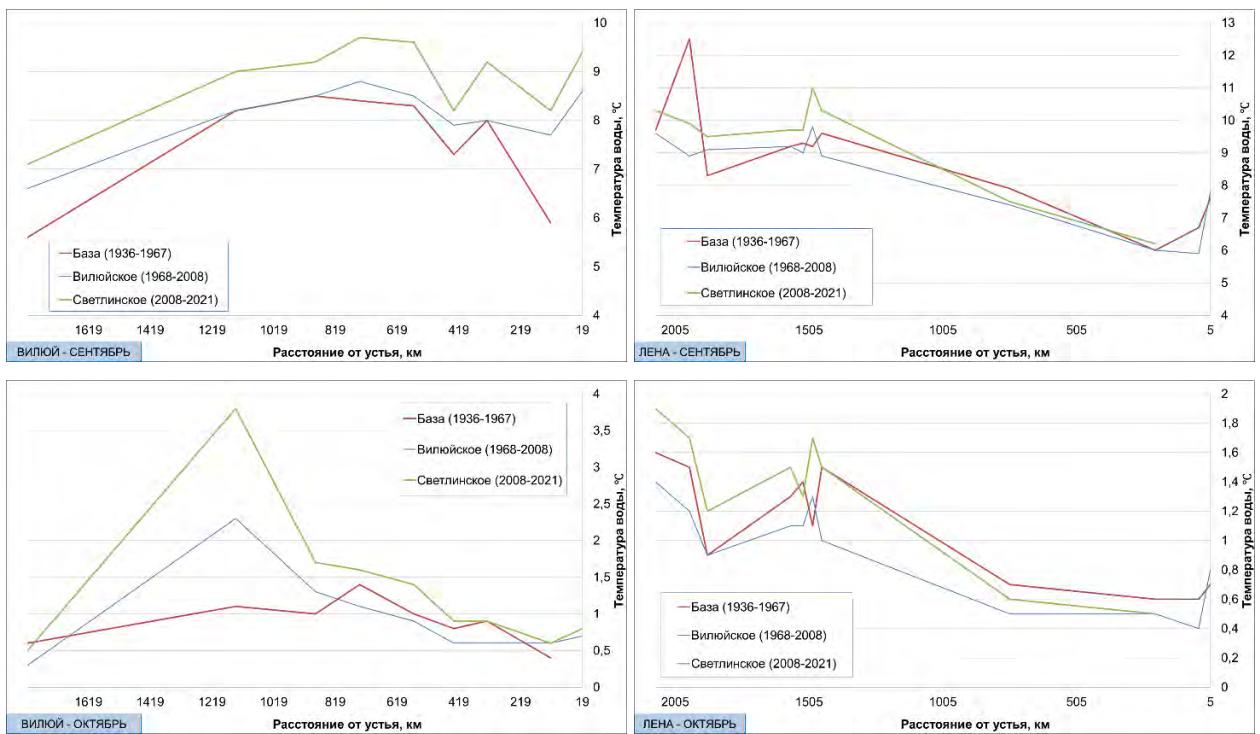


Рисунок 4.11. Вдольрусловые изменения температуры воды Вилюя (левый столбец) и Лены (правый столбец) за отдельные периоды времени до и после строительства водохранилищ на Вилюе

Анализ аномалий температуры воды и воздуха относительно периода до гидротехнического освоения показал, что, после строительства Вилуйских водохранилищ температура воды в мае выросла на небольшом протяжении (около 180 км от ГЭС), а в июне-августе на том же участке значительно снизилась, а ниже снижалась вплоть до г/п Вилуйск (около 1000 км от ГЭС). Ниже г/п Вилуйск, а в июне и ниже г/п Сюльдюкар (180 км от ГЭС) температура воды росла, несмотря на снижение температуры воздуха. В сентябре-октябре изменения температуры воздуха и воды были близки и соправлены.

В период с 1961-2021 гг. температура воды на реках бассейна р. Вилуй изменилась на весьма близкие величины в каждый месяц тёплого периода года. Воздействие водохранилищ в этот период проявилось только на участке г/п Сюльдюкар.

Важно отметить, что только на Вилую при наличии регулирования температура воды растёт в мае-июне и сентябре-октябре быстрее температуры воздуха. Ни в бассейне Оби, ни в бассейне Енисея подобного не наблюдается. Это связано с тем, что Вилуй имеет значительно меньший сток воды, по сравнению с Обью и Енисеем, равно как и основные притоки Вилюя сравнительно меньше, чем таковые Оби и Енисея, и их тепловой сток, способный нивелировать воздействие водохранилищ, сравнительно меньше. Также, Вилуйское водохранилище - одно из крупнейших по площади среди рассматриваемых в данной работе. Особенностью Вилуйского водохранилища является его многолопастная

структурой с большим количеством расширений. Как показал опыт проведённых автором полевых работ на Богучанском водохранилище, расположенном менее, чем в 1 тыс. км от Вилюйского водохранилища в период 2021-2023 гг., в подобных расширениях значительный прогрев поверхностного слоя происходит значительно быстрее, чем в условно «русловых» частях водохранилищ (узких и глубоких), даже при глубинах до 40 м. Соответственно, после строительства Вилюйского водохранилища в нижний бьеф в весенний и осенний периоды могут поступать более тёплые воды по сравнению с периодом до их строительства. Водохранилище Светлинской ГЭС низконапорное. На затопленных поймах вода прогревается лучше, чем в основном русле реки.

Сравнительно небольшая протяженность участка с изменением температуры воды обусловлена, вероятно, сравнительно небольшим регулированием стока воды на р. Вилюй.

Для Лены же разнонаправленность аномалий температуры воды и воздуха, по-видимому, характерна в силу полизональности реки.

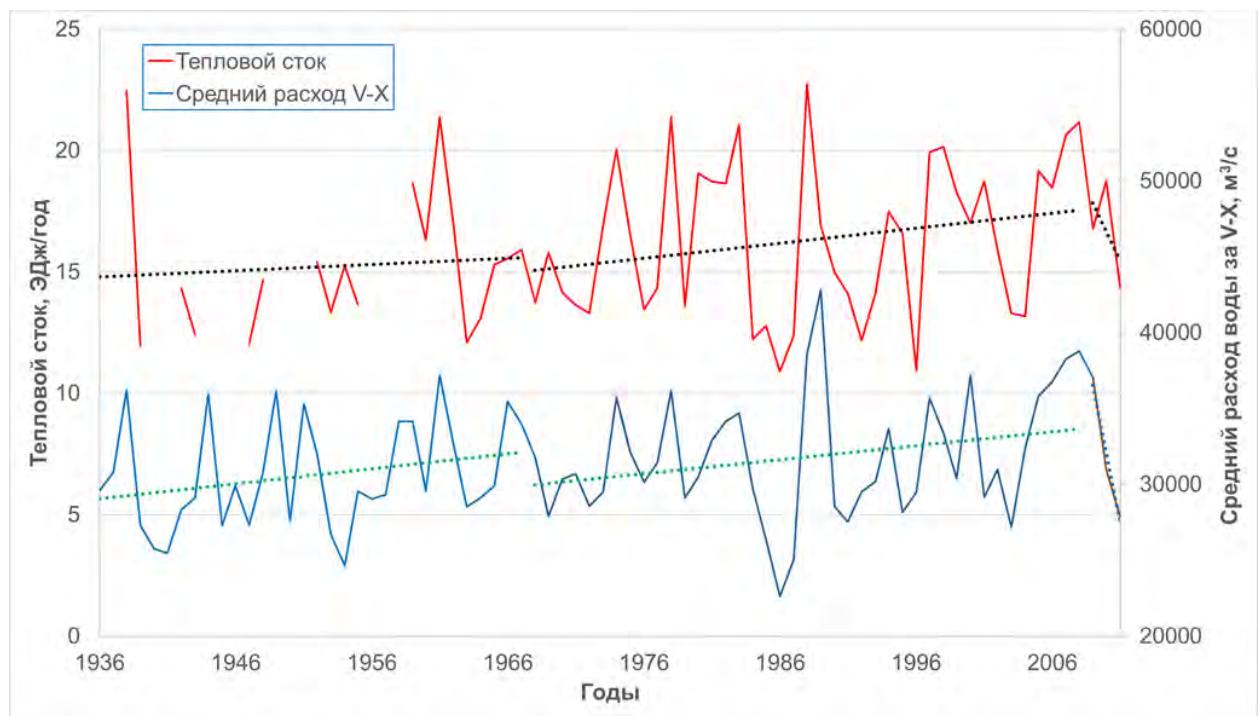


Рисунок 4.12 Многолетний ход годового теплового стока и средних расходов воды на г/п Кюсюр за период с мая по октябрь. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения Вилюя и в периоды совместной работы ГЭС бассейна по мере их ввода в эксплуатацию

Основное воздействие ГЭС на термический режим Вилюя наблюдается на достаточно непродолжительном участке (менее 200 км от Вилюйской и менее 50 км от Светлинской ГЭС) и выражается в охлаждении вод в летний период. Трансформации температуры воды ниже по течению связаны с трансформациями теплового стока притоков

Вилюя. Воздействия на термический режим Лены изменения температуры воды Вилюя не оказывают.

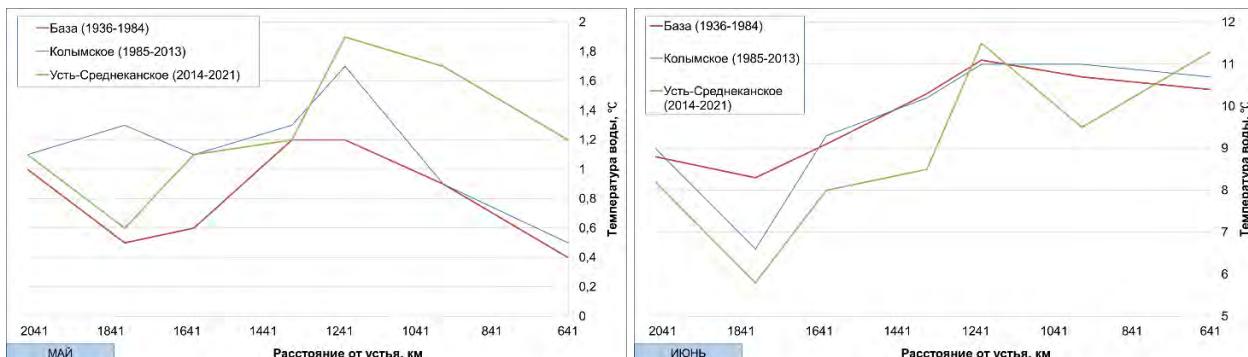
Годовой тепловой сток перед устьевой областью Лены на протяжении всего периода наблюдений изменяется соответственно изменениям стока воды (Рисунок 4.12). Оценить достоверно воздействие изменений стока от строительства Светлинской ГЭС не представляется возможным в связи с прекращением наблюдений за стоком воды на г/п Кюсюр в 2012 г. Многолетние колебания среднемесячного теплового стока р. Лена выше устьевой области также происходят синхронно с колебаниями стока воды.

Таким образом, воздействие строительства водохранилищ на Лене на тепловой сток в низовьях реки не выявлено, а на р. Вилюй данное влияние довольно ограничено, в силу особенностей регулирования водохранилищ и их морфометрических особенностей.

На Колыме строительство водохранилищ началось уже после начала климатических изменений. Колымское водохранилище было наполнено в 1984 г. С 2013 г. началось наполнение Усть-Среднеканского водохранилища.

После начала гидротехнического освоения Колымы, в июне-августе наблюдается снижение температуры воды практически до г/п Зырянка (около 660 км от Усть-Среднеканской и около 880 км от Колымской ГЭС). Наибольшее снижение температуры воды наблюдается в июле (до 3°C). В мае, сентябре и октябре наблюдается, наоборот, увеличение температуры воды. Максимальные изменения температуры воды наблюдаются именно в период после запуска Усть-Среднеканской ГЭС, причём выше Усть-Среднеканского водохранилища, ниже Колымского, что с одной стороны может быть связано с климатическими изменениями, а с другой стороны с изменением режима регулирования после появления контррегулятора.

Анализ изменения температуры воды вдоль русла р. Колымы (Рисунок 4.13) показал, что в мае и августе-октябре температура воды выросла после строительства водохранилищ, а в июне и июле снизилась. Причём большие изменения характерны для периода после строительства Усть-Среднеканской ГЭС. Изменения температуры воды минимальны у г/п Коркодон (400 км от Усть-Среднеканской ГЭС).



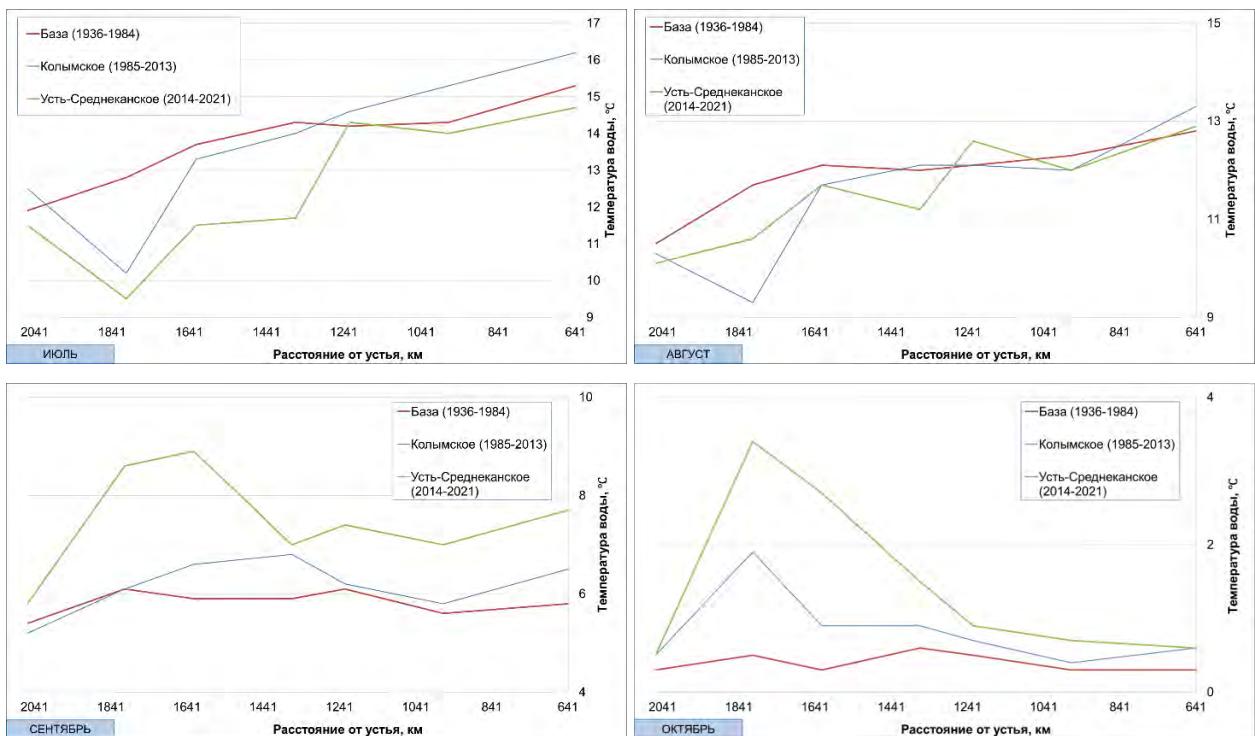


Рисунок 4.13 Вдольрусловые изменения температуры воды Колымы за отдельные периоды времени до и после строительства водохранилищ

Анализ аномалий температуры воды и воздуха показал, что в период после строительства Колымской ГЭС наблюдалось охлаждение вод в июне-августе и увеличение температуры воды в сентябре-октябре. Влияние Колымской ГЭС распространялось до г/п Коркодон. То есть, примерно на 800 км от ГЭС.

После строительства Усть-Среднеканской ГЭС наблюдаются те же тенденции, в том числе на участке между плотиной Колымской ГЭС и Усть-Среднеканским водохранилищем, а также выше Колымского водохранилища, в связи с чем невозможно однозначно выделить изменения температуры воды из-за антропогенных факторов. На антропогенное влияние указывают, с одной стороны, анализ воздействия Колымской ГЭС, когда наблюдались схожие изменения, но выше водохранилища наблюдались аномалии температуры воды и воздуха одного знака при больших величинах аномалий температуры воздуха, а с другой стороны, ряд наблюдений после строительства Усть-Среднеканской ГЭС достаточно короткий, что снижает надёжность статистических оценок.

Многолетние колебания годового теплового стока р. Колымы и средних расходов воды тёплого периода года практически полностью совпадают (Рисунок 4.14). Только в период после строительства Колымской ГЭС расходы воды росли несколько быстрее, чем тепловой сток.

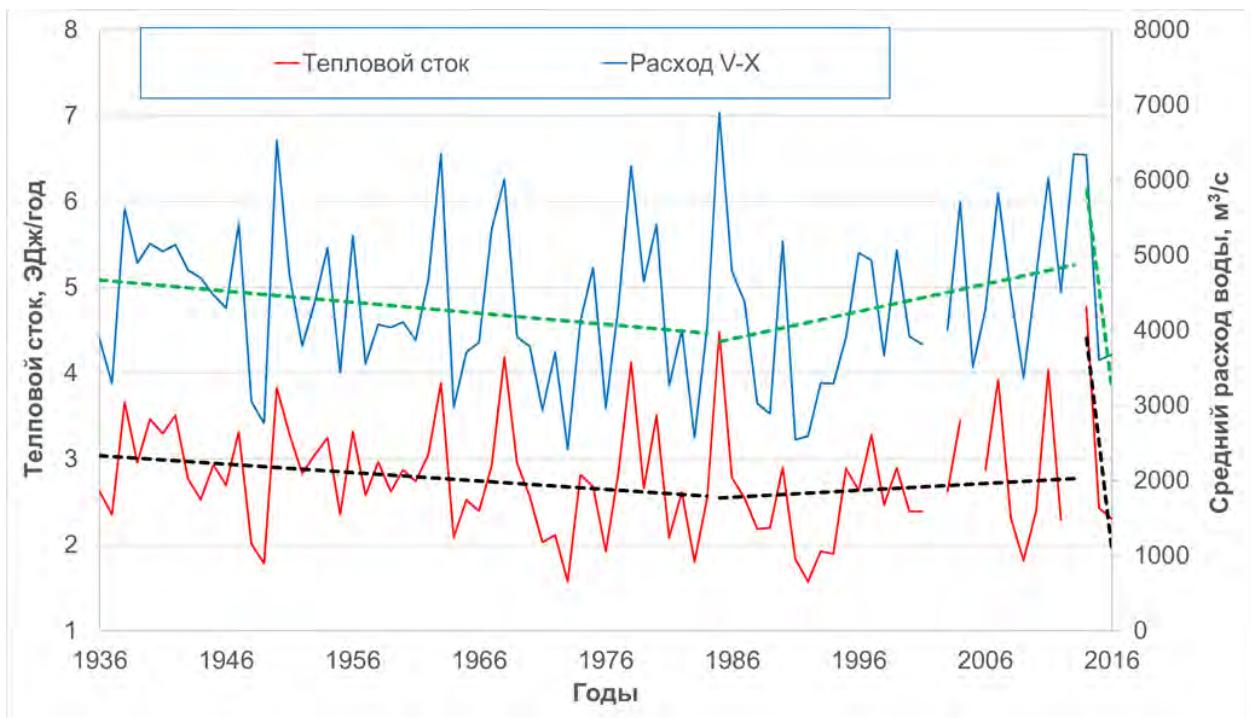
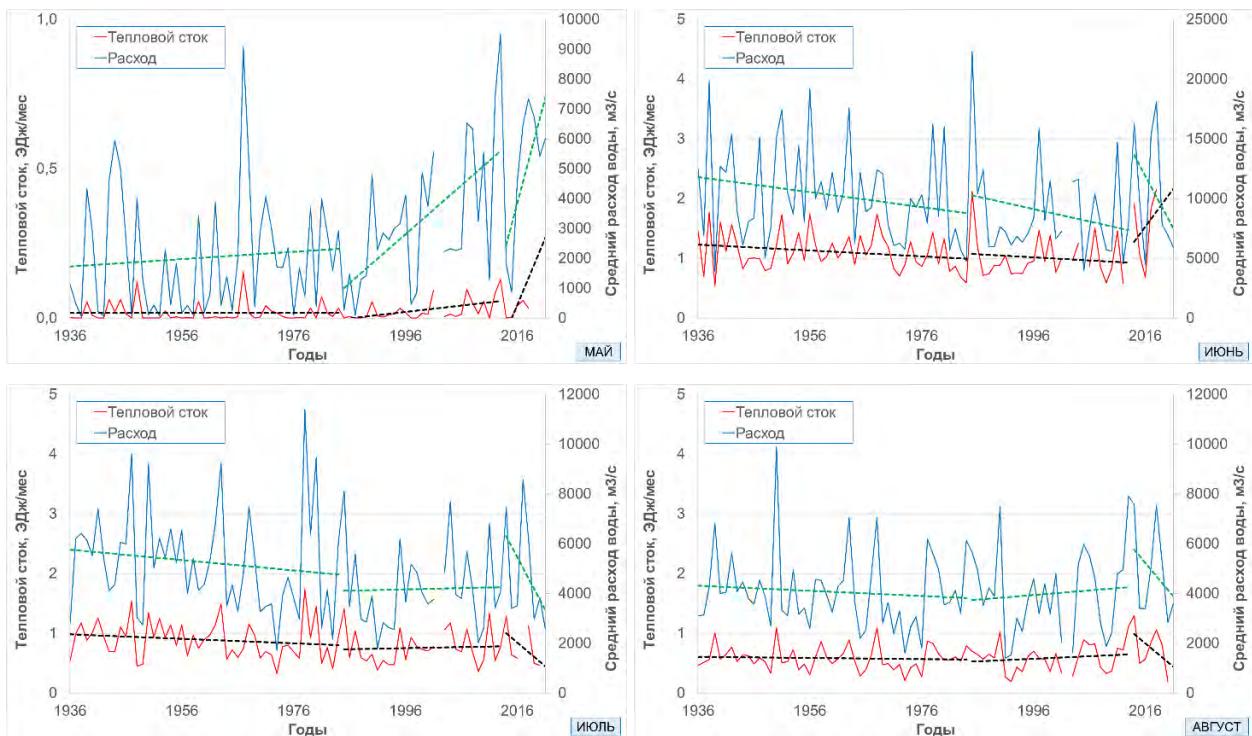


Рисунок 4.14. Многолетний ход годового теплового стока и средних расходов воды на г/п Среднеколымск за период с мая по октябрь. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения р. Колымы и в периоды совместной работы ГЭС бассейна по мере их введения в эксплуатацию

На среднемесячном уровне колебания теплового стока в период после строительства Усть-Среднеканской ГЭС (2014-2021 гг.) также соответствуют колебаниям расходов воды (Рисунок 4.15) во все месяцы тёплого периода года, кроме июня. Возможно, колебания теплового стока июня связаны с началом эксплуатации данного водохранилища.



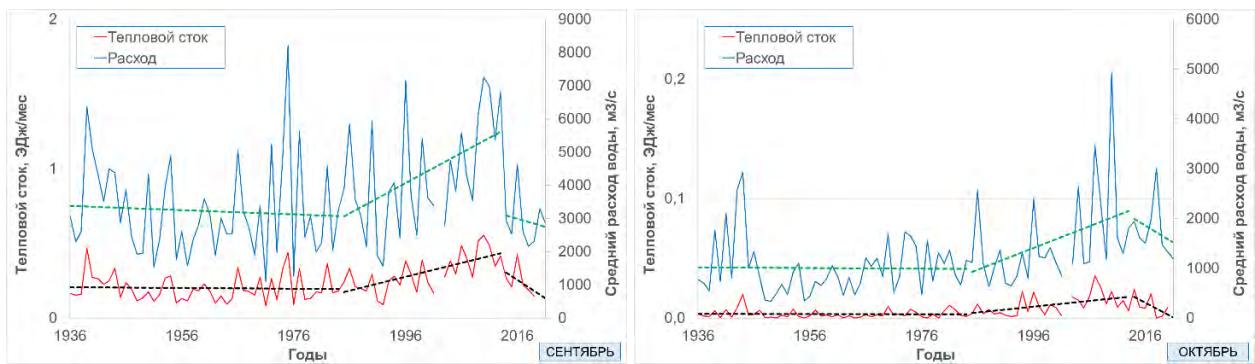


Рисунок 4.15. Многолетний ход годового теплового стока и средних расходов воды на г/п Среднеколымск за период с мая по октябрь. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения бассейна и в периоды совместной работы ГЭС бассейна по мере их введения в эксплуатацию

Полученные в нашей работе результаты сопоставимы с полученными ранее по рядам данных до 2007-2010 гг., до ввода в эксплуатацию ряда водохранилищ, оценками изменения теплового стока крупнейших рек в их низовьях [Магрицкий, 2009; Магрицкий, 2015; Lammers, 2007]. В настоящей работе показано, что в современный период, после ввода в эксплуатацию ряда новых водохранилищ, ситуация не изменилась: в низовьях рек наблюдается рост теплового стока, достигший или превышающий таковой для периода до гидротехнического освоения, а воздействие Вилойских водохранилищ на низовья Лены не прослеживается.

Подобрать реку-аналог для сопоставления воздействия рассматриваемых водохранилищ российской Арктики на низовья рек как в Арктике, так и в умеренных широтах достаточно сложно. Во-первых, в нашей работе рассматриваются наиболее крупные реки. Во-вторых, в работе описаны практически все большие водохранилища на реках, субмеридионально текущих к Северному Ледовитому океану. Большое водохранилище в Канаде на реке Пис не имеет прямой связи с рекой Маккензи, они разделены озером Атабаска и оценить влияние водохранилища на тепловой сток не представляется возможным. Тем не менее, определённые сравнения с реками умеренных широт возможны.

Некоторое количество исследований изменений термического режима рек при строительстве водохранилищ проведено для европейских рек, в первую очередь, для низовьев Дуная [Vyshnevskiy, Shevchuk, 2023], Днепра [Vyshnevskiy, Shevchuk, 2024], а также для малых и средних рек Польши [Wiejaczka, Kijowska-Strugała, 2016; Kędra, Wiejaczka, 2018]. В данных исследованиях подтверждается снижение температуры воды в летний период ниже водохранилищ, и нагревание воды в зимний период, на величины до нескольких градусов, а тепловое воздействие затухает на первых десятках километров от

плотин. В исследованиях, выполненных для рек Польши быстрое затухание изменений связано со сравнительно небольшим размером гидротехнических сооружений, тем более, они расположены на средних реках. В ряде случаев водохранилища расположены вблизи устьев рек, например, на р. Днепр В работе [Vyhnevskyi, Shevchuk, 2023], описывающей термический режим дельты р. Дунай, косвенно указано на отсутствие воздействия Джердапского водохранилища на температуру воды в дельте и отмечен ненарушенный положительный тренд температуры воды с 1960 г., то есть до строительства водохранилища. Стоит, однако, отметить, что Джердапское водохранилище сравнительно невелико и расположено на значительном удалении от дельты.

Выводы по главе:

- Термический режим большинства рек, впадающих в СЛО в последние 15-20 лет растет относительно предшествующего (с 1981 г.) периода, с наибольшим ростом на Северо-Востоке и на западном побережье Белого моря. Рост величин притока тепла к устьевым областям достигает 10-25%, в отдельных случаях 75%.
- Изменения вызваны ростом теплового стока в июне, обусловленного ростом температуры воды, увеличением теплового стока мая и октября, в том числе при удлинении периода с температурой воды выше 0°C, и ростом температуры воды переходных сезонов.
- Суммарно к устьевым областям приносится порядка 63 ЭДж/год.
- Термический режим в низовьях крупнейших арктических рек изменяется сообразно изменениям расхода воды, при этом на Оби и Колыме значительно растёт тепловой сток июня, что на Оби связано с климатообусловленным ростом температуры воды, а на Колыме, возможно, связано со строительством ГЭС, однако воздействие ГЭС постепенно нивелируется климатическими изменениями.
- Годовой тепловой сток в современный период времени сопоставим с таковым до гидротехнического освоения бассейнов арктических рек, что, по-видимому, связано с происходящими климатическими изменениями.

Глава 5. Трансформации термического режима в устьевых областях рек

5.1 Трансформация температуры воды и теплового стока в устьевых областях Севера ЕТР

Устьевые области (УОР) больших рек Севера ЕТР представлены эстуариями и дельтами, с различными величинами приливов: от микроприливов (Печора) до гиперприливов (Мезень). Особенности трансформации теплового стока рек в устьевых областях рассматриваются в данном разделе.

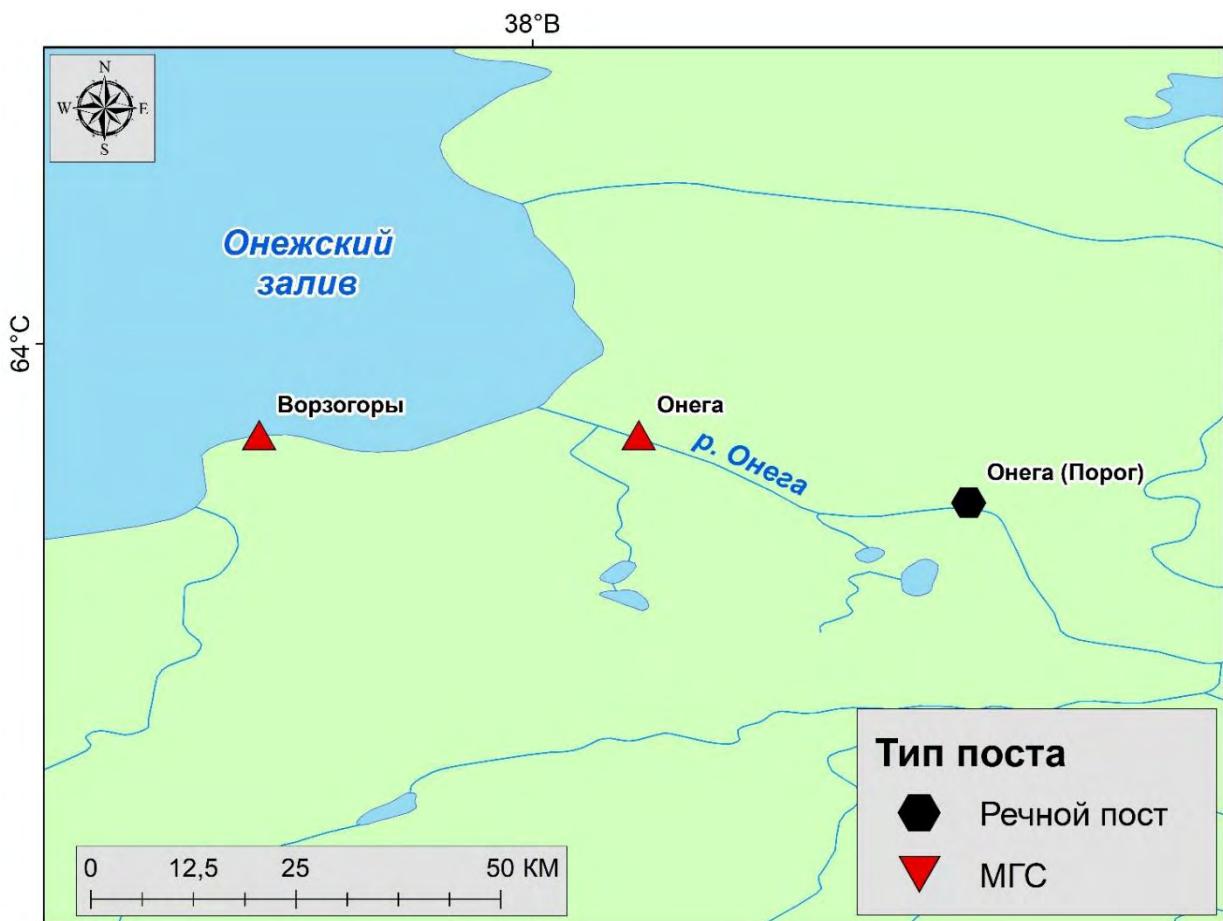


Рисунок 5.1. Взаимное расположение пунктов наблюдений за температурой воды в устьевой области Онеги

Современные наблюдения за термическим режимом устьевой области **Онеги** проводятся на морской гидрологической станции (МГС) «Онега» в г. Онега, около 5 км выше устьевого створа р. Онега, и на гидрологическом посту р. Онега д. Порог в вершине устьевой области. В период с 1977 по 1987 гг. наблюдения также проводились на МГС «Ворзогоры» в 16 км на запад-северо-запад от устьевого створа. Расположение станций показано на рисунке 5.1.

МГС Онега расположена в русле реки в зоне влияния прилива, МГС Ворзогоры находится на открытом устьевом взморье. В теплый период года (апрель-ноябрь) температура воды на рассматриваемых станциях приблизительно одинакова и ее колебания не превышают 0,7°C. Характеристики средних месячных температур воды приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Различия среднемноголетних месячных температур воды на г/п Порог и МГС в УОР Онеги за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Онега	1961-2021	-0,3	-0,4	-0,1	0,4	0,3	0,2
	1977-1987	-0,2	-0,3	-0,1	0,6	0,4	0,4
Ворзогоры	1977-1987	-0,4	0,1	0,2	0,7	0,1	0

Температура воды в реке несколько выше, чем внутри УОР, после периода нагрева вод в период с августа по октябрь. На границах устьевого взморья, при этом, отмечаются близкие к речным температуры воды также в июне и июле, максимальные же различия температуры воды в реке и в её мезоприливном эстуарии наблюдаются в августе, однако данные различия не велики. Стоит заметить, что переломные годы (по Буишанду при $\alpha = 0,05$) в период 1961-2021 гг. на МГС Онега и г/п Порог совпадают во все месяцы, кроме июля, где переломный год наступил на два года позже.

Температура воды на МГС Онега линейно связана с температурой воды на гидрологическом посту в вершине УОР, связь достаточно тесная во все месяцы теплого периода года, но становится менее устойчивой в октябре (Таблица 5.2).

Таблица 5.2 - Коэффициенты детерминации среднемноголетней (1961-2021 гг.) месячной температуры воды на МГС Онега и температуры воды и теплового стока на г/п Порог. W_t – тепловой сток, ЭДж/год; $\vartheta_{река}$ – температура воды на г/п Порог, °C; $T_{вод ГМС}$ – температура воды на МГС Онега, °C

R^2	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
$(T_{вод ГМС}, \vartheta_{река})$	0,96	0,96	0,96	0,9	0,92	0,77
$(T_{вод ГМС}, W_t)$	0,42	0	0,11	0	0,06	0,21

Значимых линейных связей величины теплового стока в вершине и внутри УОР в среднемесячном масштабе не выявлено. Подобные связи объяснимы, с одной стороны, единством факторов формирования прибрежной температуры воды на относительно

непротяженном участке; с другой стороны, роль теплового стока в формировании прибрежной температуры воды в мезоприливном эстуарии, по-видимому, незначительна.

Тепловой сток, вычисленный по данным о температуре воды МГС Онега и данным о стоке воды г/п Порог, практически идентичен таковому в вершине УОР (за период 1961-2021 гг.). Снижение на 0,01 ЭДж/мес внутри УОР наблюдается только в мае, в половодье, что соответствует снижению теплового стока мая на 8%, различий в годовом, летнем и июньском тепловом стоке не наблюдается, в результате округлений расчётов.

Переломные годы рядов среднемесячной температуры воды (1961-2021 гг.) произошли в реке Онега и её устьевой области одновременно во все месяцы, кроме июля (1999 и 1997 гг. соответственно). Статистически значимый тренд (по Манну-Кендаллу, $\alpha = 0,05$) выявлен (при полном совпадении размеров рядов на г/п и МГС) только в реке в октябре. Внутри устьевой области значимых трендов не выявлено.



Рисунок 5.2. Взаимное расположение пунктов наблюдений за температурой воды в устьевой области Северной Двины

Устьевая область Северной Двины является наиболее изученной в гидрологическом отношении во всей российской Арктике. Обобщение исследований 2022 г. приведено в [Лебедева и др., 2022]. Режим температуры воды в этой работе

приводится по данным 1976-2020 гг., однако, режим теплового стока не обсуждался, влияние климатических изменений не были оценены. Измерение температуры воды производится на 7 МГС, расположенных как на придельтом участке, так и внутри дельты (Рисунок 5.2). Наблюдения на всех постах охватывают исследуемый период 1961-2021 гг.

Анализ различий температуры воды в вершине УОР Северной Двины и внутри её устьевой области показал, что температура воды ниже г/п Усть-Пинега увеличивается практически во все месяцы года, причем наибольшие различия наблюдаются в переходные периоды (май-июнь и сентябрь-октябрь), что отражено в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Различия среднемноголетних месячных температур воды на г/п Усть-Пинега и МГС в УОР Северной Двины за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Тройная гора	2009-2020	-1	0	0,3	0,7	0,5	-0,1
Бакарица	1986-2003	-1,6	-0,2	0,4	0,1	-0,5	-0,8
Смольный Буян	1986-2021	-1,5	0	0,2	0	-0,5	-1
Северодвинск	1961-2021	-0,3	3,2	5,2	3,3	0,7	-1,3
Соломбала	1961-2021	-1,4	-0,4	0,2	-0,1	-0,6	-0,8
Конвейр	1986-1993	-1,2	0,2	0,6	0,3	-0,3	-0,7
Мудьюг	1961-2020	-0,8	0,1	1,4	1,6	0,6	-0,2

Внутри УОР температура воды в летний период значительно (более, чем на 1°C) отличается от таковой в вершине УОР только на МГС Мудьюг и Северодвинск, расположенных на морском краю дельты, более того, как отмечено в [Лебедева и др., 2022], температура воды на МГС Мудьюг можетискажаться в силу геоморфологических особенностей мест измерений, однако общая тенденция снижения температуры воды в летние месяцы на морском крае относительно вершины дельты на величины до 5,2°C сохраняется, несмотря на особенности пунктов измерений. Стоит отметить, что МГС Северодвинск находится в устье Никольской протоки, аккумулирующей множество дельтовых проток, отделяющихся от Никольского рукава дельты. Прогрева на этих мелководных участках либо не наблюдается (в силу залесенности островов), либо он достаточно мал и воздействие морских факторов на температуру воды здесь выше. Внутри дельты и на придельтом участке (г/п Усть-Пинега - МГС Смольный Буян) различия температуры воды в летний период минимальны, не более 0,3°C. Различия температуры воды на этих пунктах наблюдений весной и осенью объясняются охлаждающим воздействием реки Пинеги.

Летние колебания температуры воды внутри дельты малозаметны (до морского края) и составляют 0,1-0,6°C. При этом, наблюдаются большие различия в температуре воды внутри УОР относительно вершины в мае, в период половодья и в осенний переходный период, причём, различия растут от сентября к октябрю. Ниже г/п Усть-Пинега, температура воды в переходные сезоны повышается. Описанные тенденции подтверждаются при анализе гидрологических постов с продолжительными рядами наблюдений внутри УОР Северной Двины (Таблица 5.4).

Таблица 5.4 - Различия среднемноголетних месячных температур воды на г/п Усть-Пинега и МГС в устьевой области р. Северная Двина за период 1986-2021 гг.

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Смольный Буян	1986-2021	-1,5	0	0,2	0	-0,5	-1
Северодвинск	1961-2021	0	3,9	5,3	3,4	0,6	-1,3
Соломбала	1961-2021	-1,2	0	0,3	-0,2	-0,6	-0,8
Мудьюг	1961-2020	-0,9	0,3	1,6	1,5	0,6	0,1

Наблюдается высокая скоррелированность температуры воды в УОР и температуры воды в её вершине, что отражено в таблице 5.5. Значительные различия наблюдаются только по МГС Северодвинск на морском краю дельты. Отдельные низкие величины R^2 на МГС Тройная гора связаны с малой длиной рядов температуры воды.

Таблица 5.5 - Коэффициенты детерминации среднемноголетних месячных температур воды на г/п р. Северная Двина д. Усть-Пинега и МГС в устьевой области р. Северная Двина за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Тройная Гора	2009-2020	0,53	1	0,62	0,48	0,76	0,92
Бакарица	1986-2003	0,83	0,92	0,96	0,86	0,92	0,94
Смольный Буян	1986-2021	0,77	0,94	0,94	0,86	0,85	0,85
Северодвинск	1961-2021	0,67	0,23	0,18	0,37	0,55	0,9
Соломбала	1961-2021	0,9	0,94	0,98	0,9	0,85	0,94
Конвейр	1986-1993	0,98	0,98	0,96	0,9	0,94	0,9
Мудьюг	1961-2020	0,85	0,77	0,83	0,74	0,81	0,9

Вычисление теплового стока по данным температуры воды на МГС Смольный Буян (вершина дельты) позволило выявить увеличение годового теплового стока на 0,07 ЭДж/год, относительно г/п Усть-Пинега. Наибольшие различия наблюдаются в период половодья, которое и обуславливает годовое различие (Таблица 5.6).

Таблица 5.6 - Среднемесячные и среднегодовые величины теплового стока р. Северная Двина, вычисленные по температуре воды на г/п Усть-Пинега (вершина УОР) и на МГС Смольный Буян (вершина дельты) за период 1961-2021 гг. (данные о стоке воды с г/п Усть-Пинега)

Пункт	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	ГОД
Усть-Пинега	0	0,73	0,92	0,59	0,36	0,23	0,1	0,01	2,9
Смольный Буян	0,02	0,92	0,9	0,55	0,34	0,22	0,11	0,01	2,97

Летний тепловой сток (июнь-август) при этом снижается на 0,08 ЭДж/год, или на 4%, а июльский тепловой сток снижается на 0,04 ЭДж/мес, или на 7%.

Наиболее подробно наблюдениями за температурой воды в дельте Северной Двины освещён Корабельный рукав. Распределение стока воды по протокам дельты в настоящее время наиболее качественно определено для летнего меженного периода [Лебедева и др., 2022]. С учетом приведенных в указанной статье данных о том, что Корабельный рукав получает 14% стока воды в летний меженный период, вычислен летний тепловой сток на входе в Корабельный рукав (по данным МГС Смольный Буян) и на выходе из него (по данным МГС Конвейр). Согласно полученным данным, летний тепловой сток снижается вниз по рукаву на 0,08 ЭДж/год, или на 4%. В июле тепловой сток снижается, при тех же вводных, на величину 0,04 ЭДж/мес, или на 7%.

Распределение стока по рукавам дельты в период половодья было измерено в 1925-1929 гг. [Лебедева и др., 2022]. Согласно данным измерениям, в Корабельный рукав при различных уровнях воды поступает в среднем 25% стока воды. Предполагая такое распределение в современный период, можно оценить снижение теплового стока в мае (относительно вершины дельты) в 0,19 ЭДж/мес, или 26%.

В предположении о том, что подобные величины снижения теплового стока в мае и в летний период характерны для всех рукавов дельты, тепловой сток УОР относительно г/п Усть-Пинега в мае снижается на 7%, в летний период на 10%, а в июле на 11%. Среднее снижение теплового стока за период с мая по август составит таким образом 0,22 ЭДж/год или 8%.

Переломные годы рядов среднемесячной температуры воды (1961-2021 гг.) наступили (при совпадении размеров рядов) неодновременно в вершине УОР Северной Двины и внутри ее устьевой области (Таблица 5.7).

Переломные годы в рядах температуры воды внутри УОР Северной Двины пришли на период 1998-2002 гг. На г/п Усть-Пинега переломные годы выявлены раньше. В совместных периодах наблюдений отмечаются наибольшие различия в период половодья и в осенний сезон, в которых, видимо, в силу совокупности антропогенных и морских факторов переломные годы наступили позже, чем в вершине УОР.

Таблица 5.7 - Различия переломных лет в рядах среднемноголетних месячных температур воды на МГС в устьевой области р. Северная Двина и на г/п р. Северная Двина д. Усть-Пинега за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Тройная Гора	1961-2021	-19	0	1	7	-1	-4
Бакарица	1961-2021	0	0	0	0	-1	-4
Смольный Буян	1965-2021	-12	0	1	0	-1	-8
Северодвинск	1961-2021	-11	16	3	8	-5	-8
Соломбала	1961-2021	-11	0	0	0	-1	-4
Конвейр	1961-2018	0	0	-10	0	0	0
Мудьюг	1961-2021	-11	-1	0	0	-5	-8

Значимых трендов температуры воды после переломных лет в УОР Северной Двины не выявлено, равно как не выявлено их в вершине УОР в совместные периоды наблюдений. Статистически значимый тренд выявлен (при полном совпадении размеров рядов на г/п и МГС) только в октябре. Внутри устьевой области значимых трендов температуры воды не выявлено.



Рисунок 5.3. Взаимное расположение пунктов наблюдений за температурой воды в устьевой области Мезени

В гиперприливном эстуарии **Мезени** на русловом участке наблюдения за температурой воды производились только краткосрочные, не более нескольких лет. Длительные наблюдения проводятся внутри Мезенской губы на двух МГС, расположение которых приведено на рисунке 5.3.

Речные воды в замыкающем створе Мезени в период с мая по сентябрь теплее, чем воды губы, при этом в период половодья (май) различия с прибрежной температурой воды в западной части губы составляют менее 1°C, а сентябре и октябре температуры воды в губе и в реке отличаются на 0,5°C и менее (Таблица 5.8).

Таблица 5.8. Различия среднемноголетних месячных температур воды на г/п Дорогорское и МГС в УОР Мезени за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Абрамовский маяк	1968-2021	0,9	3,8	4,1	1,8	0	-0,4
мыс Конушин	1961-1996	2,5	4,4	3,8	2,1	0,5	0

При этом температура воды достаточно слабо коррелирована в реке и в губе, что отражено в таблице 5.9. Исключение составляет температура воды в октябре в восточной части губы (по крайней мере до 1996 г.), в этом месяце наблюдаются как высокие коэффициенты детерминации (более 0,7) с температурой воды в реке, так и с тепловым стоком. Отсутствие подобной связи в западной части губы может быть объяснено циклональной циркуляцией вод в губе.

Таблица 5.9. Коэффициенты корреляции среднемноголетних месячных температур воды на г/п Дорогорское и МГС в УОР Мезени за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Абрамовский маяк	1968-2021	0,58	0,71	0,64	0,71	0,62	0,62
мыс Конушин	1961-1996	0,2	0,49	0,64	0,66	0,49	0,85

Наблюдения за температурой воды в устьевой области **Печоры** проводятся до настоящего времени на пяти МГС, а в период 1961-1977 гг. наблюдения велись на семи пунктах. До выхода на морской край дельты в настоящее время действует три МГС: Нарьян-Мар (протока Большая Печора); Красное (протока Куйский Шар, ответвление Большой Печоры); Андег (узел разветвления Малой Печоры на Средний и Тундровый шары, у

протоки Месино, соединяющей Большую и Малую Печору). Гидрологический пост Оксино, расположенный несколько ниже вершины УОР, находится под воздействием приливных колебаний, в связи с чем гидрологическим постом с исходным для расчётов тепловым стоком является г/п Усть-Цильма. Взаимное расположение пунктов наблюдений в УОР Печоры приведено на рисунке 5.4.

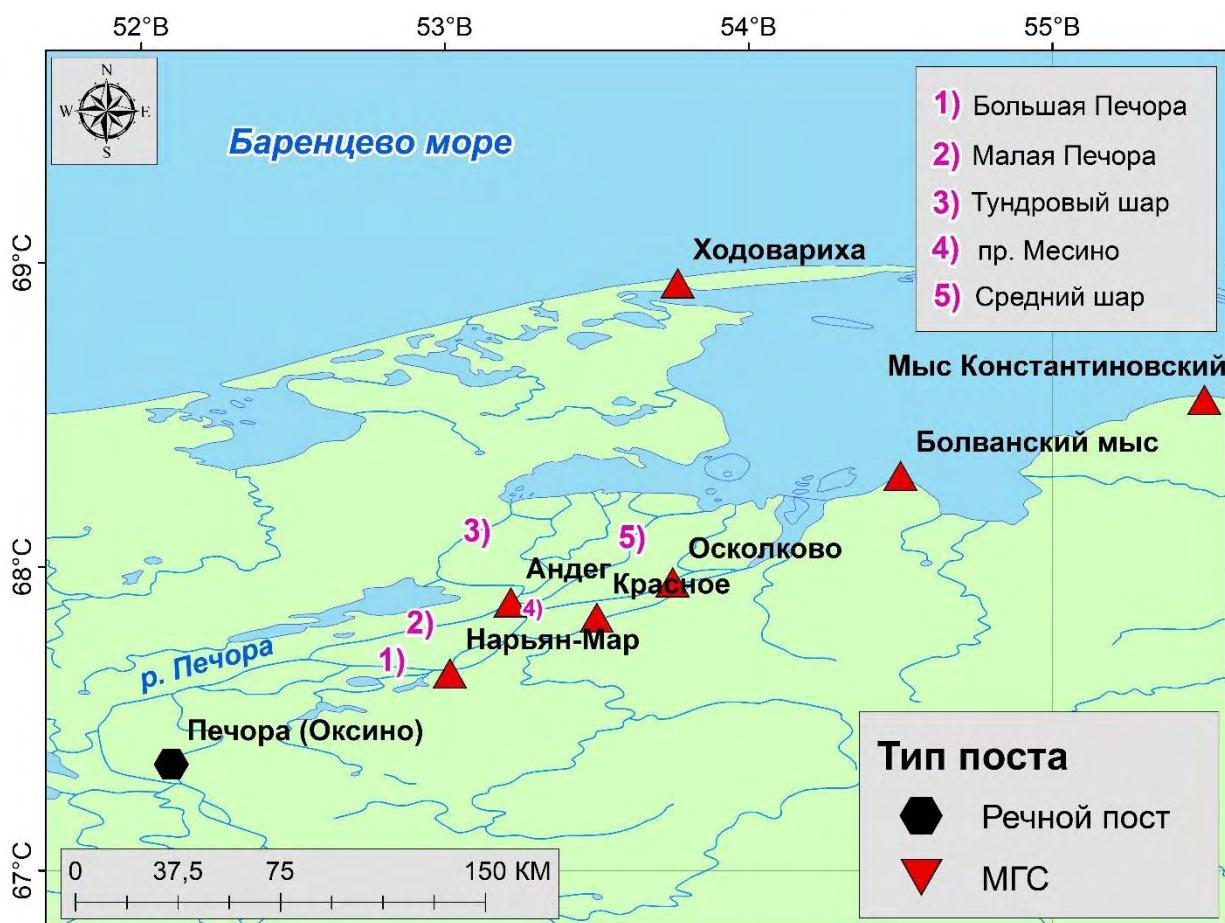


Рисунок 5.4. Взаимное расположение пунктов наблюдений за температурой воды в устьевой области р. Печора

Температура воды в рукавах Большая и Малая Печора сравнительно близка с таковой в условной вершине УОР (в пределах 0,5°C) (Таблица 5.10).

Однако в период спада половодья-начала межени (июль) температура воды в Большой Печоре несколько ниже, чем в вершине УОР. В Малой Печоре во все месяцы теплого периода температура воды выше, чем на г/п Оксино. Наблюдается также тенденция к увеличению различий в переходные сезоны.

В 1960-е и 1970-е годы разница выше 0,5°C наблюдалась на МГС Осколково, вероятно, из-за сравнительно меньшего периода наблюдений на МГС и на гидрологическом посту. Также определённое искажение температуры могло возникать благодаря тепловому стоку малых проток дельты выше МГС Осколково.

Таблица 5.10. Различия среднемноголетних месячных температур воды на г/п р. Печора д. Оксино и МГС в устьевой области р. Печора за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Нарьян-Мар	1980-2021	-0,4	0	0,2	0	-0,3	-0,6
Красное	1980-2018	-0,3	0,1	0,2	0	-0,2	-0,6
Андеg	1980-2021	-0,7	-0,3	-0,1	-0,4	-0,5	-0,7
Осколково	1961-1977	0,3	-0,5	0,8	1,5	0,7	-0,1
Болванский мыс	1980-1997	1,1	4,1	1,7	1,5	1,4	0,7
Мыс Константиновский	1980-2021	1,7	5,4	2,9	2,1	1,1	0,6
Ходовариха	1980-2021	2,5	7,1	7,9	4,7	1,4	-0,4

Значительные различия в июне растут вниз по протоке Большая Печора до 1,1°C, однако, вниз по Малой Печоре различия невелики и остаются в пределах 0,5°C, как и в другие месяцы года. В конце мая-начале июня в низовьях Печоры обычно наблюдается весенне полноводье. Вне морского края дельты температура воды во все месяцы ниже, чем в вершине УОР, причем различия увеличиваются от кута Печорской губы к её выходу, достигая, как и в случае Мезенской губы, сравнительно небольших различий в переходные сезоны, в особенности в осенний.

Таблица 5.11. Различия среднемноголетних месячных температур воды на г/п р. Печора с. Усть-Цильма и МГС в устьевой области р. Печора за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Нарьян-Мар	1961-2021	-0,2	-0,4	1	1,2	0,3	-0,3
Красное	1961-2018	0	-0,3	1	1,2	0,4	-0,3
Андеg	1961-2021	-0,4	-0,7	0,8	0,9	0,1	-0,3
Осколково	1961-1977	0,3	-0,5	0,8	1,5	0,7	-0,1
Болванский мыс	1961-1997	0,9	3	2,1	2,5	1,8	0,8
Мыс Константиновский	1961-2021	1,6	4,6	4	3,3	1,6	0,9
Ходовариха	1962-2021	2,4	6,2	9,1	6,3	2	-0,1

Сравнение температуры воды на МГС в УОР Печоры с температурой воды на г/п Усть-Цильма, имеющем более полные ряды наблюдений в 60-е и 70-е годы XX в., продемонстрировало схожие тенденции в мае-июне и сентябре-октябре, при этом в период половодья и в переходные сезоны воды УОР теплее, чем воды в районе расположенного

южнее гидрологического поста, летом же, наоборот, наблюдается снижение температуры воды с юга на север (Таблица 5.11).

Температура воды внутри устьевой области достаточно тесно связана с температурой воды в её вершине, хотя на отдельных пунктах наблюдений в некоторые месяцы локальные факторы могут ослаблять эту связь. В октябре роль речной температуры воды в формировании температуры воды внутри УОР резко снижается (Таблица 5.12).

Таблица 5.12. Коэффициенты детерминации среднемноголетних месячных температур воды на г/п р. Печора д. Оксино и МГС в устьевой области р. Печора за совместные периоды наблюдений

МГС	Период совместных наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Нарьян-Мар	1980-2021	0,69	0,88	0,92	0,96	0,81	0,18
Красное	1980-2018	0,71	0,9	0,92	0,96	0,83	0,18
Андег	1980-2021	0,72	0,88	0,94	0,94	0,85	0,26
Осколково	1961-1977	0,92	0,22	0,96	0,98	0,49	0,81
Болванский мыс	1980-1997	0,64	0,71	0,83	0,83	0,71	0,08
Мыс Константиновский	1980-2021	0,59	0,55	0,74	0,62	0,71	0,26
Ходовариха	1980-2021	0,27	0,5	0,18	0,38	0,58	0,34

Оценки распределения стока воды по рукавам дельты приводятся в [Полонский, 1984] и составляют в вершине дельты в период половодья 46% в рукав Большая Печора (правый) и 54% в рукав Малая Печора (левый); в меженный период 40% в рукав Большая Печора (правый) и 60% в рукав Малая Печора (левый); данные распределения в дальнейшем подтверждены рядом экспедиций, в том числе с участием автора [Борщенко и др., 2021, Алабян и др. 2022]. В районе д. Андег при разветвлении русла в проток Месино, связывающую Малую и Большую Печору, в Большую Печору перетекает в период половодья 16,5% стока Малой Печоры, а в период межени 25% стока. Таким образом, в районе д. Красное (протока Куйский шар Большой Печоры ниже протоки Месино), в среднем за теплый период года Большая Печора переносит 55% стока Печоры. Соответствующая величина стока воды и температура воды на МГС Красное использованы для оценки изменения теплового стока в рукаве Большая Печора. Температура воды на ГМС Нарьян-Мар, расположенной непосредственно на берегу рукава, а не в протоке, практически не отличается от таковой на МГС Красное (различия в пределах 0,0-0,1°C; в июне 0,2°C). Влияние местных факторов таким образом при расчёте предполагается нивелированным. Оценка для рукава Малая Печора проводилась по температуре воды на МГС Андег, с величиной стока 45% процентов от стока р. Печора (переток в протоку Месино не учитывался, поскольку МГС расположена на противоположном от входа в

протоку берегу). Расчёты проводятся с 1980 г., поскольку в рядах среднемесячной температуры воды 1961-1979 гг. имеются многочисленные пропуски.

Результаты расчёта для рукава Большая Печора приведены в таблице 5.13. При снижении годового стока Большой Печоры на 3% наблюдается снижение в протоке майского теплового стока, и значительный рост июльского, что, вероятно, связано с продолжительным таянием льда в дельте и лучшим прогревом проток.

Таблица 5.13. Среднемесячные и среднегодовые величины теплового стока (ЭДж) рукава Большая Печора, вычисленные по температуре воды на г/п Оксино (близко к вершине УОР) и на МГС Красное за период 1980-2021 гг. (с допущением о среднем поступлении в район д. Красное 55% стока воды р. Печора)

Пункт	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	ГОД
Оксино	0	0,1	0,67	0,4	0,2	0,14	0,04	0	1,54
Красное	0	0,11	0,67	0,42	0,21	0,15	0,05	0	1,62

Годовой тепловой сток протоки Малая Печора растёт к д. Андег в среднем на 11%, за счёт теплового стока мая, июня и июля (Таблица 5.14). Рост теплового стока в период половодья вниз по протоке может быть объяснен поступлением более теплых вод множества проток.

Таблица 5.14. Среднемесячные и среднегодовые величины теплового стока (в эксаджолях) рукава Малая Печора, вычисленные по температуре воды на г/п Оксино (близко к вершине УОР) и на МГС Андег за период 1961-2021 гг. (с допущением о среднем поступлении в район д. Андег 45% стока воды р. Печора)

Пункт	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	ГОД
Оксино	0	0,03	0,24	0,14	0,07	0,05	0,02	0	0,55
Андег	0	0,05	0,25	0,16	0,07	0,05	0,02	0	0,61

Таким образом, суммарный тепловой сток из дельты Печоры, по данным МГС, расположенных в дельте, составляет 2,23 Эдж/год, что на 7% больше рассчитанного теплового стока для замыкающего створа р. Печоры. Данная трансформация, однако, может не исключать дальнейшего снижения теплового стока вниз по рукавам дельты, равно как и не исключает дальнейшего его роста.

5.2 Трансформация температуры воды и теплового стока в устьевых областях азиатского сектора российской Арктики

Для рассматриваемых крупнейших рек характерно снижение или очень небольшое изменение температуры воды по направлению от створа измерения теплового стока к

устьевой области реки. Большие притоки на участке между замыкающим створом и устьевой областью есть только у Енисея, где между г/п Игарка и г/п Караул впадает два большой зарегулированный приток - Хантайка. Величины изменений температуры воды и теплового стока в низовьях больших рек представлены на рисунке 5.5.

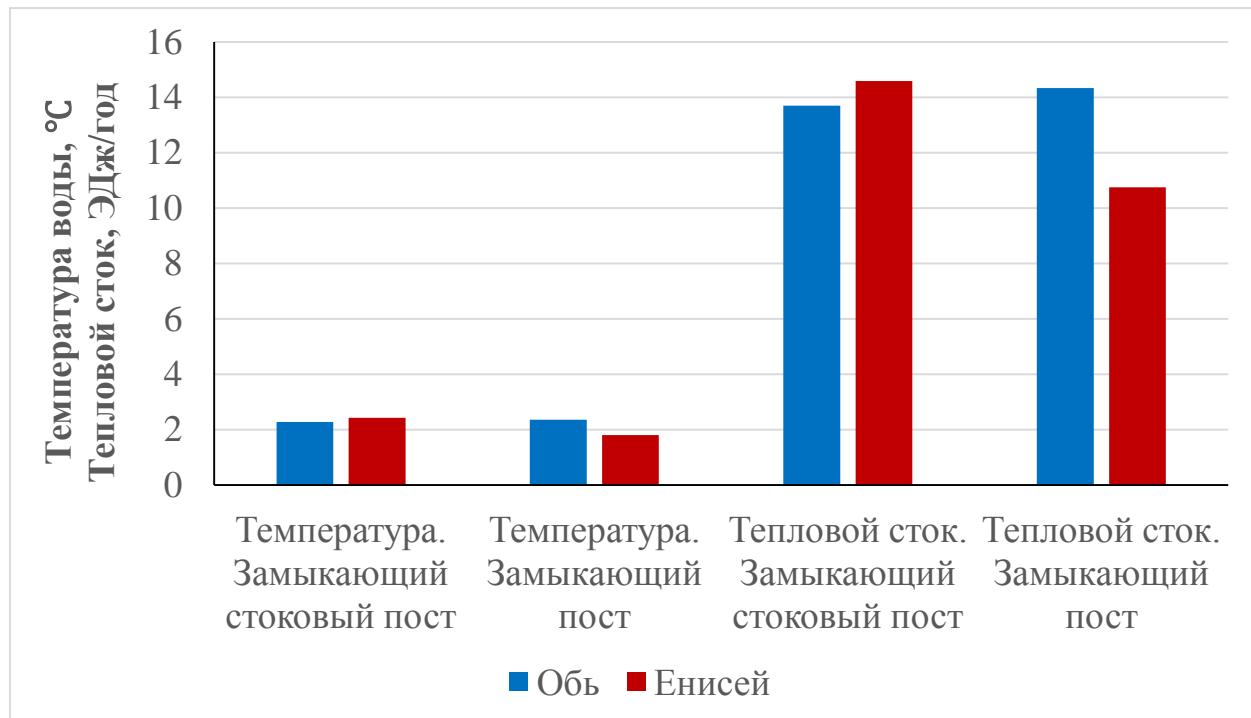


Рисунок 5.5. Трансформации средней за май-октябрь температуры воды и теплового стока в низовьях Оби и Енисея за совместные периоды наблюдений

Как видно из графика, тепловой сток Оби несколько увеличивается на участке от Салехарда до Аксарки (65 км), на 0,63 Эдж/год или на 5% (1961-2006). Ошибки вычислений среднего арифметического теплового стока за совместный период наблюдений составляют 0,36 и 0,42 ЭДж/год. Указанные изменения могут обусловлены впадением на данном участке сравнительно больших судоходных проток Оби, а также ряда притоков из пойменных озёр.

На Енисее от г/п Игарка до г/п Караул (444 км) снижается и температура воды, и тепловой сток. Тепловой сток в замыкающем створе снижается на 26% при использовании данных о стоке воды с г/п Игарка (1961-2014 гг.). Ошибки вычислений среднего арифметического теплового стока за совместный период наблюдений составляют 0,28 и 0,26 ЭДж/год для Игарки и Караула соответственно. При этом сток воды в УОР выше, чем в Игарке, поскольку замыкающий стоковый створ не учитывает сток р. Хантайка. Однако, снижение температуры воды на протяженном субмеридиональном участке в среднем на 2°C (28%) здесь остаётся заметным.

Прибрежные температуры воды в южной части Обской губы, в рассматриваемый период времени 1981-2018 гг. практически всегда холоднее, чем воды Оби и Надыма. В мае реки теплее на 0,8-1,2°C, причем более теплой является река Надым. В июне, во время половодья реки также теплее поверхности моря на 8,2 и 7,3°C, причем более холодные воды в р. Надым. Это наибольшие различия за год. Река Ныда в эти месяцы также теплее, чем поверхность морских вод у Нового Порта, однако величины различий меньше, чем для рек Обь и Надым: 0,4°C в мае и 5,3°C в июне. В остальные месяцы температура воды в устье Ныды близка к таковой в вершине дельты Надыма.

Температура воды р. Енисей у с. Караул достаточно хорошо коррелирует с температурой морской воды у морской станции Сопочная Карга в июле, сентябре и октябре $r = 0,76-0,85$. Температура морской воды в среднем ниже, чем речной на 2,8°C в июне-сентябре. Роль теплового стока в формировании температуры воды на данной морской станции может быть достаточно велика.

Температура воды на выходе из Енисейского залива (1977-1992 гг.) хорошо коррелирует с температурой на Сопочной Карге в июле и сентябре. Достаточно стабильна разница температур речной и морской воды на м. Летниковском, на западном берегу Енисейского залива - 4,5-5°C в июле-сентябре. Высоких корреляций между температурами воды в реке и море (на выходах из залива) не отмечается. В достаточно короткий период совместных наблюдений на о. Вилькицкого (Карское море) и станциями Енисейского залива, значительные корреляции с $r > 0.7$ наблюдались только в сентябре, что говорит о значительной роли местных факторов в формировании прибрежной температуры воды моря в данном районе.

В зоне воздействия реки Оленёк значительных корреляций температуры воды на МГС мыс Терпяй Тумса и на речных гидрологических постах не выявлено. Только в сентябре наблюдался коэффициент корреляции $r > 0,7$ температуры воды на станции и на постах Усть-Оленёк и Таймылыр. Перепад температур между Усть-Оленёком и м. Терпяй Тумса составлял 3,6°C в июне, 10,4°C в июле, 6,3°C в августе и 3°C в сентябре. В октябре и ноябре перепад составлял 1,2°C.

Значительно более тесные связи температуры воды моря и реки наблюдались для платформы Олимпийская и р. Оленёк. С июня по сентябрь отмечались $r > 0,8$, в июле $r > 0,9$. При этом связь между температурой воды на посту Таймылыр и платформой Олимпийской несколько более тесная, чем на посту Усть-Оленёк с той же платформой. Это обусловлено географической близостью данных пунктов наблюдений на разных склонах Оленёкского хребта. Предполагается, что Оленёк в низовьях может являться аналогом по термическому режиму для Оленёкской протоки дельты р. Лены. Разница в температуре

воды в устье Оленёка и на платформе Олимпийской в июле достигала 1,7°C, в августе - 2,7°C, в сентябре - 2,1°C, а в остальные месяцы - менее 1°C.

Данные о термическом режиме моря на морском краю дельты Лены ограничены. В устье протоки Оленёкской (западный рукав дельты) в 1980-е годы располагалась МГС Олимпийская. На северо-западе дельты находилась МГС о. Дунай (1977-2011 гг.), однако, к нему в настоящее время не выходят протоки дельты. На выходе из залива Неелова, образованного протокой Исполатова, в основной действующей протоке дельты располагалась МГС м. Быков (1977-1994 гг.).

В 1980-е годы наблюдалась достаточно высокая корреляция между температурой воды на морской станции Олимпийская и речным постом Кюсюр ($r > 0,8$, $R^2 > 0,66$) в июне-сентябре. Разница в температуре воды достигала 5,5°C, с максимумами в августе и июле. В апреле, мае и октябре температура воды в реке превышала морские минимумы на 1°C.

Схожая пространственная изменчивость наблюдается при сравнении речной температуры воды с температурой воды на м. Быковском (1978-1994). Температура воды в море в июне и июле была на 4,5-4,9°C ниже, чем в реке, в августе - на 2,5°C, в сентябре - на 2°C. Таким образом, термический режим на протяженном участке р. Лены и в восточной протоке дельты отличаются мало, по сравнению с реками, рассмотренными ранее. Однако, оценить наличие трансформации температуры воды внутри устьевой области по данным наблюдений затруднительно. Следует отметить, что в сентябре наблюдаются достаточно высокие корреляции температуры воды в реках и в прибрежных зонах моря в сентябре ($r > 0,7$). Связь в этот месяц у морских станций выше. Это подтверждается в том числе данными морской станции о. Муостах (1977-1994 гг.), расположенной восточнее дельты.

Наблюдения за температурой воды в устьевой области Колымы не проводятся, однако, в рамках экспедиции в августе 2019 г. с участием автора, проведены как точечные, так и с применением логгеров измерения температуры воды. Показано, что вдоль правого берега Колымы и вдоль правого берега правого рукава дельты Каменной Колымы наблюдается шлейф вод р. Анюй (40 км от вершины дельты) и возможно р. Омолон (160 км от вершины дельты). Также температура воды у правого берега изменяется за счет притока р. Пантелейха, впадающего с правого берега перед вершиной дельты. В условиях циклональной холодной погоды воды Пантелейхи создавали охлаждающий эффект на прибрежную зону у правого берега Колымы в створе Черского. А с установлением антициклональной теплой погоды быстро нагревшиеся воды Пантелейхи обусловили скачок температуры на 3,5°C в узкой 200-м прибрежной зоне, тогда как от левого до правого берега температура по всей ширине Колымы (3 км) в диапазоне от 14,5 до 12,8°C. В целом на малых водотоках после антициклонального периода нагревания температура воды была

на 2,5°C выше, чем в Колыме. Различия в температуре воды, измеренной в Пантелеихе и средней температуре воды Колымы в период экспедиции, достигали 1,3°C. Такие различия приводят к занижению теплового стока на 2-12%. Тепловой сток занижается сильнее в периоды более холодной погоды. Значительное влияние на левобережье придельтового участка оказывает Стадухинская протока, остивающая при изменениях погодных условий быстрее Колымы и создающая шлейф более холодных, примерно на 1-1,5°C вод, а при переходе к антициклональным условиям создает шлейф теплых вод, теплее на 0,5-2,5°C. Отепляющее воздействие малых водотоков может проявляться достаточно быстро, в начале более теплого периода. К примеру, на 40-км участке между устьем р. Омолон и ур. Дуванный Яр температура воды по всему участку возросла на 1°C (по измерениям 1.08.2019). Различия поверхностной и придонной температуры воды в Колыме не превышали 0,1-0,2°C, что свидетельствует о хорошем турбулентном перемешивании в потоке.

Особый интерес представляет распределение тепла по рукавам дельты в её вершине. Как показали измерения, значительное воздействие на температуру воды Походской Колымы (левый рукав дельты) и левобережья Каменной Колымы (правый рукав дельты) оказывает шлейф вод Стадухинской протоки. Его влияние отмечается в периоды остывания у нп. Петушки в 40 км от устья Стадухинской протоки. При этом, при поступлении из Стадухинской протоки более теплых, по сравнению с водами Колымы вод их воздействие на левобережье Каменной Колымы не прослеживается. Предположительно более теплый, и соответственно менее плотный шлейф вод отжимается в левую Походскую Колыму. В Каменной Колыме наблюдается слабое воздействие шлейфа вод Анюя. В Каменной же Колыме и в ее протоках, наблюдалось снижение температуры воды у берегов в периоды поступления сравнительно теплых вод Стадухинской протоки. По-видимому, при достаточно продолжительных циклонических условиях у берегов поступают в реку более холодные воды поверхностного склонового стока, либо воды таяния многолетнемерзлых пород. Наблюдается также охлаждающее воздействие малых притоков, к примеру р. Филиповки. Величина охлаждения прибрежных вод независимо от источника снижения температуры составляла 0,5-0,7°C.

Вывод по главе: трансформация температуры воды и теплового стока в устьевых областях рек изучена в настоящее время недостаточно, однако, данные многолетних наблюдений позволили выявить как снижение, так и рост температуры воды в устьевых областях рек, представленных преимущественно дельтами больших рек, при этом рост температуры воды в сторону морского взморья предположительно обусловлен впадением множества прогретых проток и притоков, часто связанных с озёрами. Пересчёт теплового стока в моря с учётом полученных данных показывает, что сделанная в работе оценка притока тепла к

устьевым областям рек величиной в 62,7 ЭДж/год, должна быть скорректирована на - 2,9 ЭДж/год. Снижение данной величины обусловлено в первую очередь завышенной оценкой теплового стока Енисея.

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 количеством дней с отрицательной температурой воздуха за период с октября по май. Использовалось пять вариантов регрессионных зависимостей для оценок продолжительности будущего периода с ледовыми явлениями и три варианта регрессионных зависимостей для оценок будущей продолжительности ледостава. В качестве метеорологических данных использованы результаты четырёх моделей протокола ISIMIP. 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. Подробно методика описана в разделе 2.4.

Результаты оценок будущего ледового режима рек 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 века ожидается сокращение периода ледостава на сроки от 3 до 58 суток, при изменениях периода с ледовыми явлениями на величины от +7 до -34 суток (Рисунок 6.1).

На большем количестве рассматриваемых речных участков величина потенциального сокращения периода с ледовыми явлениями не сопоставима с изменениями в 1991-2020 гг. в сравнении с 1961-1990 гг. с наблюдаемыми на сегодняшний день. Восточнее бассейнов Оби и Таза процесс величины изменений преимущественно ниже современных для продолжительности периода с ледовыми явлениями, а западнее бассейна Енисея, наоборот, выше, причем значительно. Оцениваемые изменения продолжительности периода с ледовыми явлениями в 2031-2060 гг. на 2-3 недели больше, чем те, которые наблюдаются на сегодняшний день. Стоит отметить, что в горных частях бассейнов Яны, Индигирки и Колымы потенциально возможно небольшое увеличение периода с ледовыми явлениями. Тоже возможно и на р. Онеге. Изменения относительно современной величины в таких случаях оцениваются как достаточно небольшие – в пределах 7 дней. Наибольшее потенциальное сокращение периода с ледовыми явлениями

ожидается на реках юга Кольского полуострова, а также в низовьях Оби, на её левых притоках, находящихся на Полярном Урале и на притоках нижнего Енисея.

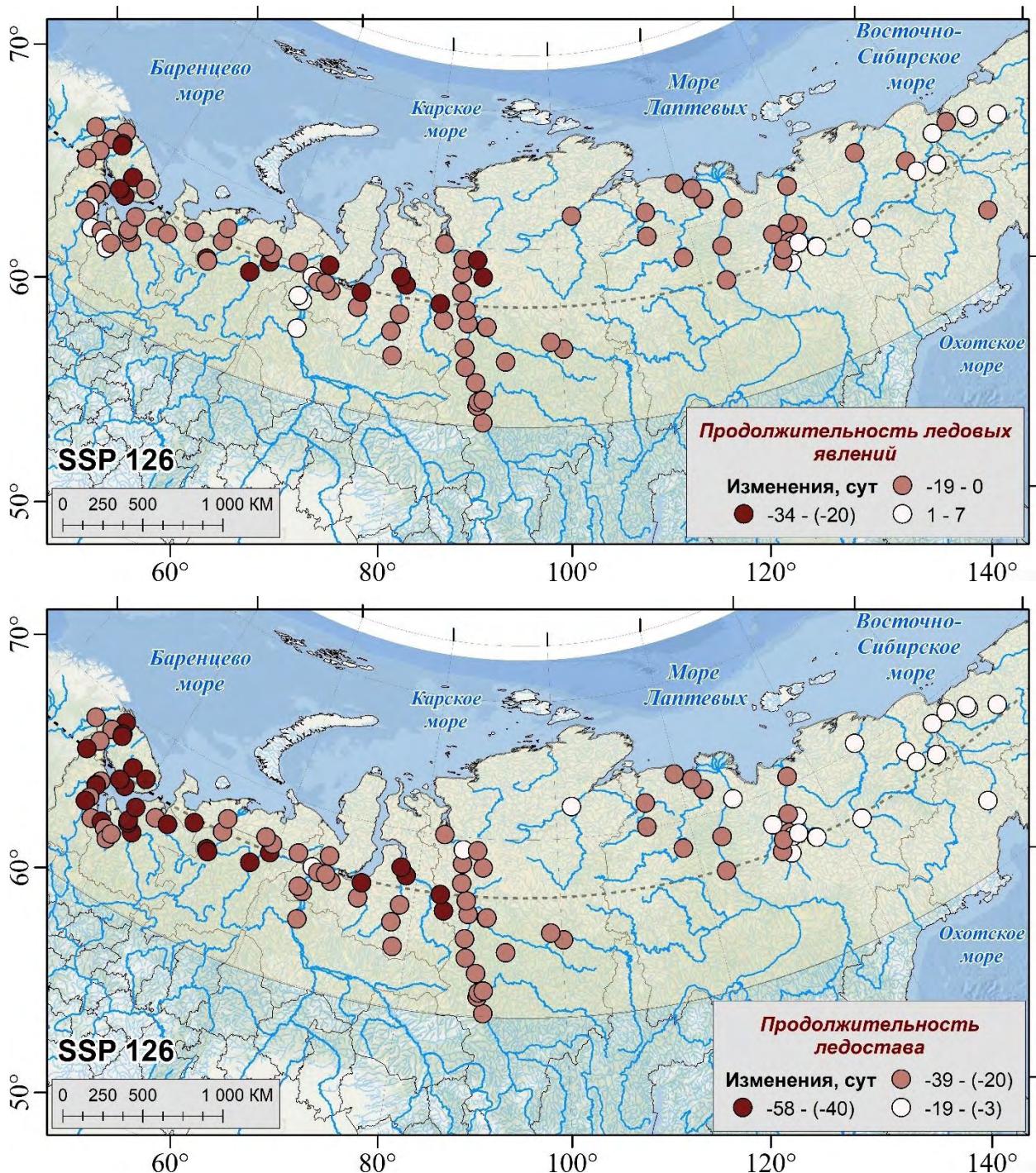


Рисунок 6.1. Ожидаемые изменения продолжительности периода с ледовыми явлениями (сверху) и периода ледостава (снизу) в 2031-2060 гг. при реализации сценария SSP 126

Сокращение же периода ледостава ожидается повсеместно. Наименьшие изменения, менее чем на 10 суток, ожидаются на реках восточной части бассейна Колымы, и, для западных районов Чукотки, на остальной территории российской Арктики ожидается сокращение периода ледостава в среднем на месяц. На Севере ЕТР потенциальные

изменения достигают 1,5-2 месяцев практически на всех реках. Стоит отметить, что речь идёт о самом мягким из потенциальных сценариев климатических изменений.

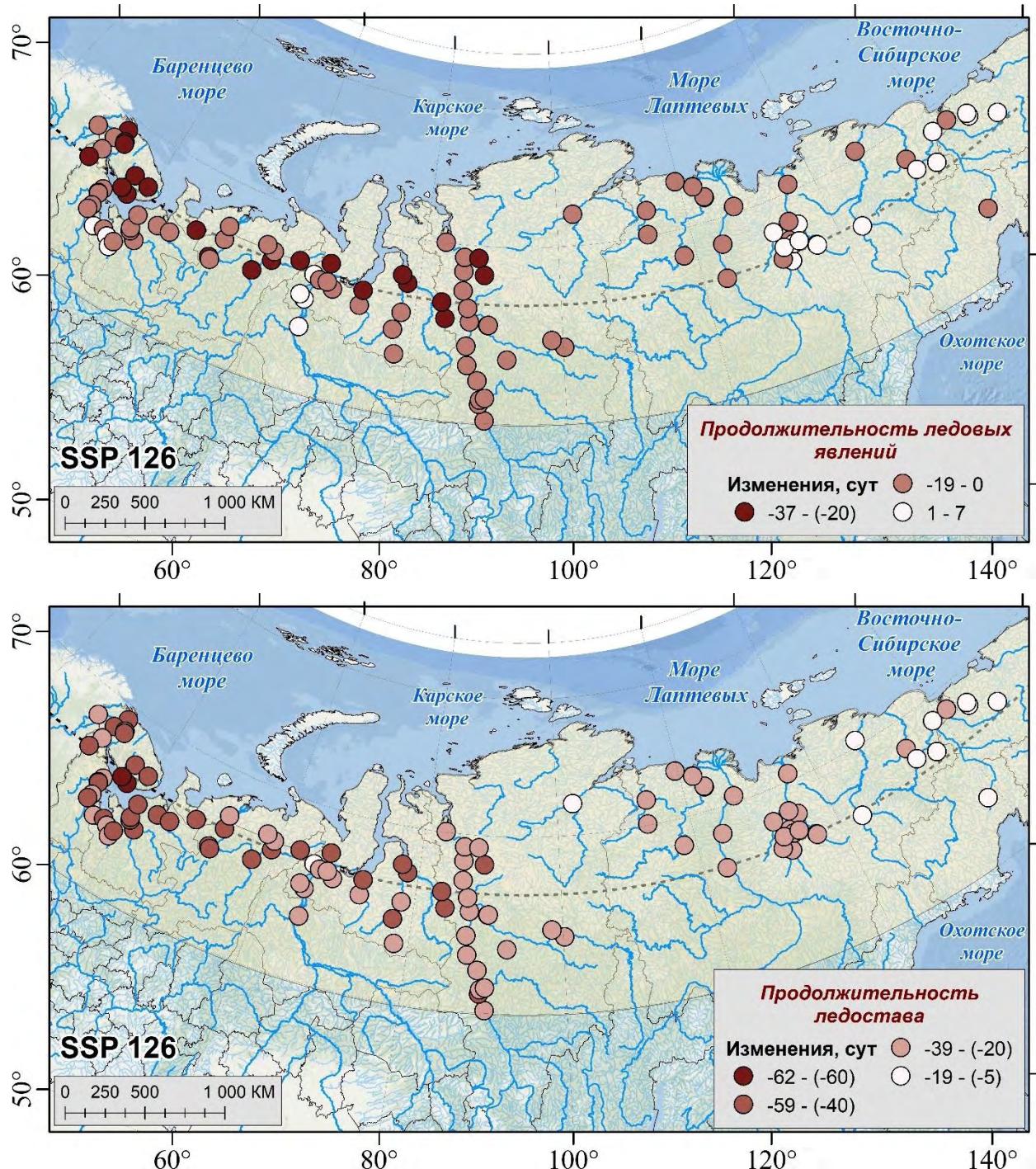


Рисунок 6.2. Ожидаемые изменения продолжительности периода с ледовыми явлениями (сверху) и периода ледостава (снизу) в 2071-2100 гг. при реализации сценария SSP 126

К концу века, в соответствие с тем же сценарием, 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 (Рисунок 6.2).

Стоит отметить, что величины изменений обеих характеристик в конце столетия изменяются относительно середины столетия на величины, сопоставимые с изменениями, наблюдаемыми на сегодняшний день: $\pm 3\text{--}5$ 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.

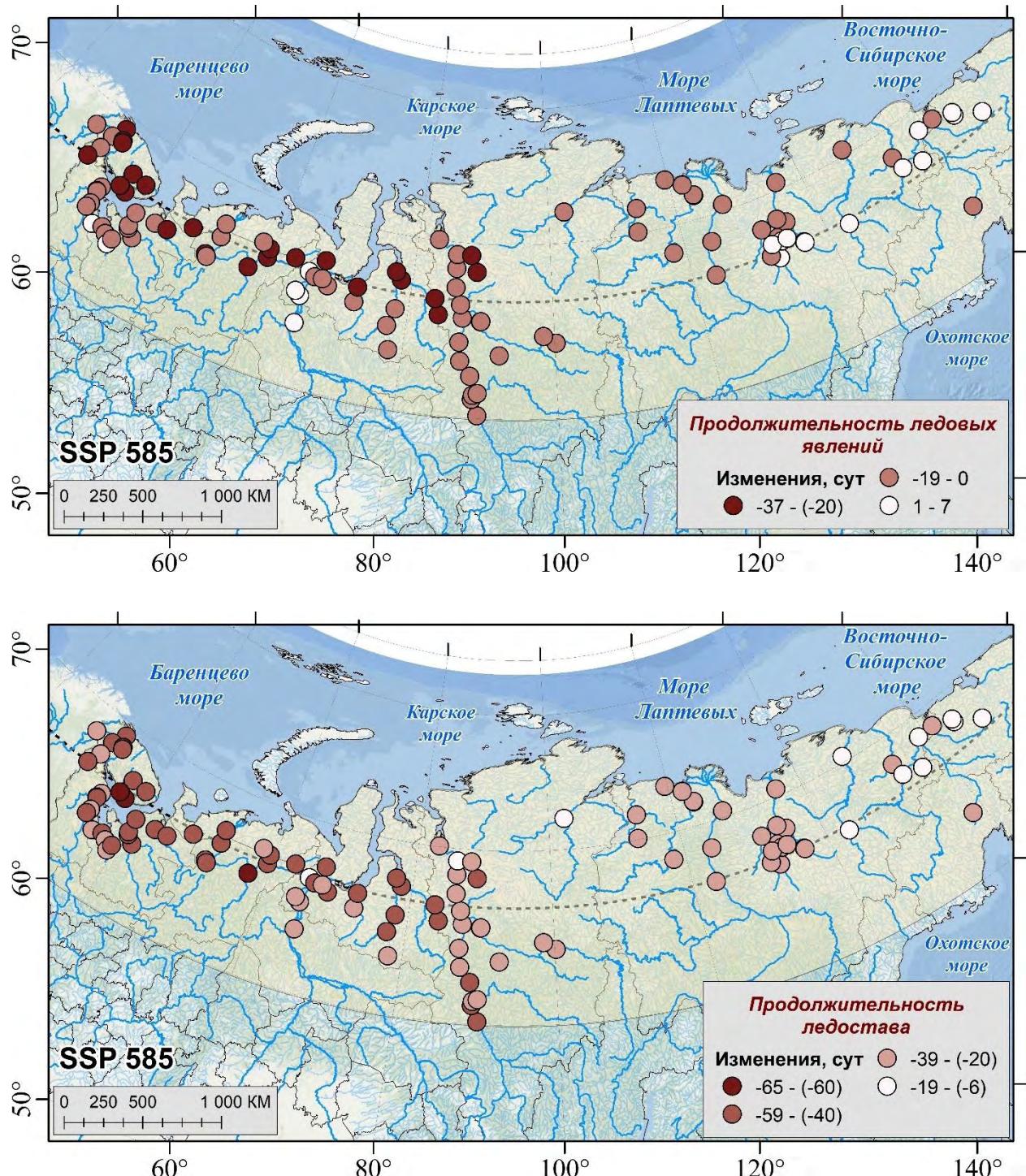


Рисунок 6.3. Ожидаемые изменения продолжительности периода с ледовыми явлениями (сверху) и периода ледостава (снизу) в 2031–2065 гг. при реализации сценария SSP 585

Отметим, что оценки будущего ледового режима на конец XXI в. по сценарию SSP 126 сопоставимы (различия в оценках в среднем 1 сутки, максимум 6 суток) с оценками по сценарию SSP 585 на середину столетия (Рисунок 6.3).

В конце века при оценке по жёсткому сценарию ожидается сокращения периода с ледовыми явлениями на величины от 9 дней до 2 месяцев (Рисунок 6.4).

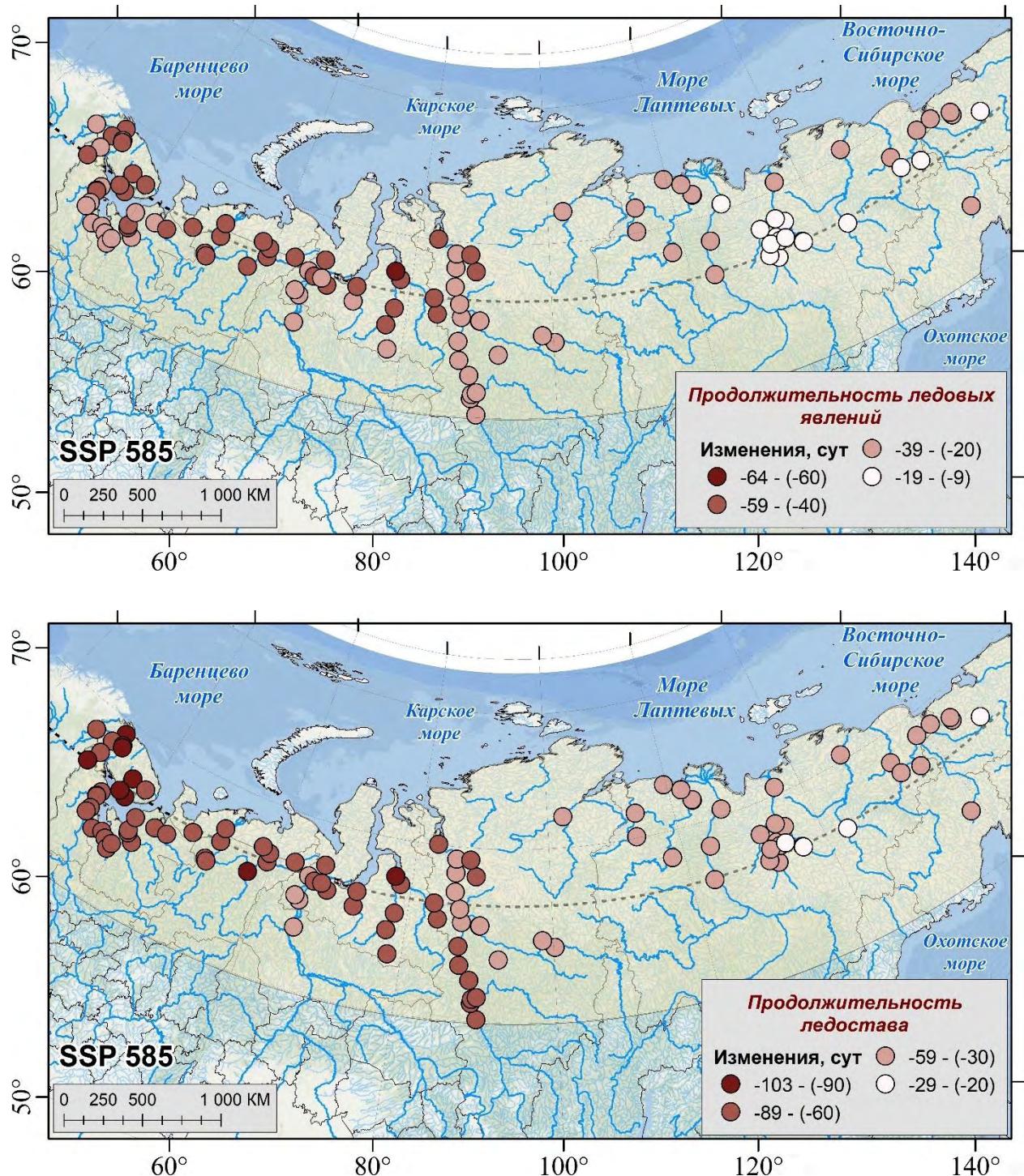


Рисунок 6.4. Ожидаемые изменения продолжительности периода с ледовыми явлениями (сверху) и периода ледостава (снизу) на период 2071-2100 гг. при реализации сценария SSP585

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.

Наибольшее сокращение периода ледостава ожидается, при реализации «жёсткого» сценария к концу столетия, на Кольском полуострове, преимущественно на реках, не вытекающих непосредственно из озёр, а также на Усе и в низовьях рр. Пур и Таз. На Севере ЕТР, на севере Западной Сибири и на среднем Енисее ожидается сокращение периода ледостава на два-три месяца. Восточнее в пределах двух месяцев, опять же за исключением отдельных рек различных величин в верховьях Яны, Индигирки, на верхней Алазее и в верховьях Малого Анюя (правый приток нижней Колымы).

Важно отметить, что даже при жёстком сценарии к концу столетия не ожидается полного отсутствия ледовых явлений и ледостава повсеместно в российской Арктике. Суммарная продолжительность периода с ледовыми явлениями в дальневосточном секторе российской Арктике, по полученным оценкам, может составлять 6-8 месяцев. Максимальные же изменения ожидаются в равнинной части рассматриваемой территории, преимущественно без распространения (современного) ММП на Севере ЕТР и на севере Западной Сибири. Здесь период с ледовыми явлениями может сократиться до 4-5 месяцев, что в отдельные годы на севере ЕТР наблюдается и в наши дни.

Обращает на себя внимание и факт значительно большего сокращения периода ледостава, в сравнении с периодом с ледовыми явлениями, показанный всеми моделями. Однако, 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. 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 рассматриваемой территории 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 в большинстве оценок она увеличивается относительно современной в 2-3 раза (Таблица 6.1).

Полученные оценки продолжительности будущих периодов с ледовыми явлениями сопоставимы, с более ранними работами, в том числе с участием автора [Agafonova et al.,

2017; Vasilenko et al., 2019]. Приведённые оценки можно считать даже несколько более «жёсткими», что связано, по-видимому, с обновлением сценариев климатических изменений.

Таблица 6.1. Потенциальные изменения характеристик ледового режима рек при реализации различных сценариев *CMIP6* в отдельных гидрографических регионах

Характе ристика	Продолжительность периода с ледовыми явлениями				Продолжительность ледостава			
	Период		2031-2060		2071-2100		2031-2060	
	Сценарий	SSP126	SSP585	SSP126	SSP585	SSP126	SSP585	SSP126
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

Следует отметить, что впервые показаны значительные различия в степени изменения продолжительности ледостава по сравнению с продолжительностью периода с ледовыми явлениями.

Вывод по главе: Потенциальное сокращение периода с ледовыми явлениями на основе оценок с использованием новейших климатических моделей 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. Показано также, что наименьшие изменения характерны для горных районов дальневосточного сектора Арктической зоны, в большей степени потенциальные изменения ожидаются на реках равнин севера Западной Сибири и Севера ЕТР, а наибольшие ожидаются на реках Кольского полуострова, не вытекающих из озёр.

Заключение

В соответствии с целью работы и защищаемыми положениями можно выделить следующие выводы:

1. Значительно расширены базы данных по ледовому и термическому режимам рек Арктической зоны России, являющиеся на сегодняшний день одними из самых подробных в мире. Важной особенностью данных баз является включение в них только действующих по сегодняшний день гидрологических постов, объем данных на которых достаточен для проведения статистических анализов и оценки пространственной неоднородности.
2. Статистический анализ временных рядов позволил выявить и описать максимально соответствующие современным условиям характеристики ледотермического режима рек российской Арктики и его пространственно-временной изменчивости.
3. На базе современных данных построены карты среднемесячной температуры воды в реках, сроков появления льда, установления ледостава, начала ледохода и продолжительности периодов с ледовыми явлениями и ледостава. 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 многолетней закономерности увеличения продолжительности периода с ледовыми явлениями с юго-запада на северо-восток, сохраняющееся как для осенних, так и для весенних характерных сроков наступления фаз ледового режима.
4. В последние 60 лет наблюдается статистически значимая тенденция к росту среднемесячной температуры воды в арктических реках, с величинами роста большими, чем в расположенных южнее регионах мира, в особенности в мае-июне, в период половодья и в несколько меньшей степени в сентябре и октябре, при сравнительно небольших изменениях в летний период. Наиболее значительные изменения выявлены в Арктической части Западной Сибири, в регионе с наибольшими изменениями температуры воздуха без широкого распространения многолетнемёрзлых пород и преимущественно равнинным рельефом.
5. В последние 30 лет тренды изменений температуры воды практически повсеместно статистически не значимы. В последние 20 лет количество выявленных значимых трендов ещё меньше. Соответственно можно утверждать, что произошло некоторое замедление изменений температуры воды в реках. При этом, в период нагрева вод в мае-июне в европейском секторе рассматриваемой территории многолетние тренды имеют большую интенсивность, чем тренды в последние 30 лет. В то же время в азиатском секторе, с более континентальным климатом выявлено ускорение изменений термического режима рек в

последние 30 лет в сравнении с многолетними трендами. В июле-октябре же, в европейском секторе в последние 30 лет температура воды изменяется интенсивнее, чем в многолетний период, а в азиатском секторе - медленнее. Таким образом, больший вклад в изменения температуры воды вносят в европейском секторе месяцы с июля по октябрь, а в азиатском - май и июнь.

6. Многолетние тренды (1961-2021 гг.) изменений ледового режима рек в среднем соответствуют многолетним, в том числе вековым трендам, выявленным для множества замерзающих рек Северного полушария. Многолетние тренды, как и в случае термического режима статистически значимы. Наблюдается сокращение периода ледостава за счёт смещения на более поздние даты сроков появления льда и установления ледостава и на более ранние даты сроков начала ледохода и сроков очищения ото льда. Среднее сокращение периода с ледовыми явлениями и периода ледостава в последние 20-30 лет, а на Севере ЕТР в последние 40 лет, составило 9 суток, в первую очередь за счёт смещения сроков появления льда и установления ледостава на более поздние даты.

7. Интенсивность изменений характеристик ледового режима в осенний период усиливается относительно многолетней, в то время как интенсивность изменений характеристик ледового режима весной практически не меняется относительно многолетней изменчивости.

8. Показана трансформация температуры воды в наиболее изученных устьевых областях Арктической зоны России, обусловленная снижением объемов воды в протоках дельт и теплообменом с берегами и местной гидрографической сетью дельт. Недоучёт трансформаций температуры воды в дельтах приводит к переоценке теплового стока крупнейших рек российской Арктики в Северный Ледовитый океан на величину порядка 3 ЭДж/год. С учётом этих данных, а также расчётов теплового стока средних и больших слабоизученных рек, тепловой сток рек в моря Северного Ледовитого океана с территории России составляет в среднем не менее 69-73 ЭДж/год. Показанная переоценка теплового стока в целом невелика, однако, в пределах отдельных устьевых областей и низовий рек тепловой может меняться от -28% (низовья Енисея) до +7-8% (УОР Северной Двины и Печоры).

9. В приливных и гиперприливных эстуариях наблюдается сравнительно близкая температура воды на русловом участке УОР и растянутое по времени «выравнивание» температуры воды в вершине УОР и на морской её границе, причём период выравнивания растёт с уменьшением величин приливов. При этом значительной трансформации теплового стока в приливных эстуариях не происходит.

10. Тепловой сток рек в Северный Ледовитый океан растёт в последние 20-30 лет, причём основной прирост формируется в июне, в северо-восточной части Арктической зоны России в связи с климатообусловленным ростом температуры воды и смещением на более ранние сроки дат очищения ото льда, а также климатообусловленным снижением стока в половодье и лучшим прогревом водных масс.

11. Антропогенное воздействие строительства водохранилищ на тепловой сток Оби и Енисея, проявлявшееся во второй половине XX в., в XXI в. оказалось снижено климатическими факторами. 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 в их нижних бьефах всё ещё велика.

12. Показано, что сокращение периода с ледовыми явлениями при оценках с использованием новейших климатических моделей 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. Показано также, что наименьшие изменения характерны для горных районов дальневосточного сектора Арктической зоны. Значительные потенциальные изменения ожидаются на реках равнин севера Западной Сибири и Севера ЕТР, а наибольшие ожидаются на реках Кольского полуострова, не вытекающих из озёр.

Список литературы

1. Агафонова С. А. Ледовый режим рек Арктической зоны Западной Сибири в современных климатических условиях // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 25-33.
2. Агафонова С. А., Магрицкий Д. В., Банщикова Л.С. Водный и ледовый режим устья р. Печоры в современных гидроклиматических условиях // Водные ресурсы. 2025. Т. 52, № 1. С. 38-51.
3. 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. Сер. 5, География. 2022. № 1. С. 167-179.
4. Алексеев В. Р. Наледи и наледные процессы (вопросы классификации и терминологии). Новосибирск: Наука, 1978. 188 с.
5. Алексеевский Н. И., Базелюк А. А., Кузьмина Е. О. Термический режим рек на юге европейской территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 5. С. 55-66.
6. Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В. Особенности термического и ледового режимов р. Сулак // Материалы международной научно-практической конференции "География и регион". Вып. IV. Пермь, 2002. С. 912.
7. Антонов В. С. Енисей: гидролого-навигационный очерк реки и подходов к ней по Карскому морю / под ред. М. К. Федова. Л.: Морской транспорт, 1962. 99 с. (Труды Арктического научно-исследовательского института Главного управления Северного морского пути при Совете министров СССР; Т. 245)
8. Антонов В. С. Устьевая область реки Лены: (гидрологический очерк). Л.: Морской транспорт, 1967. 108 с.
9. Антонов В. С. О переходном температурном коэффициенте для воды в низовьях реки Оби // Проблемы Арктики. 1941. Т. 1. С. 69-70.
10. Антонов В. С. Количество тепла, вносимое реками в Карское море // Труды Арктического института. 1936. Т. 35. С. 23-50.
11. Антонов В.С. Низовье и устье реки Оби / В.С. Антонов, Н.Г. Маслаева. - Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 235 с.
12. Атавин А. А., Зиновьев А. Т., Кудишин А. В. Ледотермический режим нижнего бьефа Новосибирского гидроузла // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 2. С. 123-130. DOI: 10.7868/S0321059614020023.
13. Атавин А. А., Зиновьев А. Т., Кудишин А. В. Математическое моделирование гидроледотермического режима зарегулированного участка реки // Фундаментальные

проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: материалы Международной научной конференции (Томск, 0307 сентября 2000 года). Томск: Издательство научно-технической литературы, 2000. С. 371-375.

14. Атавин А. А., Зиновьев А. Т., Кудишин А. В., Овчинникова Т. Э. Комплексная математическая модель гидродинамических и термодинамических процессов в нижних бьефах гидроузлов // Сибирский журнал индустриальной математики. 2020. Т. 23, № 3(83). С. 515. DOI: 10.33048/SIBJIM.2020.23.301.
15. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянскова А.А. Новосибирск: Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2021. 302 с. ISBN 978-5-6046428-2-5/
16. Борщенко Е. В., Мишин Д. В., Ермакова Г. С., Горелиц О. В., Фатхи М.О., Жбаков К. К., Ракчеева Е. А., Строков А. А., Турсунова Г. Ш., Севастьянова Л.Ю. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора. Москва; Иваново: ИПК «ПресСто», 2021. 152 с. ISBN 978-5-6047387-4-0.
17. Бузин В. А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб., 2015. 242 с.
18. Бузин В. А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 203 с.
19. 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: ООО «Пять плюс», 2009. 168 с.
20. Булатов С. Н. Основные факторы, определяющие начало весенних подвижек льда на реках // Метеорология и гидрология. 1952. № 2. С. 34-37.
21. Булатов С. Н. Расчет прочности тающего ледяного покрова и начало ветрового дрейфа льда. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 111 с.
22. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2(384). С. 92-116. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-92-116.
23. 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. 822.
24. Вуглинский В. С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях //

Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7, Геология. География. 2014. № 3. С. 32-45.

25. Вуглинский В. С., Гронская Т. П. Изменения ледового режима рек и водоемов России и их возможные последствия для экономики // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 229-244.
26. География Сибири в начале XXI века: в 6 т. Т. 2: Природа / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т географии им. В. Б. Сочавы; гл.ред. В. М. Плюснин; отв. ред. Ю. М. Семенов, А. В. Белов. Новосибирск: Гео, 2015. 384, [7] с.
27. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007.
28. Гидрогеологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:2 500 000 / под общ. ред. С. В. Яковлева. М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2008. 1 к.
29. Гинзбург Б. М. Вероятностные характеристики сроков замерзания и вскрытия рек и водохранилищ Советского Союза. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 110 с.
30. Горчаков А. М., Милаев В. М. К вопросу о нормировании привноса тепла в водные объекты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 6. С. 62-72.
31. Готлиб Я.Л., Жидких В.М., Сокольников Н.М. Тепловой режим водохранилищ гидроэлектростанций. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 202 с.
32. Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Сазонов А. А., Пахомова О. М., Поздняков С. П., Ван П. Связь между осадками, речным стоком и испаряемостью на Европейской части России и ее изменчивость // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2024. Т. 79, № 6. С. 55-66. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.5.
33. Гришанин К. В., Спецов Ф. А. Распределение скоростей и коэффициент трения в потоках под ледяным покровом // Труды ЛИИВТ. 1968. Вып. 110. С. 53-69.
34. Двоеглазова К. С., Шелутко В. А. Динамика теплового стока реки Северная Двина // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2021. № 9. С. 15-25. DOI 10.17076/lim1388.
35. Двоеглазова К. С., Шелутко В. А., Горошкова Н. И. Оценка изменений термического режима рек бассейна Северной Двины // Четвертые Виноградовские Чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции (Санкт-Петербург, 23-31 октября 2020 года). СПб: ООО "Издательство ВВМ", 2020. С. 606-610.
36. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 248 с.

37. Донченко Р. В., Филиппов А. М., Болотников Г. И. Исследование процессов формирования и разрушения ледяного покрова на зарегулированных участках рек // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. 1989. Т. 7. С. 307312.
38. Донченко Р. В., Щеголева Е. В. Закономерности образования и распространения зажоров на реках СССР // Труды ГГИ. 1985. Вып. 309. С. 315.
39. Донченко Р. В., Щеголева Е. В., Коробко А. С. Закономерности формирования и распространения заторов льда на реках СССР // Труды ГГИ. 1982. Вып. 287. С. 315.
40. Елшин Ю. А. Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 1988. № 5. С. 63-68.
41. Елшин Ю. А. Тепловой сток рек европейской территории СССР // Метеорология и гидрология. 1981. № 9. С. 85-93.
42. Естифьев А. М., Соколов И. Н. Процессы зажорообразования на реках и водохранилищах и методы их регулирования // Труды координационного совещания по гидротехнике. 1970. Вып. 56. С. 36-53.
43. Зайков Б. Д. Речной сток в море Лаптевых и Восточно-Сибирское и количество переносимого им в эти моря тепла // Труды Арктического института. 1936. Т. 35. С. 51-84.
44. Землянскова А. А., Нестерова Н. В., Макарьева О. М. Изменение ледового режима рек Северо-Востока России // Арктика и Антарктика. 2024. № 1. С. 20-33. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.1.69791
45. Иванов В. В., Куржунов А. Н. Тепловой сток рек в Обско-Тазовскую губу // Труды ААНИИ. 1980. Т. 358. С. 102-110.
46. Коваленко Н.В., Поповнин В.Н., Губанов А.С., Полюхов А.А., Успенская Е.И. Малые ледники плато Пutorана на фоне климатических перемен // Лёд и снег. 2023. Т. 63, № 3. С. 332-346. DOI: 10.31857/S2076673423030043.
47. Козлов Д. В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. М.: Изд-во МГУП, 2000. 263 с.
48. Комов Н. И. Ледовый режим р. Пур // Труды ААНИИ. 1970. Т. 290.
49. Космаков И. В. Термический и ледовый режим в верхних и нижних бьефах высоконапорных гидроэлектростанций на Енисее. Красноярск: Кларетианум, 2001. 200 с.
50. Куржунов А. Н. Тепловой сток Енисея в устьевой области // Труды ААНИИ. 1984. Т. 394. С. 6674.
51. Лебедева С. В., Ракчеева Е. А., Горелиц О. В., Борщенко Е. В., Мишин Д. В., Турсунова Г. Ш., Фатхи М. О., Жбаков К. К., Строков А. А., Куликова Ж. М., Шевченко Л.Б. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Северная Двина. Москва; Воронеж: ООО «ЮКОНЪ», 2022. 196 с.

52. Леонов Е.А. Изменение термического режима рек под влиянием хозяйственной деятельности // Труды ГГИ. 1977. Вып. 239. С. 49–77.
53. Магрицкий Д. В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 5. С. 69-77.
54. Магрицкий Д. В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 6. С. 85-95.
55. Магрицкий Д. В., Айбулатов Д. Н., Горелкин А. В. Закономерности пространственно-временной изменчивости стока на предустьевом участке и в дельте р. Лены // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 1. С. 15-29.
56. 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 г. // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2022. № 1. С. 134-151.
57. Магрицкий Д. В., Чалов С. Р., Агафонова С. А., Кузнецов М.А., Банщикова Л.С. Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1(102). С. 106-115.
58. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Нестерова Н.В., Осташов А.А. Гигантские наледи-тарыны Северо-Востока России по данным кадастра (1958 г.) и космическим снимкам 19732021 гг // Криосфера Земли. 2023. Т. 27, № 6. С. 2739. DOI: 10.15372/KZ20230603. EDN IOQDLT.
59. Макунина А. А. Физическая география СССР. М. : Изд-во Московского университета, 1985. 296 с.
60. Методика измерений температуры, прозрачности и определение запаха воды: руководящий документ Росгидромета. Ростов-на-Дону, 2018.
61. Михайлов В. М. Основные закономерности формирования термического режима рек и водоемов на северо-востоке Азии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2009. № 4. С. 27-34.
62. Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.
63. Назаренко С.Н., Сахарова Н.Б. Изменение ледотермического режима р.Вилуй в нижнем бьефе Вилуйской ГЭС 1-11 // Гидротехническое строительство. 1982. № 8. С. 23-26.
64. Налимов Ю. В. Гидрологическая характеристика протоки Главное Русло дельты р. Яны // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. 1965. Т. 268. С. 57-77.

65. Налимов Ю. В. Ледовый режим рек бассейна реки Хатанги // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. 1968. Т. 283. С. 124-135.
66. Нежиховский Р. А., Бузин В. А. Условия образования и прогнозы льда на реках // Метеорология и гидрология. 1977. № 5. С. 70-75.
67. Ноговицын Д.Д., Кусатов К.И. Анализ изменения режима реки Вилюй после зарегулирования стока водохранилищем ГЭС // Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1984. С. 41-55.
68. Носенко Г.А., Муравьёв А.Я., Иванов М.Н., Синицкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // Лёд и снег. 2020. Т. 60, № 1. С. 42-57. DOI: 10.31857/S2076673420010022.
69. Одрова Т. В. Изменение режима рек Енисея и Ангары в результате зарегулирования стока // Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях Крайнего Севера. Якутск, 1987. С. 84-95
70. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России / Д. В. Козлов, В. А. Бузин, Н. Л. Фролова [и др.]. М.: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2015. 348 с.
71. Орлова Г. А. Изменения термического режима Енисея и Оби ниже водохранилищ Красноярской и Новосибирской ГЭС // Пути преобразования речного стока на юге Сибири. Новосибирск, 1984. С. 23-39.
72. Панфилов Д. Ф. Движение раздробленного ледяного поля в русле реки, стесненном перемычками // Труды координационного совещания по гидротехнике. 1968. Вып. 42. С. 128-143.
73. Панфилов Д. Ф. Закономерности движения воды и льда в широком прямоугольном русле при сплошном ледоходе // Метеорология и гидрология. 1968. № 8. С. 41-44.
74. Панфилов Д. Ф. Установившееся движение уплотненных масс мелкобитого льда на прямом участке реки // Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения: материалы международного симпозиума. Л.: Энергия, 1972. С. 170-174.
75. Полилов А.М. О влиянии сибирских рек на воды Северного Ледовитого океана и Карского моря. СПб., 1907. 33 с.
76. Полонский В. Ф. Распределение стока воды в устьевой области Печоры и тенденция его изменения // Труды ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 96-110.
77. Распоряжение Правительства РФ от 22.11.2008 N 1734-р (ред. от 11.06.2014) О Транспортной стратегии Российской Федерации.
78. Рейнберг А. М. Материалы по гидрологии низовьев р. Лены // Труды Арктического института. Л.: 1938. Т. 105, Вып. 2.

79. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 1. Кольский полуостров / под ред. Елшина Ю. А., Куприянова В. В. Л.: Гидрометиздат, 1970. 316 с.
80. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь / под ред. Водогрецкого В. Е. Л.: Гидрометиздат, 1973(1). 426 с.
81. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. Муранова А. П. Л.: Гидрометиздат, 1973 (2). 372 с.
82. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индигирский район / под ред. Протасьева М. С. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 649 с.
83. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток / под ред. Куприянова В. В. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 153 с.
84. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1 / под ред. Водогрецкого В. Е. Л.: Гидрометиздат, 1972 (1). 528 с.
85. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Север ЕТР / под ред. Жила И. М., Алюшинской Н. М. Л.: Гидрометиздат, 1972 (2). 662 с.
86. Российская Арктика: Пространство. Время. Ресурсы: атлас / ПАО «НК Роснефть»; авт.: С. А. Агафонова, Д. Н. Айбулатов, В. Л. Бабурин [и др.]. Москва: Феория, 2019. 796 с.
87. Рыкачев М. А. Вскрытие и замерзание вод Российской империи. СПб.: Изд-во Академии Наук, 1886. 309 с.
88. Рымша В. А., Донченко Р. В. Исследования и расчеты замерзания рек и водохранилищ // Труды ГГИ. 1965. Вып. 129. С. 319.
89. Рымша В. А., Донченко Р. В. Метод расчета (прогноза) условий образования внутриводного льда // Труды ГГИ. 1962. Вып. 93. С. 52-66.
90. Самохвалов В. Л., Ухов Н. В. Температурный режим водотоков разных порядков в бассейне верхней Колымы // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 48-51.
91. Селин В. С., Васильев В. В., Широкова Л. Н. Российская Арктика: география, экономика, районирование. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2011. 203 с.
92. Соколова Е. М. Термический режим рек СССР // Труды ГГИ. 1951. Вып. 30(84). С. 1-74.
93. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Ледовый режим реки Онега и особенности его прогнозирования // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ: сб. тез. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, 2224 октября 2020 года. СПб.: РГГМУ, 2020. С. 422-423.

94. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода // Успехи современного естествознания. 2021. № 10. С. 7580. DOI: 10.17513/use.37701.
95. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Изменение климата и его влияние на ледовый режим рек Арктической зоны РФ // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: труды III Всероссийской конференции (Санкт-Петербург, 1617 декабря 2019 года). СПб.: Химиздат, 2019. С. 816-819.
96. Толстиков А. В., Балаганский А. Ф., Чернов И. А. Оценка теплового стока рек водосбора Белого моря // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2021. № 3. С. 109-119.
97. Титкова Т. Б., Ананичева М. Д. Использование реанализа ERA5-Land и данных метеостанций в горных районах России для оценки изменения ледниковых систем Восточной Сибири и Дальнего Востока // Лёд и Снег. – 2023. Т. 63, № 2. С. 199-213. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673423020163>.
98. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Е. М. Акентьева, А. М. Алейникова, Г. В. Алексеев [и др.]. Санкт-Петербург: Издательство «Наукоемкие технологии», 2022. 676 с. ISBN 978-5-907618-13-8.
99. Указ Президента РФ от 02.05.2014 N 296 (В редакции Указа Президента Российской Федерации от 05.03.2020 № 164) "О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации"
100. Ухов Н. В. Современный тепловой сток горных рек криолитозоны: геоэкологические особенности формирования на примере Верхней Колымы // Тихоокеанская география. 2023. № 4(16). С. 64-73. DOI 10.35735/26870509_2023_16_6.
101. Ушаков М. В., Ухов Н.В. Современные изменения термического режима горных рек криолитозоны (на примере Верхней Колымы) // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 70-76.
102. Чижов А. Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 128 с.
103. Чижов А. Н., Бородулин В. В. Распределение толщины ледяного покрова на реках Лена, Витим и Олекма по данным радиолокационной аэrolедомерной съемки // Труды ГГИ. 1984. Вып. 299. С. 36-47.
104. Шамов В. В., Тарбеева А. М., Лебедева Л.С., Ефремов В. С. Условия образования непромерзающих озеровидных расширений в четковидных руслах малых рек криолитозоны, Республика Саха (Якутия) // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в

- эпоху перемен: сборник докладов международной научной конференции (Санкт-Петербург, 0514 октября 2023 года). СПб.: ООО "Издательство ВВМ", 2023. С. 672-677.
105. Шостакович В. Б. Температура рек Сибири и количество переносимого ими в Северный Ледовитый океан тепла // Записки по гидрографии. 1911. Вып. XXXIII. С. 123-152.
106. Шостакович В. Б. Вскрытие и замерзание рек в Азиатской России // Известия Восточно-Сибирского отдела Русского географического общества. 1906. Т. 37.
107. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. Расчеты для целей прогнозов. Л.: Гидрометиздат, 1960. 216 с.
108. Agafonova S. A., Frolova N. L., Surkova G. V., Koltermann K. P. Modern characteristics of the ice regime of Russian Arctic rivers and their possible changes in the 21st century // Geography, Environment, Sustainability. 2017. Vol. 10, No. 4. P. 415. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15.
109. 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. No. 2. P. 48-57. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-12.
110. Aldrees A., Hasan M. S. U., Rai A. K., Akhtar M. N., Khan M. A., Saif M. M., Ahmad N., Islam S. On the precipitation trends in global major metropolitan cities under extreme climatic conditions: An analysis of shifting patterns // Water. 2023. Vol. 15, No. 3. P. 383. DOI: 10.3390/w15030383.
111. Alfredsen K., Stickler M. Dynamic ice formation processes in two Norwegian rivers - implications for the environment and hydropower: Proc. of 17th Workshop on River Ice. Edmonton. 2013. P. 21-24.
112. Andrishak R., Hicks F. Simulating the Effects of Climate Change on the Ice Regime of the Peace River // Canadian Journal of Civil Engineering. 2008. Vol. 35. P. 461-472. DOI: 10.1139/L07-129.
113. Arden R., Wigle T. Dynamics of ice formation in the Upper Niagara River // The Role of Snow and Ice in Hydrology: Proceedings of the Banff Symposium, Banff. 1972. Vol. 1. P. 1126-1141.
114. Arora R., Tockner K., Venohr M. Changing river temperatures in Northern Germany: Trends and drivers of change // Hydrological Processes. 2016. Vol. 30, No. 17. P. 3084-3096. DOI: 10.1002/hyp.10849.
115. Beaufort A., Moatar F., Curie F., Ducharme A., Bustillo V., Thiéry D. River Temperature Modelling by Strahler Order at the Regional Scale in the Loire River Basin, France // River Research and Applications. 2015. Vol. 32. DOI: 10.1002/rra.2888.

116. Beltaos S. Assessing the frequency of floods in ice-covered rivers under a changing climate: review of methodology // Geosciences. 2021. Vol. 11, No. 12. P. 514. DOI: 10.3390/geosciences11120514.
117. Brooks R., Prowse T., O'Connell I. Quantifying Northern Hemisphere freshwater ice // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, No. 6. P. 1128-1131. DOI: 10.1002/grl.50238.
118. Brown L., Hannah D., Milner A., Hodson A., Brewer M. Water source dynamics in a glacierized alpine river basin (Taillon-Gabiétous, French Pyrénées) // Water Resources Research. 2006. Vol. 42. DOI: 10.1029/2005WR004268.
119. Buishand T. A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records // Journal of Hydrology. 1982. Vol. 58, No. 12. P. 11-27. DOI: 10.1016/0022-1694(82)90066-X.
120. Burn D. H., Elnur M. A. Detection of hydrologic trends and variability // Journal of Hydrology. 2002. Vol. 255, No. 14. P. 107-122. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00514-5.
121. Burrell B., Beltaos S., Turcotte B. Effects of climate change on river-ice processes and ice jams // International Journal of River Basin Management. 2021. Vol. 21, No. 1. P. 178. DOI: 10.1080/15715124.2021.2007936.
122. Cermak M. [et al.] Temperature of watercourses in Czechoslovakia (in Slovak) // Hydrological Conditions in Czechoslovakia. Vol. 2. Prague: HMU, 1967
123. Chen D., Minpeng H., Guo Y., Dahlgren R. Changes in river water temperature between 1980 and 2012 in Yongan watershed, eastern China: Magnitude, drivers and models // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 533. P. 191-199. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.005
124. Docherty C., Dugdale S., Milner A., Abermann J., Lund M., Hannah D. Arctic river temperature dynamics in a changing climate // River Research and Applications. 2019. DOI: 10.1002/rra.3537
125. Dunea D., Bretcan P., Ţerban G., Tanislav D., Tuchiu E., Iordache S. Water Temperature Variability in the Lower Danube River // Water Resources Management in the Lower Danube River Basin. 2022. P. 83-101. DOI: 10.1007/978-3-031-03865-5_5
126. Ficklin D., Hannah D., Wanders N., Dugdale S., England J., Klaus J., Kelleher C., Khamis K., Charlton M. Rethinking river water temperature in a changing, human-dominated world // Nature Water. 2023. Vol. 1. P. 125-128. DOI: 10.1038/s44221-023-00027-2
127. Frolova N., Magritsky D., Kireeva M., Grigor'ev V., Gelfan A., Sazonov A., Shevchenko A. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // Water Resources. 2022. Vol. 49, No. 3. P. 333-350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
128. Fukš M. Changes in river ice cover in the context of climate change and dam impacts: a review // Aquatic Sciences. 2023. Vol. 85. DOI: 10.1007/s00027-023-01011-4.

129. Fuso F., Stucchi L., Bonacina L., Fornaroli R., Bocchiola D. Evaluation of water temperature under changing climate and its effect on river habitat in a regulated Alpine catchment // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 616. P. 128-816. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128816.
130. Garner G., Hannah D. River water temperature in the United Kingdom // *Progress in Physical Geography*. 2015. Vol. 39, No. 1. P. 68-92. DOI: 10.1177/0309133314550669.
131. Gebre S. B., Alfredsen K. T. Investigation of river ice regimes in some Norwegian water courses // *Proceedings of the 16th Workshop on the Hydraulics of Ice-Covered Rivers*. Winnipeg, MB, Canada, 2011. P. 18-22.
132. Georgiadi A. G., Kashutina E. A., Milyukova I. P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // *Polarforschung*. 2018. Vol. 87, № 2. P. 167-176. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.167
133. Gradova M. A., Golubeva E. N. Evaluation of the Riverine Heat Influx Impact on the Arctic Ice Cover Based on Numerical Modeling // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2023. Vol. 48, No. 7. P. 639-644. DOI: 10.3103/S1068373923070117.
134. Harlow F. H. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics // *Methods in Computational Physics*. 1964. Vol. 3. P. 319-343.
135. Hibler W. D. A dynamic thermodynamic sea ice model // *Journal of Physical Oceanography*. 1979. Vol. 9, No. 4. P. 815-846. DOI: 10.1175/1520-0485(1979)009<0815:ADTSIM>2.0.CO;2.
136. Huokuna M., Morris M., Beltaos S., Burrell B. Ice in reservoirs and regulated rivers // *International Journal of River Basin Management*. 2020. Vol. 20, No. 1. P. 164. DOI: 10.1080/15715124.2020.1719120.
137. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844
138. Jurgelėnaitė A., Kriauciuniene J., Reihan A., Latkovska I., Elga A. Spatial distribution and temporal changes in river water temperature in the Baltic States // *Hydrology Research*. 2018. Vol. 49, № 2. P. 364-377. DOI: 10.2166/nh.2017.289
139. Jurgelėnaitė A., Kriauciūnienė J., Šarauskienė D. Spatial and temporal variation in the water temperature of Lithuanian rivers // *Baltica*. 2012. Vol. 25, № 1. P. 65-76. DOI: 10.5200/baltica.2012.25.06

140. Kędra M., Wiejaczka Ł. Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: Assessment and management implications // *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 626. P. 1474-1483. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.044.
141. Kovalenko N. V., Popovnin V. V., Uspenskaya E. I., Gubanov A. S. Actual conditions of the arctic small glaciers (on the example of the Putorana plateau) // Intern. Conf. "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration". Pt. 2: Participants' reports in English. Beijing, PRC, 2021. P. 129-136.
142. Kuusisto E., Elo A. R. Lake and river ice variables as climate indicators in Northern Europe // *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*. 2000. Vol. 27. P. 2761-2764. DOI: 10.1080/03680770.1998.11898168.
143. Lammers R., Pundsack J., Shiklomanov A. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007. Vol. 112. DOI: 10.1029/2006JG000370
144. Latkovska I., Elga A. Long-Term Changes in Water Temperature of Rivers in Latvia // *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B*. 2016. Vol. 70. № 2. P. 78-87. DOI: 10.1515/prolas-2016-0013
145. Liu B. Siberia Lena river thermal regimes and changes: MS thesis. USA, University of Alaska Fairbanks, Water and Environmental Research Center, 2004.
146. Liu B., Yang D., Ye B., Berezovskaya S. Long-term open water season stream temperature variations and changes over Lena river basin in Siberia // *Global and Planetary Change*. 2005. Vol. 48, No. 13. P. 96-111. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.12.007.
147. Lorenzo-Gonzalez M., Isidoro D., Quilez D. Factors controlling the changes in surface water temperature in the Ebro River Basin // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2023. Vol. 47. P. 101-379. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101379.
148. Magnuson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingstone D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere // *Science*. 2000. Vol. 289, No. 54-85. P. 1743-1746. DOI: 10.1126/science.289.5485.1743.
149. Magritsky D., Vasilenko A., Frolova N., Shevchenko A. 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 (1). Vol. 50, No. 2. P. 190-201. DOI: 10.1134/S0097807823020112.
150. Magritsky D., Vasilenko A., Frolova N., Shevchenko A. 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 (2). Vol. 50, No. 2. P. 202-214. DOI: 10.1134/S0097807823020124.
151. Michel B. Winter regime of rivers and lakes. Hanover, N.H.: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1971. (Cold Regions Science and Engineering Monograph. III-B1a).
152. Mohseni O., Stefan H. G., Erickson T. R. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures // Water Resources Research. 1998. Vol. 34, No. 10. P. 2685-2692. DOI: 10.1029/98WR01877.
153. Newton B., Beltaos S., Burrell B. Ice regimes, ice jams, and a changing hydroclimate, Saint John (Wolastoq) River, New Brunswick, Canada // Natural Hazards. 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06736-5.
154. Niedrist G. Substantial warming of Central European mountain rivers under climate change // Regional Environmental Change. 2023. Vol. 23. № 2. DOI: 10.1007/s10113-023-02037-y
155. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H. H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmüller B., Kholodov A., Khomutov A., Kääb A., Leibman M. O., Lewkowicz A. G., Panda S. K., Romanovsky V., Way R. G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 193. P. 299-316. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
156. Ognjen B., Zaknić-Catović A., Roje-Bonacci T., Prohaska S., Čatović S. Air and Water Temperature Trend Analysis at the Confluence of the Sava and Danube Rivers in Belgrade, Serbia // Pure and Applied Geophysics. 2024. Vol. 181. P. 2895-2912. DOI: 10.1007/s00024-024-03552-7
157. Oveisy A., Dibike Y., Prowse T., Beltaos S., de Goede E. 2DH numerical simulation of ice dynamic during break up // 18th CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice-Covered Rivers: proceedings. Quebec, 2015.
158. Park H., Watanabe E., Kim Y., Polyakov I., Oshima K., Zhang X., Kimball J. S., Yang D. Increasing riverine heat influx triggers Arctic Sea ice decline and oceanic and atmospheric warming // Science Advances. 2020. Vol. 6, No. 45. DOI: 10.1126/sciadv.abc4699.
159. Park H., Yoshikawa Y., Yang D., Oshima K. Warming Water in Arctic Terrestrial Rivers under Climate Change // Journal of Hydrometeorology. 2017. Vol. 18, No. 8. P. 2173-2181. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0260.1.
160. Pekarova P., Halmova D., Miklanek P., Onderka M., Pekar J., Skoda P. Is the Water Temperature of the Danube River at Bratislava, Slovakia, Rising? // Journal of Hydrometeorology. 2008. Vol. 9. P. 1115-1122. DOI: 10.1175/2008JHM948.1.

161. Prowse T. D. River ice processes // River Ice Jams / ed. by S. Beltaos. Highlands Ranch, CO: Water Resources Publications, 1995. P. 29-70.
162. Prowse T., Alfredsen K., Beltaos S., Bonsal B. R., Bowden W. B., Duguay C. R., Korhola A., McNamara J., Vincent W. F., Vuglinsky V., Walter Anthony K. M., Weyhenmeyer G. A. Effects of Changes in Arctic Lake and River Ice // Royal Swedish Academy of Sciences. 2012 (1). P. 63-74. DOI: 10.1007/s13280-011-0217-6.
163. Prowse T., Alfredsen K., Beltaos S., Bonsal B., Duguay C., Korhola A., McNamara J., Pienitz R., Vincent W. F., Vuglinsky V., Weyhenmeyer G. A. Past and Future Changes in Arctic Lake and River Ice // Royal Swedish Academy of Sciences. 2012 (2). P. 53-62. DOI: 10.1007/s13280-011-0216-7.
164. Prowse T., Bonsal B., Duguay C., Lacroix M. River-ice break-up/freeze-up: A review of climatic drivers, historical trends and future predictions // Annals of Glaciology. 2007. Vol. 46. P. 443-451. DOI: 10.3189/172756407782871431.
165. Przybylak R. The Climate of the Arctic. 2nd ed. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-21696-6.
166. Rannie W. F. Breakup and freezeup of the Red River at Winnipeg, Manitoba Canada in the 19th century and some climatic implications // Climatic Change. 1983. Vol. 5, No. 3. P. 283-296. DOI: 10.1007/BF02423523.
167. Rham L., Dibike Y., Beltaos S., Peters D., Bonsal B., Prowse T. A Canadian River Ice Database from the National Hydrometric Program Archives // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. № 3. P. 1835-1860. DOI: 10.5194/essd-12-1835-2020.
168. Rivers-Moore N. A., Lorentz S. A simple, physically-based statistical model to simulate hourly water temperatures in a river // South African Journal of Science. 2004. Vol. 100. № 5-6. P. 331-333
169. Rokaya P., Morales-Marín L., Bonsal B., Wheater H., Lindenschmidt K. E. Climatic effects on ice phenology and ice-jam flooding of the Athabasca River in western Canada // Hydrological Sciences Journal. 2019. Vol. 64, No. 11. P. 1265-1278. DOI: 10.1080/02626667.2019.1638927.
170. Sharma S., Magnuson J. J., Batt R. D., Winslow L. A., Korhonen J., Aono Y. Direct observations of ice seasonality reveal changes in climate over the past 320570 years // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. DOI: 10.1038/srep25061.
171. Shrestha R., Pesklevits J., Bonsal B., Brannen R., Guo T., Hoffman S. Rising summer river water temperature across Canada: spatial patterns and hydroclimatic controls // Environmental Research Letters. 2024. Vol. 19. № 4. P. 44-59. DOI: 10.1088/1748-9326/ad365f
172. Smith L. C. Trends in Russian arctic river-ice formation and breakup, 1917 to 1994 // Physical Geography. 2000. Vol. 21, No. 1. P. 46-56. DOI: 10.1080/02723646.2000.10642698.

173. Soldatova I. I. Secular variations in river breakup dates and their relation to climate changes // Russian Meteorology and Hydrology. 1993. No. 9. P. 70-76.
174. Takács K., Kern Z., Pásztor L. Long-term ice phenology records from easterncentral Europe // Earth System Science Data. 2018. Vol. 10, No. 1. P. 391-404. DOI: 10.5194/essd-10-391-2018.
175. Tananaev N., Georgiadi A., Sidorenko V. Revising contemporary heat flux estimates for the Lena River, Northern Eurasia // Hydrology Research. 2019. Vol. 50, No. 6. P. 1519-1533. DOI: 10.2166/nh.2019.062.
176. Toffolon M., Piccolroaz S. A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10, No. 11. P. 114011. DOI: 10.1088/1748-9326/10/11/114011.
177. Tokuda D., Kim H., Yamazaki D., Oki T. Development of a global river water temperature model considering fluvial dynamics and seasonal freeze-thaw cycle // Water Resources Research. 2019. Vol. 55, No. 2. P. 1366-1383. DOI: 10.1029/2018WR023083.
178. van Vliet M. T. H., Ludwig F., Zwolsman J. J. G., Weedon G. P., Kabat P. Global River temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow // Water Resources Research. 2011. Vol. 47, No. 2. DOI: 10.1029/2010WR009198.
179. Vasilenko A. N., Agafonova S. A., Frolova N. L. Ice regime of rivers of the Arctic zone of Russia in modern and future climate conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 263. P. 012-001. DOI: 10.1088/1755-1315/263/1/012004.
180. Vasilenko A., Frolova N. L., Grigoriev V. Yu., Magritsky D., Shevchenko A., Winde F. Spatio-temporal variability of water temperature of arctic rivers in Russia over the past 60 years // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 23. DOI: 10.3390/app142310942.
181. Vasilenko A., Magritsky D., Frolova N., Shevchenko A. Long-term heat flux formation of the large Russian Arctic rivers under the influence of climate-induced and dam-induced effects // Geography, Environment, Sustainability. 2022. Vol. 15. No. 4. P. 158-170. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-105
182. Vyshnevskyi V., Shevchuk S. The Impact of the Kakhovka Dam Destruction on the Water Temperature in the Lower Reaches of the Dnipro River and the Former Kakhovske Reservoir // Journal of Landscape Ecology. 2024. DOI: 10.2478/jlecol-2024-0008.
183. Vyshnevskyi V., Shevchuk S. Thermal regime of the Danube Delta and the adjacent lakes // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2023. Vol. 71, No. 3. P. 283-292. DOI: 10.2478/johh-2023-0015.
184. Wake A., Rumer R. R. Great Lakes ice dynamics simulation // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1983. Vol. 109, No. 1. P. 86-102. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:1(86).

185. Wanders N., van Vliet M. T. H., Wada Y., Bierkens M. F. P., van Beek L. P. H. High-resolution global water temperature modeling // Water Resources Research. 2019. Vol. 55, No. 4. P. 2760-2778. DOI: 10.1029/2018WR023250.
186. Webb B., Nobilis F. Long-term water temperature trends in Austrian Rivers // Hydrological Sciences Journal. 1995. Vol. 40. № 1. P. 83-96. DOI: 10.1080/02626669509491392
187. Webb B., Nobilis F. Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century // Hydrobiologia. 1994. Vol. 291. P. 105-113. DOI: 10.1007/BF00044439
188. Whitefield J., Winsor P., McClelland J., Menemenlis D. A new river discharge and river temperature climatology data set for the pan-Arctic region // Ocean Modelling. 2015. Vol. 88. DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.12.012.
189. Wiejaczka Ł., Kijowska-Strugała M. Effect of a reservoir operation on relations between river water temperature and air temperature // Proceedings of the 4th IAG/AIG Regional Conference on Geomorphology "Landforms and their dynamics". 2016. P. 73-80.
190. Williams G. P. A note on the break-up of lakes and rivers as indicators of climate change // Atmosphere. 1970. Vol. 8, No. 1. P. 23-24. DOI: 10.1080/00046973.1970.9676580.
191. Worrall F., Howden N., Burt T., Hannah D. River water temperature demonstrates resistance to long-term air temperature change // Hydrological Processes. 2022. Vol. 36. DOI: 10.1002/hyp.14732.
192. Yang D., Ge S., Park H., Lammers R. River Heat Flux into the Arctic Ocean // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / ed. by D. Yang, D. L. Kane. Cham : Springer, 2021. P. 707-730. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_25.
193. Yang D., Liu B., Ye B. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32. № 5. L05401. DOI: 10.1029/2004GL021568
194. Yang D., Peterson A. River Water Temperature in Relation to Local Air Temperature in the Mackenzie and Yukon Basins // ARCTIC. 2017. Vol. 70, No. 1. P. 47-58. DOI: 10.14430/arctic4627.
195. Devik O. Termische und Dyanamische Bedingungen der Eisbildung in Wasserflaufen auf Norwegische Verhältnisse angewandt // Geofysiske Publikasjoner. Oslo, 1932. Vol. 9.
196. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1> (дата обращения: 01.09.2025).
197. Геопортал ИВМ СО РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://gis.krasn.ru> (дата обращения: 10.01.2024).
198. Портал Единой государственной системы информации о Мировом Океане (ЕСИМО) [Электронный ресурс]. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения: 10.10.2025).

199. Уровень воды онлайн [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info/> (дата обращения: 10.10.2025).
200. ECMWF Forecast User Guide: Regional temperature biases [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/81307-ecmwf-forecast-user-guide> (дата обращения: 17.10.2024).
201. ISIMIP - Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project [Электронный ресурс]. URL: <https://www.isimip.org/> (дата обращения: 01.01.2024).