

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ТГУ)
Геолого-географический факультет
Кафедра гидрологии

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП
канд. геогр. наук, доцент
_____ Д. А. Вершинин
« ____ » _____ 2019 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
ДИНАМИКА ТЕПЛОВОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА СЕВЕРНОГО
ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

по основной образовательной программе подготовки бакалавров
направление подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология

Вознесенская Варвара Сергеевна

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____ Л.И. Дубровская
« ____ » _____ 2019 г.

Автор работы
Студент группы № 02505
_____ В. С. Вознесенская

Оглавление

Введение.....	3
1 Современное состояние проблемы. Литературный обзор.....	4
2 Физико-географическая характеристика района исследований	7
2.1 Северный край (европейская часть водосбора СЛО).	7
2.2 Западная Сибирь.....	10
2.3 Восточная Сибирь.	15
3 Анализ исходных данных и методика их обработки	18
3.1 Выбор объектов исследования.....	18
3.2 Оценка репрезентативности периода наблюдений. Проверка синхронности колебаний.	20
3.3 Анализ однородности рядов стока и температуры воды.....	22
3.4 Критерии определения значимости тренда при анализе динамики гидрометеорологических характеристик.	24
4 Общие закономерности и факторы колебания стока.....	27
4.1 Характеристика условий формирования и распределение стока на исследуемой территории.	27
4.2 Средний многолетний сток.	29
4.3 Внутригодовое распределение стока.....	31
4.4 Температурный режим речных вод и средний многолетний тепловой сток.....	33
4.5 Внутригодовая динамика теплового стока.	35
4.6 Особенности проявления климатических трендов на стоке рек в замыкающих створах СЛО.	40
5 Зависимости теплового стока от стокоформирующих факторов	54
5.1 Современные модели расчета.	54
5.2 Корреляционные связи температур воды и метеорологических величин выделенных районов.	56
Заключение	65
Использованные источники и литература	67

Введение

Сегодня Россия активно восстанавливает свои позиции в Арктическом регионе. Изменения климата и влияния данных изменений на природные условия региона являются одним из лимитирующих факторов возвращения в Арктику.

Тепловой сток рек – является одним из важнейших факторов гидроэкологического состояния водных объектов, оказывает влияние на формирование режима прибрежной части моря, является одним из индикаторов изменения климата [1].

Кроме того, важно понимать насколько огромную энергию несут в себе речные воды. Так мощность самой крупной в России, Саяно-Шушенской ГЭС составляет 6400 МВт, при пересчете в годовую выработку получается $2 \cdot 10^{17}$ Дж/год, в то же время, тепловой сток реки Енисей за год составляет порядка $15 \cdot 10^{19}$ Дж/год. Чтобы воспроизвести тепловой сток реки Енисей, нужно 74 Саяно-Шушенских гидроэлектростанции.

Таким образом, тепловой сток рек важно учитывать не только как гидроэкологический фактор состояния водного объекта, но и как показатель энергетической ценности водного потока для прилегающих территорий.

Основной идеей работы является оценка величины и анализ динамики теплового стока с территории России в Северный Ледовитый океан (СЛО). Дополнительно к этому в работе совершена попытка оценки зависимости температур вод замыкающих створов рек от температур воздуха в данных створах (по ближайшим метеостанциям).

Таким образом, **целью** настоящей работы является оценка величины, динамики и факторов формирования среднесуточного водного и теплового стока рек территории России в Северный Ледовитый океан.

Задачи исследования:

- 1) изучение условий формирования водного и теплового стока рек территории России, принадлежащих водосбору Северного Ледовитого океана;
- 2) количественный подсчет среднегодовых значений водного и теплового стока рек;
- 3) изучение климатически обусловленных тенденций изменения водного и теплового стока рек;
- 4) оценка зависимости температуры воды в замыкающем створе от гидрометеорологических параметров.

1 Современное состояние проблемы. Литературный обзор

В настоящее время исследования динамики гидрологических характеристик рек неразрывно связаны с проблемой современного изменения климата.

Согласно докладу Росгидромета, об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год [2], наиболее существенные изменения климата фиксируются в высоких широтах Северного полушария. Особое внимание эксперты уделяют арктическому региону ввиду хрупкости его экосистем и существенной роли в определении глобального климата Земли. Именно в этих районах происходят наиболее значимые изменения водного и теплового стока рек.

Выделяют несколько стадий изменения климата. Впервые сообщения о признаках потепления в Арктике появились в 1920-х годах. Тогда Н.М. Книпович в 1921 г. выявил, что воды Баренцева моря стали заметно теплее [3]. Похолодание в 40-60е гг. привело к наступлению льдов СЛО. С середины 1970-х годов началось второе за историю инструментальных наблюдений глобальное потепление. Согласно [4], с конца XX века по современный период наблюдается фаза «паузы» в глобальном потеплении климата. Дальнейший прогноз зависит от причин потепления климата, с одной стороны это цикличность изменения гидрометеорологических величин, с другой стороны антропогенное влияние. В первом случае период «паузы» закончится понижением среднегодовых значений температуры, а втором случае будет продолжаться увеличение средней глобальной температуры.

Особым индикатором изменения климата является тепловой сток рек. Уже в середине XX века рядом ученых [5 - 7], были поставлены вопросы о термике воды и влиянии теплового стока на арктическую зону океана. В XX столетии, советские ученые ставили перед собой задачу сделать Северный морской путь судоходным в течение всего года [6]. На фоне снижения экономической активности страны, в конце XX века снизился и интерес к Арктическому региону. В Арктике стихийно закрывались полярные гидрометеорологические станции, объекты военного назначения, исследовательские программы, было ограничено функционирование Северного морского пути.

Сегодня, ввиду новой политики «возвращения Арктики», растёт интерес и к речным системам СЛО, влияющим на изменение температуры береговой части океана. Идет изучение не только водного, но и теплового стока рек, хотя пока эти исследования и являются, в основном, локальными. Мало исследований, которые бы рассматривали весь арктический регион включая Аляску, причиной этому служит не только недостаточная изученность территории, но и труднодоступность гидрологической информации.

В разное время изучением водного и теплового стока рек в Арктику занимались В.С. Антонов, Б.Д. Зайков, В.Б. Шостакович, Л.С. Ёлшин, Е.А. Леонов, В.В. Фролов, П.С. Кузин, Я.И. Марусенко, В.С. Мезенцев, А.М. Комлев, Ю.Л. Матвеева, А.А. Брашкова, В.В. Зуева, К.Ф. Ретеюм, В.В. Иванов, И.В. Кружнов, А.Г. Георгиади, Е.А. Кашутина, Д.В. Магрицкий, Л.С. Евсеева, С.Г. Добровольский, Б.Р. Ламмерс, А.И. Шикломанов и др.

В исследовании теплового стока начало XX-го столетия ознаменовалось детальными исследованиями Арктического и Антарктического института. А.М. Рейнберг предложил способ подсчета тепловых расходов воды и на его основе рассчитал, для некоторых рек, коэффициенты перехода температур от береговых к средневзвешенным по сечению. М.И. Зотин не только уточнили исследования предыдущих авторов, но и получили зависимости теплового стока от жидкого для створа р. Лена – с. Кюсюр, исследовал тепловой сток рек водосбора моря Лаптевых [5, 6, 8].

Исследования теплового стока рек Арктики в 1970-80-е годы связаны с накоплением гидрологической информации и ее систематизацией. Исследования в это время ведут Е.А. Леонов (Изменение термического режима рек под влиянием хозяйственной деятельности, 1977 г.), Ю.А. Ёлшин (Тепловой сток рек Европейской территории СССР, 1981г., Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана, 1988), В.В. Иванов (Тепловой сток рек в Обь-Тазовскую губу, 1980), А.Н. Куржунов (Тепловой сток Енисея в устьевой области, 1984 г.)

Современные исследования теплового стока рек связаны с его важностью как гидроэкологического показателя состояния водного объекта [1]. Ведется оценка изменения термического режима рек ввиду климатических изменений [1, 9-11], а также поиск зависимостей температуры воды и теплового стока от метеорологических величин [9, 12-13].

В работе Б.Р. Ламмерса (. Variability in river temperature, Discharge, And energy flux from the Russian pan-Arctic landmass, 2007 г.) проведена оценка теплового стока рек с 80,9% бассейна СЛО. Исследование рек России с 1938 по 1992 год показало совокупное уменьшение водного стока рек, а вместе с ним и уменьшение теплового стока в Северный Ледовитый океан, в том числе, для крупнейших рек региона – Оби, Лены и Енисея (суммарно на 17%). Вместе с тем, для реки Печора обнаружен тренд на увеличение и теплового стока.

D. Yang (River Water Temperature in Relation to Local Air Temperature in the Mackenzie and Yukon Basins) исследовал связь температуры воздуха с температурой воды на постах бассейна рек Юкон и Маккензи, используя 3 вида моделей: линейную регрессионную с учетом влияния расхода воды, нелинейную регрессионную модель

(Mohseni et al., 1998), а также уравнение с использованием модели воздушного потока (Toffolon и Piccolroaz, 2015).

Среди российских исследователей важно отметить исследования Д.В. Магрицкого (Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения, 2009; Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек российской Арктики, 2015; Водные ресурсы и режим рек Арктической зоны Сибири: современное состояние, прогнозируемое изменение, масштабы и структура хозяйственного использования, 2017) [1, 10, 14]. Автор уточнил полученные ранее (по коротким рядам) оценки теплового стока рек, принадлежащих российской части водосбора СЛО, получил для средних рек всех северных районов российской части водосбора СЛО расчетные зависимости вида теплового стока от водного стока, и теплового стока от площади рек, оценил естественные и антропогенные изменения теплового состояния рек.

Таким образом, проведенный анализ различных литературных источников по проблемам климата, а также изменения термического и водного режима рек позволяет оценить современный уровень знаний о тепловом стоке, определить наиболее актуальные сегодня аспекты изучения теплового режима рек и перспективные методы его исследования.

2 Физико-географическая характеристика района исследований

Формирование стока рек Русской Арктики происходит не только на территории России, но и на территории Китая, Монголии и Восточного Казахстана, и, всё же, на сто рек с территории Российской Федерации приходится более 90,8% всего водосбора Северного Ледовитого океана (СЛО) с территории Евразии.

Сток Российских рек формируется на территории Кольского п-ова и Карелии, северной половины Восточно-Европейской равнины, Полярного Урала, Западной, Средней и Северо-Восточной Сибири, Алтае-Саянской горной страны, Прибайкалья и Забайкалья. Эта территория занимает 70,7 % площади России и составляет 12,064 млн. км² [1]

Основная часть водосбора морей Российской Арктики приходится на водосборы морей Карского (6,650 млн. км²) и Лаптевых (3,693 млн. км²). Существенно меньшую площадь занимают водосборы Чукотского моря и западной части Баренцева моря.

Крупнейшие по площади водосбора реки СЛО – Обь, Енисей и Лена; к очень большим относят Северную Двину, Печору, Хатангу, Оленек, Яну, Индигирка и Колыму; реки Онега, Мезень, Надым, Пур, Таз, Пясина, Нижняя Таймыра, Анабар и Алазея относятся к большим. Около 110 рек района относятся к средним.

По орографическим и климатическим признакам водосбор Северного Ледовитого океана можно разделить на три физико-географических страны: Европейская территория водосбора (согласно [15], Северный край), Западная Сибирь и Восточная Сибирь. Рассмотрим физико-географические особенности каждого района.

2.1 Северный край (европейская часть водосбора СЛО). Согласно [15], рассматриваемая территория занимает Северо-Восточную Часть Европейской территории России (ЕТР). Район включает в себя бассейны рек Онеги, Северной Двины, Мезени, Печоры [16].

Физико-географический район охватывает побережье Баренцева и Белого морей, включает в себя такие крупнейшие реки ЕТР, как Северная Двина и Печора. Естественные границы района проходят на западе по горному массиву Манселькя, на востоке по Уральским горам. Южная граница физико-географического района проходит по водоразделу Северного ледовитого океана и бассейна Каспийского моря и других областей внутреннего стока [16].

Северный край в меридиональном направлении простирается на 650-700 км, а в широтном на 1000 км. Крайняя южная точка расположена на широте 58 °с.ш., крайняя

северная имеет широту 70° с.ш., западная и восточная крайние точки имеют широту соответственно 38 и 65° в.д.

Рассматриваемый район представляет собой лесистую равнину, не защищенную от западных и северо-западных ветров, что обуславливает поступление большого количества влажных воздушных масс.

Равнинный характер местности незначительно нарушается наличием так называемых «хребтов» на северо-западной окраине Ветреного Пояса и Тиманским Кряжем в центре. На большей части территории низменные равнины чередуются невысокими плато и возвышенными равнинами, слабоволнистыми или слегка всхолмленными. Ветренный Пояс и Тиман занимают сравнительно небольшую часть изучаемой территории, мало отличаясь по высотам от ближайших возвышенных равнин. Но с Ветренным поясом связано изменение течения реки Онега с меридионального на северо-западное. А Тиман, вытянуты до полуострова Канин более чем на 700 км делит территорию Северного края на две неравные части, играет роль водораздела между р. Печорой с реками Северная Двина и Мезень [16].

Тиманский кряж существенно влияет на перераспределение влаги района, являясь барьером на пути господствующего переноса влаги с запада и юго-запада.

Вдоль Восточной границы Района расположена обширная горная страна – западный склон Урала. Система горных хребтов в предгорьях западного Урала имеет сложную орографию, высоты близ главного водораздела достигают $1000 - 1500$ м и более.

Геологическое строение территории характеризуется преобладание платформенных структур. А фундамент, несмотря на глубокое понижение, чередованием глыбовых структур и разломов определяет чередование низменностей и плато.

Большая протяженность как в меридиональном, так и в широтном направлениях, а также неоднородность рельефа создают различия климата отдельных частей района.

Для всего Северного края характерна частая смена воздушных масс (прохождение циклонов с Атлантики). Циклоничность наиболее развита зимой и осенью, летом ослабевает. Циклоны приносят с собой теплую (оттепели) зимой и прохладную летом погоду. Сухие северо-восточные ветра со стороны СЛО приносят резкие похолодания (особенно летом). С юга и юго-востока поступают сюда сухие, континентальные воздушные массы, сильно прогретые летом и охлажденные в зимнее время года.

Континентальность климата, таким образом, увеличивается с севера на юг и с запада на восток (особенно суров климат Полярного Урала).

Совокупность перечисленных выше факторов определяют короткое прохладное лето и холодную зиму с устойчивым снежным покровом.

На западе зима продолжается 5-6 месяцев (со средней температурой $-11 - -12^{\circ}\text{C}$), на востоке 6-7 (средняя температура $-18, -20^{\circ}\text{C}$).

Зимние ветры обычно южного или юго-западного направления со средней скоростью 3-7 м/сек, осадков выпадает немного 110-200 мм, наибольшее их количество выпадает на склонах Полярного Урала, а также на наветренных склонах возвышенностей и плато территории [15].

Большая часть территории освобождается от снега в третьей декаде апреля – первой декаде мая, в предгорьях Урала ко второй декаде мая. Плотность снежного покрова также варьируется, от 0,22 – 0,25 в лесной зоне до 0,32 – 0,34 в тундре. Запас воды к началу снеготаяния в лесной зоне составляет 140 – 200 мм в лесу, 120-180 мм на полях и болотах.

Лето продолжается 3-4- месяца на юго-западе и 1- 2 месяца на юго-востоке, средняя месячная температура не превышает $16-17^{\circ}\text{C}$, заморозки возможны в любой из летних месяцев.

Среднегодовая температура колеблется от $+3^{\circ}\text{C}$ на юго-западе территории до -8°C на северо- востоке. Среднегодовая влажность воздуха возрастает в северо-восточном направлении от 77-80% на юго-западе до 82-86% в тундре.

Направление ветра имеет четко выраженный годовой ход. Зимой преобладают южные и юго-западные ветры, а летом северные и северо-восточные. Зимой наибольшие скорости ветра наблюдаются на Тимане, а весной к востоку от него.

Относительно однородные природные условия и переизбыток увлажнения способствуют развитию густой речной сети, в среднем коэффициент развитости речной сети составляет 0,3 км/км². Общая протяженность рек района 521,2 тыс. км, преобладают малые реки и ручьи длиной менее 10 км (их более 53,1% всех водотоков), рек длиной более 100 км - 280, а свыше 500 – всего 14. Главные реки района – Онега, Северная Двина, Мезень и Печора, впадают в Белое и Баренцево моря [16].

Северная Двина и Печора – крупнейшие судоходные реки ЕТР, по величине стока занимают соответственно 4 и второе места после р. Волги. Эти реки района имеют широкие многорукавные дельты, а реки Онега и Мезень – мелководные эстуарии.

Водоразделы между бассейнами главных рек орографически выражены слабо, слабо прослеживается и водораздел рек Северного края с бассейнами Онежского озера и Волги.

Большинство рек района имеют равнинный характер, обладают широкой поймой. Пороги здесь встречаются только на западной окраине края, где выступают

кристаллические породы Тиманского кряжа, и у рек Западного склона Урала, протекающих в долинах горных хребтов.

Крупные реки района, по выходе на приморскую равнину, начинают меандрировать (Печора ниже Усть-Цильмы, Северная Двина ниже Усть-Пинеги), образуя пойменную многорукавность.

В районах сосредоточения озер (большинство из них ледникового происхождения) реки образуют озерно-речные системы, что способствует высокой степени естественной зарегулированности рек района. Большинство озер – мелкие водоемы, и только 5 водоемов имеют площадь водного зеркала более 100 км².

По режиму питания реки Северного края относятся к преимущественно снеговому питанию. Водный режим характеризуется высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью, для летне-осеннего периода характерны паводки.

В распределении годового стока воды по территории наблюдается закономерность, отвечающая ее климатическим и гипсометрическим особенностям. Сток рек уменьшается с севера на юг (на юге наблюдается большее количество осадков, но они компенсируются повышенным испарением). На морском побережье годовой сток составляет около 11 – 12 л/сек*км², на юге территории эта цифра снижается до 9 л/сек,км².

Так же повышение водного стока рек Северного края связано с наветренными склонами Тимана (13-14 л/с*км²), в предгорьях Урала сток колеблется от 12 л/с*км² до 20 л/с*км², а вблизи главного водораздела может достигать 40 л/с*км².

Половодье на реках района длится 1,5 – 2 месяца начинаясь во второй декаде апреля, на реках с озерным регулированием до 3 месяцев (р. Онега, р. Кена и др.). Гидрограф, на большей части территории, имеет один пик, при возвращении холодов расчленен.

Начало летне-осенней межени приходится на конец мая, либо середину июля на северо-востоке края, в дождливые годы межень прерывается паводками и не превышает по длительности 1,5 – 2 месяцев. Наибольшее маловодье наблюдается на реках в августе, либо в сентябре (при условии высокой естественной зарегулированности). Минимальный сток приходится на время наибольшего истощения запасов подземных вод и обычно наблюдается в марте.

За летне-осеннюю межень в среднем проходит до 40% годового стока, на зиму приходится от 5 до 15% в зависимости от гидрогеологических условий бассейна [15].

2.2 Западная Сибирь. Западная Сибирь включает в себя Западно-Сибирскую низменность и Алтайскую горную страну. Эта физико-географическая страна занимает область площадью около 3 млн. км² [17]. Западной границей являются склоны Уральских

гор, с востока – Енисейский кряж и Среднесибирское плоскогорье. Северной границей Западной Сибири является побережье Карского моря, южная граница – Казахский мелкосопочник.

С севера на юг Западная Сибирь протянулась почти на 2500 км от 73°30' с.ш. (северная окраина Ямала) до 51° с.ш. (крайний юго-восток). В плане территория Западной Сибири имеет форму трапеции с наибольшей протяженностью с запада на восток на широте г. Красноярск (около 1900 км).

Основными чертами природы Западной Сибири являются слабо пересеченный рельеф, с малыми абсолютными и относительными высотами, высокая степень заболоченности, хорошо выраженная широтная зональность, а также наличие многолетней мерзлоты на севере.

Значительная протяженность территории с севера на юг (более 22°) и в особенности равнинность обусловили разнообразие и зональное распределение основных природных географических зон: тундры, лесотундры, леса, лесостепи и степи.

На юге, выделенного района, наблюдаются высокогорные области (территория Алтай), и степные равнины (Кулундинская степь, Барабинская низменность). В средней части территории преобладают залесенные и заболоченные равнины (Васюганская равнина). На севере распространена многолетняя мерзлота.

Южная граница распространения многолетнемерзлых пород проходит примерно в пределах 61- 62° с. ш. Вдоль нее многолетнемерзлые породы залегают редкими островками на безлесных участках, главным образом в торфяниках. Севернее, примерно у 65-66° с. ш., эти породы занимают большую площадь, чем талые породы и встречаются даже на участках, поросших лесом. Еще севернее мерзлые породы имеют в основном сплошное распространение и отсутствуют только под руслами крупных рек (Оби, Пура, Таза) и под глубокими (свыше 2 м) большими озерами. Под менее крупными водотоками и водоемами верхняя поверхность мерзлых пород залегает на глубине нескольких десятков метров. Вблизи южной границы области многолетнемерзлых пород располагается широкая (100-200 км) зона, в пределах которой температура грунта близка к 0°С; к северу температура многолетнемерзлых пород постепенно понижается и в заполярных районах достигает -7 – -10° С [18-19].

Средняя температура холодного времени года ($t_{\text{сред.сут.}} < 0^{\circ}\text{C}$) в южных районах физико-географической страны составляет -11,6°С, средняя температура теплого времени года – +12,1°С [20]. Амплитуда между самым холодным и самым теплым месяцем здесь достигает 37,7°С. Суммарное годовое количество осадков, в среднем, составляет 397 мм, наибольшее количество осадков приходится на июль и август.

В северных районах территории (Ханты – Мансийский авт. округ) средняя температура холодного времени года составляет – 16,3°C, теплого времени года – +9,3°C [20]. Амплитуда между самым холодным и самым теплым месяцем – 37,4°C. Суммарное годовое количество осадков, в среднем, составляет 488 мм, наибольшее количество осадков приходится на июль.

Некоторую пятнистость в распределение осадков вносит различный характер подстилающей поверхности, степень залесенности территории, наличие огромных заболоченных пространств. На всей территории Западной Сибири большая часть осадков выпадает летом. С мая по октябрь здесь выпадает до 70–80 % годовой суммы осадков. Для области характерны значительные колебания количества осадков в разные годы. Особенно большие различия наблюдаются в лесостепной зоне, где при средней многолетней сумме осадков около 300–350 мм/год во влажные годы выпадает до 550–600 мм/год, а в сухие — лишь 170–180 мм/год [21].

В первую половину зиму выпадает больше половины зимней нормы осадков. Годовой минимум приходится на февраль, когда количество осадков не превышает 20 мм в степной зоне, и 25 мм в лесной [18-19, 22].

В связи с огромной протяженностью территории, снежные покровы на территории имеют значительные разницы дат его появления на севере и юге территории. Устойчивый снежный покров на севере территории образуется 4 – 16 октября, в таежной зоне – 20-28 октября, а на самом юге водосбора в первой декаде ноября. Распределение снежного покрова характеризуется неравномерностью распределения, так на открытых полях лесостепной зоны к концу зимы наблюдается снежный покров высотой до 40 см. В лесной зоне эта цифра увеличивается до 60 см, а в заполярных районах снова снижается до 40-50 см [20].

Разрушение устойчивого снежного покрова в Заполярье происходит с конца мая по конец июня, в центральных районах с конца апреля до середины мая, а на юге в первой декаде апреля [18].

Наибольшие величины снеготпасы достигают на крайнем севере Заполярья (160-180 мм), в лесной зоне запас воды в снеге снижается до 120 – 140 мм, а на Юге бассейна достигает лишь 50-60 мм.

Зональное распределение имеет и величины испарения и влажности. Наибольшее количество влаги испаряется в южной половине (часть Васюганского болота, подзона южной тайги) Западной Сибири до 350–400 мм/год. На севере в прибрежных тундрах, величина испарения не превышает 150–200 мм/год. Примерно такова же она и на юге степной зоны (200–250 мм), что объясняется малой величиной выпадающих в степях

осадков. При этом испаряемость в степной зоне достигает 650–700 мм, поэтому в некоторые месяцы (особенно в мае) количество испаряющейся влаги может превышать сумму осадков в 2–3 раза (за счет испарение из почвы) [21].

Гидрографическая сеть Западной Сибири, в основном, принадлежит бассейну Карского моря. Наиболее значимыми реками водосбора являются Обь, Пур, Таз, Надым и притоки Оби Иртыш, Томь, Северная Сосьва, Полуй и т.д. Территорию отличает обилие озер, здесь их насчитывается до 450 тыс., но 98% озер обладают площадью зеркала менее 1 км². Также характерной особенностью территории является большое распространение болот.

У большинства рек территории, за исключением притоков Оби стекающих с территории гор южной Сибири, широкие долины, двусторонние поймы и малые уклоны. Их обуславливают небольшие высоты Западно-Сибирской равнины (Обь – 0,04м/км, Таз – 0,1 м/км, Пур – 0,09м/км). При этом, реки сильно меандрируют, образуя многочисленные старицы и протоки. Коэффициент извилистости многих рек равнины составляет 2,5–3 [24].

С юга на север территории наблюдается равномерный рост подземного питания. Наибольшая величина подземного стока наблюдается на территории Сибирских Увалов (Обь-Пур-Тазовское междуречье), к северу от Увалов наблюдается снижение подземного стока, связанное с увеличением распространения многолетнемерзлых пород, к югу от Увалов понижение подземного стока связано с ростом испарения [18]. Наибольший подземный сток наблюдается у реки Таз.

По режиму питания реки, принадлежащие бассейну Карского моря, относятся к преимущественно снеговому (Западносибирская равнина), а также к смешанному и ледниковому (притоки Оби, стекающие с гор южной Сибири).

Повсеместно основным источником питания являются зимние осадки, которые формируют от 40 до 70% годового стока. Участие дождевых вод в питании рек различно по территории. Наибольший процент дождевого стока (около 30-40 %) наблюдается на реках бассейна Сев. Сосьвы и р. Соби. В питании рек принимают примерно одинаковое участие, наряду с дождевыми, грунтовые воды. Повышенный грунтовый сток (25-30%) имеют реки лесной зоны (Таз, Пур, Тара). На реках лесотундры и тундры (Собь, Щучья) доля грунтового питания является незначительной (7-15%) [18].

На реках Алтая с водосборами, расположенными выше 1500-2000 существенную роль в годовом стоке играют талые воды снежников, а в питании многих рек со средней высотой водосборов более 2200-2500 талые ледниковые воды. На реках со средними высотами водосборов более 3000 м в створах, расположенных в непосредственной

близости от языков ледников, доля ледникового стока достигает 40-60% годового, тогда как на выходе рек из гор ледниковое питание не превышает 10-15 % [19]

В распределении годового стока воды по территории наблюдается закономерность, отвечающая ее климатическим и гипсометрическим особенностям.

Сток рек увеличивается с юга на север. На юго-востоке повышение водного стока рек связано с поясом гор Южной Сибири (Алтай, Саяны), здесь модуль стока рек достигает 40 л/с,км², в то время как на юго-западе бассейна модуль стока колеблется от 0,2 л/с,км² до 4 л/с,км². На севере и в центральной части обского бассейна модуль речного стока составляет 6-8 л/с,км² [16].

По характеру водного режима реки рассматриваемой территории подразделяются на следующие типы: 1) реки с весенним половодьем; 2) реки с весенним половодьем и паводками в теплое время года; 3) реки с весенне-летним половодьем; 4) реки с летним половодьем [23].

К рекам с весенним половодьем и паводками в теплое время года относятся реки левобережья Иртыша и северо-восточных низкогорных районов Алтая и Саяна со средними высотами водосборов менее 1000-1500 м.

Также к рекам с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года относятся реки правобережья Оби (Томь, Уса, Вах), а также бассейны рек лесотундры и тундры. Весенне-летнее и летнее половодье свойственно большим и средним рекам снегово-дождевого питания гор Алтая и Саяна [24].

Реки Алтая обладают большой энергетической способностью. На реках Катунь, Бий и Иртыше с притоками может быть получено около 12 млн. кВт электроэнергии. Наибольшими потенциальными возможностями обладает р. Катунь, которая может дать около 5,5 млн. кВт. электроэнергии, р. Иртыш - около млн. кВт., р. Бухтарма - более млн. кВт. Имеющиеся гидроэлектростанции построены на реках Иртыше (Бухтарминская, Усть-Каменогорская), Малой Ульбе (Хариузовская, Тишинская), Тихой, Чемал (приток р. Катунь) и на многих малых реках.

Реки бассейнов Нижнего Иртыша и Оби используются для судоходства, лесосплава, рыболовства, водоснабжения, орошения и как водоприёмники осушительных систем.

Главной воднотранспортной магистралью является непрерывный водный путь, начинающийся на р. Иртыше от г. Павлодара (за пределами рассматриваемой территории) и продолжающийся в северном направлении по р. Оби. Далее водный путь проходит через устье Оби в Обскую Тазовскую губы, где смыкается с Северным морским путем [18].

2.3 Восточная Сибирь. Физико-географическая страна охватывает обширную часть территории Азиатского материка, расположенную к востоку от Енисея и простирающуюся до Тихоокеанского водораздела, а в меридиональном направлении – от берегов Северного Ледовитого океана до Монголии и Китая. Протяженность физико-географической страны с запада на восток примерно на 80° (устье Енисея - $82^\circ 42' 58''$ в. д., восточная граница проходит в районе границы республики Саха и Чукотского АО по 163° в. д). На севере Восточная Сибирь ограничена побережьем Северного Ледовитого океана, на юге граничит с Монголией и Китаем, т.о. протяженность по широте равна примерно 20° С [16].

Основными чертами природы Восточной Сибири являются гористый рельеф, с высотами более 400 метров над уровнем моря, нарушения широтной зональности, а также проникновение многолетней мерзлоты в южные районы.

По характеру рельефа Восточная Сибирь относится к горным районам, причем здесь преобладают горы средней высоты и обширные плоскогорья, тогда как низменности занимают лишь небольшие пространства. Большую часть региона занимает Среднесибирское плоскогорье, средняя высота которого 500 – 700 метров [25]. На севере, юге и востоке плоскогорье окружено горными хребтами. Наиболее выраженная граница – горы Южной Сибири (исключая Алтай), сюда входят Салаирский кряж, Кузнецкий Алатау, Саяны, хребты Прибайкалья и Забайкалья, Витимское плоскогорье, Становой хребет и Алданское нагорье. Низменности занимают в Восточной Сибири прогибы между горами и возвышенностями (Вилуйская, Северо-Сибирская, Минусинская, Байкальская), а также опущенный северный край материка Евразия (Яно-Индибирская и Колымская) [26].

В отличие от Западной Сибири, природные зоны здесь менее разнообразны. Приполярноморская низменность занята тундрой и лесотундрой. Большая часть территории Восточной Сибири относится к таежной зоне. Леса Восточной Сибири заболочены слабо. Таежная зона на территории Восточной Сибири является господствующей и распространяется далеко на юг; участки степи и лесостепи вкраплены в нее в виде пятен (Минусинская котловина, носящая степной характер, степи Забайкалья) [27].

Климатические условия Восточной Сибири в значительной мере определяются ее географическим положением внутри Азиатского материка. На формирование климатических условий здесь не влияет ни Атлантический, ни Тихий океаны (отделена высокими горными хребтами), при этом воздушные массы, формирующиеся над

Северным ледовитым океаном, проникают вглубь континента, формируя над охлаждаемым материком полюс холода.

В Азии сибирский антициклон формируется в зимнее время, его мощный отрог занимает всю Восточную Сибирь, смыкаясь с Арктическим антициклоном, расположенным в течение всего года над Северным Ледовитым океаном. Таким образом, зима здесь характеризуется малой облачностью и преобладанием штилей, что влечет за собой сильное выхолаживание. В межгорных котловинах, где застаивается тяжелый холодный воздух, температура опускается до $-40 - -50^{\circ}\text{C}$. В районе полюса холода (Верхоянск и Оймякон) зарегистрирована температура -71°C [25].

Лето короткое, но жаркое, что обуславливается резкой континентальностью климата. На равнинах центральной Якутии средняя температура июля составляет $+19^{\circ}\text{C}$, иногда температура поднимается до $+38^{\circ}\text{C}$. Над прогретой сушей формируется зона пониженного атмосферного давления, и сюда устремляются воздушные массы Арктического антициклона, т.о. летом вдоль северных побережий Восточной Сибири формируется пасмурная прохладная погода, с дождями и снегопадами [28].

Среднегодовая температура Восточной Сибири почти везде ниже 0°C . Годовая амплитуда температур зимы и лета Восточной Сибири колеблется от 50 до 100°C (восточные районы).

На распределение осадков оказывает большое влияние рельеф и экспозиция горных хребтов. Так северо-западные склоны хребта Хамар-Дабан получают от 800 до 1400 мм осадков в год, осадки на юго-восточных склонах не достигают 300 мм в год [25]. В целом, осадков выпадает мало, на большей части района их количество не превышает 200–400 мм в год. Наименьшее количество осадков выпадет на Лено-Вилуйской низменности (не более 200 мм). Летом, преимущественно в июле – августе выпадет 70 – 80% осадков. Таким образом, зима Восточной Сибири достаточно малоснежная. Только в бассейне Енисея и в пределах Средне-Сибирского плоскогорья выпадает сравнительно много снега. Менее всего снега выпадает в бассейнах Яны и Индигирки [21].

На большей части Средней Сибири с ледникового времени сохранилась и многолетняя мерзлота, лежащая на глубине до 1 км и более на севере. Сохранению мерзлых грунтов способствует, в том числе, и малоснежная зима, и континентальность климата, приводящая к переохлаждению территории.

Наличие многолетней мерзлоты обуславливает сложные гидрогеологические условия. Запасы грунтовых вод на большей части Восточной Сибири очень бедны; грунтовые воды представлены преимущественно верховодкой, не участвующей в питании

рек. Зимой на многих реках образуются наледи, особенно в бассейнах рек Яны, Индигирки и Колымы, некоторые реки промерзают до дна.

Восточная Сибирь характеризуется большим количеством озер, особенно в северной и восточной частях. Большинство чаш озер образовано термокарстовыми явлениями, часть приурочена к поймам рек. Наиболее крупные озера (Байкал) расположены в тектонических трещинах [28].

Реки Восточной Сибири преимущественно имеют вид горных потоков; лишь в нижнем течении, протекая по низменностям, они приобретают равнинный характер. Здесь находятся такие крупные реки как Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма [16]. Общий уклон физико-географической страны направлен с юга на север. Большие высоты горных хребтов обуславливают значительные уклоны рек (Енисей – 0,16 м/км, Лена– 0,33 м/км, Яна – 0,15 м/км). На своем пути они пересекают разломы земной коры, поэтому их долины часто имеют характер ущелий с многочисленными порогами.

Большинство водотоков района относится к типу рек преимущественно снегового питания, доля которого превышает 50 % годового стока. Дождевое питание играет второстепенную роль, а грунтовое в условиях многолетней мерзлоты очень скудное и составляет лишь 1–2 % от общего годового стока. Основной сток на реках Восточной Сибири проходит в теплый период года, на долю зимнего стока приходится лишь несколько процентов от общего годового его объема [25].

Восточная Сибирь обладает большими гидроэнергетическими ресурсами, что определяет высокое антропогенное влияние на реки (Енисей – Красноярская и Саяно-Шушенская ГЭС, на притоке Лены – Вилюйская ГЭС и др.).

В целом для режима рек Восточной Сибири характерны следующие основные признаки: высокое весеннее половодье; ряд летних дождевых паводков, по высоте уступающих весеннему половодью; низкий сток в зимний период вплоть до полного его прекращения [27].

3 Анализ исходных данных и методика их обработки

3.1 Выбор объектов исследования. Для анализа теплового стока российских рек, принадлежащих бассейну СЛО, были выбраны четырнадцать наиболее крупных рек России. Основными критериями выбора рек была величина их протяженности, а также принадлежность к классу больших и средних рек по площади водосбора (более 2000 км²), согласно [29].

Выбор створов для исследования сопровождался трудностями, связанными с наличием пропусков в рядах наблюдения, и отсутствием рядов наблюдения за температурами.

Отобранные гидрологические посты должны были соответствовать следующим условиям:

- 1) как можно ближе располагаться к устьевым участкам рек, для наиболее полного учета жидкого и теплового стока;
- 2) содержать репрезентативный ряд наблюдений за расходами и температурой согласно [30];
- 3) ряды должны иметь одинаковую длину, либо возможность восстановления ряда данных до заданной длины, для последующего сравнения полученных результатов;

Исходными материалами для исследований послужили данные многолетних наблюдений за расходами и температурами воды на гидрологических постах Росгидромета, полученные из гидрологических ежегодников, а также по запросам в УГМС России (Северное УГМС, Обь-Иртышское УГМС, Среднесибирское УГМС, Якутское УГМС), кроме того, в работе использовались материалы глобальной базы данных R-arcticNET [31].

Также в работе использовались данные температуры воздуха, ближайших к створам метеостанций из удаленной базы данных АИСОРИ [32]. Выбор соответствующих метеостанций производился с учетом географической близости створов.

Створы, выбранные для изучения в рамках работы, представлены в таблице 1. Створы в таблице представлены в порядке уменьшения площади водосбора. Стоит заметить, что продолжительность наблюдений за температурой в створах р. Колыма- с. Колымское, р. Яна – с. Юбилейное, р. Мезень – д. Малонисогорская не соответствует условию 2, по этой причине оценка теплового стока по этим створам при удлинении ряда наблюдений может измениться.

Список метеорологических станций, соответствующих створам рек, представлен в приложении А.

Расчет теплового стока производился по месяцам теплого периода (май – октябрь).

Все расчеты, выполнялись в программах Excel 2016 и Statistica 6.0.

Таблица 1 – Географические характеристики исследуемых рек

Река	Замыкающий створ	Расстояние до устья, км	Площадь водосбора, км ²	Продолжительность наблюдений	
				Температура	Расход
Обь	г. Салехард	287	2950000	1940-2014	1930-2014
Енисей	г. Игарка	697	2440000	1940-2014	1936-2014
Лена	с. Кюсюр	211	2430000	1937-2010	1934-2010
Колыма	с. Колымское	262	526000	1978-2000	1978-2000
Северная Двина	п. Усть-Пинега	137	348000	1939-2010	1881-2010
Индигирка	п. Воронцово	350	305000	1939-1991	1938-1999
Печора	с. Усть-Цильма	425	248000	1936-2010	1932-2010
Яна	с. Юбилейное	157	224000	1972-1992	1971-1999
Оленек	7,5 км от устья р.Бур	210	198000	1964-1991	1964-1999
Таз	п. Сидоровск	259	100000	1962-1990	1962-1996
Пур	п. Самбург	86	95100	1954-1991	1939-1997
Анабар	с. Саскылах	209	78800	1954-1992	1954-1992
Мезень	д. Малонисогорская	186	56400	1940-1962	1920-1999
Онега	с. Порог	31	55700	1943-1988	1943-1992

С учетом неоднородности физико-географических условий формирования стока и величины рек, было принято разделение исследуемых рек на районы, представленное в работе Ю.А. Симонова [33]. Таким образом реки водосбора СЛО были разделены на 5 районов: Eu2, N1, N2, Ob, Le, En (Рисунок 1, таблица 2). Исследования района Eu1 (мелкие водотоки и реки, стекающие со склонов скандинавских гор), в связи с отсутствием гидрологических данных, не производилось.

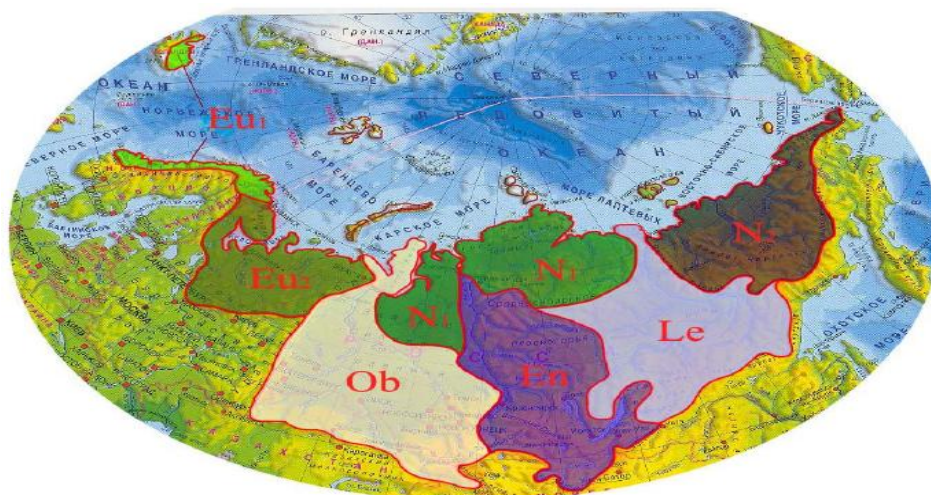


Рисунок 1 – Физико-географические районы формирования стока с российской части бассейна СЛО [33]

Eu2 - Европейская территория водосбора СЛО; Ob- бассейн Оби, N1 – Обь-енисейское и Енисей-ленское междуречье, En- бассейн Енисея, Le – бассейн Лены, N2 – реки Дальнего Востока

Таблица 2 – Принадлежность створов к физико-географическим районам формирования стока в СЛО

Район	Створ
Eu2	р. Онега - с. Порог
	р. Северная Двина - п. Усть-Пинега
	р. Мезень - д. Малонисогорская
	р. Печора - с. Усть-Цильма
N1	р. Пур - п. Самбург
	р. Таз - п. Сидоровск
	р. Оленек - 7,5 км от устья Бура
	р. Анабар - с. Саскылах
N2	р. Яна - с. Юбилейное
	Индибирка - п. Воронцово
	р. Колыма - с. Колымское
OB	р. Обь - г. Салехард
EN	р. Енисей - г. Игарка
LE	р. Лена - с. Кюсюр

3.2 Оценка репрезентативности периода наблюдений. Проверка синхронности колебаний. Продолжительность периода наблюдений считают достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен (представителен). Репрезентативность ряда гидрологических данных определяется средней квадратичной погрешностью среднего значения ряда, показывающей, насколько она отличается от нормы стока [34]. Репрезентативность ряда зависит от длительности ряда и коэффициента изменчивости [35].

Относительная средняя квадратическая погрешность не должна превышать 10 %.

Так же оценка репрезентативности ряда гидрологических данных ведется при помощи построения разностных интегральных кривых (РИК). Считается, что колебания стока во времени проявляется в виде многоводных и маловодных периодов, которые отличаются друг от друга и по отклонению от среднего значения и по продолжительности. Такие периоды образуют циклы разной продолжительности. В течение цикла наблюдается одна многоводная (увеличение водности) и одна маловодная фаза (уменьшение водности) [35].

Конечная формула, по которой считались координаты разностной интегральной кривой:

$$f(t) = \sum \frac{(K_i - 1)}{C_v}, \quad (1)$$

где $f(t)$ – функция, описывающая РИК, C_v - коэффициент вариации ряда.

Таким образом, для каждого исследуемого створа была получена разностная интегральная кривая стока. На рисунке 2 представлен итоговый график интегральных кривых стока 5 крупнейших рек бассейна СЛО за совместный период, для остальных створов РИК представлены в приложении Б.

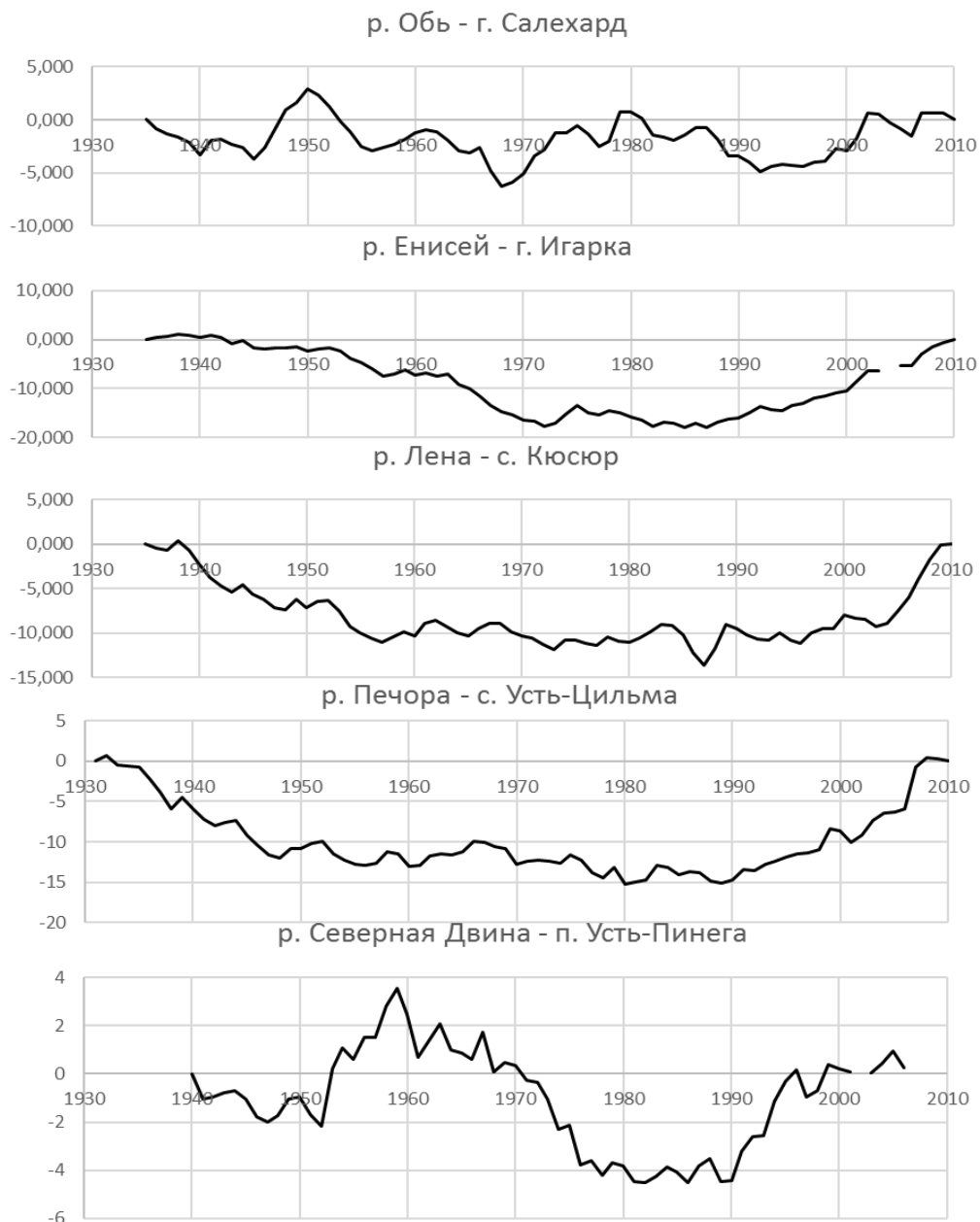


Рисунок 2 – Разностные интегральные кривые средних годовых расходов воды

С помощью разностных интегральных кривых определяют не только репрезентативный период, по колебаниям кривой можно оценить синфазность изменения водности на постах. Синфазность – это одинаковый ход колебания водности не в отдельные годы, а в фазы водности, т.е. параллельный ход маловодных и многоводных временных периодов [35].

Оценка синфазности водности была проведена для наиболее многоводных рек района (Северная Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена) (рисунок 2), а также по выделенным в исследовании физико-географическим районам (приложение Б).

Синфазность водности была выявлена для створов трех крупнейших рек водосбора Северного ледовитого океана: р. Енисей – г. Игарка, р. Обь – г. Салехард, р. Лена- с. Кюсюр, до 1970-80х гг. в створах наблюдается фаза пониженной водности, а затем начинается постепенное повышение стока. Важно отметить, что на этих же створах наблюдается нарушение однородности (по среднему) ряда расходов воды.

3.3 Анализ однородности рядов стока и температуры воды. Для объективной оценки гидрометеорологической информации, перед началом работы, ряды данных подвергаются проверке на однородность.

Существует множество причин формирования неоднородности гидрологической информации, некоторые из них, согласно [34], представлены ниже:

- 1) изменение метеорологических факторов, оказывающих влияние на формирование речного стока;
- 2) влияние естественных факторов подстилающей поверхности, таких как бессточные микро и макро понижения местности;
- 3) смена прибора для измерения метеорологических или гидрологических характеристик, влияющих на формирование речного стока;
- 4) ошибки во время камеральной обработки гидрометеорологической информации;
- 5) хозяйственная деятельность человека, изменяющая условия формирования речного стока.

Проверка рядов на однородность осуществляется по двум видам критериев, параметрическим и непараметрическим. В работе применялись следующие параметрические критерии: критерий Стьюдента (оценка по среднему) и критерий Фишера (оценка по дисперсии).

По критерию Фишера однородность двух выборок, можно проверить с помощью следующего условия:

$$K(F_f) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \sigma_1 > \sigma_2 \quad (2)$$

Величина $K(F_f)$ подчиняется закону распределения Фишера. Если $K(F_f) < K(F_{\alpha, \vartheta_1, \vartheta_2})$, где $\vartheta_1 = N_1 - 1$, $\vartheta_2 = N_2 - 1$ – числа степеней свободы; N_1 и N_2 – объемы сравниваемых выборок с соответствующими стандартными отклонениями σ_1 и σ_2 , то гипотеза однородности дисперсий подтверждается [36].

Согласно критерию Стьюдента, однородный ряд должен удовлетворять условию $K(S_f) < K(S_\alpha)$:

$$K(S_f) = \frac{|\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2|}{\sqrt{N_1\sigma_1^2 + N_2\sigma_2^2}} * \frac{\sqrt{N_1 * N_2 * (N_1 + N_2 - 2)}}{\sqrt{N_1 + N_2}}, \quad (3)$$

где \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 – средние значения сравниваемых выборок, $K(S_\alpha)$ – статистика Стьюдента на уровне значимости α . Если $K(S_f) < K(S_\alpha)$, то гипотеза равенства средних значений принимается.

Ограничения использования данных критериев состоит в том, что на однородность так могут быть проверены только нормально распределенные случайные величины.

Для рядов, не совпадающих с нормальным законом распределения, производилась дополнительная проверка на однородность по критерию Манна- Уитни (U- критерий). Для подсчета данного критерия ряд, проверяемый на однородность, делят на две части (X и Y), затем ряды объединяют и используют операцию ранжирования. Каждому значению x_i и y_i присваивается ранг (порядковый номер), для каждого ряда ведется подсчет ранговых сумм. Для определения однородности ряда по U-статистике пользуются следующими выражениями [37]:

$$U_1(U_2) = mn + \frac{m(m+1)}{2} - w_1(w_2), \quad (4)$$

где U_1 и U_2 - число инверсии для первой и второй выборки соответственно (инверсия для ряда X, если x_i впереди y_i , для ряда Y наоборот), w_1 и w_2 - ранговые суммы, m и n - количество СВ в первом и втором ряду.

Для верно рассчитанных значений инверсии должно выполняться равенство:

$$U_1 + U_2 = mn \quad (5)$$

Для сравнения с критическим значением U-статистики, берется наименьшее, из подсчитанных, число инверсий. Критическое значение U-статистики определяется по разработанным для метода таблицам.

На однородность анализировались среднегодовые температуры и расходы воды для каждого поста. Однородность всех рядов проверялась по критерию Стьюдента и Фишера. (оценки, рассчитанные по критерию Манна-Уитни, совпали с оценками, рассчитанными по критерию Стьюдента). Таблица проверки согласия среднегодовых значений температур и расходов воды с нормальным законом распределения, а также проверки однородности данных представлена ниже.

Таблица 3 – Результаты проверки рядов среднегодовых температур и расходов воды на согласие с нормальным законом распределения и однородность

Створ	Расход		Температура	
	норм.*	одн.	норм.	одн.
р. Онега - с. Порог	-	+	+	+
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	+	+	+	-
р. Мезень - д. Малонисогорская	+	+	+	+
р. Печора - с. Усть-Цильма	+	-	-	-
р. Пур - п. Самбург	+	+	+	+
р. Таз - п. Сидоровск	+	+	-	+
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	+	-	+	+
р. Анабар - с. Саскылах	+	+	+	-
р. Яна - с. Юбилейное	+	+	+	+
р. Индигирка - п. Воронцово	+	+	-	+
р. Колыма - с. Колымское	+	+	+	+
р. Обь-г. Салехард	+	+	+	+
р. Енисей -г. Игарка	+	-	+	+
р. Лена - с. Кюсюр	+	-	+	+

Примечание. *норм. – согласие с нормальным законом распределения, одн. – однородность по среднему

Анализ исследуемых рядов расхода и температуры воды показал согласие нормальному закону распределения для всех исследуемых постов, кроме поста р. Онега - с. Порог. В рядах температуры воды гипотеза о согласии с нормальным законом распределения была отвергнута на уровне значимости 5 % у следующих постов: р. Печора – с. Усть-Цильма, р. Таз – п. Сидоровск, р. Индигирка – п. Воронцово.

Анализ однородности (по дисперсии неоднородности не обнаружено) по среднему исследуемых рядов (оценка приведена для среднегодовых значений) показал нарушение однородности ряда расходов для трех створов крупнейших рек бассейна СЛО: р. Печора – с. Усть-Цильма, р. Енисей – г. Игарка, р. Лена – с. Кюсюр; нарушение однородности для ряда температур воды наблюдалось в створах р. Северная Двина - п. Усть-Пинега, р. Печора - с. Усть-Цильма, р. Оленек –7,5 км от устья р. Бур, р. Анабар - с. Саскылах.

Нарушение однородности по среднему в температурных рядах может быть вызвано изменением метеорологических факторов формирования температур воды в районе исследования. С 1960 –70гг XX века на территории водосбора СЛО наблюдается непрерывный рост температур воздуха, что отражено в работах [1, 9-10, 38].

Неоднородность по среднему рядов расхода воды, помимо изменения метеорологических факторов, может быть связана с хозяйственным освоением территории водосбора рек. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в пункте 4.6.

3.4 Критерии определения значимости тренда при анализе динамики гидрометеорологических характеристик. Долгосрочное изменение гидрологического

режима реки влечет за собой изменение статистических характеристик гидрометеорологических рядов, характеризующих данный речной бассейн. В случае направленного изменения гидрологического ряда его характеристики не могут считаться случайными, а общий ход ряда имеет тренд.

Оценка тренда по коэффициенту корреляции. Для оценки линейных трендов использовался критерий значимости выборочного коэффициента корреляции (R) для зависимости $X = f(t)$ [39]. Гипотеза об отсутствии тренда принималась, если выполнялось условие:

$$|R| < t_{2\alpha} \sigma_R \quad (6)$$

$$\sigma_R = \frac{(1-R^2)}{\sqrt{n-1}}, \quad (7)$$

где X – исследуемая гидрометеорологическая величина, α - уровень значимости, t - статистика Стьюдента при заданном уровне значимости $2\alpha = 5\%$, σ_R - стандартная ошибка коэффициента корреляции R , n - количество лет наблюдения.

Значение статистики Стьюдента зависит не только от уровня значимости, но и от числа степеней свободы ϑ , равного количеству независимых случайных величин выборки (т.е. для случайных нормально распределенных рядов, длине ряда) [37].

Критерий Аббе. Если выборка представляет собой ряд значений взаимно независимых нормально распределенных случайных величин, то для выяснения вопроса о ее стохастической независимости предпочтительнее воспользоваться критерием квадратов последовательных разностей (критерий Аббе) [40].

Критерий Аббе позволяет обнаружить систематическое смещение в ходе выборочного обследования. Проверяется гипотеза о том, что все выборочные значения принадлежат одной генеральной совокупности со средним математическим ожиданием μ ($H_0: \mu_i = \mu, i = 1, 2, \dots, n$) против альтернативы тренда $H_1: |\mu_{i+1} - \mu_i| > 0, i = 1, 2, \dots, n-1$.

Статистика критерия Аббе имеет вид:

$$\gamma = \frac{1}{2} * \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

Если $\gamma < \gamma_\alpha$ то нулевая гипотеза случайности ряда отклоняется с доверительной вероятностью $2\alpha = 0,05$ (критические значения γ_α приведены, например, в работах [40], [41]).

При $n > 60$, γ_a рассчитывается из условия, $\gamma_a = \gamma_{min}^*$:

$$\gamma_{min}^* = 1 + \frac{u_a}{\sqrt{n+0.5(1+u_a^2)}} \quad (10)$$

Оценка проводилась на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

4 Общие закономерности и факторы колебания стока

4.1 Характеристика условий формирования и распределение стока на исследуемой территории. Как уже отмечалось выше, физико-географические условия формирования речного стока в Северный ледовитый океан достаточно разнообразны. Однако при всем многообразии физико-географических условий, основополагающими факторами формирования речного стока являются осадки, температура воздуха и наличие вечной мерзлоты. Для больших рек (всех изучаемых), также важно направление течения. Все исследуемые реки протекают с юга на север, что обуславливает особенности их вскрытия, а также наличие заторов и зажоров во время ледохода (Северная Двина, Обь, Енисей и Лена).

ЕТР. Распределение стока на изучаемой части ЕТР носит зональный характер, нарушающийся наветренными склонами Уральских гор и влиянием теплого Северо-Атлантического течения. Почти по всей длине Урала модуль стока колеблется от 12 до 14 л/с×км², достигая 25 л/с×км² в истоках правобережных притоков р. Печора. Благодаря теплоте течения зона с модулем стока равны 10 л/с×км² начинается ближе к побережью СЛО, сюда попадают истоки Северной Двины. Таким образом, модуль стока Европейской территории России, принадлежащей водосбору Карского и Белого морей, изменяется от 10 до 25 л/с×км² [16].

Западная Сибирь. В целом, распределение стока на Западно-Сибирской равнине носит зональный характер. Но задерживающее атлантические воздушные массы влияние Уральских гор обуславливает большие скорости падения модуля стока с севера на юг [42]. В Тундре в среднем модуль стока составляет около 6 л/с×км², в зоне тайги значение модуля стока увеличивается до 8 л/с×км². Так модуль стока рек Пур и Таз составляет 9 л/с×км². Увеличение модуля стока для данных рек так же связано с многолетней мерзлотой, располагающейся в среднем течении и верховьях. Южнее сибирских увалов идет постепенное уменьшение модуля стока, на границе со степной зоной модуль стока составляет 1 л/с×км², далее на границе с пустынно-степной зоной - 0,1 л/с×км² [35].

Восточная Сибирь. В Восточной Сибири сильно проявляется нарушение зонального распределения модуля стока (в том числе в бассейне река Енисей). Здесь изолинии стока располагаются по меридиану, вдоль линий горных хребтов [42]. Бассейн Енисея имеет наибольший в Восточной Сибири модуль стока (после гор Путорана) - до 25 л/(с×км²) на правых притоках и до 16 л/(с×км²) на левых. Верхоянский хребет, расположившийся вдоль правого побережье реки Лена повышает модуль стока территории до 12 л/с×км², при этом модуль стока северное левобережье Лены едва

достигает значения $8 \text{ л/с} \times \text{км}^2$ и при удалении вглубь материка снижается до $4 \text{ л/с} \times \text{км}^2$, а в районе Якутска до $0,5 \text{ л/с} \times \text{км}^2$ [16]. Верховья рек Яна, Индигирка и Колыма имеют модуль стока $8-12 \text{ л/с} \times \text{км}^2$, который при движении к устью рек снижается до $4 \text{ л/с} \times \text{км}^2$, а затем и до $1 \text{ л/с} \times \text{км}^2$.

Изменения величины стока рек, принадлежащих бассейну Северного ледовитого океана, происходит не только в пространстве, но и во времени, в течение года сток рек района распределен не равномерно. Так реки Сибири Обь, Енисей и Лена за весну – лето выносят 70 -80% годового стока, на зимний сток приходится около 9-15%, а на осенний около 10-15% [18, 25, 43]. Реки ЕТР также выносят большую часть годового стока в теплый период, но за весну здесь проходит до 60% от годовой нормы (на р. Онеге до 50%), летне-осенний период обычно более многоводный чем в Сибири, за это время реки ЕТР выносят до 35% водного стока (р. Онега до 40%), зимний сток традиционного низкий и колеблется от 7 до 10% (на Онеге до 15%). Особенности водного режима р. Онега обуславливаются высокой естественной зарегулированностью ее истоков [15].

Наибольшая доля годового стока рек Таз, Пур, Колыма, Яна, Индигирка, также приходится на теплый период. Это обуславливается еще и тем, что половодье в тундровой зоне рек Сибири начинается в конце мая, освобождение реки ото льда происходит через 20 дней после начала половодья, а завершается половодье в конце июля – начале августа.

Для таких рек района как Таз, Пур, Надым характерно наличие летне-осенних паводков, образующихся в результате выпадения обильных дождей и многолетней мерзлоты на успевающей оттаять за летний период, и не позволяющей проходить процессам инфильтрации. На Оби дождевые паводки идут преимущественно в осенний период, в сентябре — октябре. В среднем и нижнем течении спад половодья наслаивается на дождевые паводки и продолжается до ледостава

Обычно, половодье на Енисее начинается в конце апреля — начале мая в верховьях, и в нижнем течении в середине мая — начале июня. Весенний ледоход часто сопровождается заторами, причинами служат протяженность реки с Юга на Север и высокая транспортирующая способность потока (льдины приходят с верховий).

Для рек Восточной Сибири, таких как, Яна и Индигирка весеннее половодье незначительно вследствие малого количества снега, выпадающего в бассейне реки, многоводный период года – теплый, в основном за счет, выпадающих на территории дождей [44]. Реки Колыма, Анабар, Оленек характеризуются высоким весенним половодьем, летне-осенними паводками и исключительно-низким стоком в зимний период вплоть до полного перемерзания. Это объясняется скудностью грунтового питания рек в условиях вечной мерзлоты.

Питание рек водосбора Северного ледовитого океана относится к преимущественно снеговому. У Енисея и Оби высока доля дождевого питания. На реке Таз выделяют до 27 % грунтового питания. Основными источниками питания рек, впадающих в море Лаптевых (Анабар, Оленёк, Яна, Лена) являются талые воды и летне-осенние дожди, роль грунтового питания незначительна из-за многолетнемерзлых пород [7]. Реки ЕТР также относятся к преимущественно снеговому питанию, с дождевым и грунтовым стоком [15].

Переход температуры воды через отметку 0,2°C в нижних створах рек ЕТР происходит в третьей декаде апреля – первой декаде мая. В нижних створах западносибирских и восточносибирских рек такой переход совершается в третьей декаде мая - первой декаде июня. В среднем через 5 – 7 дней после указанного перехода реки освобождаются ото льда. Прогрев воды идет сравнительно быстро, достигая своего максимума в июле – в среднем 15 °С. Период положительных температур воды составляет 5 месяцев [45].

4.2 Средний многолетний сток. Годовой сток относится к категории основных гидрологических характеристик. Обычно годовой сток характеризуется нормой стока или, при недостаточном количестве лет наблюдений средним многолетним стоком [46] Подсчет среднемноголетнего стока рек производился через нахождение годового стока и последующее вычисления среднего арифметического ряда. Количественно средний многолетний сток выражается через модуль расхода, объем стока, расход или слой стока [35]. Результаты расчетов для среднего многолетнего значения этих гидрологических характеристик приведены в таблице 4. Для подсчета годового стока воды в створах, использовались значения среднемесячных расходов воды.

Подсчет нормы стока велся через вычисление среднего арифметического многолетнего ряда расходов воды:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_1^N Q_{cp,i}}{N}, \quad (11)$$

Подсчет среднего объема стока за многолетний период:

$$\bar{W} = \frac{\sum_1^N Q_{cp,i}t}{N}, \quad (12)$$

где $Q_{cp,i}$ - среднегодовой расход воды в створе за i -тый год, N - количество лет наблюдений, t - количество секунд в году.

Модуль стока и слой стока так же рассчитывались по общепринятым формулам:

$$\bar{q} = 1000 \frac{\bar{Q}}{F}, \quad (13)$$

$$\bar{y} = \frac{\bar{W}}{1000F}, \quad (14)$$

где \bar{q} – среднееголетний модуль стока, \bar{Q} – средний расход воды, F – площадь водосбора, \bar{y} – среднееголетний слой стока, \bar{W} – среднееголетний объём стока.

Таблица 4 - Средние многолетние значения гидрологических характеристик стока

Створ	Средний расход, м ³ /с	Объем стока, км ³ /год	Модуль стока, л/(с×км ²)	Слой стока, мм
р. Онега - с. Порог	501	15,8	9,0	283
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	3228	101,8	9,3	292
р. Мезень - д. Малонисогорская	644	20,3	11,4	360
р. Печора - с. Усть-Цильма	3516	110,9	14,2	447
р. Пур - п. Самбург	900	28,4	9,5	298
р. Таз - п. Сидоровск	1055	33,3	10,6	333
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	1173	37,0	5,9	187
р. Анабар - с. Саскылах	454	14,3	5,8	181
р. Яна - с. Юбилейное	1034	32,6	4,6	146
Индибирка - п. Воронцово	1619	51,1	5,3	167
р. Колыма - с. Колымское	3254	102,6	6,2	195
р. Обь-г. Салехард	12574	396,5	4,3	134
р. Енисей -г. Игарка	18643	587,9	7,6	241
р. Лена - с. Кюсюр	17015	536,6	7,0	221

Таким образом, суммарный средний многолетний сток исследуемых рек в СЛО составил 2073 км³/год. При чем 73,5% от рассчитанного стока приходится на три крупнейшие реки Российской территории СЛО – р. Обь (19,2%), р. Енисей (28,4%), р. Лена (25,9%). Более 15% стока исследуемых створов в СЛО приносят реки Северная Двина (4,9%), Печора (5,4%) и Колыма (5%).

Согласно исследованию В.И. Бабкина, средний суммарный Арктический сток российский рек составляет порядка 2900 км³. Около 54,3% указанной величины составляют воды рек Енисей (630), Лена (540) и Обь (408 км³/год), 29,2% стока приходится на 16 больших, и еще 16,4% стока приходится на 1500 средних и малых рек [1].

Суммарный арктический сток, исследуемых рек составил 72% (2073 км³) от приведенной величины стока всех российских рек. Рассчитанный в работе средний годовой сток Енисея, Оби и Лены от приведенных выше величин отличается незначительно.

Таким образом, при учете полного среднего годового стока рек России в Северный Ледовитый океан на сток реки Енисей, приходится порядка 20%, на Лену – 19%, Обь –

14%. Вклад не учтенных при исследовании рек довольно значителен около 28% (Рисунок 3).

ОБЪЕМ СТОКА В СЛО, КМ³

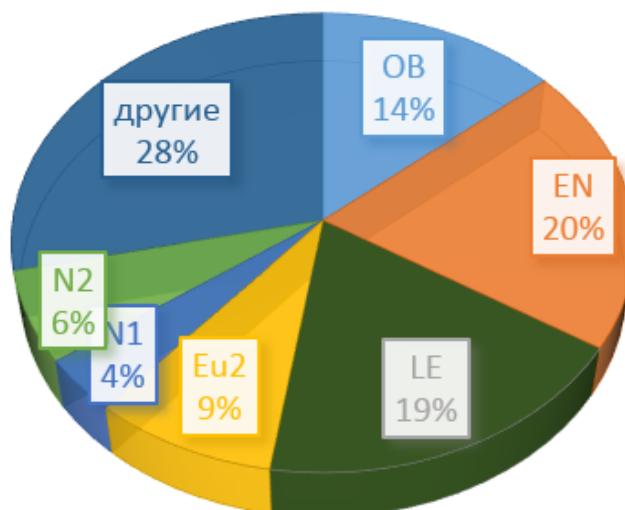


Рисунок 3 – Вклад физико-географических районов в сток российских рек в СЛО

4.3 Внутригодовое распределение стока. Сток рек распределен неравномерно не только в пространстве, но и во времени. За счет преобладания снегового питания и обильных осенних дождей, у большинства российских рек водосбора СЛО выражено весеннее половодье, преобладает сток в теплую часть года, у рек западносибирского (Обь) и восточносибирского типа (Енисей, Лена, Колыма) наблюдаются осенние паводки, а реки восточноевропейского типа (Печора, Северная Двина) обладают повышенным осенним стоком. Реки дальневосточного типа (Индигоирка, Яна, Оленек) так же обладают повышенным стоком в теплый период времени, за счет почти полного отсутствия подземного питания в условиях вечной мерзлоты.

За период расчета с мая по октябрь в среднем проходит 88% водного стока, при этом на реках Оленек, Анабар, Яна и Индигоирка за это время проходит в среднем 99%, на р. Колыме проходит 96% от среднего годового стока (таблица 5). Так же велика доля стока с мая по октябрь у реки Лена (92%).

Реки ЕТР и Западной Сибири по сравнению с реками Восточной Сибири обладают повышенным зимним стоком. Так на реке Онега и на реке Обь, согласно расчетам, сток с декабря по март составляет 12 % от годового, а на реке Лена всего 5,1%, а на Анабаре и Яне 0,1%.

Таблица 5 – Внутригодовое распределение стока рек по месяцам (в %)

	Река	Месяц												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	V-X
eu2	р. Онега - с. Порог	3,0	2,4	2,2	8,4	33	14	7	5	6	8,1	6,7	4,2	73
	р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	1,7	1,4	1,2	2,3	23	33	11	6	7	7,5	3,9	2,4	87
	р. Мезень - д. Малонисогорская	2,2	1,8	1,7	5,1	36	18	7	5	6	8,0	5,5	3,2	80
	р. Печора - с. Усть-Цильма	2,6	2,1	1,8	6,4	35	17	7	5	6	7,2	5,8	3,5	78
N1	р. Пур - п. Самбург	2,8	2,4	2,1	2,2	7	35	16	9	8	6,8	4,7	3,7	82
	р. Таз - п. Сидоровск	2,4	2,1	1,8	1,8	7	34	21	8	7	6,5	4,4	3,2	84
	р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	0,1	0,0	0,0	0,0	4	57	17	8	10	2,8	0,6	0,2	99
	р. Анабар - с. Саскылах	0,0	0,0	0,0	0,0	2	59	18	12	8	1,5	0,6	0,1	99
N2	р. Яна - с. Юбилейное	0,0	0,0	0,0	0,0	4	35	25	21	14	2,0	0,4	0,1	99
	р. Индигирка - п. Воронцово	0,2	0,1	0,1	0,0	2	30	28	22	14	2,8	0,7	0,4	99
	р. Колыма - с. Колымское	0,7	0,6	0,6	0,5	5	38	19	15	13	4,6	1,2	0,9	96
OB	р. Обь-г. Салехард	3,2	2,7	2,4	2,5	10	22	19	14	9	6,8	4,3	3,6	81
EN	р. Енисей -г. Игарка	3,0	3,1	3,0	3,0	13	35	12	8	8	6,4	3,5	2,9	81
LE	р. Лена - с. Кюсюр	1,5	1,2	0,9	0,8	4	36	19	13	12	7,2	1,8	1,5	92

В таблице 6 представлено внутригодовое распределение стока по отдельным районам в км³. Максимальным стоком за теплый период обладает Лена - 496 км³, на втором месте Енисей – 479 км³, сток Оби за этот период составляет 325 км³, Европейские реки дают сток порядка 206, 9 км³, далее идут бассейны больших рек Восточной (181 км³) и Западной (102 км³) Сибири. Большой вклад стока в СЛО для рек Восточной Сибири объясняется высокой водностью реки Колыма.

Таблица 6 – Внутригодовое распределение объема стока рек различных физико-географических районов

Район	Месяц													За год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	V-X	
OB	12,9	9,8	9,6	9,8	41,9	84,2	78,2	57,7	35,0	27,6	16,9	14,6	325	398
EN	18,2	16,6	17,9	17,5	76,7	204	69,7	46,3	44,6	38,0	20,1	17,5	479	587
LE	8,2	5,8	5,0	4,0	19,8	193	106	73,4	64,7	39,4	9,5	8,4	496	537
Eu2	5,6	4,1	4,0	11,4	75,2	59,2	23,2	14,1	16,2	19,0	12,4	7,8	206,9	252
N1	1,7	1,3	1,2	1,2	6,0	50,4	20,7	10,1	9,4	5,4	3,0	2,3	102,0	113
N2	0,8	0,6	0,6	0,5	6,8	64,6	42,9	34,7	25,0	6,9	1,7	1,2	181,0	186
СЛО*	47	38	38	44	226	655	341	236	195	136	64	52	1790	2073

Примечания* - сток в северный ледовитый океан представлен стоком исследуемых рек

Основные статистические характеристики водного стока исследуемых рек района ЕТР (Таблица 7) показывают среднюю величину разброса данных (максимальный

коэффициент вариации составил 0,22), а также их значительную правостороннюю асимметрию (кроме реки Мезень). Для рек Обь-Енисейского, Енисей-Ленского междуречья (N1) и рек правобережья Лены (N2), так же, как и для рек ЕТР характерна средняя величина изменчивости ряда.

Важно заметить, что с увеличением количества лет наблюдений, в целом, коэффициент вариации ряда уменьшается. Наименьший коэффициент вариации среди исследуемых рек наблюдается для реки Енисей. В связи с этим, наибольшее среднее квадратическое отклонение среди исследуемых водосборов составляет 2155 и принадлежит ряду наблюдений на р. Лена, на втором месте – среднее квадратическое отклонение р. Оби, и лишь затем идет р. Енисей.

Наименьшее среднее квадратическое отклонение наблюдается у реки Пур, что связано с малой величиной дисперсии ряда расходов (чуть больше, чем у Енисея).

Таблица 7 – Основные статистические характеристики расхода рек, принадлежащих бассейну СЛЮ

Район	Река	N	Среднее	Медиана	Min	Max	СКО	Cv	Cs
Eu2	Северная Двина	124	3326	3264	1785	5245	615	0,18	0,38
	Печора	79	3516	3497	2576	5821	509	0,14	1,07
	Онега	50	501	483	309	825	108	0,22	0,76
	Мезень	79	644	631	350	904	108	0,17	0,13
N1	Таз	30	1055	1027	869	1474	139	0,13	1,12
	Пур	59	896	891	695	1086	101	0,11	- 0,06
	Оленёк	35	1173	1088	645	1839	329	0,28	0,35
	Анабар	46	454	462	173	689	114	0,25	- 0,05
N2	Индигирка	60	1619	1591	1082	2527	331	0,20	0,85
	Яна	27	1034	995	642	1768	287	0,28	0,89
	Кольма	23	3254	3158	1862	4871	825	0,25	0,47
Le	Лена	76	17015	16541	12731	23054	2155	0,13	0,52
En	Енисей	77	18665	18856	15649	22248	1490	0,08	0,09
Ob	Обь	85	12574	12453	8488	18142	1910	0,15	0,57

Примечания* - Cv - коэффициент вариации, Cs – коэффициент асимметрии ряда

4.4 Температурный режим речных вод и средний многолетний тепловой сток.

Тепловой сток рек, принадлежащих бассейну СЛЮ, осуществляется лишь в летний период. Значения теплового стока рек в другое время года можно считать незначительными т.к. температуры воды близки к нулю, а на жидкий сток 7 из 12 (ноябрь - май) месяцев приходится около 30% годового стока. Расчет среднего значения теплового стока, таким образом, велся за 6 месяцев (период с мая по октябрь) для рек ЕТР, и за 5 месяцев (июнь-октябрь) для остальной части исследуемых рек.

Месячная величина теплового стока рассчитывалась по следующей формуле:

$$W_T = c_p \rho t W \quad (15)$$

где c_p - удельная теплоемкость воды (изменяется от 4,174 до 4,212 кДж/(кг×°С) при t от 0 до 30 °С), ρ - плотность пресной воды, равная 1000 кг/м³, t – средняя за месяц температура воды (°С), W - объем жидкого стока за месяц (м³).

Диапазон изменения удельной теплоемкости воды невелик, поэтому величина c_p была принята по среднему со всей территории значению и составила 4,185 кДж/(кг×°С) (соответствует температуре 8,5°С).

Коэффициенты вариации для рядов температуры воды (таблица 8) изменяются от 0,09 до 0,16, что указывает на малую величину разброса значений температур воды за период июнь – октябрь (май-октябрь для ЕТР) по всей территории водосбора СЛО. Как и в случае с водным стоком вариация ряда температур для р. Енисей является одной из самых небольших в бассейне.

Среднегодовая температуры воды на исследуемых створах меняется от 6,2 до 11,7 °С. Среди рек ЕТР наименьшая среднегодовая температура воды наблюдается у р. Мезень, а максимальная среднегодовая температура характерна для р. Онега. Среди рек, принадлежащих Обь-Енисейскому и Енисей-Ленскому междуречьям, река Таз обладает максимальной среднегодовой температурой воды. Районом с наиболее холодными водами является восточная часть бассейна СЛО (правобережье Лены), здесь максимальная среднегодовая температура воды составляет лишь 8,6°С (река Колыма), а среднегодовая температура р. Яны составляет 6,2 °С.

Из крупнейших рек водосбора СЛО минимальной среднегодовой температурой обладает р. Лена (7,7°С), среднегодовые температуры воды в Оби и Енисее приблизительно равны (10,3 и 10,2°С соответственно).

Таблица 8 – Основные статистические характеристики температуры воды рек, принадлежащих бассейну СЛО

Район	Река	N	Среднее	Медиана	Min	Max	СКО	Cv	Cs
Eu2	Северная Двина	69	11,2	11,3	8,8	14,5	1,08	0,10	0,00
	Печора	71	9,9	9,7	7,0	14,0	1,57	0,16	0,45
	Онега	40	11,7	11,9	7,2	13,0	1,14	0,10	-1,76
	Мезень	19	8,1	7,6	6,5	10,7	1,03	0,13	1,02
N1	Таз	29	9,7	9,8	8,3	11,2	0,85	0,09	0,12
	Пур	38	9,0	9,1	7,2	10,6	0,81	0,09	-0,39
	Оленёк	26	6,8	6,8	4,3	8,0	0,84	0,12	-1,08
	Анабар	34	7,2	7,3	4,6	9,3	1,05	0,15	-0,18

Продолжение таблицы 8

Район	Река	N	Среднее	Медиана	Min	Max	СКО	Cv	Cs
N2	Яна	17	6,2	6,4	4,8	7,5	0,72	0,12	-0,16
	Индигирка	50	6,9	6,9	5,5	8,8	0,66	0,10	0,24
	Кольма	23	8,6	8,3	7,4	10,5	0,84	0,10	0,82
Le	Лена	65	7,7	7,8	5,0	10,0	0,91	0,12	-0,03
Об	Обь	74	10,3	10,4	7,8	13,0	1,32	0,13	-0,02

4.5 Внутригодовая динамика теплового стока. Внутригодовая и многолетняя динамика теплового стока связана не только с изменением температуры. Огромное влияние на тепловой сток оказывает и величина расхода воды. Так река Таз, принадлежащая Енисей-Ленскому междуречью, среди рек района обладает наибольшим тепловым стоком из рассмотренных рек района (таблица 9).

С другой стороны, водность реки Енисей выше чем водность реки Лена, средняя за теплый период температура воды в реке Лена, на 2,4°C ниже, чем в Енисее, а тепловой сток этой реки является максимальным среди всех исследуемых рек. Такая картина связана с тем, что средний многолетний расход Лены за июнь-октябрь (36206 м³/с) выше чем у Енисея (30517 м³/с).

Таблица 9 – Основные статистические характеристики теплового стока рек, принадлежащих бассейну СЛЮ

Район	Река	N	Среднее	Медиана	Min	Max	СКО	Cv	Cs
Eu2	Онега	40	330	319	169	669	97,0	0,29	1,29
	Северная Двина	70	2173	2130	1024	4138	623	0,26	0,18
	Мезень	19	425	381	238	773	138	0,32	0,92
	Печора	71	2939	2835	1482	5123	729	0,25	0,83
N1	Пур	38	822	800	580	1290	161	0,20	0,93
	Таз	27	1149	1108	731	1945	252	0,22	1,16
	Оленёк	25	888	966	291	1451	308	0,35	-0,58
	Анабар	34	333	331	176	536	101	0,30	0,25
N2	Яна	17	1225	1165	830	2071	384	0,31	0,86
	Индигирка	50	2158	2080	1364	3718	466	0,22	0,94
	Кольма	23	3777	3634	2261	5962	945	0,25	0,70
Об	Обь	74	13903	13148	4954	23939	3579	0,26	0,55
En	Енисей	74	15053	14756	9744	21573	2261	0,15	0,54
Le	Лена	65	15796	15730	10055	22617	3106	0,20	0,28

Наибольшей дисперсией теплового стока обладают реки Оленёк, Мезень и Анабар, что может быть связано с недостаточной длительностью рассчитанных рядов. Наименьшая дисперсия значений характерна, как и в случаях с расходом и температурой, для реки Енисей.

Говоря о колебания теплового стока нельзя не учесть его внутригодовой ход. Как уже говорилось выше 6-7 из 12 месяцев тепловой сток приравнивается к нулевому. А максимум теплового стока смещен относительно максимума водный стока, и не совпадает с максимум температуры воды. Это происходит за счет того, что во время весеннего половодья, когда наблюдается максимальный водный сток, воды реки еще не успевают прогреться, а в период, когда наблюдается температурный максимум, как правило, половодье уже завершено. Таким образом величина теплового стока получается суперпозицией хода водного стока и температур воды.

Для каждого физико-географического района, рассматриваемого в исследовании, были получены свои графики хода водного и теплового стока, осредненные за весь промежуток наблюдений для соответствующей реки.

Согласно получившимся графикам, для ЕТР характерно запаздывание максимума теплового стока по отношению к максимуму жидкого стока. В то же время температурный максимум на реках района (исключая Печору) наступает позже максимума теплового стока (рисунок 4).

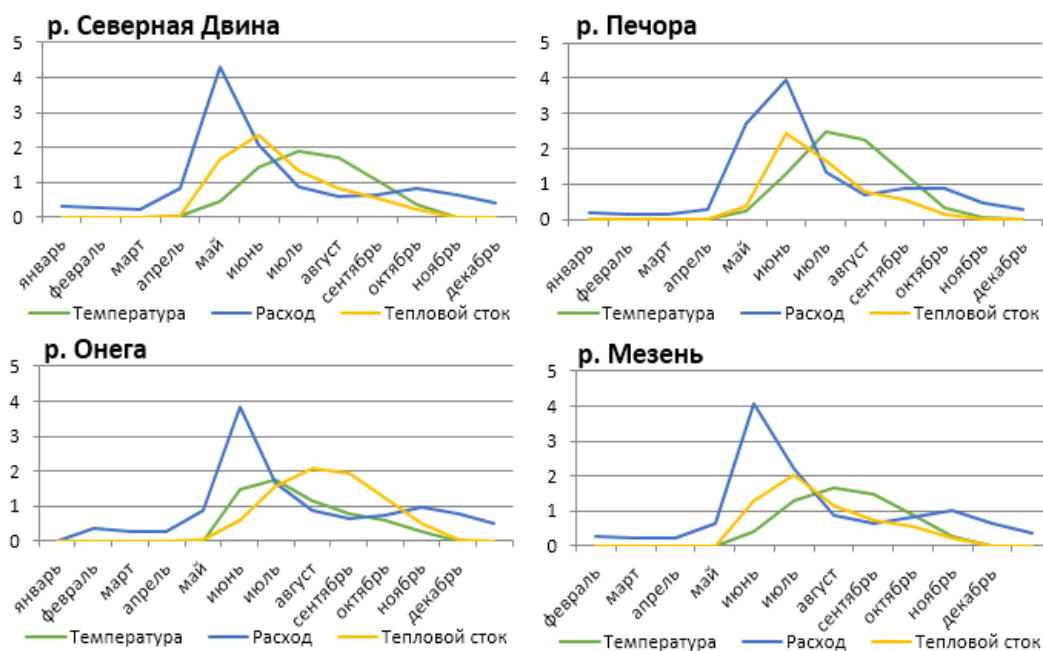


Рисунок 4 - График хода модульных коэффициентов расхода, температур и теплового стока для района Eu2

Для рек Пур и Таз, как и для рек ЕТР, характерно запаздывание максимума теплового стока по отношению к максимуму водного стока. При этом, реки Анабар и Оленёк отличаются совпадением максимумов жидкого и водного стока (рисунок 5). Совпадение максимумов можно объяснить очень большой долей июньского водного стока

от годового - более 50%, и подтверждается исследованиями, проводимыми в 1950е. гг. Арктическим научно-исследовательским институтом [6].

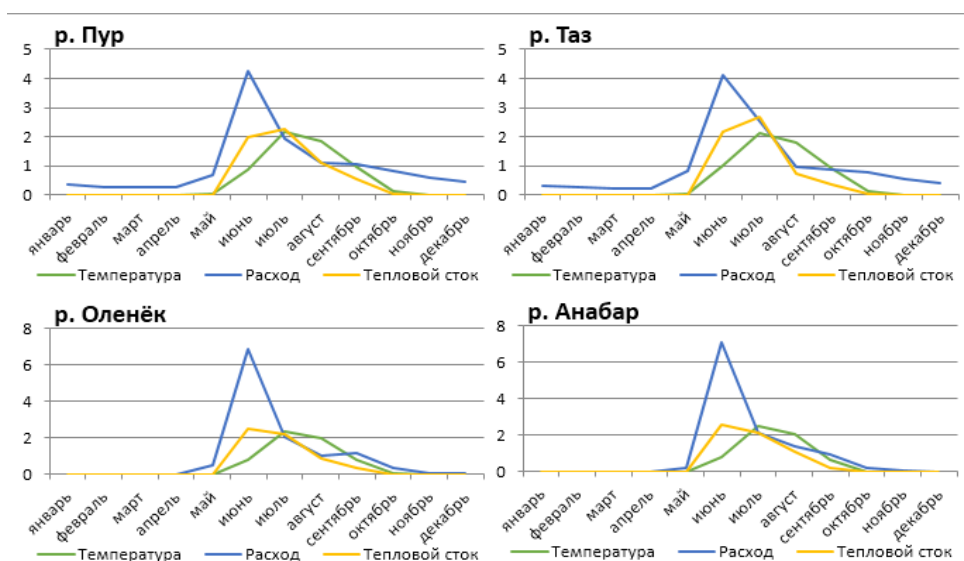


Рисунок 5 - График хода модульных коэффициентов расхода, температур и теплового стока для района N1

Реки Яна и Индигирка являются реками с повышенным водным стоком в теплую часть года. Весеннее половодье этих рек не дает нужного, для совпадения максимума водного и теплового стока, количества воды. Пик теплового стока смещен относительно пика половодья, при этом уменьшение водного стока после пика происходит очень плавно, в отличии от других рек восточной Сибири. Ход максимумов рассматриваемых величин на реке Колыма по виду совпадает с ходом максимумов на реках Анабар и Оленёк, что связано с похожими условиями формирования водного стока на данных реках (рисунок 6).

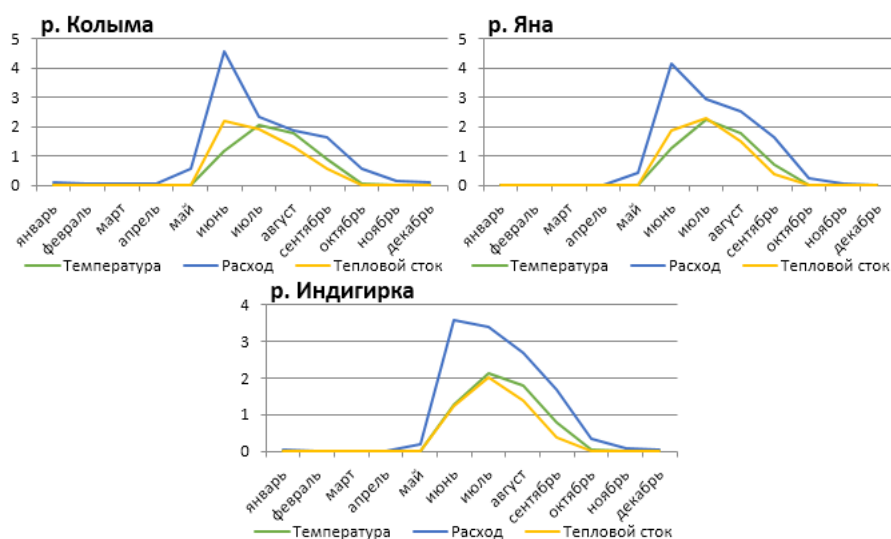


Рисунок 6- График хода модульных коэффициентов расхода, температур и теплового стока для района N2

Ход теплового стока на крупнейших реках арктического региона, в целом отражает особенности не только территории расположения створа, но и азональные особенности рек. Так для Оби и Лены характерно совпадение максимума теплового стока с максимумом температуры, достигающимся в июле, а для Енисея максимум теплового и водного стока совпадают (Рисунок 7). Совпадение максимумов теплового и водного стока на р. Енисей можно объяснить неравномерным распределением стока реки за июнь-октябрь. Так 35% стока приходится на июнь, в то время как июльский сток и сток последующих месяцев не превышает 12% от годового. На р. Лена и р. Обь водный сток в теплый период распределен более равномерно, и потому решающую роль здесь играет прогрев воды.

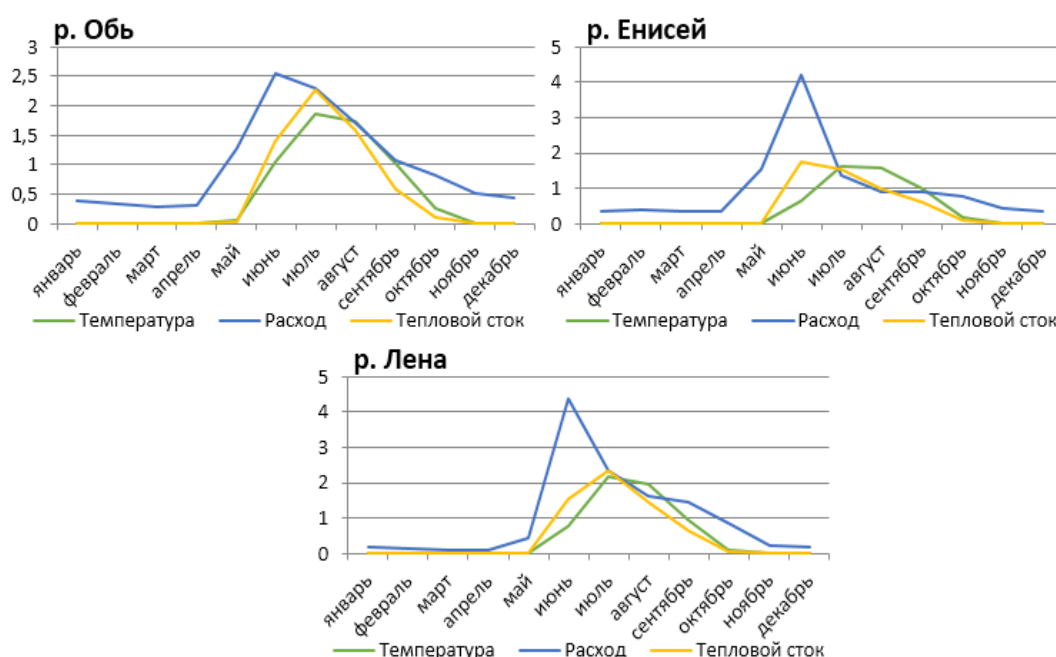


Рисунок 7 - График хода модульных коэффициентов расхода, температур и теплового стока крупнейших рек водосбора СЛО

В работе также был произведен подсчет количества теплоты в джоулях выносимого рекой за 1 секунду (тепловой расход), и количество теплоты, выносимое рекой за 1 секунду с км² площади водосбора (модуль теплового стока). Формулы для подсчета теплового расхода (Q_T) и модуля теплового стока (q_T) представлены ниже.

$$Q_T = c_p \rho t Q \quad (16)$$

$$\bar{q}_T = 1000 \frac{\bar{Q}_T}{F} \quad (17)$$

где c_p - удельная теплоемкость воды (изменяется от 4,174 до 4,212 кДж/(кг×°C) при t от 0 до 30 °C), ρ - плотность пресной воды, равная 1000 кг/м³, t – средняя за месяц температура воды (°C), Q - расход воды (м³/с), F – площадь водосбора.

Согласно расчетам (таблица 10) наибольший средний тепловой расход, как и объема теплового стока наблюдается у реки Лена. В то же время наибольший вынос теплоты с километра квадратного характерен для реки Печора, модуль её теплового стока составляет более $376 \text{ Дж}/(\text{с}\times\text{км}^2)$, что является следствием большей величины расхода реки по сравнению с другими реками района Eu2 и меньшей площадью водосбора по сравнению с крупнейшими реками региона. Также важно отметить высокую величину модуля теплового стока для реки Таз ($364 \text{ Дж}/(\text{с}\times\text{км}^2)$), обусловленную более высокой среднегодовой температурой по сравнению с другими реками района N1.

Таблица 10 – Средние многолетние значения характеристик теплового стока.

Створ	Средний тепловой расход, Дж/с	Объем теплового стока, кДж*10 ¹² /год	Модуль теплового стока, Дж/(с×км ²)
р. Онега - с. Порог	10463	330,0	187,8
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	68905	2173,0	198,0
р. Мезень - д. Малонисогорская	13465	424,6	238,7
р. Печора - с. Усть-Цильма	93188	2938,8	375,8
р. Пур - п. Самбург	26057	821,7	274,0
р. Таз - п. Сидоровск	36436	1149,1	364,4
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	28164	888,2	142,2
р. Анабар - р. Саскылах	10572	333,4	134,2
р. Яна - с. Юбилейное	38860	1225,5	173,5
Индигирка - п. Воронцово	68416	2157,6	224,3
р. Колыма - с. Колымское	119764	3776,9	227,7
р. Обь-г. Салехард	440861	13903,0	149,4
р. Енисей -г. Игарка	477338	15053,3	195,6
р. Лена - с. Кюсюр	500894	15796,2	206,1

Критерием влияния внутригодового распределения стока и температура воды на тепловой сток служит тепловой коэффициент K_t , отражающий соотношение годового стока теплоты и стока воды [1].

Для рассматриваемых постов, среднегодовые значения теплового коэффициента колеблются от 18 до $47 \text{ МДж}/\text{м}^3$ – подсчет производился за май – октябрь (Таблица 11). При этом максимальные тепловые коэффициенты у всех рек водосбора СЛО наблюдаются в июле и изменяются от 52 до $72 \text{ МДж}/\text{м}^3$.

Максимальный тепловой коэффициент наблюдается у реки Онега, 1 м^3 воды данной реки в среднем несет в себе $46,4 \text{ МДж}/\text{м}^3$, в июльский тепловой коэффициент также является наибольшим из рассматриваемых ($71,8 \text{ МДж}/\text{м}^3$). Наименьшее теплосодержание в кубическом метре характерно для реки Оленёк. Из крупнейших рек наибольший тепловой коэффициент характерен для Оби в среднем $36,8 \text{ МДж}/\text{м}^3$ с июльским максимумом $68,8 \text{ МДж}/\text{м}^3$.

Таблица 11 – Коэффициент теплового стока (МДж/м³) для рек водосбора СЛЮ

Река	V	VI	VII	VIII	IX	X	Среднее
р. Онега - с. Порог	20,6	58,6	71,8	68,6	43,1	15,7	46,4
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	18,9	53,2	71,1	60,1	37,2	12,4	42,2
р. Мезень - д. Малонисогорская	16,4	50,9	69,6	64,3	38,7	11,2	41,8
р. Печора - с. Усть-Цильма	6,76	33,2	66,0	61,0	35,0	9,2	35,2
р. Пур - п. Самбург	0,00	27,4	69,0	58,6	31,3	3,5	31,7
р. Таз - п. Сидоровск	0,00	34,3	68,9	50,1	27,8	2,6	30,6
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	0,00	17,4	52,6	42,1	15,5	0,9	21,4
р. Анабар - с. Саскылах	0,00	16,7	46,4	37,6	11,2	0,3	18,7
р. Яна - с. Юбилейное	0,00	33,2	57,6	44,0	17,5	0,2	25,4
Индибирка - п. Воронцово	0,00	35,2	60,4	51,7	22,2	0,7	28,4
р. Колыма - с. Колымское	0,00	34,9	60,4	52,5	25,8	1,8	29,2
ОВ	2,50	38,1	68,8	64,9	38,0	8,7	36,8
EN	0,00	26,0	66,9	66,4	40,6	7,8	34,6
LE	0,00	20,5	58,3	53,1	25,3	2,8	26,7

4.6 Особенности проявления климатических трендов на стоке рек в замыкающих створах СЛЮ. За последние 100 лет глобальная температура суши и океана увеличились на $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$. На протяжении XX века Арктика переживала потепление температуры несколько раз, и сегодня средняя температура поверхности продолжает расти. Все эти изменения влияют не только на атмосферу, есть свидетельства ускорения глобального гидрологического цикла [9]. Таким образом, в современных условиях изменения климата, важно отслеживать не только изменения климатических характеристик, но и связанное с ними изменение гидрологического режима рек.

Критерий Аббе и определение значимости тренда по коэффициенту корреляции использовались для оценки наличия тренда в рядах температур воды, а также водного и теплового стока при исследовании тенденций изменения стока рек в Северный Ледовитый океан. Динамика гидрометеорологических величин рассматривалась по выделенным физико-географическим районам.

Европейская территория водосбора СЛЮ (Eu2). Согласно рассмотренным графикам хронологического хода гидрометеорологических величин физико-географического района Eu2, изменение климата неоднозначно влияет на их динамику в исследуемых створах рек и в районах соответствующих им метеостанций.

Изменения на метеостанциях Архангельск (р. Северная Двина) и Усть-Цильма (р. Печора) за период подсчета теплового стока показывают увеличение температуры воздуха со значимым трендом по критерию Аббе. В то же время для рядов на метеостанциях «Онега» и «Сура» за тот же период подтверждена стохастическая независимость рядов (таблица 12, рисунок 8)

Ряды температур воды в замыкающих створах рек Северная Двина и Печора показывают рост средних значений со значимым линейным трендом (таблица 12, рисунок 9). В то же время изменения на реке Онега не показали значительных изменений (до 1990 года). Однако, интерес представляет минимум средней температура воды (1945 г.), предположительно такое влияние на температуру воды оказала низкая среднемесячная температура воздуха в мае (по данным метеостанции Онега – 2,7 °С). Оценка динамики температуры и теплового стока на реке Мезень не представляет интереса из-за имеющегося короткого ряда наблюдений.

В большинстве случаев для рек района характерно синхронное изменение температуры речной воды и температуры воздуха на ближайшей метеостанции. Более подробно данный вопрос будет рассмотрен в главе 5.

Анализ динамики расходов воды на рассматриваемой территории показал значимые изменения по трем постам: р. Северная Двина – п. Усть-Пинега (критерий Аббе), р. Мезень - д. Малонисогорская (критерий Аббе) и р. Печора – с. Усть-Цильма (по коэффициенту корреляции, критерий Аббе). Наиболее заметные изменения характерны для реки Печора, здесь наблюдается явный тренд на увеличение водного стока (рисунок 10).

Значимое изменение теплового стока для физико-географического района Eu2 выявлено лишь для реки Печора (рисунок 11), наблюдается явный рост среднегодовых значений, что подтверждается и ранее проведенными исследованиями (R.V. Lammers, A.I. Shiklomanov, 2007) [9]. Для остальных рек района значимость тренда не была подтверждена.

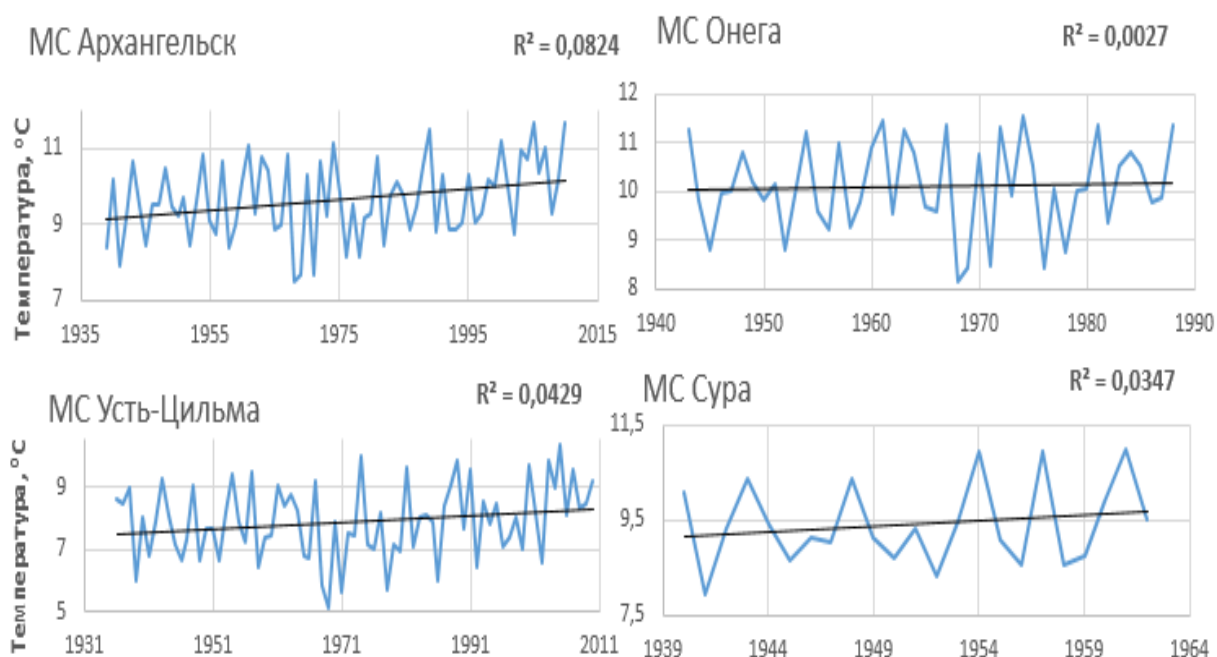


Рисунок 8 – Хронологический график средней за теплый период температуры воздуха для Eu2

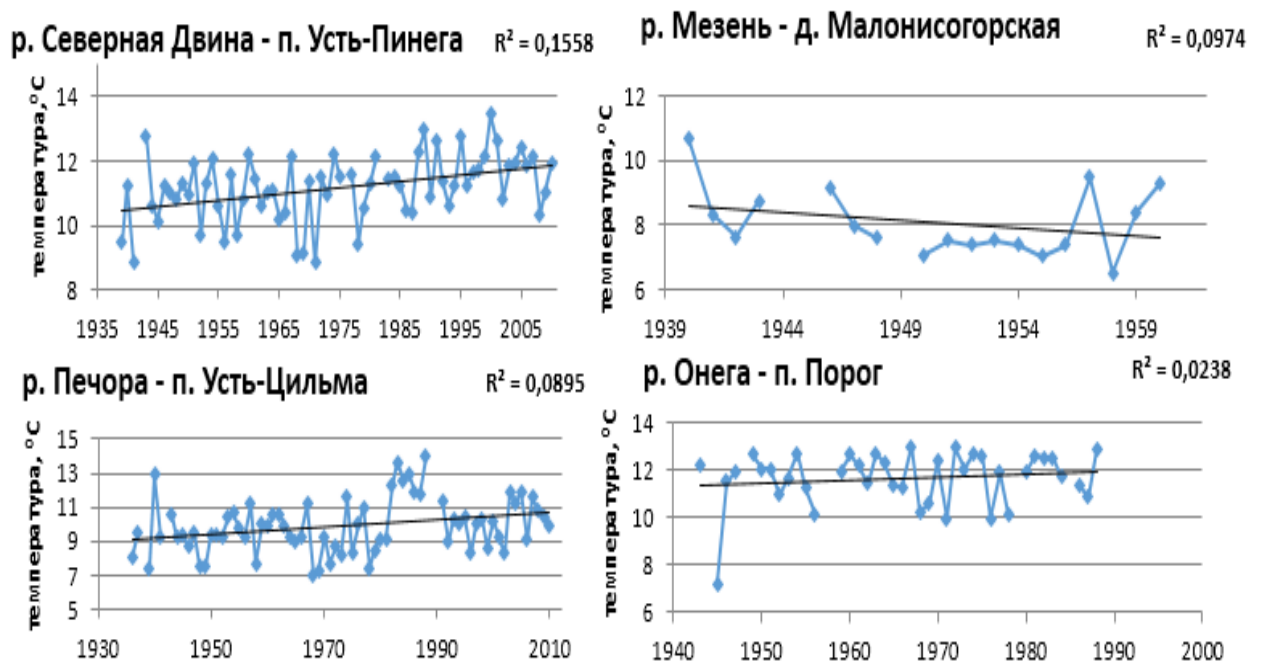


Рисунок 9 – Хронологический график средней за теплый период температуры воды для Eu2

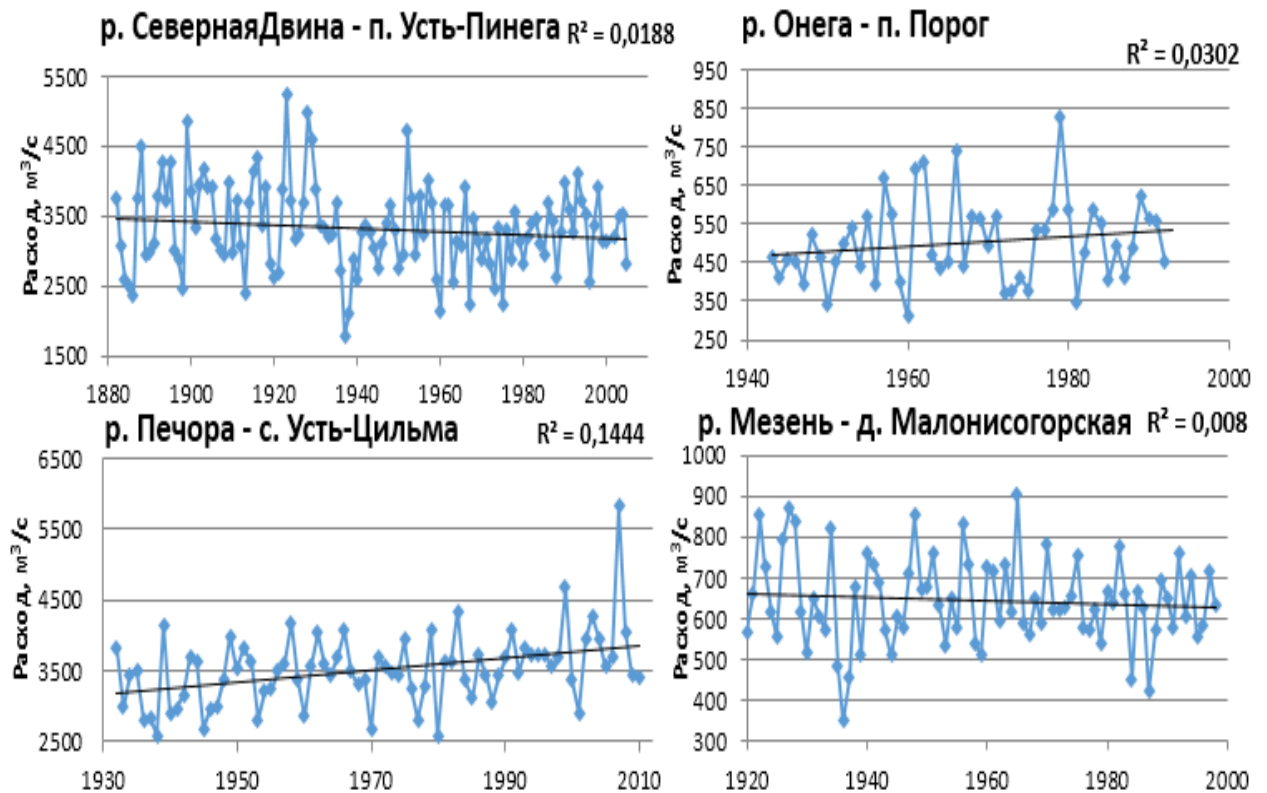


Рисунок 10 – Хронологический график среднего расхода воды для Eu2

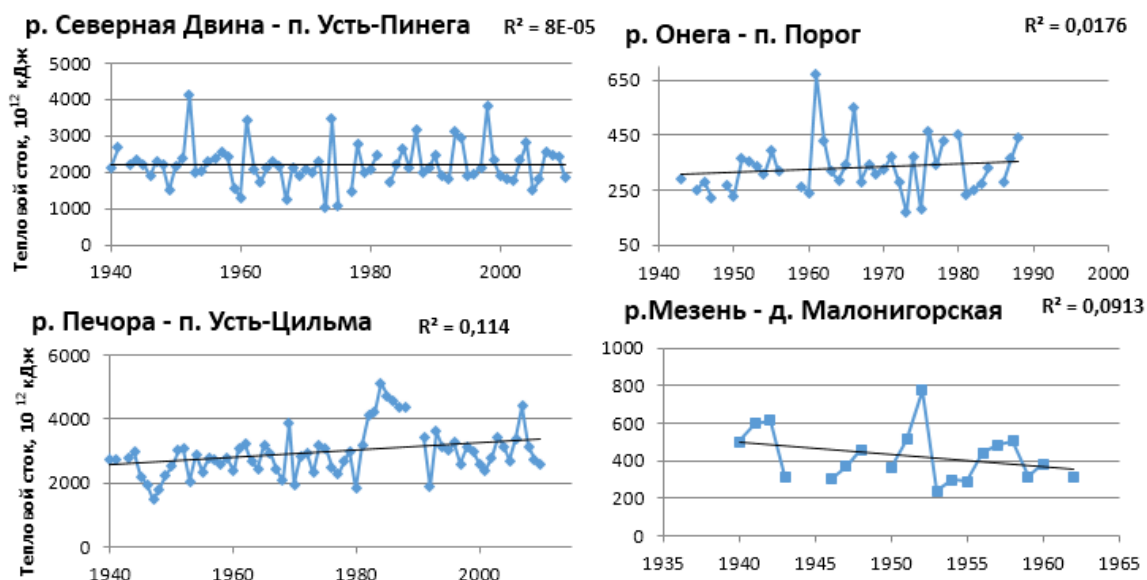


Рисунок 11 – Хронологический график теплового стока воды для Eu2

Таблица 12 – Оценка значимости трендов гидрометеорологических величин для района Eu2

Створ	По коэффициенту корреляции		Критерий Аббе		
	R/σ _R	Оценка	Y	Y _{min}	Оценка
Температура воздуха					
р. Онега - с. Порог	0,32	-	1,13	0,75	-
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	2,64	+	0,76	1,14	+
р. Мезень - д. Малонисогорская	1,015	-	1,08	0,67	-
р. Печора - с. Усть-Цильма	1,86	-	1,01	1,14	+
Температура воды					
р. Онега - с. Порог	0,99	-	1,09	0,75	-
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	3,25	+	1,13	1,19	+
р. Мезень - д. Малонисогорская	1,43	-	0,71	0,75	-
р. Печора - с. Усть-Цильма	2,83	+	0,91	1,16	+
Расход воды					
р. Онега - с. Порог	1,25	-	0,86	0,77	-
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	1,55	-	0,71	1,12	+
р. Мезень - д. Малонисогорская	0,39	-	0,79	1	+
р. Печора - с. Усть-Цильма	3,92	+	0,83	1,14	+
Тепловой сток					
р. Онега - с. Порог	0,63	-	0,96	0,75	-
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	0,07	-	1,53	1,18	-
р. Мезень - д. Малонисогорская	1,37	-	0,87	0,75	-
р. Печора - с. Усть-Цильма	3,77	+	0,79	1,18	+

Реки Обь-Енисейского и Енисей-Ленского междуречья (N1). Изменения в температурах воздуха и воды в данном районе практически не заметны. Согласно исследованиям значимые, лишь по критерию Аббе, изменения температур воздуха замечены на метеостанции Ханты-Мансийск, соответствующей створу р. Пур –п. Самбург (таблица 13, рисунок 12).

В то же время при анализе динамики температур воды для исследуемых створов значительный тренд (по коэффициенту корреляции) был выявлен только в створе р. Анабар – с. Саскылах (рисунок 13). На фоне неизменной средней за теплый период температуры воздуха, в створе наблюдается уменьшение температур воды, что может быть обусловлено изменениями в верховьях водосбора.

Кроме того, уменьшение температур воды может быть обусловлено значимым (по коэффициенту корреляции) увеличением расходов воды в створе р. Анабар- с. Саскылах. Также значимое увеличение стока за период с 1960-х по 2000-е. характерно для реки Оленёк (по коэффициенту корреляции, критерий Аббе). Реки Таз и Пур не имеют направленного изменения ряда расходов воды (до 1999 г.) (таблица 13, рисунок 14).

Значимых статистических изменений в рядах теплового стока исследуемых рек района N1 выявлено не было (рисунок 15).

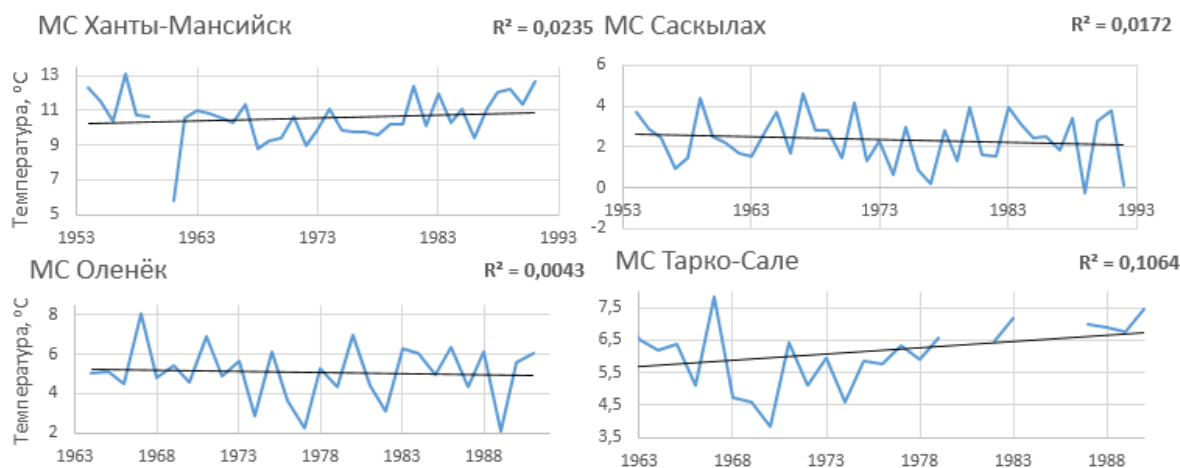


Рисунок 12 – Хронологический график средней за теплый период температуры воздуха для N1

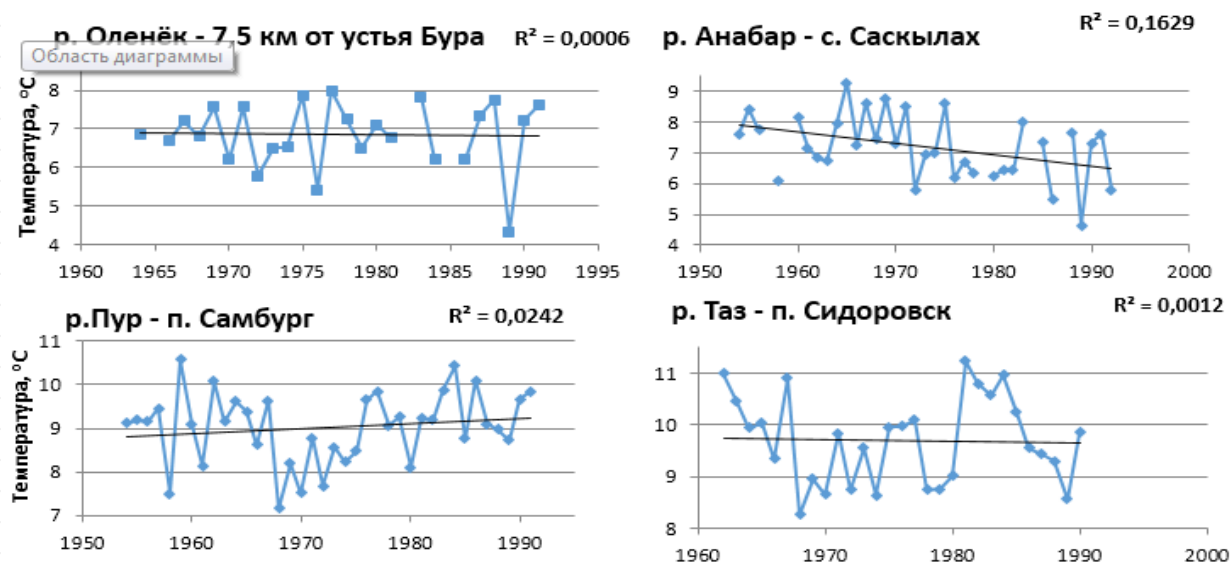


Рисунок 13 – Хронологический график средней за теплый период температуры воды для N1

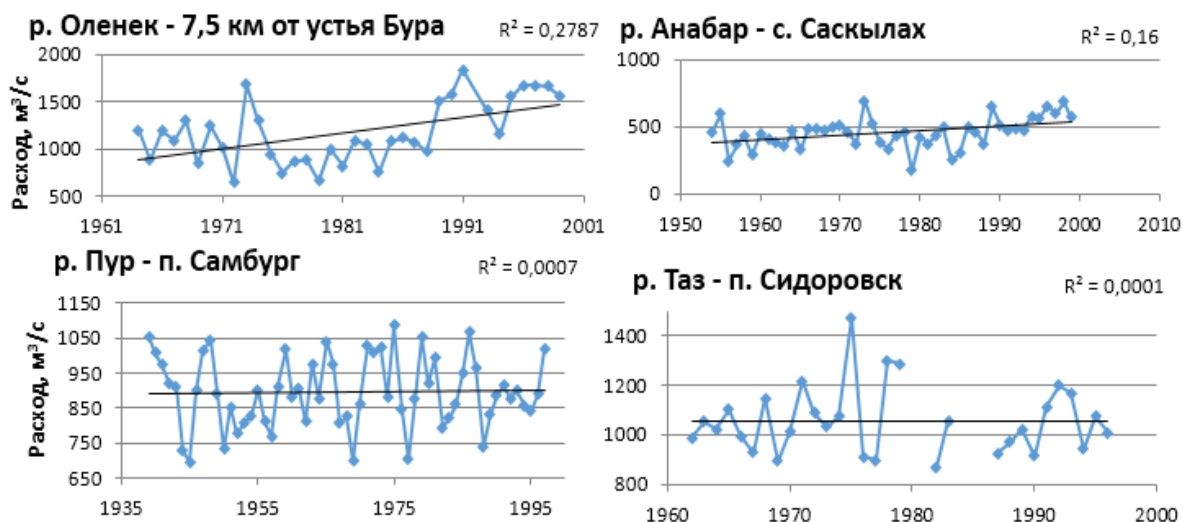


Рисунок 14 - Хронологический график среднего расхода воды для N1

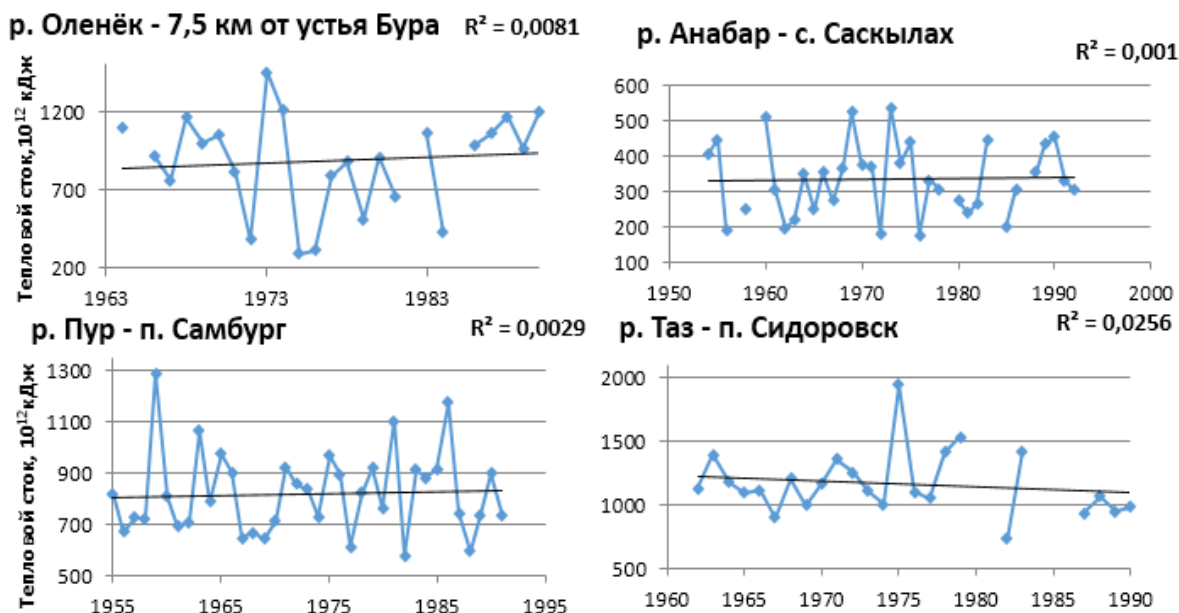


Рисунок 15 – Хронологический график теплового стока воды для N1

Таблица 13 – Оценка значимости трендов гидрометеорологических величин для района N1

Створ	По коэффициенту корреляции		Критерий Аббе		
	R/σ _R	Оценка	Y	Ymin	Оценка
Температура воздуха					
р. Пур - п. Самбург	0,95	-	0,65	0,74	+
р. Таз - п. Сидоровск	1,93	-	0,72	0,70	-
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	0,39	-	1,26	0,70	-
р. Анабар - с. Саскылах	0,82	-	1,18	0,74	-
Температура воды					
р. Пур - п. Самбург	0,97	-	0,95	0,74	-
р. Таз - п. Сидоровск	0,19	-	0,70	0,70	-
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	0,12	-	1,42	0,68	-
р. Анабар - с. Саскылах	2,77	+	1,02	0,73	-

Продолжение таблицы 13

Створ	По коэффициенту корреляции		Критерий Аббе		
	R/σ _R	Оценка	Y	Y _{min}	Оценка
Расход воды					
р. Пур - п. Самбург	0,16	-	0,69	0,79	+
р. Таз - п. Сидоровск	0,05	-	1,09	0,71	-
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	4,27	+	0,49	0,73	+
р. Анабар - р. Саскылах	3,19	+	0,93	0,77	-
Тепловой сток					
р. Пур - п. Самбург	0,41	-	1,08	0,74	-
р. Таз - п. Сидоровск	1,04	-	0,73	0,7	-
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	0,45	-	0,91	0,68	-
р. Анабар - с. Саскылах	0,17	-	1,05	0,73	-

Реки правобережья р. Лены (N2). Анализ изменения гидрометеорологических величин физико-географического района N2 не показал значимых изменений в рядах по коэффициенту корреляции, но показал стохастическую зависимость рядов гидрометеорологических величин для реки Колыма (кроме температур воздуха), и значимую стохастическую зависимость температур воздуха для метеостанции Чокурдах (р. Индигирка) (таблица 14, рисунок 16-19).

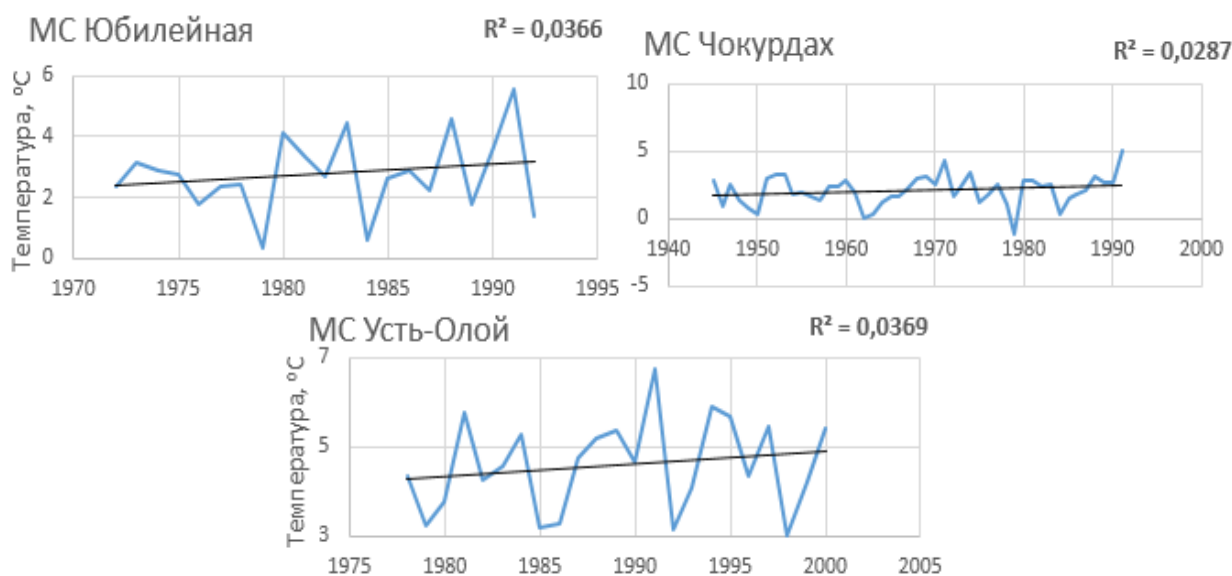


Рисунок 16 – Хронологический график средней за теплый период температуры воздуха для N2

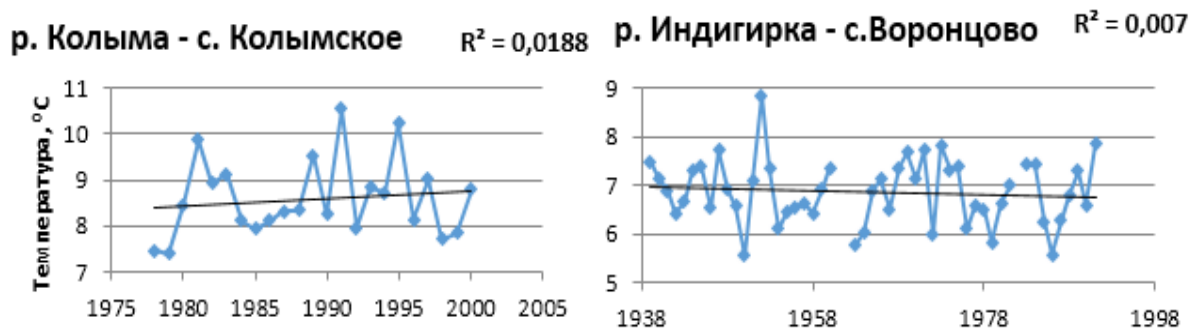


Рисунок 17 – Хронологический график средней за теплый период температуры воды для N2

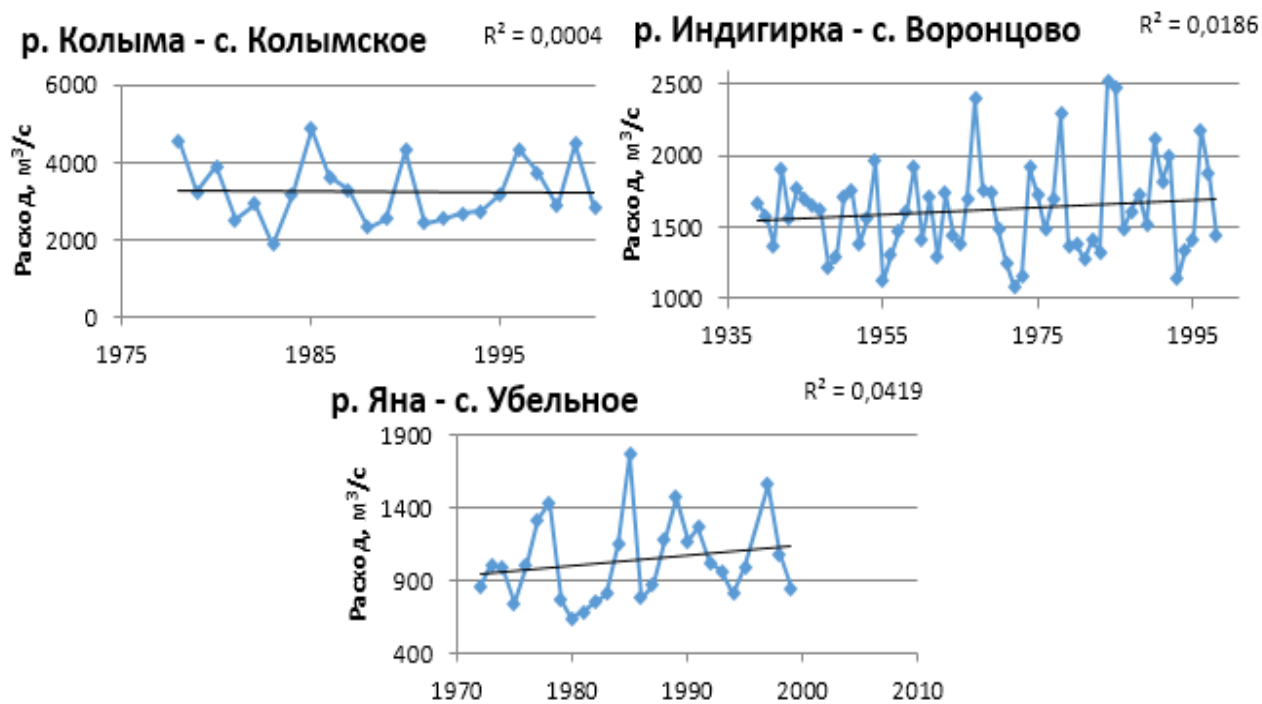


Рисунок 18 - Хронологический график среднего расхода воды для N2

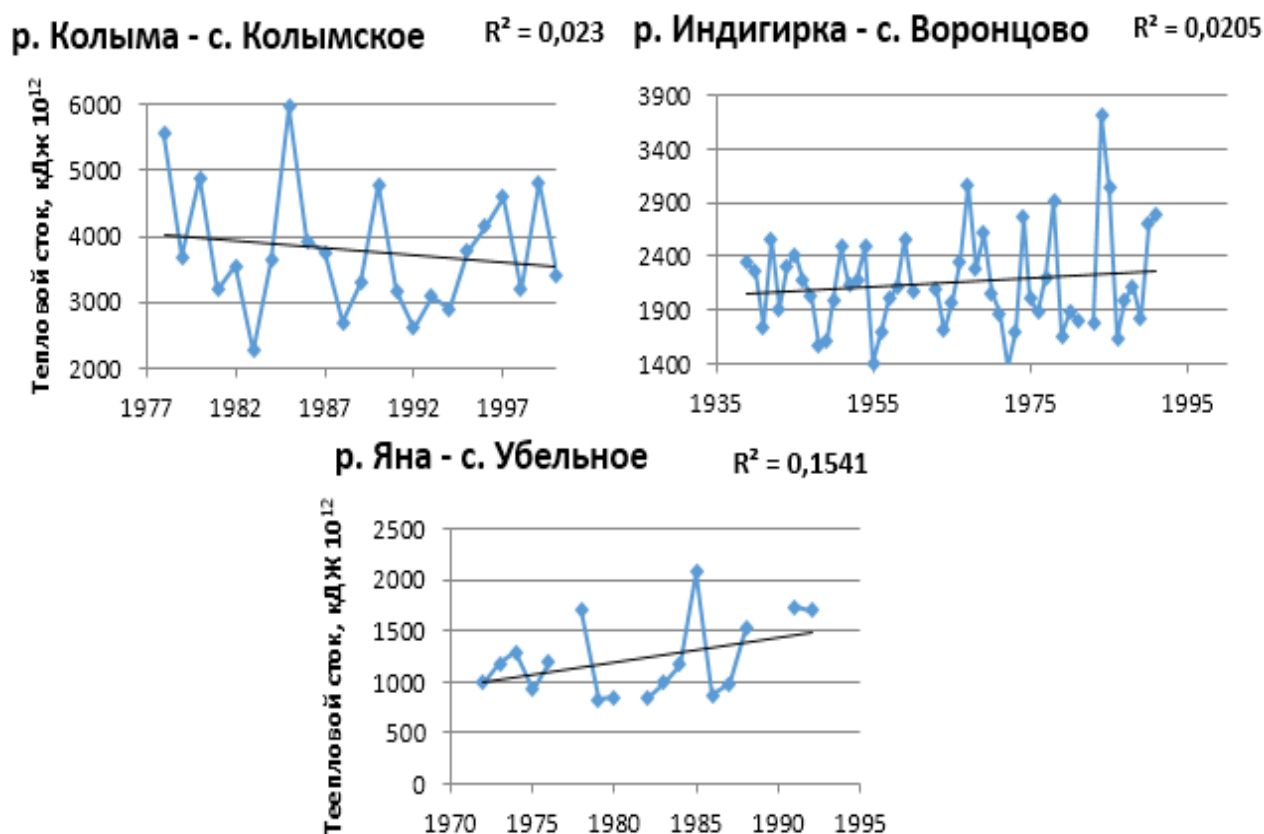


Рисунок 19 – Хронологический график теплового стока воды для N2

Таблица 14 – Оценка значимости трендов гидрометеорологических величин для района N2

Створ	По коэффициенту корреляции		Критерий Аббе		
	R/σ _R	Оценка	Y	Y _{min}	Оценка
Температура воздуха					
р. Яна - с. Юбилейное	0,89	-	1,27	0,66	-
р. Индигирка - п. Воронцово	1,18	-	0,68	0,76	+
р. Колыма - с. Колымское	0,94	-	1,06	0,76	-
Температура воды					
р. Яна - с. Юбилейное	1,49	-	0,82	0,62	-
р. Индигирка - п. Воронцово	0,59	-	1,03	0,78	-
р. Колыма - с. Колымское	0,61	-	1	0,67	+
Расхода воды					
р. Яна - с. Юбилейное	1,09	-	0,77	0,69	-
Индигирка - п. Воронцово	1,07	-	0,83	0,79	-
р. Колыма - с. Колымское	0,09	-	0,91	0,67	+
Тепловой сток					
р. Яна - с. Юбилейное	1,49	-	0,86	0,62	-
Индигирка - п. Воронцово	1,03	-	0,83	0,78	-
р. Колыма - с. Колымское	0,56	-	0,92	0,67	+

Крупнейшие реки водосбора СЛО. Анализ изменения гидрометеорологических характеристик крупнейших рек водосбора показал различные направления их изменения. Так, по коэффициенту корреляции, значимых трендов температур воздуха на исследуемых постах не обнаружено. В то же время, критерий Аббе показывает присутствие зависимости между членами ряда средних температур за май-октябрь во всех створах.

Значимый рост средней температуры воды за теплый период и расхода наблюдается в створе р. Лена – с. Кюсюр (по коэффициенту корреляции). Значимое увеличение расходов воды наблюдается и в створе р. Енисей – г. Игарка (по коэффициенту корреляции и Аббе). На фоне увеличения среднегодовых значений расходов, тепловой сток в створе г. Игарка значимо уменьшился (таблица 15, рисунок 20-23).

Таблица 15 - Оценка значимости трендов гидрометеорологических величин для крупнейших рек водосбора СЛО

Створ	По коэффициенту корреляции		Критерий Аббе		
	R/ σ_R	Оценка	Y	Ymin	Оценка
Температура воздуха					
р. Обь-г. Салехард	1,59	-	0,72	1,14	+
р. Енисей -г. Игарка	1,83	-	0,93	1,15	+
р. Лена - с. Кюсюр	0,42	-	1,13	1,17	+
Температура воды					
р. Обь-г. Салехард	0,68	-	0,84	1,14	-
р. Енисей -г. Игарка	0,95	-	1,18	1,13	-
р. Лена - с. Кюсюр	2,41	+	0,91	1,16	+
Расход воды					
р. Обь-г. Салехард	1,33	-	1,01	1,13	-
р. Енисей -г. Игарка	4,26	+	1,16	1,13	+
р. Лена - с. Кюсюр	3,44	+	0,57	1,14	-
Тепловой сток					
р. Обь-г. Салехард	0,81	-	0,68	1,17	-
р. Енисей -г. Игарка	4,03	+	1,29	1,15	+
р. Лена - с. Кюсюр	1,81	-	0,84	1,19	-

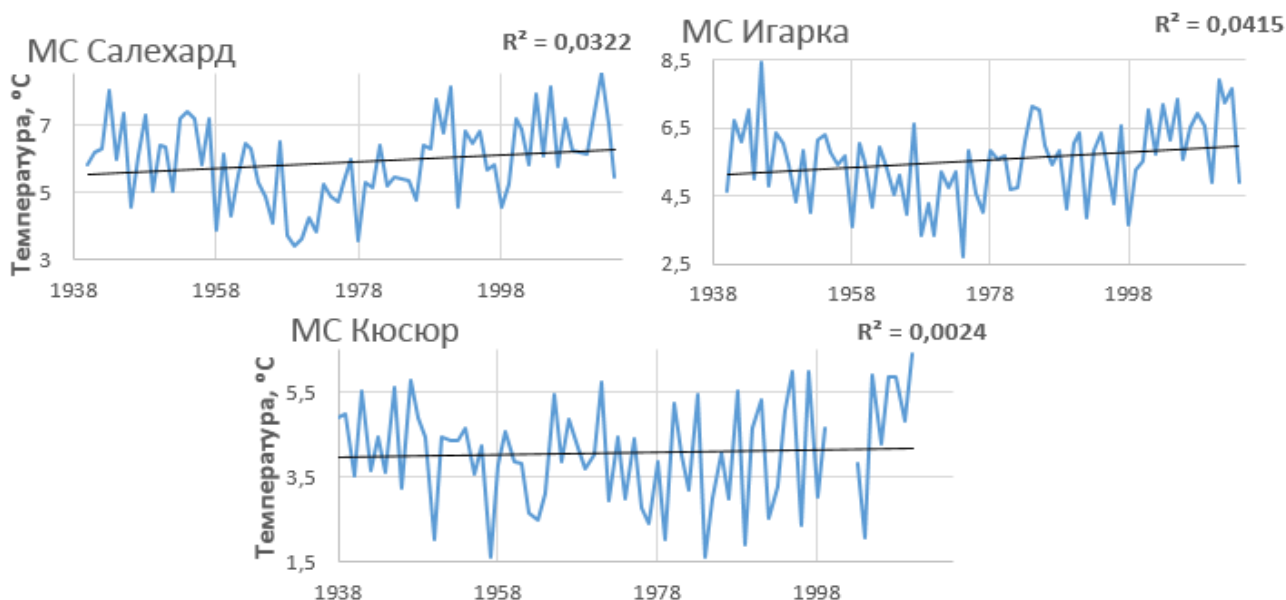


Рисунок 20 – Хронологический график средней за теплый период температуры воздуха для крупнейших рек водосбора СЛО

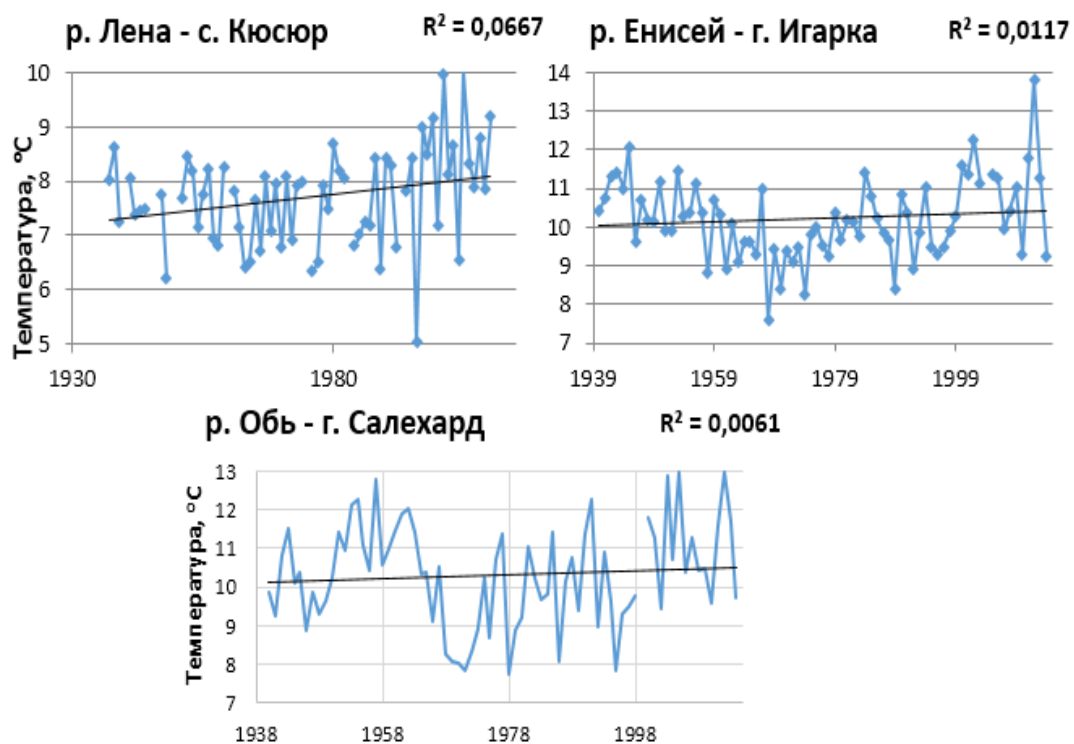


Рисунок 21 – Хронологический график средней за теплый период температуры воды для крупнейших рек водосбора СЛО

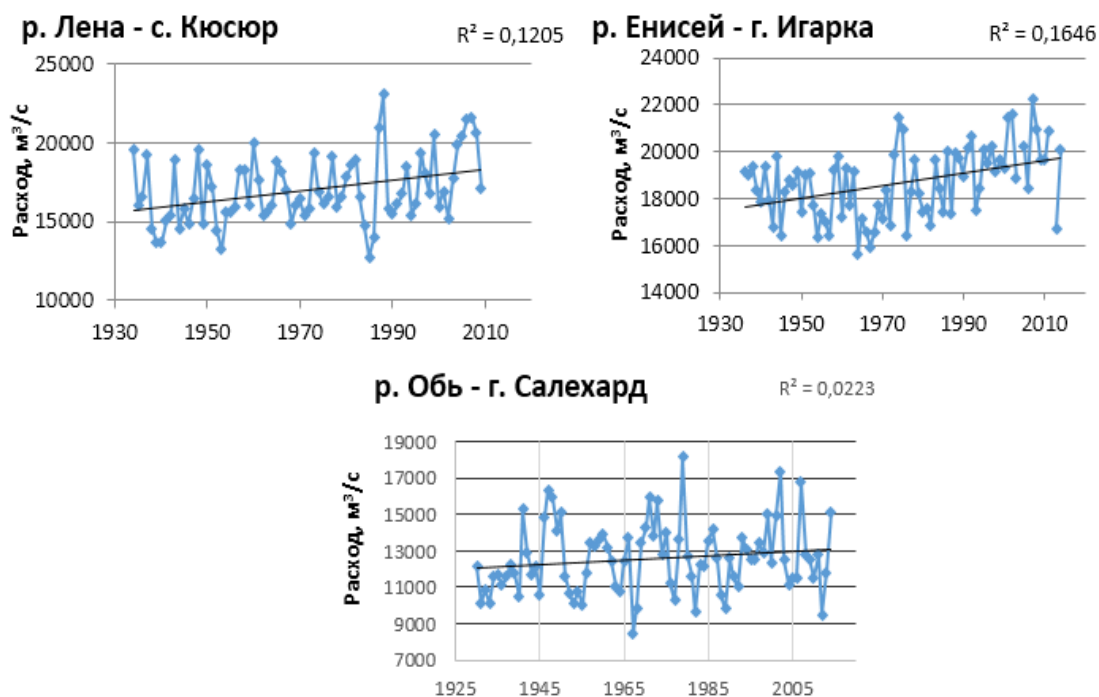


Рисунок 22 – Хронологический график среднего расхода воды для крупнейших рек водосбора СЛО

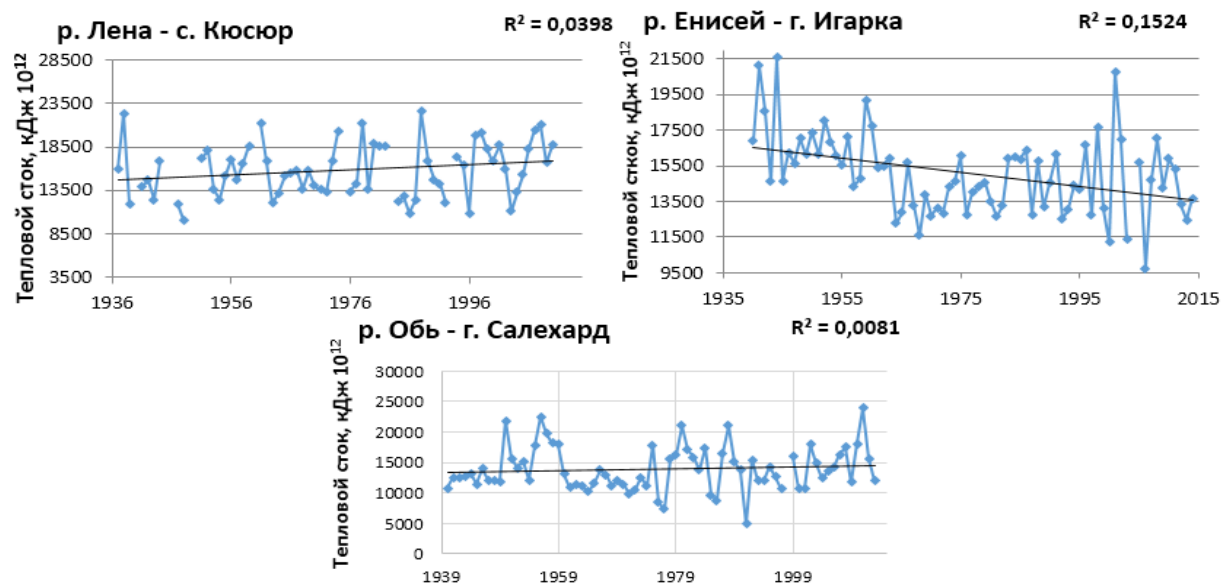


Рисунок 23 – Хронологический график теплового стока воды для крупнейших рек водосбора СЛО

Интересны хронологические графики хода сумм гидрометеорологических величин крупнейших рек СЛО за совместный период наблюдений (представлены суммы Оби, Енисея и Лены). Анализ хода расходов показал значительное увеличение суммарного стока данных рек, в то же время значительного увеличения теплового стока, не произошло (таблица 16, рисунок 24).

Таблица 16 - Оценка значимости трендов суммарных гидрометеорологических величин крупнейших рек водосбора СЛО

Характеристика	По коэффициенту корреляции		Критерий Аббе		
	R/σ_R	Оценка	Y	Ymin	Оценка
Суммарная температура воды	1,05	-	0,51	1,34	+
Суммарный расход	4,57	+	1,70	1,75	+
Суммарный тепловой сток	0,16	-	1,09	2,09	+

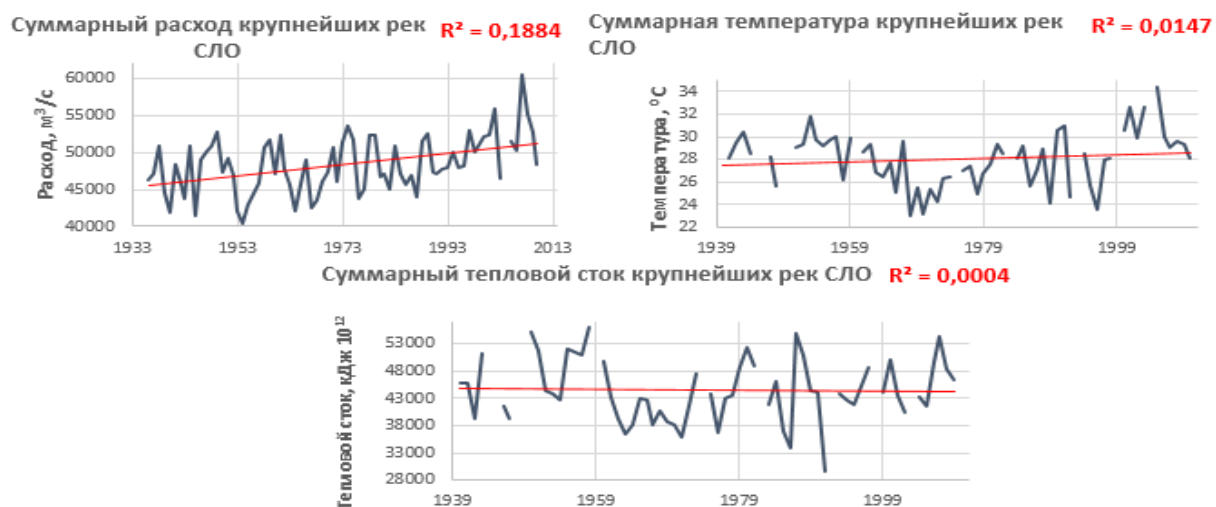


Рисунок 24 – Ход суммарных гидрометеорологических характеристик крупнейших рек СЛО

Такая картина связана с тем, что рост среднегодовых значений расходов воды идет за счет увеличения суммарных расходов за зимний период (январь-апрель, ноябрь-декабрь), за период подсчета теплового стока суммарные расходы оставались стабильными (рисунок 25 – 26, таблица 17). Из-за чего идет рост суммарных расходов за зимний период невозможно точно сказать. Очевидно определенную роль в этом процессе сыграло строительство гидроэлектростанций на Енисее и Вилюе, также нельзя отрицать вклад глобального изменения климата. Для более точного указания причин необходимо более детальное исследование данного вопроса.

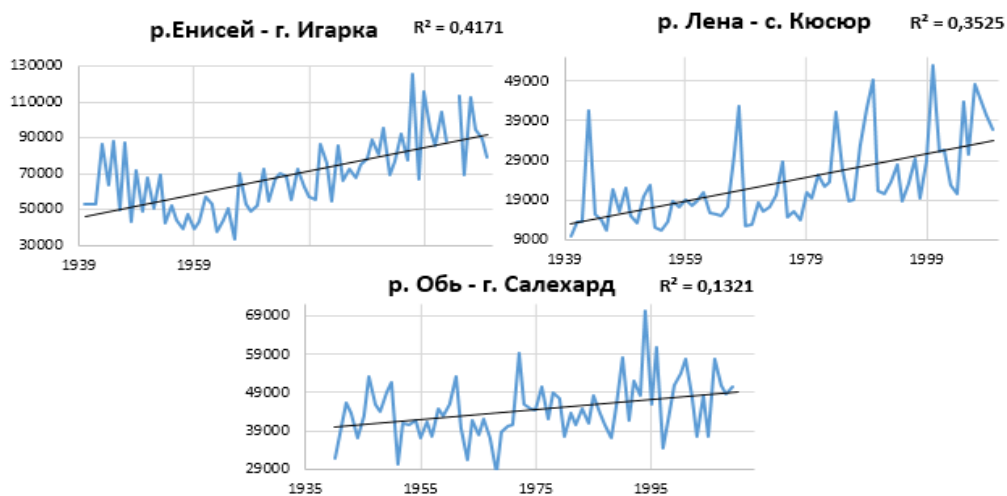


Рисунок 25 - Ход суммарных расходов воды крупнейших рек СЛО за ноябрь – май



Рисунок 26 - Ход суммарных расходов воды крупнейших рек СЛО за июнь – октябрь

Таблица 17 - Оценка значимости трендов суммарных расходов крупнейших рек водосбора СЛО за отдельные периоды года

Створ	По коэффициенту корреляции	
	R/σ_R	Оценка
Суммарные расходы воды за ноябрь – май		
р. Обь-г. Салехард	3,8	+
р. Енисей -г. Игарка	9,3	+
р. Лена - с. Кюсюр	7,9	+
Суммарные расходы воды за июнь-октябрь		
р. Обь-г. Салехард	0,92	-
р. Енисей -г. Игарка	2,33	+
р. Лена - с. Кюсюр	1,79	-

5 Зависимости теплового стока от стокоформирующих факторов

5.1 Современные модели расчета. Тепловой сток явно является функцией двух параметров: температуры и расхода воды в створе. В свою очередь и расход, и температура воды также являются функциями гидрометеорологических параметров (прихода вещества и энергии с нижних створов, прихода солнечной радиации, осадков, испарения и конденсации, осеннего увлажнения, температуры воздуха, бокового притока и т.д.). Поэтому точное определение данных величин является залогом успешного расчета теплового стока рек.

Определение ежедневных и среднемесячных расходов воды на реке не представляет затруднений. На большинстве крупных рек имеются ряды расходов обеспечивающих репрезентативность расчетов. В то же время ряды температур воды не всегда имеют столь длительные ряды измерений. Также важно подчеркнуть отсутствие достаточно хорошо разработанных методов прогноза температур воды, на основе которых было бы возможно спрогнозировать тепловой сток.

По выше изложенным причинам, сегодня важно понять процесс формирования температур воды, разработать модели определения температур воды по гидрометеорологическим факторам.

Современные исследователи [13] [12] выделяют 3 вида моделей для определения температуры воды по формирующим её факторам:

- модели, основанные на линейной регрессии;
- модели, основанные на нелинейной регрессии;
- модели, основанные на модели воздушного потока.

Модели, основанные на линейной регрессии. При исследовании связей температуры воды с гидрометеорологическими факторами проводится оценка степени тесноты линейной связи между предсказываемой величиной [47], предиктантом (температурой воды), и переменными на основе которых ведется прогноз, предикторами (параметрами, формирующими температуру).

В основу этого типа моделей ложится уравнение следующего вида:

$$T_{\text{воды}} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n, \quad (18)$$

где $b_0 \dots b_n$ - коэффициенты линейного уравнения регрессии, $X_1 \dots X_n$ – предикторы.

При этом значимость уравнения регрессии проверяется по критерию Фишера. Выдвинутая гипотеза о равенстве всех коэффициентов уравнения регрессии нулю ($H_0: b_0 = b_1 = \dots = b_n = 0$) подтверждается, если рассчитанная статистика ($t_{\text{набл}}$) меньше критической

($t_{\text{крит}}$). Если статистика $t_{\text{набл}} > t_{\text{крит}}$, то хотя бы один из коэффициентов уравнения регрессии не равен нулю. Расчет статистики $t_{\text{набл}}$ ведется по следующей формуле:

$$t_{\text{набл}} = \frac{R^2(n-m-1)}{(1-R^2)m}, \quad (19)$$

где R^2 – коэффициент детерминации, n – длина ряда, m – количество предикторов.

Для оценки качества модели обычно используют отношение среднего квадратического отклонения ряда (σ) – предиктанта к величине стандартной ошибки уравнения регрессии [46]. Величина стандартной ошибки уравнения регрессии определяется по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-m)} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i\text{расч}})^2}, \quad (20)$$

где S – стандартная ошибка уравнения на зависимом материале.

Если длина ряда больше 25 лет, то отношение $\frac{S}{\sigma}$ для того чтобы методика считалась хорошей, должно быть меньше 0,5, методика считается удовлетворительной, если

$0,5 < \frac{S}{\sigma} \leq 0,8$ и плохой если $0,8 < \frac{S}{\sigma}$. В случае длину ряда от 15 до 25 лет, значение $\frac{S}{\sigma}$ уменьшается на 0,05, если длина ряда менее 15 лет – на 0,1.

Модели, основанные на нелинейной регрессии. Для оценки температуры воды с помощью уравнения нелинейной регрессии пользуются моделью, разработанной в 1998 г. Омидом Мохсени (США) и доработанной Мишелем Ван Влитом в 2011 г. (Нидерланды) [48-49]. О. Мохсени предложил рассматривать температуру воды как функцию температуры воздуха, имеющую S-образную форму, а М. Ван Влит добавил в данную модель учет расхода воды:

$$T_{\text{воды}} = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_{\text{возд}})}} + \frac{k}{Q}; \gamma = \frac{4 \tan(\theta)}{\alpha - \mu}, \quad (21)$$

где μ и α – нижняя и верхняя границы диапазона изменения температуры воды соответственно; θ – угол в точке перегиба; β – температура воздуха в точке перегиба; k – установленный коэффициент.

Данная модель использует средние за 7 дней температуры воздуха и воды и возможность ее применения с использованием среднемесячных значений нужно проверять.

Согласно [13] регрессионные модели линейного и нелинейного вида возможно использовать и без учета расхода воды, но данные модели обоснованы лишь статистически, поэтому в условиях изменения климата их дальнейшая применимость под вопросом.

Модели, основанные на модели воздушного потока. Наиболее обоснованной с физической точки зрения является модель air2stream, разработанная в 2015 году итальянским гидрологом Марко Тофоллоном. В основу модели положено дифференциальное уравнение, включающее в себя и температуры воздуха и данные по расходам:

$$\frac{dT_w}{dt} = \left(\frac{1}{\delta} (a_1 + a_2 T_A - a_3 T_w + \theta (a_5 + a_6 \cos \left(2\pi \left(\frac{t}{t_y} - a_7 \right) \right)) - a_8 T_w) \right)$$

$$\delta = \theta^{a_4}; \theta = \frac{Q}{Q_0}, \quad (22)$$

где $a_1 \dots a_8$ - подобранные коэффициенты, t - время и t_y - количество единиц времени в году, T_w - температура воды, T_A - температура воздуха.

В данном исследовании рассматривалась лишь первая модель как наиболее простая в использовании.

5.2 Корреляционные связи температур воды и метеорологических величин выделенных районов. Как уже говорилось выше, тепловой сток, согласно расчетной формуле зависит не только от расхода воды в створе, но и от температуры водной толщи. Данные измерений температуры воды часто являются труднодоступными, а потому при определении теплового стока могут возникать определенные трудности.

В работе проводился поиск зависимостей температуры воды в створе от следующих гидрометеорологических величин: расхода воды, температуры воздуха, продолжительности солнечного сияния. На основе найденных корреляционных связей были получены регрессионные модели расчета температуры воды для отдельных рек и районов.

Так как гидрологические посты часто не освещаются метеорологическими наблюдениями в створе, выбор метеостанций, откуда брались метеорологические данные, проводился по принципу наименьшей удаленности от створа.

Важно отметить, что подсчет коэффициента корреляции температуры воды с гидрометеорологическими характеристиками производился по их средним (за май – октябрь) величинам. Кроме того, информация о продолжительности солнечного сияния, использованная в работе, начинается с 1961 года (по некоторым рекам ряды без пропусков недостаточны для расчета коэффициент корреляции).

Европейская территория водосбора СЛЮ (Eu2). Результаты анализа корреляционных зависимостей для данного региона показали наличие значимой (по коэффициенту корреляции, на уровне значимости 0,05) связи температуры воды в створе и температуры воздуха для всех исследуемых рек (таблица 18, рисунок 22). Кроме того,

найлены значимые отрицательные связи температуры воды с расходами (р. Мезень, р. Онега, р. Северная Двина). Значимая связь температур воды с продолжительностью солнечного сияния установлена только на реке Печора. Дополнительные проверки корреляции между предикторами показали высокую степень связи температуры воздуха и продолжительности солнечного сияния для реки Печора ($r=0,55$), а также значимую отрицательную связь между температурой воздуха и расходами воды на Северной Двине ($r = -0,35$).

Таблица 18 – Коэффициенты корреляции температур воды и гидрометеорологических величин для Eu2

	р. Мезень - д. Малонисогорская	р. Онега - п. Порог	р. Печора - п. Усть-Цильма	р. Северная Двина - п. Усть-Пинега
	Температура воды в створе			
N*	23 (0)	46(37)	75(52)	72(52)
Расход за V-X	-0,41	-0,39	0,006	-0,35
Температура воздуха V-X	0,59	0,79	0,57	0,82
Продолжительность сияния V-X	-	0,24	0,24	-0,15

Примечание* здесь и далее N – количество лет для подсчета корреляции, в скобках указано количество лет для подсчета коэффициента корреляции с продолжительностью солнечного сияния, красным цветом выделены значимые коэффициенты корреляции.

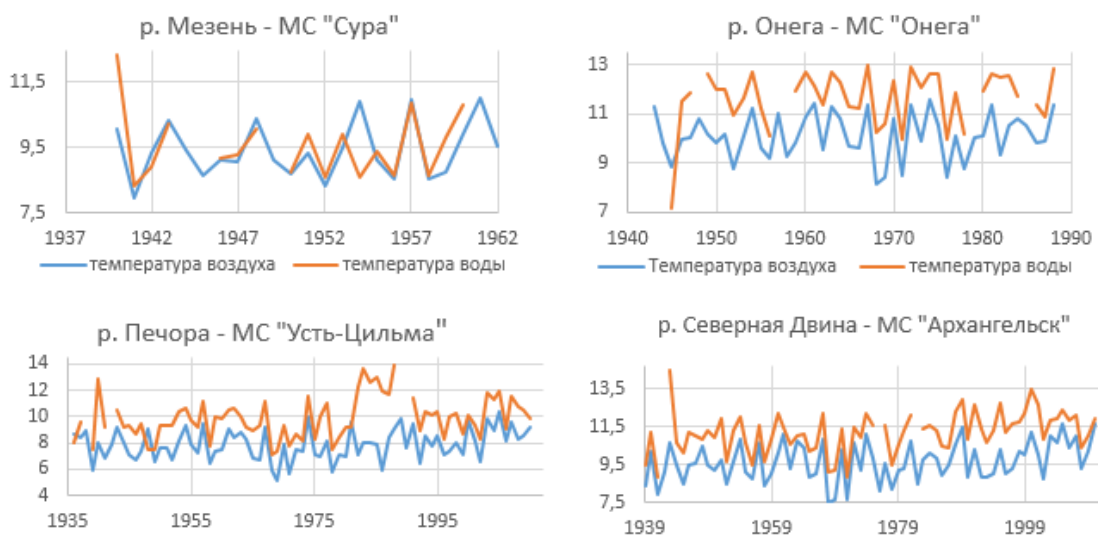


Рисунок 27 – Связь температуры воды в створе с температурой воздуха на метеостанции для Eu2

Реки Обь-Енисейского и Енисей-Ленского междуречья (N1). Реки района отличаются слабой отрицательной зависимостью от расходов воды. Значимый коэффициент корреляции температуры воды и расхода найден лишь для реки Таз, при чем корреляция составляет почти -0,5. Между тем значимые зависимости температуры воды в створе от температуры воздуха характерны для всех рек района, но лишь для рек Анабар и Таз коэффициенты парной корреляции этих величин приближаются к 0,7 (таблица 19, рисунок

23). Связи между продолжительностью солнечного сияния и температурой воды не выявлено.

Таблица 19 – Коэффициенты корреляции температур воды и гидрометеорологических величин для N1

	р. Пур – п. Самбург	р. Анабар – п. Саскылах	р. Оленёк - 7,5 км от устья р. Бур	р. Таз – п. Сидоровск
	Температура воды в створе			
N*	38(34)	39(39)	28(0)	24(0)
Расход за V-X	-0,2	-0,18	-0,11	-0,47
Температура воздуха V-X	0,38	0,68	0,45	0,66
Продолжительность сияния V-X	0,033	0,05	-	-

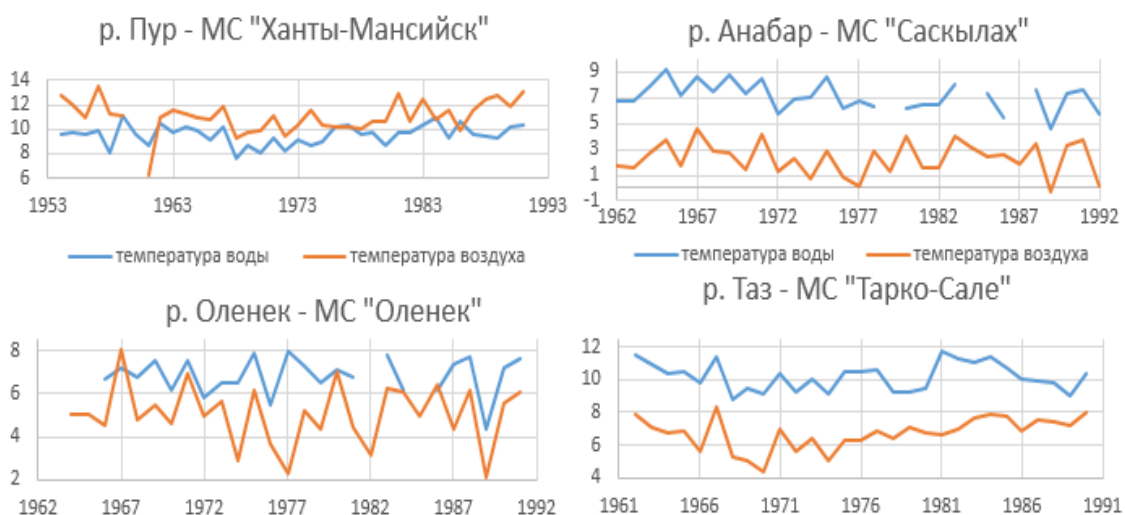


Рисунок 28 – Связь температуры воды в створе с температурой воздуха на метеостанции для N1

Реки правобережья р. Лены (N2). Реки правобережья Лены имеют значимые, достаточные связи температуры воды с температурой воздуха ($r < 0,7$). Связей температур воды в створе и расходов на уровне значимость 5% не наблюдается. Значима корреляция температуры воды в створе р. Яна – с. Юбилейное с продолжительностью солнечного сияния (таблица 20, рисунок 24). При этом высока величина связи между температурой воздуха и продолжительностью сияния, поэтому в дальнейшем как предиктор использовалась только температура воздуха.

Таблица 20 – Коэффициенты корреляции температур воды и гидрометеорологических величин для N2

	р. Яна - с. Юбилейное	р. Индигирка - п. Воронцово	р. Колыма - с. Колымское
	Температура воды в створе		
N*	21(21)	52(0)	23(23)
Расход за V-X	0,007	-0,22	-0,53
Температура воздуха V-X	0,74	0,78	0,76
Продолжительность сияния V-X	0,50	-	-

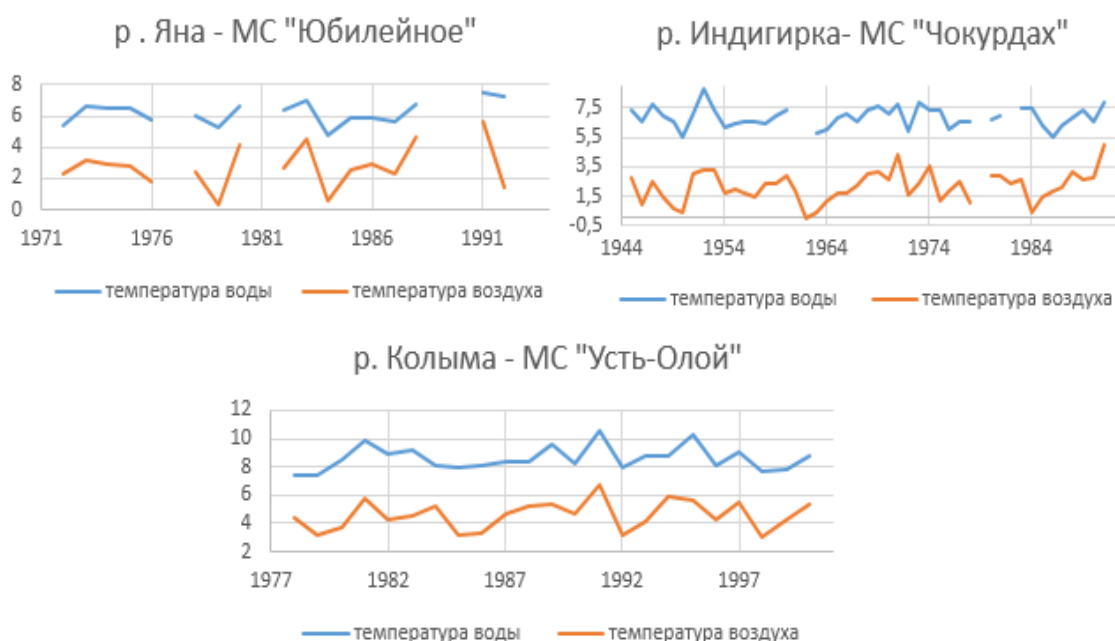


Рисунок 29 – Связь температуры воды в створе с температурой воздуха на метеостанции для N2

Крупнейшие реки водосбора СЛО. Крупнейшие реки бассейна Северного ледовитого океана обладают высоким значением коэффициента корреляции температур воды и воздуха.

Для Енисея и Оби наблюдается значимая зависимость температуры воды от расхода и продолжительности солнечного сияния. Но при использовании данной связи нужно учитывать высокое значение коэффициента корреляции температуры воздуха и продолжительности солнечного сияния (0,26 для Енисея и 0,39 для Оби), а также расхода (-0,33 для Енисея и - 0,41 для Оби).

Для реки Лены значимость связи температур воды подтверждена только для корреляции с температурами воздуха (таблица 21, рисунок 25).

Таблица 21 – Коэффициенты корреляции температур воды и гидрометеорологических величин для крупнейших рек СЛО

	р. Обь - г. Салехард	р. Енисей - г. Игарка	р. Лена - с. Кюсюр
	Температура воды в створе		
N*	72(50)	71(50)	74(50)
Расход за V-X	-0,38	-0,33	0,09
Температура воздуха V-X	0,66	0,71	0,66
Продолжительность сияния V-X	0,43	0,38	0,033

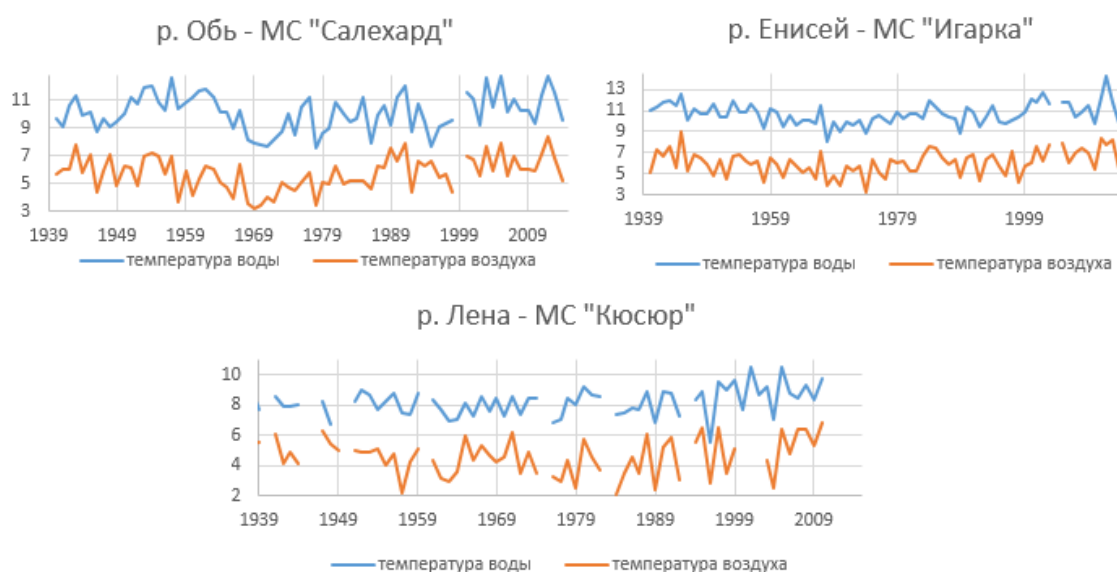


Рисунок 30 – Связь температуры воды в створе с температурой воздуха на метеостанции для крупнейших рек бассейна СЛО

5.3 Зависимости температуры воды от расхода и температуры воздуха. По результатам анализа зависимостей температуры воды в створе от гидрометеорологических величин наиболее четко выявляется зависимость температуры воды от температуры воздуха. Кроме того, для 6 из 14 рассматриваемых створов выявлена значимая связь температур воды с расходами. Таким образом был совершен вывод о том, что данные величины могут быть использованы для расчета средней за теплый период температуры воды в створе.

Для исследуемых створов, с помощью программы Statistica 6.0, были получены уравнения множественной регрессии для расчета температуры воды в створе по данным о расходе и температуре воздуха. Кроме того, для европейской территории водосбора, рек правобережья Лены, а также трех крупнейших рек бассейна СЛО найдены зависимости температуры воды от температуры воздуха.

Согласно таблице 22 для 7 исследуемых створов коэффициент детерминации уравнения превысил 0,5. Средняя величина относительной ошибки аппроксимации для составленных зависимостей не превысила 10 %.

Наихудшие связи температуры воды и температуры воздуха были получены для физико-географического района N1. Максимум ошибки составил 9,1 % и характеризует зависимость для реки Оленёк.

Наименьшие ошибки аппроксимации характерны для районов (и створов) с наибольшей корреляцией температуры воды и воздуха.

Таблица 22 – Уравнения множественной регрессии для расчета температуры воды

Створ	R ²	Уравнение	σ, %
р. Онега - п. Порог	0,62	0,874*Твозд-0,00095*Q+3,52	6,3
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	0,69	0,846*Твозд-0,00013*Q+3,65	3,8
р. Мезень - д. Малонисогорская	0,42	0,634*Твозд-0,00165*Q+5,39	5,0
р. Печора - с. Усть-Цильма	0,32	0,769*Твозд+0,00018*Q+3,53	8,8
р. Пур - п. Самбург	0,07	0,22*Твозд-0,00041*Q+7,38	7
р. Таз - п. Сидоровск	0,52	0,445*Твозд-0,00058*Q+8,03	4,8
р. Оленёк - 7,5 км от устья Бура	0,21	0,265*Твозд-0,00012*Q+5,78	9,1
р. Анабар - п. Саскылах	0,48	0,58*Твозд-0,00062*Q+6,47	8,3
р. Яна - с. Юбилейное	0,55	0,388*Твозд-0,00004*Q+5,24	5,2
р. Индигирка - п. Воронцово	0,40	0,39*Твозд-0,000017*Q+6,08	6
р. Колыма - с. Колымское	0,64	0,528*Твозд-0,00012*Q+6,99	4,9
р. Обь-г. Салехард	0,56	0,678*Твозд-0,00005*Q+7,38	4,8
р. Енисей -г. Игарка	0,50	0,579*Твозд-0,00004*Q+8,3	6,9
р. Лена - с. Кюсюр	0,46	0,475*Твозд-0,000024*Q+4,86	6,8

R² – коэффициент детерминации, σ- относительная ошибка аппроксимации

Помимо зависимостей, полученных по отдельным рекам, были получены линейные регрессионные зависимости температуры воды от температуры воздуха на ближайшей метеорологической станции по выделенным физико-географическим районам.

Подсчет ошибок корреляции, параметра α и свободного члена уравнения, а также относительной ошибки аппроксимации, показал, что уравнения для Еу2, N2 и крупнейших рек бассейна СЛО удовлетворяют условию (таблица 23):

$$\frac{r}{\sigma_r} \geq 2, \frac{\alpha}{\sigma_\alpha} \geq 2, \frac{b}{\sigma_b} \geq 2 \quad (23)$$

А значит имеют смысл и могут быть использованы для восстановления температуры воды в створе по температуре воздуха. Формулы для расчета ошибок представлены ниже.

Ошибка корреляции:

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}} \quad (24)$$

Ошибка параметра α :

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \sqrt{\frac{(1-r^2)}{\sqrt{n}}} \quad (25)$$

Ошибка параметра b :

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2} \quad (26)$$

Для рек ЕТР полученная регрессионная связь оказалась значимой (Таблица 23, рисунок 31). Наибольшие ошибки аппроксимации наблюдаются для створа р. Мезень – д. Малонисогорская – в среднем 15%, для остальных рек величина относительной ошибки аппроксимации не превышает 5%, средняя относительная ошибка аппроксимации для рек района 7%.

Важно также указать на высокую дисперсию данных температуры воды для рек ЕТР, что объясняется наличием других факторов, формирующих температурный режим рек и нуждающихся в уточнении.

Таблица 23 – Уравнений линейной регрессии для расчета температуры воды в физико-географических районах

Район	Уравнение	R ²	г/σ _r	a/σ _a	b/σ _b
Eu2	Тводы=0,78Твозд+3,6	0,53	22	4,6	72
N2	Тводы=0,6Твозд+5,42	0,61	18,8	4,9	7,2
Крупнейшие реки СЛО	Тводы=0,89Твозд+4,83	0,62	30	3,9	70
N1	-	0,36	-	-	-

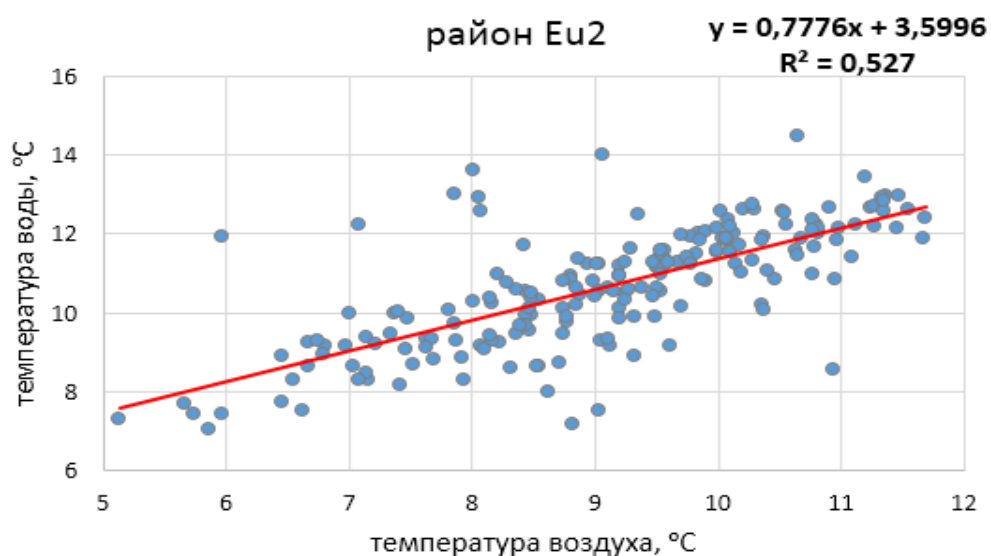


Рисунок 31 – График связи температуры воды от температуры воздуха для района

Реки Обь-Енисейского и Енисей-Ленского междуречья (N1) не показали должного коэффициента корреляции температуры воды рек района с температурой воздуха на ближайшей метеорологической станции ($R^2 < 0,5$), поэтому дальнейшая проверка зависимости не проводилась. Низкая корреляция между температурами может быть обусловлена значительной отдаленностью метеорологических станций от исследуемых створов (рисунок 32).

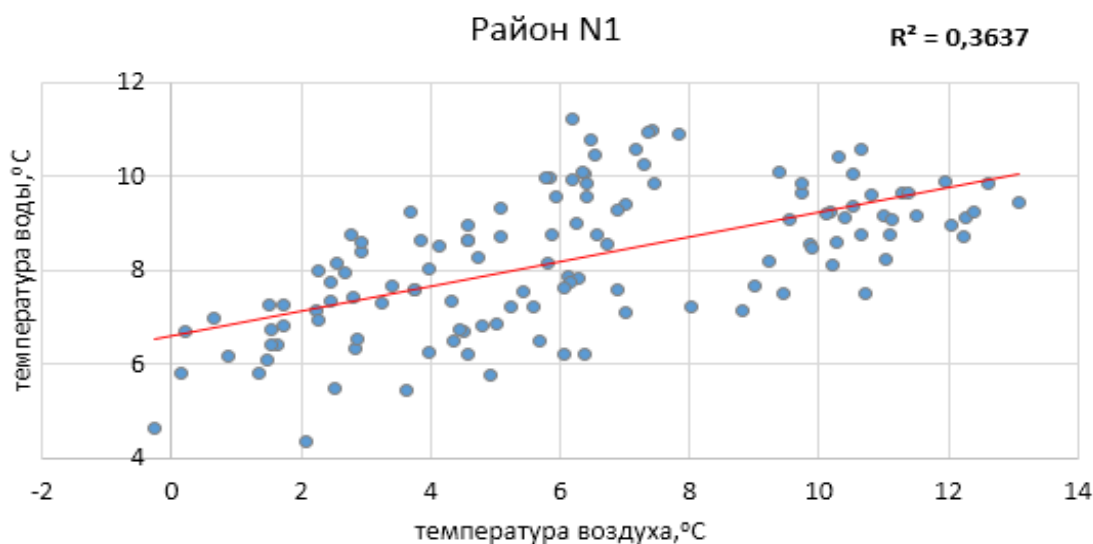


Рисунок 32 – График связи температуры воды от температуры воздуха для района N1

Для рек района N2 смысл получившегося уравнений регрессии подтвержден (рисунок 33). Средняя относительная ошибка аппроксимации составила 8,2%. Наибольшая ошибка характерна для реки Яна (до 15 %), ошибка для температур рек Индигирка и Колыма составила 6,4%.

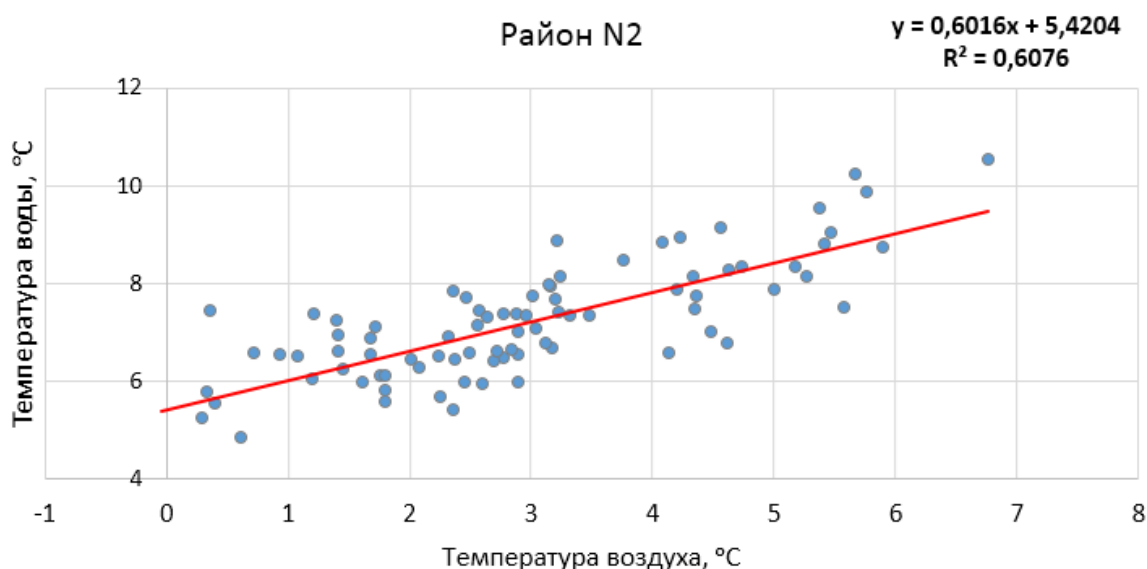


Рисунок 33 – График связи температуры воды от температуры воздуха для района N2

Замыкающие створы крупнейших рек бассейна также были объединены для построения зависимости. Коэффициент детерминации составил 0,62, значимость уравнения также подтверждена. Средняя относительная ошибка аппроксимации составила 8,4% (рисунок 34).

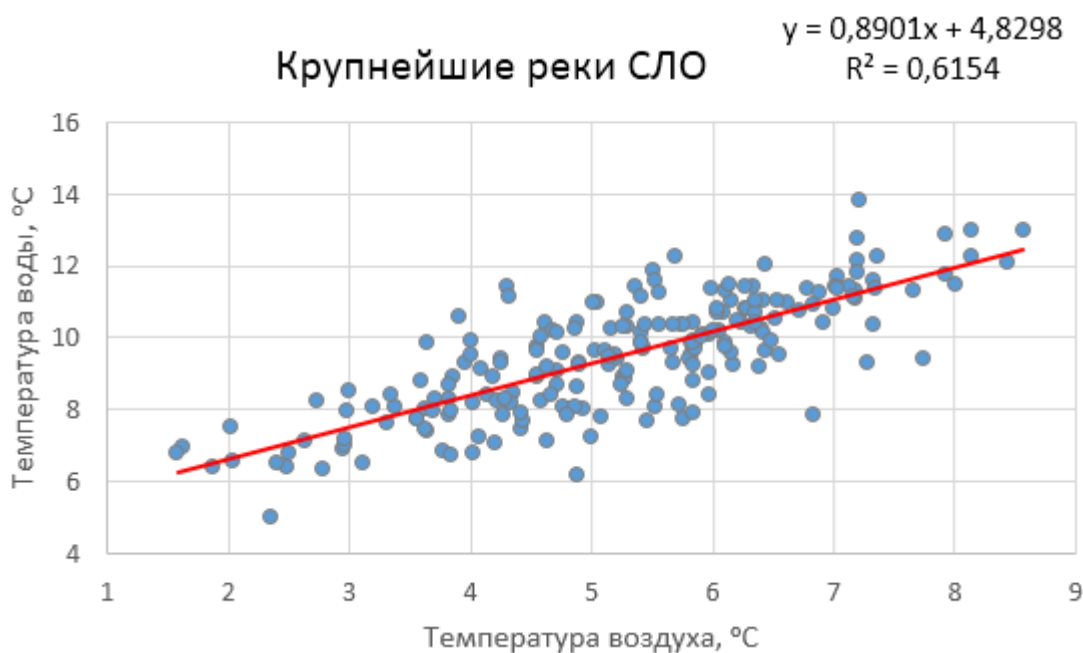


Рисунок 34 – График связи температуры воды от температуры воздуха для крупнейших рек бассейна СЛО

Таким образом, полученные зависимости средней за теплый период температуры воды от средней температуры воздуха можно использовать для восстановления данных на замыкающих створах, с последующим подсчетом теплового стока исследуемых рек.

Заключение

В работе проведена оценка теплового стока российских рек в СЛЮ по данным расходов и температур замыкающих створов на 14 реках за период с 1936 по 2010 гг.

Анализ динамики среднегодовой температуры воздуха дает понять, что современное потепление идет с 70 – 80 гг. XX века. С этого же периода отмечается повышение водного стока за холодный период для крупнейших рек бассейна.

Из рассмотренных рек наибольший водный сток характерен для реки Енисей ($18640 \text{ м}^3/\text{с}$) – он составляет более 20% от стока рек в Северный Ледовитый океан, в то же время максимальный тепловой сток характерен для Лены ($15800 \cdot 10^{12} \text{ кДж}$).

Наибольшим модулем теплового стока среди исследуемых рек обладает река Печора ($376 \text{ Дж/с} \cdot \text{км}^2$). Также важно отметить высокую величину модуля теплового стока для реки Таз ($364 \text{ Дж/с} \cdot \text{км}^2$), обусловленную более высокой среднегодовой температурой по сравнению с другими реками района N1. Из крупнейших рек максимальный модуль теплового стока характерен для Лены ($206 \text{ Дж/с} \cdot \text{км}^2$). В то же время тепловой коэффициент, характеризующий теплосодержание в единице объема воды в русле для Лены является одним из наименьших ($26,7 \text{ МДж/м}^3$), что объясняется более высокой водностью реки в период подсчета теплового стока, чем, например, у Енисея.

Максимальный тепловой коэффициент характерен для р. Онега и составляет $46,4 \text{ МДж/м}^3$. Минимальное теплосодержание в единице объема наблюдается у реки Анабар.

Согласно исследованию: наиболее заметные изменения расходов воды характерны для реки Печора, здесь наблюдается явный тренд на увеличение водного и теплового стока. В створе р. Анабар – с. Саскылах наблюдается уменьшение температур воды и увеличение среднегодовых расходов. Также значительное увеличение стока за период с 1960-х по 2000-е характерно для реки Оленёк.

Выявлен значимый рост средней температуры воды за теплый период и расхода в створе р. Лена – с. Кюсюр (по коэффициенту корреляции и критерию Аббе). Кроме того, значимый рост характерен и для среднегодовых расходов р. Енисей. При этом тепловой сток реки Лена изменился без значительного тренда, а для реки Енисей, уменьшился на фоне увеличения расхода.

Значительные изменения: характерны для водного стока крупнейших рек водосбора СЛЮ за холодный период. Тренд роста значений за ноябрь – апрель достигает 0,42 для Енисея и 0,35 для Лены. Подъем зимнего стока на р. Обь заметен меньше, чем на Енисее и Лене, но тоже имеет значимый тренд на увеличение.

Общий тепловой сток рек в СЛО в период с 1936 по 2010 для крупнейших рек водосбора СЛО, а также Северной Двины не изменился. Для реки Печора характерно увеличение теплового стока со значимым трендом.

Получены значимые статистические зависимости годового значения теплового стока от водного стока и средней температуры воздуха за июнь – октябрь для физико-географических районов. Также проведена оценка статистических зависимостей температуры воды от расхода и температуры воздуха для каждого исследуемого створа.

Для рек Северная Двина, Онега, Таз, Яна, Колыма, Енисей, Обь коэффициент детерминации фактического значения температуры воды с рассчитанным по зависимости равен либо превышает критический порог 0,5. Для рек Лена и Анабар величина коэффициента детерминации близка к 0,5.

Использованные источники и литература

- 1 Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения//Вест. Москв. ун-та. Сер. 5, География. – 2009. – Вып. 5. – С. 69 – 77.
- 2 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Техническое резюме) / Росгидромет. – М, 2019. – 79 с.
- 3 Книпович Н. М. О термических условиях Баренцева моря в конце мая 1921 г. // Бюллетень Российского гидрологического ин-та. –1921. – №9. – С.10—12.
- 4 Шерстюков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата/ Б.Г. Шерстюков//Арктика и Север. – 2018. – №24. – С. 39-67
- 5 Антонов В.С. К вопросу о термике воды в реках арктической зоны// Проблемы Арктики. – 1940. – № 4. – С. 25-29.
- 6 Труды / Аркт. Инст Зонтин М.И. – 1947. – Т. 198 : Жидкий и тепловой сток в море Лаптевых.
- 7 Труды / Аркт. Инст. Зайков Б.Д. – 1936. – Т. 35 Речной сток в моря Лаптевых и Восточносибирское и количество переносимого им в эти моря тепла.
- 8 Труды / Аркт. Инст. Рейнберг А.М. – 1938. – Т. 105 Материалы по гидрологии низовьев Лены.
- 9 Lammers B. Richard. Variability in river temperature, Discharge, And energy flux from the Russian pan-Arctic landmass/Richard. B. Lammers, Jonathan W.Pundsack, Alexandr I. Shiklomanov//Journal of Geophysical research. – 2007. –Vol.112. –P.59 – 74.
- 10 Магрицкий Д.В. Водные ресурсы и режим рек Арктической зоны Сибири: современное состояние, прогнозируемое изменение, масштабы и структура хозяйственного использования/Д.В. Магрицкий, Н.Л. Фролова, В.М. Евстигнеев, В.Н. Михайлов, М.Б. Киреева, О.М. Пахомова, Е. С.
- 11 Евсева Л.С., Магрицкий Д.В., Ретеюм К.Ф. Природные и техногенные факторы изменения теплового стока северных и южных рек России // Гид: экология: теория и практика. Проблемы гидрологии и гидроэкологии гим. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 213-237.
- 12 Соединенный ежедневный поток и вода моделирование температуры в крупных речных бассейнах Х. Т. М. ван Влит 1, Р. Дж. Иерслей', У. П. Франсена 1, Ф. Людвиг 1, И. Haddeland Д. П. Lettenmaier2, и
- 13 Yang Daqing. River Water Temperature in Relation to Local Air Temperature in the Mackenzie and Yukon Basins/ Daqing Yang, Peterson Amber//Arctic. – 2016. – №1. – P. 47 – 59.

- 14 Алексеевский Н.И. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек российской Арктики/ Н.И. Алексеевский, Д.В. Магрицкий, В. Н. Михайлов // Водное хозяйство России. – 2015. – №1. – С. 14- 31.
- 15 Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / гл. ред. И.М.Жила, Н.М.Алюшинская. –Л.: Гидрометеиздат, 1972. – Т. 3: Северный край. – 333 с.
- 16 Атлас СССР/ сост. и подгот. к изд. «Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР» в 1949 г. ; отв. ред. Т.П. Сидоренко - Москва 1983 г. – 260 с.
- 17 Архипов А.С. Западно-Сибирская равнина / С. А. Архипов. – М.: Наука, 1970. - 279 с.
- 18 Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / гл. ред. В.Е. Водогорецкий. –Л.: Гидрометеиздат, 1969. – Т. 15, вып. 1: Алтай и Западная Сибирь: Горный Алтай и верхний Иртыш. – 396 с.
- 19 Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / гл. ред. В.Е. Водогорецкий. –Л.: Гидрометеиздат, 1973. – Т. 15, вып. 3: Алтай и Западная Сибирь: Нижний Иртыш и Нижняя Обь. – 426 с.
- 20 Ежемесячные климатические данные для городов России [Электронный ресурс]/ Гидрометцентр России. – Электрон.дан. – М.: ФГБУ Гидрометцентр России, 2001-2018. – URL: <https://meteoinfo.ru/klimatgorod> (дата обращения: 20.04.2018)
- 21 Орлова В.В. Климат СССР: Западная Сибирь / В.В. Орлова. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 360 с.
- 22 Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / гл. ред. В.Е. Водогорецкий. –Л.: Гидрометеиздат, 1972. – Т. 15, вып. 2: Алтай и Западная Сибирь: Средняя Сибирь. – 401 с.
- 23 Михайлов В.Н. Гидрология: учебник для вузов/ В.Н. Михайлов, А.Л. Добровольский, С.А. Добролюбов. – М.: Высш.шк., 2005. – 436 с.
- 24 Казьмин С.П. Геоморфология Восточной Кулунды и Барабы / С.П.Казьмин. – Новосибирск.: НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1997. – 50 с.
- 25– Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / гл. ред. А.П. Муранова. –Л.: Гидрометеиздат, 1973. – Т. 16, вып. 1: Ангаро-Енисейский район: Енисей. – 374 с.
- 26 Орлёнок В.В. Физическая география: учебное пособие / В.В. Орленок, А.А. Курков, П.П. Кучерявый, С.Н. Тупикин. – Калининград.: Янтарный сказ, 1998. – 480 с.
- 27 Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири. Горы Южной Сибири / С.С. Воскресенский. – М.: изд. Моск. ун-та, 1957. – 315 с.

28 Пармузин Ю.П. Средняя Сибирь: очерк природы. / Ю.П.Пармузин. – М.: Мысль, 1964. – 313 с.

29 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам : [в 11 вып.]. Вып. 6. ч.2-Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 382 с. (Руководящий документ :РД)

30 СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения; введ. 2017 – 07 - 01. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 169 с. – (Министерство строительство и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации)

31 R-ArcticNET – A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region [Электронный ресурс] URL:<http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html> (Дата обращения 20.01.2019).

32 Аисори – Удаленный доступ к ЯОД-архивам – Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс] URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (Дата обращения 20.01.2019).

33 Оценка возможных климатических изменений стока северных рек на основе моделирования процессов его формирования [Электронный ресурс] / Симонов Ю.А., Христофоров А.В. – Электрон. дан. –М. : Российская академия наук: Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, 2006–2019. – URL: <http://www.inm.ras.ru/>(дата обращения: 11.04.2019).

34 Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным/ Государственный Гидрологический институт. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 162 с.

35 Владимиров А.М. Гидрологические расчеты / А. М. Владимиров. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 366 с.

36 Савичев О.Г. Гидрология, метеорология и климатология: гидрологические расчеты / О.Г. Савичев.– Томск.: Изд-во Томского политехнического университета, 2013.– 223 с.

37 Дружинин В.С. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации/ В. С. Дружинин, А. В. Сикан. – СПб.: изд-во РГГМУ, 2001. – 167 с.

38 Георгиади А.Г. Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены/ А.Г. Георгиади, Е.А. Кашутина//Изв. Рос. акад. наук. Сер. геогр. – 2014. – №2. – С. 71-83

39 Сикан А.В. Влияние изменения климата на водный режим рек южной и восточной частей республики Беларусь / А.В. Сикан, О.В. Байдук //Ученые записки государственного гидрометеорологического института. – 2015. – № 40. – С. 61-70.

- 40 Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: Справ. изд./ С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
- 41 Большев Л.Н. Таблицы математической статистики/ Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. –М.:Наука, 1983. –417 с.
- 42 Богословский Б. Б. Общая гидрология: учебное пособие / Б. Б. Богословский, А. А. Самохин, К.Е. Иванов, Д.П. Соколов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 420 с.
- 43 Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / гл. ред. А.В. Шестакова. –Л.: Гидрометеиздат, 1967. – Т. 17.: Лено-Индигирский район. – 443 с.
- 44 Соколов А.А. Гидрография СССР: учебник для гидрометеорологических техникумов/ А.А. Соколов. - Л.: Гидрометеиздат, 1952. — 287 с.
- 45 Попов П.А. Адаптации гидробионтов к условиям обитания в водоемах субарктики – на примере экологии рыб в водоемах субарктики Западной Сибири: учебное пособие / П.А. Попов. – Новосибирск.: изд-во Новосибирского гос. ун-та , 2012. – 255 с.
- 46 СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения; введ. 2017 – 07 - 01. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 169 с. – (Министерство строительство и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации)
- 47 Дубровская Л. И. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: учебное пособие / Л.И. Дубровская, Г. Б. Князев. – Томск.: ТМЛ-Пресс, 2011.- 120 с.
- 48 Mohseni, O., Stefan, H. G., and Erickson, T. R.: A nonlinear regression model for weekly stream temperatures, *Water Resour. Res.*, 34, 2685–2692, 1998.
- 49 Van Vliet, M. T. H. and Zwolsman, J. J. G.: Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river, *J. Hydrol.*, 353, 1–17, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.01.001, 2008. *Journal of Hydrology Volume 353, Issues 1–2, 20 May 2008, Pages 1-17*
- 50 СП 33–101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – ВЗАМЕН СНиП 2.01.14-83; введ. 2003 -12 - 26. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 70 с. – (Государственный комитет РФ по строительству и жилищно-коммунальному комплексу).
- 52 IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

- 53 Фролова Н.Л. Внутригодовое распределение стока рек России/Н.Л. Фролова, Д.П. Нестеренко, Н.В. Шенберг//Вест. Москв. ун-та. Сер. 5, География. – 2010. – Вып. 6. – С. 8 – 16.
- 54 Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока/С.Г. Добровольский. – М.: ГЕОС, 2011. – 661 с.
- 55 Труды / Государственного океанографического института. –2013. – №214: Обзор работы гидрологической сети на устьевых участках рек Енисея и Пясины по материалам многолетних наблюдений. – С. 115 – 126.
- 56 Кузин П.С. Географические закономерности гидрологического режима рек. / П.С. Кузин, В.И. Бабкин – Л.:Гидрометеиздат, 1979. – 200 с.
- 57 Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. / В.М. Евстигнеев. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
- 58 Webb, B. W., and F. Nobilis (1997), Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: A case study, *Hydrol. Processes*, 11, 137-147.
- 59 Yang, D., B. Liu, and B. Ye (2005), Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05401, doi: 10.1029/2004GL021568.
- 60 Toffolon, M., and Piccolroaz, S. 2015. A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environmental Research Letters* 10(11), 114011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114011>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Замыкающих створы рек СЛО и соответствующие им метеорологические станции

Створ	МС
р. Онега - с. Порог	Онега
р. Северная Двина - п. Усть-Пинега	Архангельск
р. Мезень - д. Малонисогорская	Сура
р. Печора - с. Усть-Цильма	Усть-Цильма
р. Пур - п. Самбург	Ханты-Мансийск
р. Таз - п. Сидоровск	Тарко-Сале
р. Оленек - 7,5 км от устья Бура	Оленёк
р. Анабар - с. Саскылах	Саскылах
р. Яна - с. Юбилейное	Юбилейное
Индиگیرка - п. Воронцово	Чокурдах
р. Колыма - с. Колымское	Усть-Олой
р. Обь-г. Салехард	Салехард
р. Енисей -г. Игарка	Игарка
р. Лена - с. Кюсюр	Кюсюр

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Оценка синфазности стока рек физико-географических районов формирования стока бассейна СЛЮ

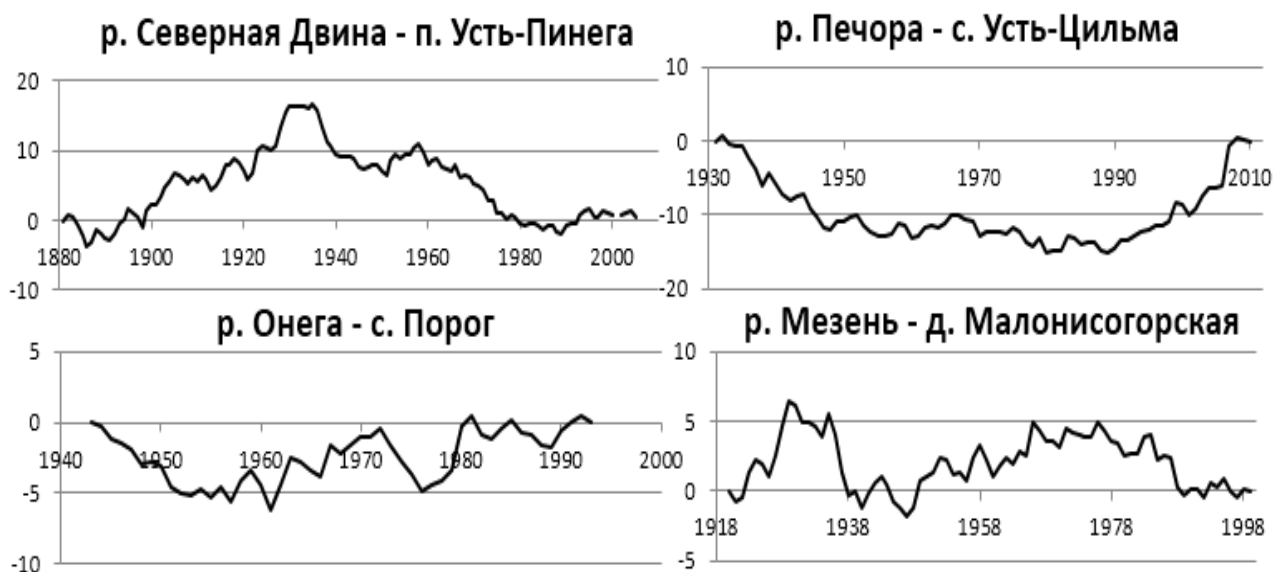


Рисунок Б.1 – Разностные интегральные кривые района Eu2

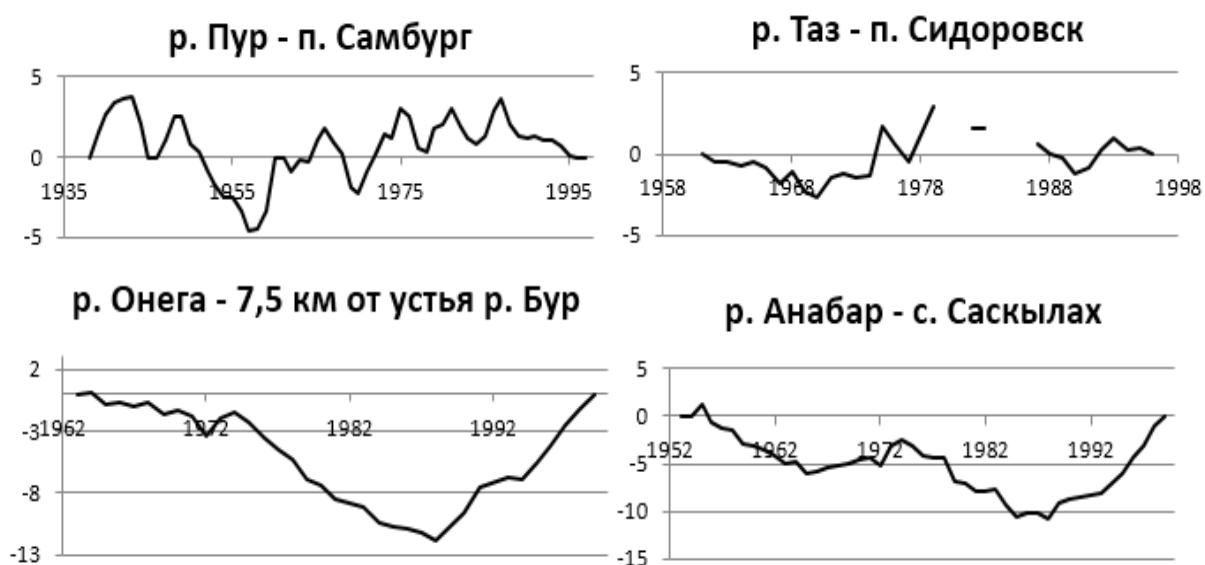


Рисунок Б.2 – Разностные интегральные кривые района N1



Рисунок Б.3 – Разностные интегральные кривые района N2



Рисунок Б.4 – Разностные интегральные кривые крупнейших рек бассейна СЛО