



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Климатическая оценка потоков воды,
тепла и соли в Печорском море

Исполнитель Дешова Диана Витальевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«19» ОВ 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение	3
Глава 1. Физико-географическое описание района исследования	5
1.1 Географическое описание района	5
1.2 Особенности гидрометеорологических условий в регионе	6
1.3 Понятие водного, теплового и солевого балансов природного объема вод	16
1.4 Обзор исследований по потокам воды, тепла и соли в исследуемом регионе	20
Глава 2. Материалы и методы	28
2.1 Описание исходных данных	28
2.2 Расчетные формулы и методы исследования	29
Глава 3. Результаты исследования	34
3.1 Среднее многолетнее состояние всех характеристик	34
3.2 Водный, тепловой и солевой балансы Печорского моря	48
3.3 Временная изменчивость компонентов водного, теплового, солевого балансов Печорского моря	52
Заключение	65
Список источников	67
Приложение А. Межгодовой ход компонентов водного, теплового и солевого балансов Печорского моря	70

Введение

Арктика – регион интенсивного многоотраслевого хозяйства России. По Арктическим морям проходит Северный морской путь, сформирован морской нефтегазовый комплекс, так что освоение Арктики играет огромную роль для развития промышленности. Но из-за суровых климатических условий данный регион долгое время оставался слабо изученным.

Печорское море, расположенное в юго-восточной части Баренцева моря, имеет огромное стратегическое значение для России, так как является аккумулятором природных ресурсов, сосредоточенных на его шельфе [1]. Акватория Печорского моря подвержена влиянию многих динамических процессов [2, 3]: транспорт североатлантических вод с запада, потоки воды из Белого моря и сток реки Печора, водообмен с Карским морем через пролив Карские Ворота, а также взаимодействие с атмосферой через поверхность. В условиях текущего изменения климата эти процессы также меняются. Этим определяется актуальность работы.

Целью работы является исследование пространственно-временной изменчивости объемного расхода воды, потоков тепла и соли в Печорском море.

Задачи, поставленные в работе:

1. Сделать обзор исследований по потокам воды, тепла и соли в исследуемом регионе;
2. Оценить среднее многолетнее состояние гидрологических и метеорологических характеристик в Печорском море;
3. Оценить интегральные характеристики потока воды, тепла и соли на границах Печорского моря;
4. Рассмотреть межгодовую изменчивость характеристик в Печорском море;
5. Оценить многолетнее состояние водного, теплового и солевого балансов.

Результаты исследования были представлены в виде стендовых докладов, с публикацией тезисов, на следующих конференциях:

1. Всероссийская научная конференция «Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН» (Севастополь, 20-24 сентября 2021 г.);

2. Всероссийская конференция с международным участием «XXIX Береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» (Калининград, 18-24 апреля 2022 г.);

3. Конференция Студенческого Научного Общества (СНО) Института гидрологии и океанологии РГГМУ (Санкт-Петербург, 20-21 апреля 2023) – без публикации тезисов;

4. VII Всероссийская научная конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» СПбГУ (Санкт-Петербург, 15-19 мая 2023).

Выступление с устными докладами по результатам работы на конференции Студенческого Научного Общества (СНО) Института гидрологии и океанологии РГГМУ в 2021 и 2022 году (Санкт-Петербург).

Участие в конкурсе научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии, проводимом в СПбФ ИО РАН в 2021 и 2022 году (Санкт-Петербург).

1 Физико-географическое описание района исследования

1.1 Географическое описание района

Печорское море – акватория в юго-восточной части Баренцева моря, между островами Колгуев и Вайгач (рисунок 1.1).

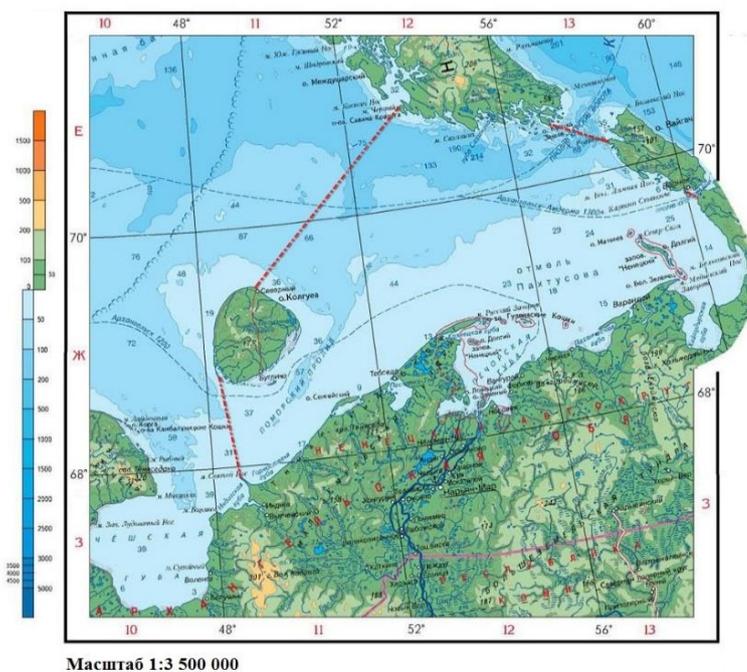


Рисунок 1.1 – Географическое положение Печорского моря

Протяженность Печорского моря в широтном направлении – от о. Колгуев до пролива Карские Ворота – около 300 км и в меридиональном направлении – от мыса Русский Заворот до Новой Земли – около 180 км. Площадь акватории моря составляет 81 263 км², объём вод 4380 км³. Средняя глубина составляет 6 м, а наибольшая – 210 м.

В пределах Печорского моря имеется несколько заливов (губ): Раменка, Колоколкова, Паханчская, Болванская, Хайпудырская, Печорская (самая крупная). Из рек, впадающих в море, самой крупной является Печора.

На большей части моря (южный и юго-восточный участки) глубина не превышает 50 м, затем дно плавно понижается к северу, и лишь в узком жёлобе у южного побережья арх. Новая Земля его уровень опускается до 200 м и ниже.

Такая мелководность обуславливает хорошую перемешиваемость вод и их однородность в течение большего периода года, а также обогащение всей водной толщи кислородом и биогенными элементами [3].

1.2 Особенности гидрометеорологических условий в регионе

Печорское море расположено на юго-востоке Баренцева моря, но даже являясь его частью, природные условия Печорского моря сильно отличаются от остальной акватории. Здесь наблюдается более суровый климат и ледовые условия. Влияние Норвежского течения, заходящего в Баренцево море, в юго-восточной части ослаблено. Основным режимом вод Печорского моря определяется влиянием стока р. Печора [4]. Совокупность климатических, гидрологических и океанологических факторов создает в Печорском море отличную от смежного баренцевоморского бассейна, обстановку [5].

Согласно классификации Б.П. Алисова, Печорское море по климату относится к атлантической области субарктического пояса. Совместное влияние Северной Атлантики и воздушных масс умеренных широт, а также высокоширотное положение, определяют внутригодовую изменчивость метеорологических параметров [3].

1.2.1 Атмосферное давление и ветровой режим

Баренцево море – район взаимодействия холодных арктических и теплых атлантических воздушных масс, разделяемых арктическим фронтом. Пространственное положение фронтальной зоны определяет направление и скорость перемещения циклонов и антициклонов, которые имеют достаточно устойчивый характер с различиями в каждый сезон года [6].

Характерной особенностью Баренцева моря по наблюдениям за среднемноголетним полем атмосферного давления является ложбина низкого давления в холодный период года. Вдоль этой ложбины со скоростью 30-

45 км/ч проходят атлантические циклоны, которые несут теплый и влажный воздух в Баренцево море.

В среднем через Баренцево море проходит 3-5 циклонов в месяц в холодный период года. В сумме число дней с низким атмосферным давлением зимой может достигать 21-23 за месяц. Дней с глубокими циклонами с давлением в центре до 990 гПа и меньше могут наблюдаться 6-7 за месяц. В дни, когда в Баренцево море приходят циклоны с давлением в центре 975-980 гПа зимой и 980-985 гПа летом, отмечается резкое ухудшение погоды [6]: сплошная облачность, повышенная температура воздуха, усиление ветра до штормового (15 м/с и более), волны высотой 4 м и более.

Среднее количество штормовых дней уменьшается с запада на восток. В холодный период года штормовые ветра наблюдаются чаще, составляя при этом 85% всех случаев за год [6] (за период с октября по апрель). Максимальной скорости ветер достигает в ноябре-декабре, а минимальной – в августе. Вдоль побережья отмечаются значения в 35-40 м/с с порывами более 40 м/с [3].

1.2.2 Температура воздуха

Пространственно-временная изменчивость температуры воздуха над Баренцевым морем формируется за счет крупномасштабной циркуляции атмосферы, переноса теплых или холодных вод течениями и теплообмена с атмосферой, особенно радиационного прогрева [6]. Температура воздуха в Баренцевом море понижается в направлении с запада на восток и с юга на север.

В зимний период на юго-западную часть Баренцева моря влияет ложбина низкого давления, вдоль которой идут циклоны с теплым воздухом из северной части Атлантического океана. В эту же зону приходят с течениями теплые воды Норвежского моря. Поэтому юго-запад Баренцева моря всю зиму свободен ото льда, но при этом большое количество тепла уходит в атмосферу. Среднемноголетняя температура воздуха зимой здесь составляет от -4 до 0 °С,

что является самой высокой температурой на всей акватории Баренцева моря. В восточной и северной частях Баренцева моря в зимний период влияние ложбины низкого давления и адвекции тепла течениями не проявляются, поэтому в этих районах наблюдается дрейфующий лед. На севере Баренцева моря температура воздуха может достигать от -22 до -24 °С [6].

В весенний период температура воздуха повышается на всей акватории моря. На севере и востоке Баренцева моря дрейфующий лед сохраняется, но площадь его сокращается из-за радиационного прогрева. На юго-западе температура воздуха составляет -2 – $+2$ °С, а в северной части -16 – -14 °С [6].

В летний период поле температуры воздуха формируется под влиянием радиационного прогрева. Атмосферная циркуляция ослабляется, к концу лета Баренцево море почти полностью свободно ото льда. В южной части температура воздуха в этот сезон года достигает 6 - 10 °С, а в северной части от 1 до 2 °С [6].

В осенний период воды Баренцева моря активно отдают тепло в атмосферу. В северной и северо-восточной частях начинается образование льда. Идет развитие ложбины низкого давления. Температура воздуха на юге моря положительна и составляет 2 - 4 °С. На севере моря температура отрицательна и может достигать от -10 до -12 °С [6].

1.2.3 Облачность

Баренцево море – одно из наиболее пасмурных морей Северного Ледовитого океана, облачность в среднем составляет 8 - 9 баллов. На облачность оказывает влияние крупномасштабная циркуляция атмосферы, содержание влаги в воздушных массах, переносимых на его акваторию из Северной Атлантики или Арктики, характер подстилающей поверхности и вертикальная стратификация атмосферы. От наличия облаков зависит количество поступающей на поверхность моря коротковолновой солнечной радиации и уходящего в атмосферу длинноволнового излучения. Поэтому количество

облаков следует учитывать при расчете теплового баланса и в математических моделях изменений климата [6].

1.2.4 Радиационный баланс

Расположение Баренцева моря и облачность определяют его радиационный баланс. В Баренцевом море в холодный период года (октябрь-март) поверхностный радиационный баланс отрицателен, а в теплый период (апрель-сентябрь) положителен и достигает максимума в июне. Летний радиационный баланс на 30-40 % меньше суммарной радиации. В целом за год результирующий поток тепла отрицателен [7].

1.2.5 Осадки

Количество осадков на акватории Баренцева моря зависит от атмосферной циркуляции, особенно от проходящих циклонов и атмосферных фронтов. Определяются осадки в большей степени по данным наблюдений на метеостанциях. Прямых попутных измерений с судов мало, в результате таких наблюдений получают только оценку интенсивности осадков (слабые, умеренные, сильные). Поэтому преимущественно используют косвенные методы расчета для оценки количества осадков. На всей площади Баренцева моря, в том числе и в Печорском море, количество осадков превышает уровень испарения. В холодный период года над Баренцевым морем преобладает снег, в теплый – дождь. Осенью наблюдаются осадки смешанного типа [6].

1.2.6 Испарение

В Баренцевом море для испарения воды характерен сезонный ход. Максимальные значения наблюдаются в зимний период в незамерзающих районах моря, а минимальное испарение – летом. В замерзающих районах испарение меньше, чем в незамерзающих [8].

1.2.7 Динамика вод и водные массы

В Баренцевом море сложная динамика вод: образуются вихри и фронтальные зоны из-за смешения пресных речных и морских вод атлантического и арктического происхождения, наблюдаются восходящие и нисходящие потоки [3].

Типы движения морских вод в Печорском море разнообразны: квазистационарная циркуляция, течения синоптического масштаба (штормовые нагоны) и приливные течения. Основные постоянные течения – это потоки теплых и соленых атлантических вод – Канинское и Колгуево-Печорское течения. Также присутствует Беломорское, Печорское стоковое течение и вытекающее из Карского моря холодное течение Литке (рисунок 1.2).

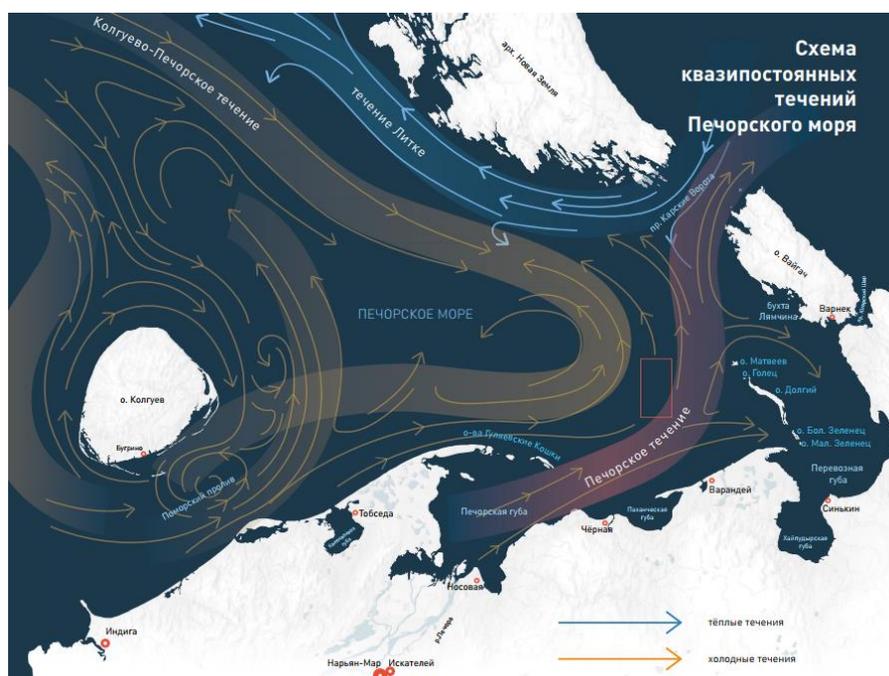


Рисунок 1.2 – Схема квазипостоянных течений Печорского моря [3]

В поверхностном слое происходит транзитный перенос баренцевоморских вод в Карское море. Под влиянием материкового стока и прибрежных течений формируются прибрежные водные массы [9].

На распределение солености и плотности вод наибольшее влияние оказывает сток р. Печора [4]. Объем стока в средний по водности год составляет около 130 км³. Максимальный сток, связанный с таянием речного

льда и снега на акватории бассейна, наблюдается в весенний период. В осенний и зимний периоды, когда реки питаются только атмосферными осадками и грунтовыми водами, наблюдается минимальный сток [10].

Полусуточные и неправильные суточные приливы в Печорском море усложняют картину течений. Приливные течения меняют свое направление и происходит это неодинаково для разных районов. В западной части моря течение, которое возникает во время прилива, принимает противоположное направление во время отлива. Приливные течения охватывают всю толщу вод, поэтому направление течения меняется во всем слое воды от поверхности до дна одновременно. Скорость приливных течений выше скорости постоянных. В среднем для Печорского моря она составляет 30-40 см/с, а в поверхностном слое может достигать 150 см/с [7].

1.2.8 Температура воды

Существует два основных фактора, которые определяют температурный режим Баренцева моря, это адвекция вод из соседних регионов и теплообмен с атмосферой. В целом по пространству Баренцева моря температура воды понижается с юга на север и с запада на восток во все сезоны и на всех глубинах.

В южной части Баренцева моря наблюдаются теплые воды, принесенные Нордкапским течением. В северную и северо-восточную части поступают холодные арктические воды. Температура воды положительна весь год в юго-западной части моря. Зимой в восточной, северной и северо-восточной частях моря температура воды достигает точки замерзания, наблюдается дрейфующий лед [6].

В поверхностном слое в августе наблюдается максимальный прогрев, а в глубинных слоях максимум приходится на сентябрь-октябрь. В Печорском море в летний период поверхностная температура составляет около 5-10 °С, уменьшаясь от юго-запада к северо-востоку (рисунок 1.3 (а)). В придонном же слое температура воды может достигать 0 °С (рисунок 1.3 (б)). Самый

холодный месяц – май, в этот период от поверхности до дна значения температуры отрицательны [11].

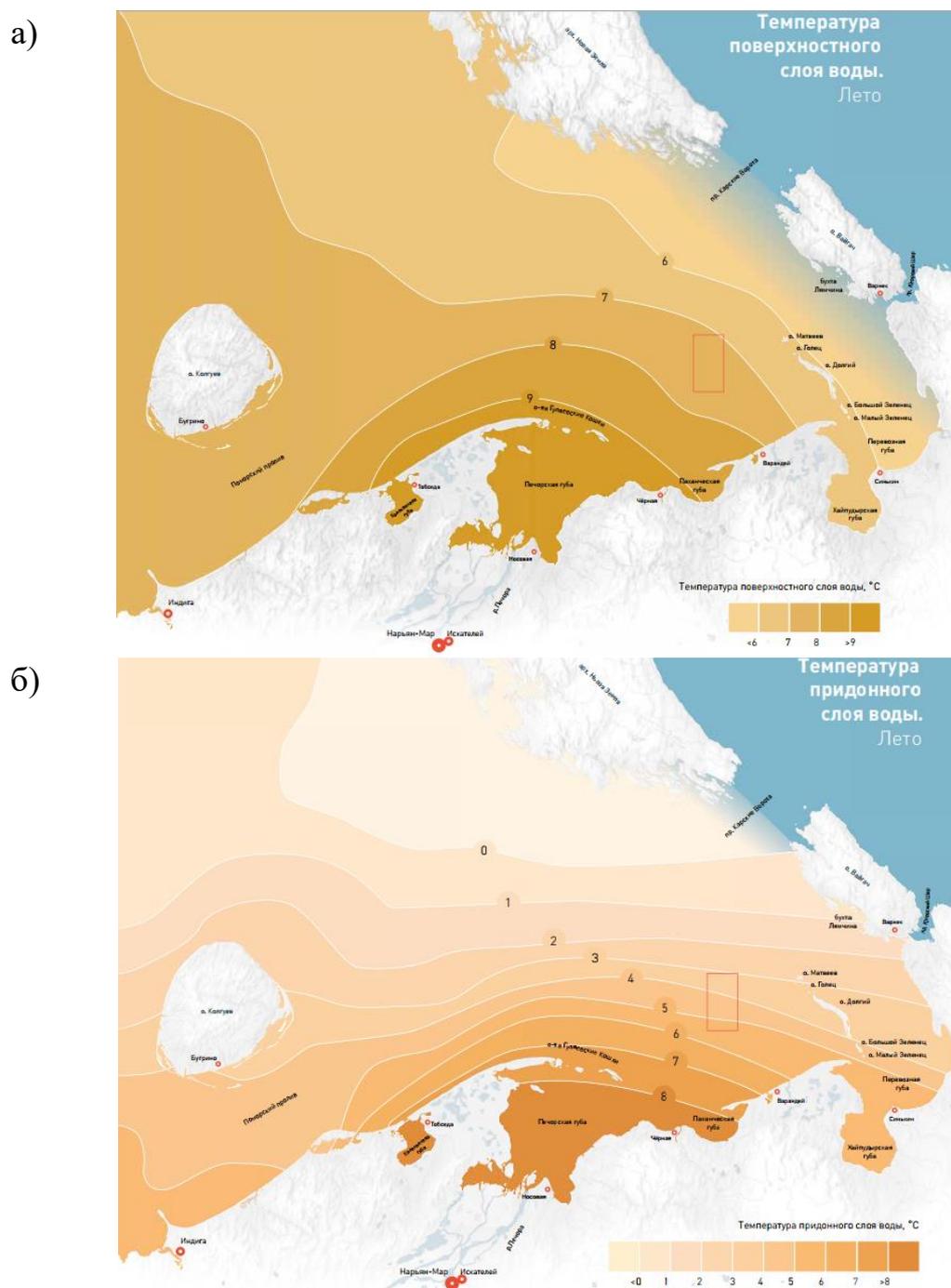


Рисунок 1.3 – Среднеголетняя температура поверхностного (а) и придонного (б) слоя воды летом в Печорском море [3]

1.2.9 Соленость воды

Соленость в Баренцевом море определяется адвекцией и перемешиванием прибрежных, атлантических и арктических водных масс, процессами образования и таяния льда, испарением и осадками, а также речным стоком. По пространственно-временной изменчивости солености можно судить о динамических процессах в море: структуре водных масс, местах их происхождения и перемещении. Соленость воды на поверхности Баренцева моря снижается с запада на восток.

Соленость формирует плотность морских вод и определяет особенности стратификации вод. Пространственно-временное распределение солености помогает определять воды различного происхождения, т.к. отражает структуру и характеристики водных масс и фронтальных зон [6].

Максимальная соленость со значениями 34,9-35,1 ‰ от поверхности до дна в течение всего года отмечается в юго-западной части Баренцева моря. Это атлантические соленые воды, принесенные Нордкапским течением. Распространяясь на восток и северо-восток соленость этих вод на глубинных слоях снижается до 34,8-34,9 ‰ [6].

На поверхности моря соленость меняется под влиянием испарения (повышение солености) и осадков (понижение солености). Т.к. количество осадков превышает испарение на всей акватории Баренцева моря, то должно наблюдаться постепенное распреснение вод, но это влияние мало и действует только на поверхности. Происходит полная компенсация такого воздействия адвекцией соленых атлантических вод [6].

Самые высокие значения солености наблюдаются в зимний период, а минимальные – летом, но такая сезонность может отличаться для вод различного происхождения [6].

В Печорском море в зимний период, когда присутствует лед, отмечается преимущество соленых морских вод (32-35 ‰). Летом и осенью море подвержено воздействию материкового пресного стока, в особенности от реки Печора [11]. В верхнем слое 0-10 м образуются зоны солоноватых (менее 25

‰), распределенных морских (25-30 ‰) и соленых морских вод (более 30 ‰) (рисунок 1.4 (а)). В придонном слое преимущественно наблюдаются соленые морские воды [7], соленость которых увеличивается с юга на север (рисунок 1.4 (б)).

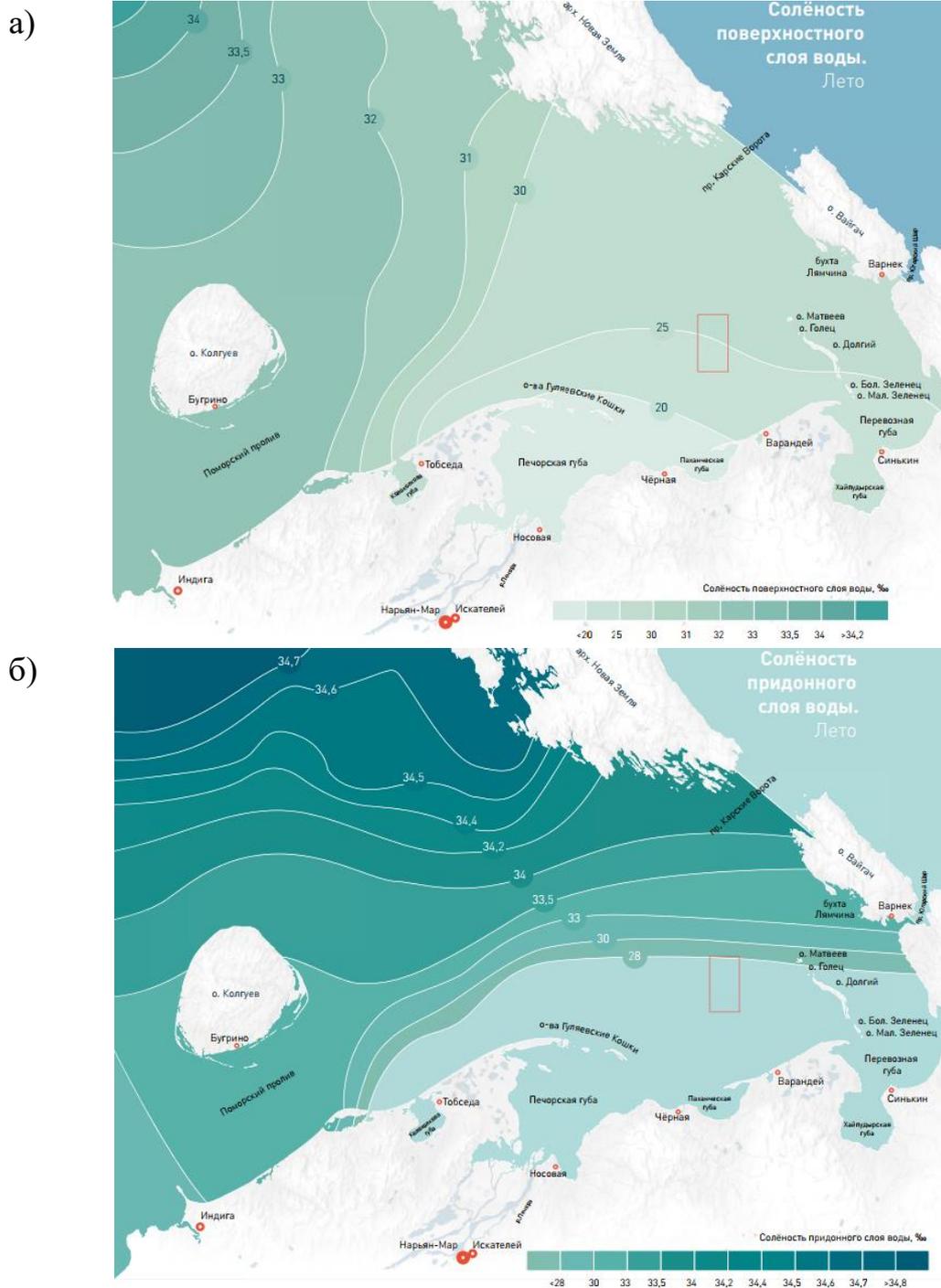


Рисунок 1.4 – Среднеголетняя солёность поверхностного (а) и придонного (б) слоя воды летом в Печорском море [3]

1.2.10 Уровень моря

Колебания уровня в Баренцевом море подвержены совокупному воздействию приливов, атмосферного давления, сгонно-нагонных явлений и изменений плотности воды [6].

Самую важную роль в изменении уровня моря играют правильные полусуточные и неправильные полусуточные приливные колебания. Чуть меньший вклад вносят непериодические изменения, которые возникают за счет изменения атмосферного давления и сгонно-нагонных явлений. Повышение атмосферного давления вызывает понижение уровня, и наоборот, при понижении давления уровень растет. Сгонно-нагонные явления проявляются при длительном воздействии ветра на водную поверхность во время прохождения глубоких циклонов. Следующими по значимости являются колебания уровня под действием изменения поля плотности воды. Такие колебания неустойчивы и, в основном, имеют локальный характер. Меньший вклад, по сравнению с остальными параметрами, вносит ледовый покров, который уменьшает величину приливов. Самым мало значимым фактором, влияющим на изменения уровня, является пресноводный сток, действие которого проявляется только в Печорской губе [6].

1.2.11 Ледовые условия

Ледовые условия в Баренцевом море определяются особенностями крупномасштабной циркуляции атмосферы, адвекцией тепла течениями, теплообменом с атмосферой и ледообменом с Белым и Карским морями и Арктическим бассейном. Также на формирование, разрушение, распределение, площадь покрова и продолжительность существования льда оказывает ветер [6]. У ледового покрова в Баренцевом море имеется сезонность, образуется он в основном в сентябре-октябре и сохраняется до июля [11].

С 2000-х годов, начала периода инструментальных наблюдений, льдом в относительно теплые зимы покрывается только северная часть моря. В холодные зимы лед наблюдался еще и на востоке и юго-востоке моря. В летний

же период, в теплые годы, лед отсутствует. А летом в холодные годы лед мог не исчезать в северной и даже восточной и юго-восточной частях. Южная часть моря даже в суровые зимы не покрывается льдом за счет поступления теплых атлантических вод [2].

1.3 Понятие водного, теплового и солевого балансов природного объема вод

Водный баланс – количественное соотношение прихода, расхода и аккумуляции (запаса) воды для исследуемого объекта за определенный промежуток времени. Метод водного баланса позволяет сопоставлять и оценивать степень воздействия отдельных источников на общий режим водного объекта за различные периоды времени. Также с его помощью можно косвенным путем определить трудно измеримые, но необходимые для решения инженерных задач или общих закономерностей водообмена, компоненты [12].

Приходными составляющими водного баланса обычно являются: P – атмосферные осадки; Q – конденсируемая влага; F_1 – подземный приток вод; W_1 – поверхностный приток вод (русловой и береговой); A_1 – приток за счет адвекции; H_1 – параметр, характеризующий увеличение объема (повышение уровня); I_1 – объем вод от таяния льда и от речного льда.

Расходными составляющими водного баланса являются: E – испарившаяся влага; F_2 – подземный отток вод; W_2 – поверхностный отток вод (русловой и береговой); A_2 – отток за счет адвекции; H_2 – параметр, характеризующий уменьшение объема (понижение уровня); I_2 – объем вод, идущих на образование льда, и уходящих со льдом из региона.

Общий вид схемы водного баланса для произвольной области изображен на рисунке 1.5.

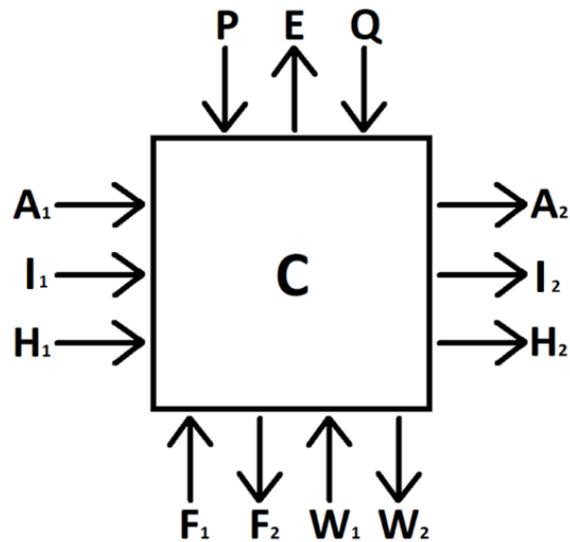


Рисунок 1.5 – Схема водного баланса

Тепловой баланс – количественное соотношение прихода, расхода и теплоудержания при различных тепловых процессах для исследуемого объекта за определенный промежуток времени. Метод теплового баланса помогает выявлять закономерности изменения гидрологических процессов, происходящих под влиянием теплообмена между соседними водными объектами и атмосферой.

Составляющие теплового баланса: S_{cp} – поглощаемая водой суммарная (прямая и рассеянная) коротковолновая солнечная радиация; S_{ia} – поглощаемое водой встречное длинноволновое излучение атмосферы; S_{iv} – потери тепла водой путем длинноволнового излучения; S_{ta} – турбулентный обмен тепла с атмосферой путем конвекции, молекулярной и турбулентной теплопроводности (за счет разности температуры воды и воздуха); S_{ik} – тепло, затрачиваемое на испарение или выделяемое при конденсации; S_{td} – теплообмен с дном; S_{pr} – тепло, приносимое водой притоков и источников; S_{st} – тепло, выносимое поверхностным и подземным стоком; S_{oc} – тепло, поступающее от дождевых осадков или затрачиваемое на таяние снега, выпадающего в водоем; $S_{л}$ – тепло, выделяемое при образовании льда или затрачиваемое при его таянии на месте (в пределах данного водоема или в пределах рассматриваемого участка); $S_{лп}$ – тепло, затрачиваемое на таяние

льда, внесенного на рассматриваемый участок реки или водоем притоками; $S_{кэ}$ – тепло, выделяемое при рассеянии кинетической энергии [12].

Составляющие $S_{сп}$, $S_{иа}$, $S_{пр}$ и $S_{кэ}$ всегда положительны, а $S_{ив}$, $S_{ст}$ и $S_{лп}$ всегда отрицательны; остальные могут и увеличивать, и уменьшать запас тепла в водной массе. Тепловой поток $S_{ик}$ положителен при конденсации и отрицателен при испарении. Если тепловые потоки $S_{та}$ и $S_{тд}$ направлены от водной массы в атмосферу или литосферу, то они будут иметь отрицательный знак, при обратном потоке тепла эти составляющие войдут в уравнение теплового баланса со знаком плюс. При образовании льда тепловой поток $S_{л}$ положителен, при таянии - отрицателен; значение $S_{ос}$ положительно при дождевых осадках и отрицательно при снеге. Результирующий тепловой поток – F_t , он положителен при увеличении теплосодержания и отрицателен при уменьшении.

В общем виде схема теплового баланса для произвольной области и некоторого периода времени выглядит как показано на рисунке 1.6.

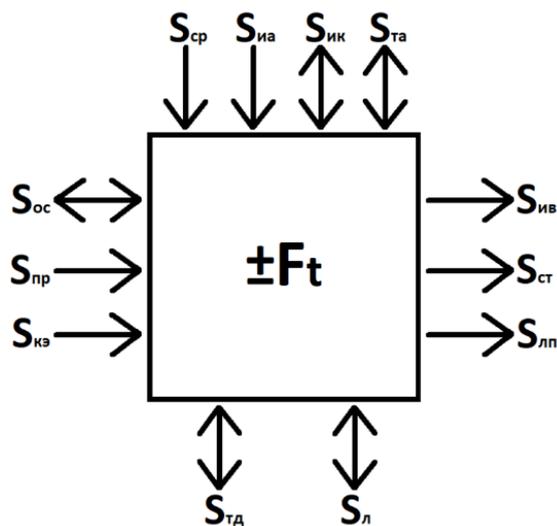


Рисунок 1.6 – Схема теплового баланса

В большинстве случаев учитываются не все составляющие теплового баланса. В теплый период года и на незамерзающих морях отбрасываются параметры, связанные со льдом. Часто пренебрегают теплом, приносимым

притоками, дождевыми осадками и затрачиваемым на таяние льда, приносимого притоками. В уравнениях для годового периода теплообмен с дном не учитывается, так как отдача тепла дну компенсируется приходом тепла от него. Такая же ситуация и с теплом, выделяемым при образовании льда и затрачиваемым на таяние.

Солевой баланс – количественное соотношение прихода и расхода соли при различных процессах для исследуемого объекта за определенный промежуток времени.

Приходные составляющие баланса солей в водоеме: W_1 – материковый сток солей; A_1 – приток соли за счет адвекции; E – испарение воды; I_1 – увеличение солености за счет образования льда.

Расходные составляющие баланса солей в водоеме: W_2 – материковый сток пресных вод (береговой и речной); A_2 – отток соли за счет адвекции; P – атмосферные осадки; I_2 – уменьшение солености за счет таяния льда и прихода речного льда; F_d – уход соли через припай в дно.

Общий вид схемы солевого баланса изображен на рисунке 1.7.

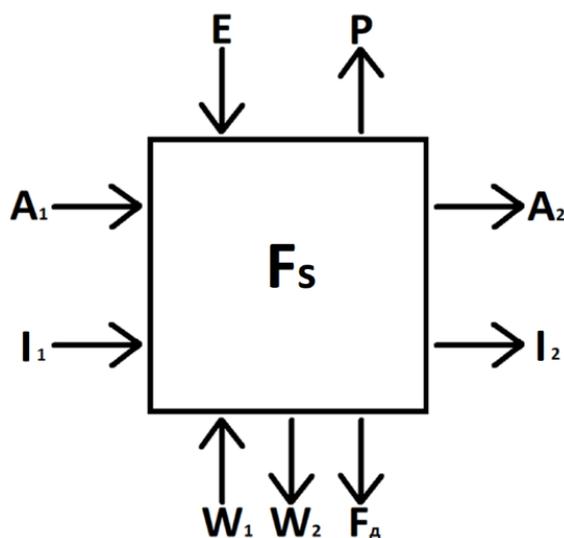


Рисунок 1.7 – Схема солевого баланса

1.4 Обзор исследований по потокам воды, тепла и соли в исследуемом регионе

На гидрологию Баренцева моря влияет множество факторов, таких как крупномасштабная атмосферная циркуляция, водообмен с соседними регионами, рельеф дна, приливо-отливные параметры, поступление дрейфующих льдов из СЛО и другие. Баренцево море – зона со сложным и переменным характером циркуляции. Здесь происходит трансформация теплых и соленых вод Атлантического океана на пути их в Северный Ледовитый океан.

Существует несколько классификаций водных масс. В 1906 году Н.М. Книпович представил карты распределения температуры и солености, по которым можно было предположить существование вод различного типа в Баренцевом море. Его последователи В.Т. Тимофеев (1945), В.К. Агеноров (1947), М.М. Адров (1958), В.П. Новицкий (1959) и другие расширили уже имеющиеся знания о структуре вод [2]. Различия в выделении водных масс возникают из-за того, что Баренцево море является зоной трансформации масс и перемешивания их с местными водами. Для Баренцева моря характерны три основные водные массы: прибрежная, атлантическая и арктическая.

Многие исследователи, такие как Д. Скорсби (1810), Ф.П. Литке, В.Ю. Визе, Х. Мон (1887), О. Петерсон (1900), Й.В. Сандстрём и Б. Хелланд-Хансен (1903), Н.Н. Зубов (1935), посвятили свои работы изучению динамики вод Баренцева моря [6]. Исходя из поставленных задач, использовались разнообразные подходы и методы. На истоке стояли предположения и догадки на основе косвенных данных (распределение температуры, солености, плотности воды, льдов, метеоданные и т.д.), в дальнейшем использовались прямые измерения с помощью современных приборов и инструментов и математическое моделирование циркуляции вод.

Определение расхода воды через границы Баренцева моря вызывает трудности. Прямые измерения течений, температуры и солености с помощью систем буйковых заякоренных станций начались не так давно. Ранее расход

определялся геострофическим методом на основе измерений температуры и солености. Современные значения измерения течений отличаются от прошлых за счет зависимости от характеристик ветра [2].

Неопределенность оценки потоков также возникает из-за неизвестности положения границы между разнонаправленными потоками. Вытекание вод из Баренцева моря происходит вдоль правой стороны проливов, а втекание вдоль левой. Справиться с этим можно за счет установки измерителей течений с высоким пространственным разрешением.

Баланс притока и оттока в Баренцевом море в целом состоит из приходящих вод на юго-западной границе и уходящих вод на северо-востоке. На северной границе и в проливе Карские Ворота наблюдается меньший водообмен, сток из Баренцева моря выше, чем из Карского моря. Из-за связи с течениями и колебаниями атмосферного давления расход имеет сезонный ход.

В балансе вод участвует не только приток и отток, но другие параметры, в сравнении с ними, малы (рисунок 1.8). Так, количество воды, поступающей со льдами из Карского и Арктического бассейна, составляет около 0,004 Св [6]. Объем пресной воды, поступающей с береговым стоком, оценивается в 0,005 Св [6], при этом на р. Печора приходится около 90 %.

Одна из ранних оценок среднего потока в Карских Воротах принадлежит Н.С. Уралову (1960) [6]. Значение равное 0,7 Св он получил с помощью расчетов динамическим методом. Выполненные в дальнейшем измерения течений и расчеты потока были близки к Н.С. Уралову и составляли 0,6 Св. Эти значения подверглись сомнению за счет малого поперечного сечения пролива. Поздние исследования дают оценку расхода в 0,05-0,6 Св.

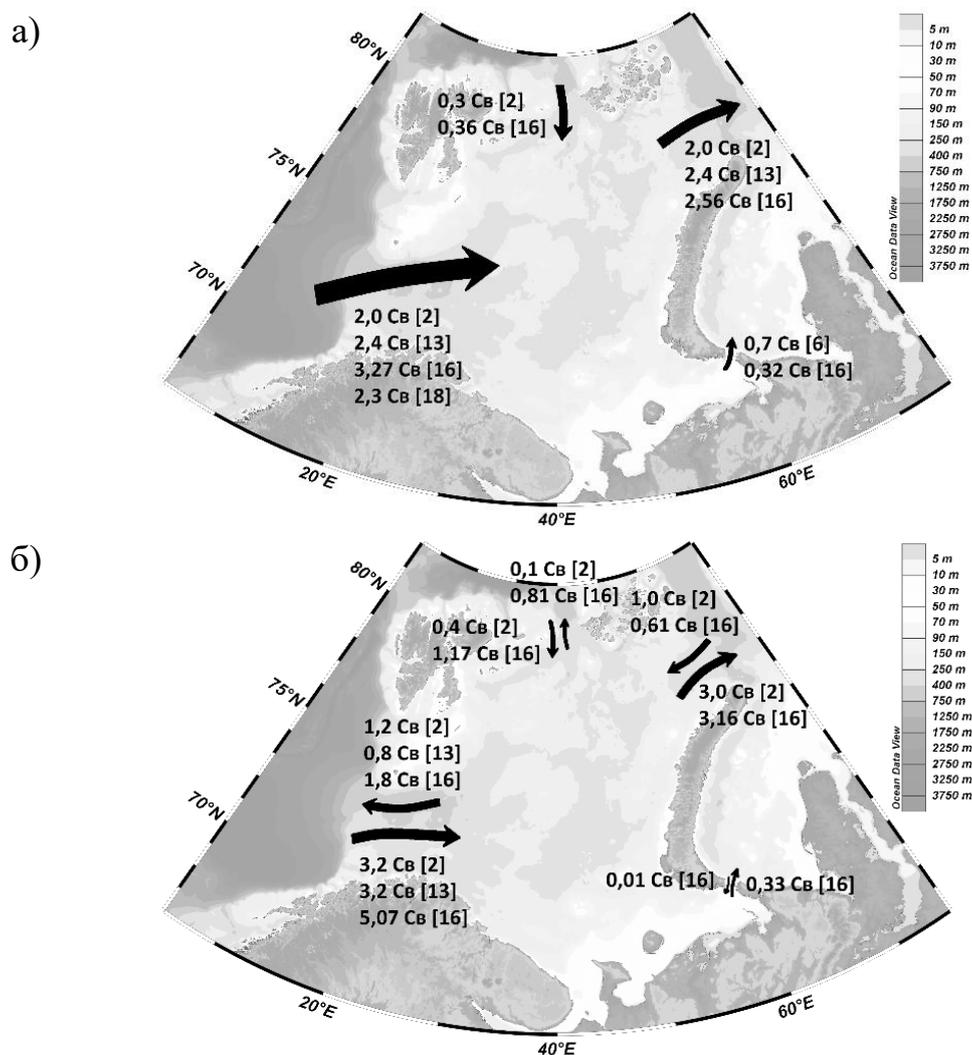


Рисунок 1.8 – Направления и оценки средних объемов водообмена (а) и притока-оттока воды (б) через границы Баренцева моря по данным разных исследователей

Приток атлантических вод в Баренцево море через западную границу начали «прямо» (с помощью измерителей течений) определять в 1997 году [2], среднее за год значение около 2 Св (приходит 3,2 Св, уходит 1,2 Св). На восточной границе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля обработка измерений с помощью модельных оценок дали средний за год поток 2 Св в том же направлении, что и на западной границе (приходит 1 Св, уходит 3 Св). Для северной границы имеется меньше всего информации по сравнению с другими границами из-за трудных ледовых условий. Оценка в 0,1-0,3 Св (приходит 0,4 Св, уходит 0,1 Св) сделана на основе геострофических расчетов

по данным, полученным путем прямых измерений течений только в двух точках.

В исследовании [13], основанном на множестве долгосрочных временных рядов, L.H. Smedsrud с соавторами получил средний смоделированный объемный перенос атлантических вод в Баренцево море через западную границу равный 2,4 Св (приток 3,2 Св и отток 0,8 Св). Перенос через восточную границу между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей составил 2,4 Св.

Согласно измерениям 1997 года [14], произведенных с помощью трех буюв, основной поток вод направлен из Баренцева моря в Карское со скоростью 6-26 см/с, а максимальная скорость до 50 см/с. В этом же году обнаружен возвратный поток из Карского моря со средней скоростью 11 см/с (максимум 43 см/с).

Измерения 2014 года [15], выполненные с помощью доплеровского акустического профилографа течений в ходе экспедиций ИО РАН, показывают динамику течений в проливе Карские Ворота в теплый период года. В конце летнего периода по анализу температуры и солености воды отмечено отсутствие явных баренцевоморских вод в Карском море. Наблюдался слабый водообмен между Баренцевым и Карским морем, но при этом фиксировались струи со скоростью до 70 см/с. К началу осени поток усилился (130-150 см/с), баренцевоморские воды стали проникать в Карское море в большем объеме. В середине осени поток вновь снизился до 70 см/с, а обратное течение Литке, направленное из Карского моря, заметно возросло.

По мере развития методов исследования ученые стали переходить от результатов, полученных на основе наблюдений и моделирования, а также на некоторых доступных долгосрочных временных рядах, к использованию выходных данных модели с высоким разрешением, усредненных за определенный период. Так В. Масловский и другие [16] использовали подход, заключающийся в количественной оценке модельной средней циркуляции и переноса масс и свойств в Баренцевом море, чтобы определить изменчивость этого количества в последующих анализах. Усредненные за 1979-2001 гг.

выходные данные модели представляют средние или климатологические условия. Модель, которую использовали ученые, имеет высокое горизонтальное разрешение, что позволяет моделировать множество процессов в Северном Ледовитом океане. Предполагается гидростатический баланс и использование приближения Буссинеска. В результате своего исследования В. Масловский и др. рассчитали перенос массы, тепла и соли на границах Баренцева моря.

Среднегодовой входящий в Баренцево море поток на западной границе (между Норвегией и арх. Шпицберген) составлял 5,07 Св, а выходящий поток 1,8 Св, это дает чистый среднегодовой перенос в размере 3,27 Св. Величины полученных переносов больше, чем полученные во время наблюдений ранее другими учеными. Одной из причин этого может быть отсутствие в данной модели приливов. Другая причина – метод расчета. Чистое количество тепла, поступающего в Баренцево море, составило 78,38 ТВт, где пришло 105,99 ТВт, а ушло 27,61 ТВт. Такая оценка приближается к верхнему пределу оценок, полученных на основе наблюдений. Среднее за год поступление соли составило $114,15 \cdot 10^3$ кг/с [16].

Чистый среднегодовой перенос из СЛО в Баренцево море на северной границе (между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа) составлял 0,36 Св. Входящий поток 1,17 Св представлял собой смесь полярных поверхностных вод и теплых атлантических вод. Уходящий поток 0,81 Св – это холодные баренцевоморские модифицированные атлантические воды. Суммарный поток тепла равен 0,76 ТВт. Входящий в Баренцево море поток составлял 1,61 ТВт, а уходящий 2,37 ТВт. Суммарный поток соли через границу равен $12,55 \cdot 10^3$ кг/с [16].

На восточной границе Баренцева моря (между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей) отток достигал скорости 30 см/с в зимнее время. Выходящий поток имел величину 3,16 Св, а входящий 0,61 Св. В итоге чистый перенос на восточной границе 2,56 Св. Чистый поток тепла в Баренцево море на восточной

границе составил 2,15 ТВт, где пришло 0,43 ТВт, а ушло 2,58 ТВт. Количество соли в потоке через границу равно $88,65 \cdot 10^3$ кг/с [16].

К югу от Новой Земли поток преимущественно на восток через Карские Ворота имел зимний максимум 0,45 Св и летний минимум 0,2 Св. Единственными периодами слабого стока на запад через Карские ворота, 0,01 Св, являются август и сентябрь. Средняя годовая величина потока в Карских Воротах равна 0,32 Св, где уходящий из Баренцева моря поток 0,33 Св, а входящий 0,01 Св. Среднее количество тепла, проходящее через пролив, равно 0,70 ТВт. Поток соли составил $10,64 \cdot 10^3$ кг/с [16].

Обсуждение результатов доказывает, что баренцевоморская ветвь атлантических вод является важным источником массы, тепла и соли для центральной Арктики при данном атмосферном воздействии.

В Баренцево море, как уже отмечалось, приходит большое количество тепла с атлантическими водами. Оно является зоной значительных потерь тепла. Средняя смоделированная L.H. Smedsrud и др. величина потерь тепла в атмосферу в Баренцевом море равна 56 ТВт [13], что составляет около 30% от общего количества по всей Арктике и имеет положительную тенденцию. Другие ученые получили оценку потерь в пределах 42-162 ТВт [17]. Увеличение со временем отдачи тепла в атмосферу является следствием уменьшения количества морского льда. Корреляция между площадью открытой воды (не занятой льдом) и потерями тепла высока и составляет 0,86 [13].

Другие ученые для оценки влияния притока океанических вод в Баренцево море на концентрацию морских льдов и характеристики атмосферы использовали ансамблевые расчеты с использованием региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики [18]. Исследования проводились для зимних месяцев в период 1979-2016 гг. В качестве начальных и граничных атмосферных условий выбирались данные реанализа ERA-Interim. Модель HIRHAM/NAOSIM есть два основных блока: атмосферная региональная климатическая модель HIRHAM5 и модель океана и морского льда NAOSIM.

Исследование проводилось для разреза по меридиану от Норвегии до арх. Шпицберген. По среднемесячным данным скорости течений и температуре был рассчитан приток вод и тепла в Баренцево море. Модель хорошо отражает сезонное изменение потока океанической воды. Максимальное значение притока отмечено в январе и в среднем по ансамблю составляет $3,1 \pm 0,8$ Св, а минимальное значение – в июне и равно $1,7 \pm 0,3$ Св. Средняя по ансамблю за год величина притока за исследуемый период составляет $2,3 \pm 0,3$ Св [18].

Среднегодовой приток тепла имеет хорошую корреляцию с притоком воды. Максимальное значение океанического притока тепла $74,5 \pm 19,0$ ТВт отмечено в январе, а минимальное $42,7 \pm 11,0$ ТВт – в июле. Средняя величина по ансамблю за год равна $57,2 \pm 7,9$ ТВт [18].

В качестве основного результата исследования выделяется связь притока относительно теплой атлантической воды и режима морских льдов в Баренцевом море. Коэффициент корреляции между океаническим притоком вод и притоком тепла равен 0,9. А с концентрацией морских льдов у притока тепла корреляция составляет -0,8. Таким образом, приток атлантических вод играет важную роль в концентрации морского льда в Баренцевом море [18].

Как говорилось ранее, в водообмене между Баренцевым и Карским морем существует сезонная изменчивость. Средняя скорость потока в основном положительная (из Баренцева моря). Максимальный приток наблюдается зимой, когда течение усиливается за счет преобладания юго-западных ветров. Минимальный приток, а иногда и отрицательный – летом, т.к. течение замедляется из-за часто повторяющихся восточных ветров. I.H. Harms и M.J. Karcher в своем исследовании [19] выявили значительные отклонения от сезонной изменчивости в 1998-1999 г. В этот период наблюдалась аномалия давления на уровне моря, в следствие чего поток через Карские Ворота был направлен в Баренцево море в течение 17 месяцев.

В своей работе I.H. Harms и M.J. Karcher рассматривали региональную объединенную модель лед-океан для Карского моря, усиленную граничными условиями из крупномасштабной модели Северной Атлантики/Северного

Ледовитого океана. 1998-1999 характеризовались сильной положительной аномалией давления на уровне моря (SLP) в сибирской части Северного Ледовитого океана. В итоге совместного влияния высокого давления и преобладания северо-восточных ветров возникло препятствие выноса пресных вод рек Обь и Енисей в Северный Ледовитый океан и море Лаптевых. В центральной и западной частях Карского моря сконцентрировалось большое количество речных вод, что привело к опреснению моря. При этом приток из Баренцева моря – основной источник соленой атлантической воды, снизился и частично даже поменял направление на обратное.

Вышеописанное изменение направления притока в Карское море через Карские Ворота подтверждает и другое исследование [20]. В этой работе представлены результаты расчета гидрометеорологических характеристик в безледный период для Карского и Печорского морей, выполненные с помощью системы оперативного диагноза и прогноза (СОДиП). В проливе Карские Ворота поток вдоль Новой Земли направлен в Печорское море, а у противоположного берега, наоборот, в Карское море. Отток из Карского моря формируется Новоземельским течением не только в поверхностном слое, но и по всей глубине. Выявлено, что отток из Карского моря в безледный период превосходит приток.

2 Материалы и методы

2.1 Описание исходных данных

Для выполнения данной работы в качестве базы исходных данных морских параметров (температура, соленость, скорость течения, уровень, концентрация льда) взят реанализ GLORYS12V1 (https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030) морской службы Copernicus. Он основан на существующей системе глобального прогнозирования CMEMS в реальном времени. Компонент модели - платформа NEMO, управляемая на поверхности ECMWF ERA-Interim, а затем повторным анализом ERA5 за последние годы. Наблюдения ассимилируются с помощью фильтра Калмана пониженного порядка. Вдоль трека данные альтиметра, спутниковая температура поверхности моря, концентрация морского льда и вертикальные профили температуры и солености на месте совместно усваиваются. Более того, схема 3D-VAR обеспечивает поправку на медленно развивающиеся крупномасштабные отклонения температуры и солености. Выходные файлы глобального океана отображаются на стандартной регулярной сетке с шагом $1/12^{\circ}$ (примерно 8 км) и на 50 стандартных уровнях [21].

В качестве базы исходных данных атмосферных параметров (осадки, испарение, составляющие теплообмена с атмосферой) взят реанализ ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means>) службы климатической изменчивости Copernicus. ERA5 - это реанализ ECMWF пятого поколения для глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий. Реанализ объединяет модельные данные с наблюдениями со всего мира в глобально полный и согласованный набор данных с использованием законов физики. Данные были переведены в обычную сетку широта-долгота $0,25^{\circ}$ для реанализа [22].

В качестве базы исходных данных по стоку р. Печора использовались наблюдения из ВКР (магистерская диссертация) «Ледовый режим устьевой области реки Печора» Севастьяновой Л.Ю. [23].

Как западная и северная границы Печорского моря рассматривались меридиональный и широтный разрезы от точки 71° с.ш. 50° в.д. к югу и востоку до берега; для пролива Карские ворота – по параллели $70^{\circ}25'$ с.ш. на долготе от $57^{\circ}5'$ до $58^{\circ}45'$ в.д. (от Новой Земли на западе до материка на востоке) (рисунок 2.1). Из архива через $5'$ выбирались среднемесячные значения меридиональной и зональной составляющих скорости течения, температуры и солёности воды на горизонтах базы данных исходя из рельефа дна от поверхности до дна за период с января 1993 по декабрь 2018 года.

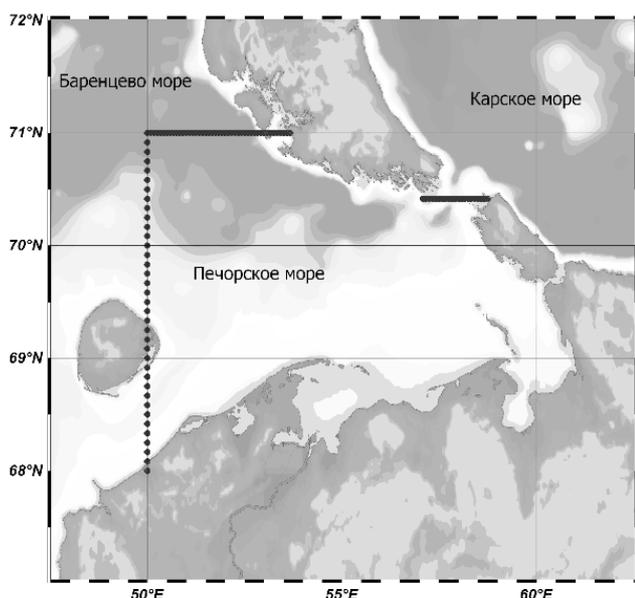


Рисунок 2.1 – Разрезы на границах Печорского моря

2.2 Расчетные формулы и методы исследования

Оценка объемного расхода, потоков тепла и соли в толще воды производилась для каждой ячейки разреза отдельно по формулам (1), (2) и (3) [24], которые потом суммировались на всём разрезе. Поток тепла

рассматривался относительно минимальной температуры морской воды в данной точке. Соленость – относительно 0,0 г/кг.

Объемный расход – объем жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени, можно определить как:

$$Q = V \cdot \Delta H \cdot \Delta R \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где Q – объемный расход, Св;

V – скорость течения в центре каждого слоя, м/с;

ΔH – толщина слоя, м;

ΔR – расстояние между станциями, м.

Тепловой поток – количество теплоты, передаваемой за единицу времени через единицу площади, можно определить как [24]:

$$F_t = C_p \cdot \rho \cdot (T - T_f) \cdot V \cdot \Delta H \cdot \Delta R, \quad (2)$$

где F_t – поток тепла, Вт;

C_p – удельная теплоемкость воды, равная 4200 Дж/(кг·с);

ρ – плотность воды, равная 1025 кг/м³;

T – температура морской воды, °С;

T_f – минимальная температура морской воды в данной точке, °С.

Поток соли – количество соли, передаваемой за единицу времени через единицу площади, можно определить как [24]:

$$F_s = \rho \cdot S_w \cdot V \cdot \Delta H \cdot \Delta R, \quad (3)$$

где F_s – поток соли, г/с;

S_w – соленость морской воды, г/кг.

Пересчет рассматриваемых параметров и балансовых составляющих:

$$S_{kvi} = x^2 \cdot 60^2 \cdot 1852^2 \cdot \cos(\pi/180 \cdot \varphi), S_{общ} = \sum S_{kvi}, \quad (4)$$

где S_{kvi} – площадь одного квадрата расчетной сетки, м²; x – шаг сетки (0,083 для морских параметров (температура, соленость, течение, уровень моря, концентрация льда) и 0,25 для атмосферных (осадки, испарение, теплообмен, давление)); 60 – количество минут в 1 градусе; 1852 – количество метров в 1 минуте; φ – широта, °; $S_{общ}$ – общая расчетная площадь акватории.

Уровень моря:

$$(\sum h_i \cdot S_{\text{кв}i}) / 2592000 = H, \quad (5)$$

$$H / S_{\text{общ}} \cdot 100 = h, \quad (6)$$

где h_i – уровень моря в точке, м; H – поток объема вод с акватории за счет уровня моря, $\text{м}^3/\text{с}$; h – средневзвешенный уровень моря для всей акватории, см; $2592000 \text{ с} = (30 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)$ – перевод из $\text{м}^3/\text{мес}$ в $\text{м}^3/\text{с}$.

Концентрация морского льда:

$$(\sum I_i \cdot S_{\text{кв}i}) / S_{\text{общ}} = I, \quad (7)$$

где I_i – концентрация льда в точке; I – средневзвешенная концентрация льда для всей акватории.

Атмосферные осадки:

$$(\sum p_i \cdot S_{\text{кв}i}) / 86400 = P, \quad (8)$$

$$P / S_{\text{общ}} = p, \quad (9)$$

где p_i – количество осадков в точке, $\text{м}/\text{сут}$; P – поток объема вод от осадков для всей акватории, $\text{м}^3/\text{с}$; p – средневзвешенное количество осадков для всей акватории, $\text{м}/\text{сут}$; $86400 \text{ с} = (24 \cdot 60 \cdot 60)$ – перевод из $\text{м}^3/\text{сут}$ в $\text{м}^3/\text{с}$.

Испарение:

$$(\sum e_i \cdot S_{\text{кв}i}) / 86400 = E, \quad (10)$$

$$E / S_{\text{общ}} = e, \quad (11)$$

где e_i – испарение в точке, $\text{м}/\text{сут}$; E – поток объема вод от испарения для всей акватории, $\text{м}^3/\text{с}$; e – средневзвешенное испарение для всей акватории, $\text{м}/\text{сут}$; $86400 \text{ с} = (24 \cdot 60 \cdot 60)$ – перевод из $\text{м}^3/\text{сут}$ в $\text{м}^3/\text{с}$.

Теплообмен с атмосферой:

$$\sum \phi_{ij} \cdot S_{\text{кв}i} = \Phi_j, \quad (12)$$

$$\sum \Phi_j / 86400 = \Phi, \quad (13)$$

где ϕ_{ij} – значение в точке одной из составляющих теплообмена S , E_3 , LE или F , $\text{Дж}/\text{м}^2/\text{сут}$; $j=1\dots4$; Φ_j – одна из составляющих (S , E_3 , LE , F), $\text{Дж}/\text{сут}$; Φ – суммарный теплообмен с атмосферой, $\text{Дж}/\text{с} = \text{Вт}$; S – поверхностная чистая солнечная радиация (коротковолновое излучение); E_3 – поверхностное чистое тепловое излучение (длинноволновое или земное излучение); LE – скрытый

турбулентный поток тепла; F – явный турбулентный поток тепла; $86400 \text{ с} = (24 \cdot 60 \cdot 60)$ – перевод из Дж/сут в Дж/с.

Кроме основных потоков, замыкался водный и тепловой балансы по уравнениям (14) и (15) для всего объема моря в указанных границах, а солевой баланс определялся только потоком соли F_s .

Водный баланс:

$$Q + W + H + (P - E) = 0, \quad (14)$$

где Q – объемный расход, горизонтальная адвекция вод; W – речной сток; H – изменение объема моря за счет колебаний уровня; P – атмосферные осадки; E – испарившаяся (конденсируемая) влага.

Тепловой баланс:

$$F_t + \Phi = 0, \quad (15)$$

где F_t – адвекция тепла течениями; $\Phi = (S + E_{\text{эф}} + LE + F)$ – теплообмен с атмосферой; S – солнечная радиация, приходящая на поверхность (коротковолновое излучение); $E_{\text{эф}}$ – тепловое излучение с поверхности (длинноволновое или земное излучение); LE – скрытый турбулентный поток тепла; F – явный турбулентный поток тепла.

Для объемного, теплового и солевого балансов были рассчитаны невязки, которые показывают, происходит ли накопление вод, тепла и соли в регионе. Также они помогают понять, достаточно ли используемых составляющих для определения баланса.

Для определения наличия во временной изменчивости среднегодового хода объемного расхода, потоков тепла и соли длиннопериодного колебания с периодом, существенно превышающим длину выборки, рассчитывался линейный тренд.

Уравнение линейного тренда имеет вид:

$$Tr = a_1 \cdot t + a_0 + \varepsilon, \quad (16)$$

где t – время.

Основными характеристиками тренда являются:

1. Коэффициент детерминации r^2 , характеризующий вклад тренда в общую дисперсию ряда.

2. Величина тренда – изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда.

Для проверки коэффициента тренда a_1 на значимость формулируется нулевая гипотеза $H_0: a_1 = 0$; альтернативная $H_1: a_1 \neq 0$. Для проверки этой гипотезы выбирается критерий Стьюдента, выборочное значение которого рассчитывается по формуле:

$$t_{a_1}^* = \frac{|a_1|}{\sigma_{a_1}}, \sigma_{a_1} = \frac{\sigma_y(1-r^2)}{\sigma_x(\sqrt{N-1})}, \quad (17)$$

где σ_a – стандартная случайная погрешность расчета коэффициента a_1 ; r – коэффициент корреляции переменных, входящих в регрессию; σ_y и σ_x – стандартные отклонения зависимой и независимой переменной соответственно.

Далее определяется критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu)$, где уровень значимости α принимается равным 5 %, а число степеней свободы $\nu = N-2$, где N – длина ряда.

Сравниваем t^* с $t_{кр}$: если $t^* > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, коэффициент линейного тренда значим. Тренд неслучайным образом отличается от нуля и вносит определенный вклад в формирование изменчивости исходного ряда; если $t^* < t_{кр}$ нулевая гипотеза принимается, коэффициент линейного тренда незначим, тренда нет.

3 Результаты исследования

3.1 Среднее многолетнее состояние всех характеристик

Для оценки пространственного среднемноголетнего состояния параметров Печорского моря были построены вертикальные разрезы и карты поверхностного распределения исследуемых характеристик.

На меридиональном разрезе по 50° в.д. (рисунок 3.1) среднее многолетнее значение скорости течения по пространству равно 2,74 см/с. Максимальные значения скорости входящих в Печорское море потоков 4,97 см/с наблюдаются севернее о. Колгуев на поверхности и в северной части разреза 5,74 см/с во всем слое. На широте 71° наблюдается поворот течения, происходит отток со скоростью 2,85 см/с. На широтном разрезе по 71° с.ш. отрицательные значения соответствуют притоку в Печорское море. Среднее многолетнее значение скорости течения по пространству равно 0,39 см/с. Максимальные значения входящего течения наблюдаются в центре разреза по всей толще на долготе 50.75-52° в.д. и составляют более 1 см/с. В мелководной части у Новой Земли приток достигает скорости 1,62 см/с. Максимальная скорость выходящего потока достигает 2,69 см/с у склона Новой Земли. На разрезе через Карские Ворота среднее многолетнее значение скорости течения по пространству составляет 23,83 см/с. Максимальные значения скорости отмечаются у западного (Новоземельского) склона в придонном слое от 25 м до дна 58,24 см/с и на поверхности в центральной части разреза до 15 м (около 50 см/с). На материковом шельфе в восточной части разреза скорость течения менее 10 см/с. На шельфе Новой Земли отмечается противотечение из Карского моря в Баренцево с максимальной скоростью 6,48 см/с.

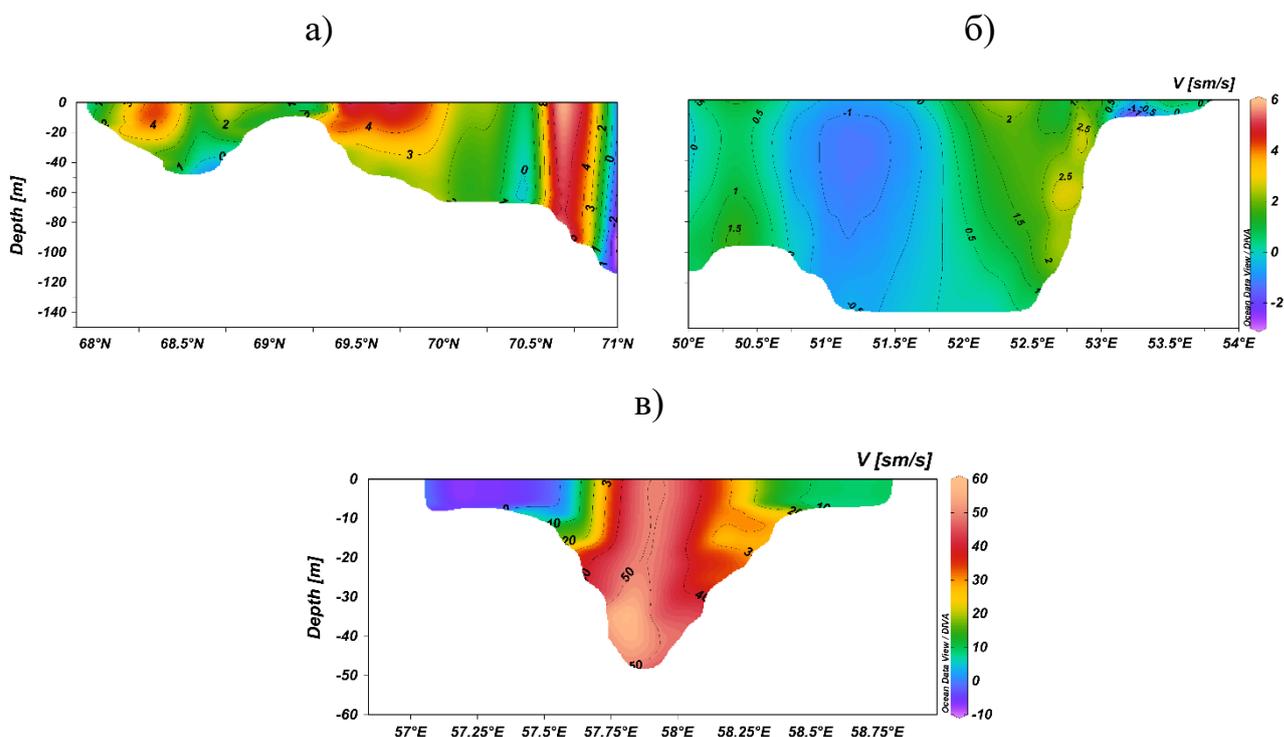


Рисунок 3.1 – Средние многолетние оценки скорости течения (см/с) на границах Печорского моря: западная граница по 50⁰ в.д. (а), северная граница по 71⁰ с.ш. (б), Карские Ворота (в)

В распределении температуры воды (рисунок 3.2) на меридиональном разрезе по 50⁰ в.д. среднее многолетнее значение по пространству составляет 1,82 °С. Наблюдается теплый поверхностный слой с максимальным значением в северной части (2,69 °С). Минимальные значения температуры, около 0,5 °С отмечаются в придонном слое. А на широте 71⁰ у дна температура отрицательна и составляет -0,4 °С. На широтном разрезе по 71⁰ в.д. среднее многолетнее значение температуры по пространству составляет 0,88 °С. Максимальное значение в западной части разреза (50-50.5⁰ в.д.) 2,23 °С. От горизонта 40 м и до дна температура ниже нуля. В придонном слое температура минимальна и составляет -1,22 °С. На разрезе через Карские Ворота средняя многолетняя температура воды по пространству 0,71 °С. Распределение температуры имеет ядро теплой воды в центре разреза в подповерхностном слое с максимумом на горизонте 5 м (1,22 °С). Наиболее холодная вода -0,20 °С в придонном слое отмечается у Новоземельского склона.

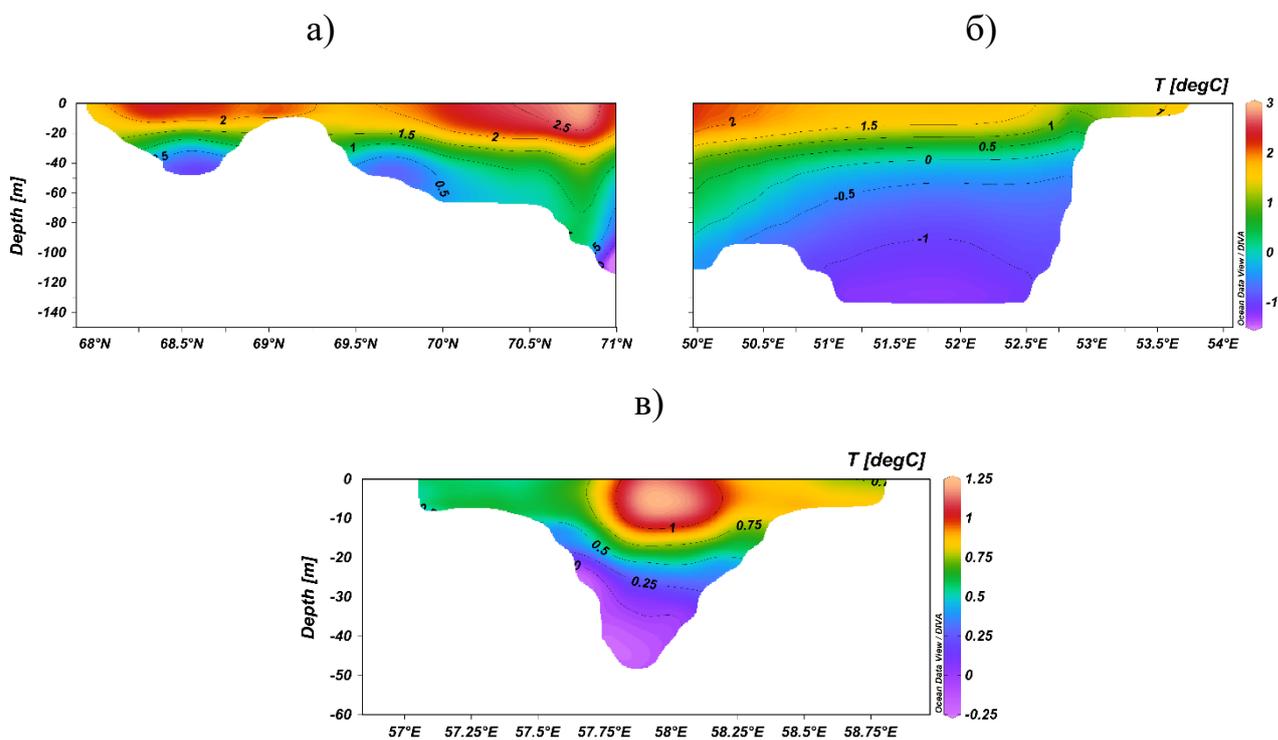


Рисунок 3.2 – Средние многолетние оценки температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

Средняя многолетняя соленость воды изменяется значительно (рисунок 3.3). На меридиональном разрезе по 50° в.д. среднее многолетнее значение солености по пространству составляет 33,88 ‰. В южной части разреза соленость наименьшая 32,19 ‰. К северу соленость увеличивается и достигает у дна 34,72 ‰ на широте 71° . На широтном разрезе по 71° с.ш. соленость увеличивается с глубиной, ее среднее многолетнее значение по пространству составляет 34,44 ‰. В поверхностном слое соленость воды наименьшая (34,15 ‰). В самой глубокой части в придонном слое максимальное значение солености 34,82 ‰. На разрезе через Карские Ворота соленость увеличивается к западу и с глубиной, среднее многолетнее значение по пространству составляет 33,36 ‰. На материковом шельфе соленость минимальная 32,18 ‰, а максимум 34,37 ‰ наблюдается в придонном слое западного склона.

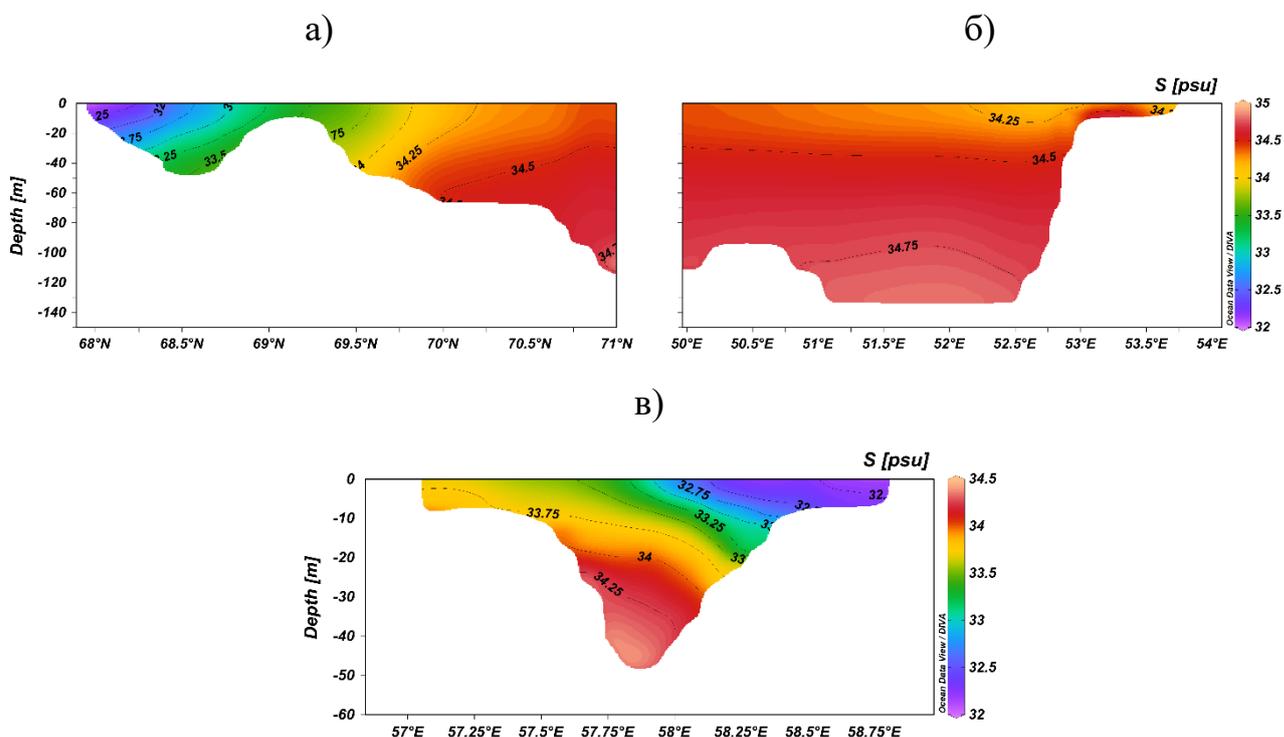


Рисунок 3.3 – Средние многолетние оценки солёности воды (‰) на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

Таким образом, анализируя распределение течений, температуры и солёности по разрезам видно, что на меридиональном разрезе по 50° в.д. на участке 70.6 – 70.8° с.ш. наблюдается заходящее в Печорское море Колгуево-Печорское течение, несущее атлантические воды с температурой более 2,5 °С и солёностью около 34,5 ‰. Южнее 70° с.ш. вокруг о. Колгуев в исследуемый район заходят прибрежные воды с температурой 2,0 – 2,3 °С и солёностью 32,2 – 34,2 ‰, формирующиеся под действием материкового стока и опресненных прибрежных течений. На широтном разрезе по 71° с.ш. на участке 50.8 – 51.8° в.д. в придонном слое наблюдается приходящая в Печорское море трансформированная атлантическая водная масса, которая мало отличается от баренцевоморских вод и характеризуется низкой температурой (-1 – 0 °С) и высокой солёностью (более 34,5‰). Через пролив Карские Ворота западнее 57.5° в.д. в Печорское море поступают арктические воды с течением Литке, имеющие температуру около 0,5 °С и солёность 33,5 ‰.

Для каждой ячейки разрезов рассчитаны средние многолетние значения и построены вертикальные распределения потоков воды (расхода), тепла и соли.

На западном разрезе по 50° в.д. (рисунок 3.4) среднее многолетнее значение расхода равно $687 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный приход наблюдается в придонном слое в северной части разреза ($70.5\text{-}70.75^{\circ}$ с.ш.) и составляет $7054 \text{ м}^3/\text{с}$. На широте 71° наблюдается поворот течения, происходит отток вод величиной $5002 \text{ м}^3/\text{с}$. На широтном разрезе по 71° с.ш. среднее многолетнее значение расхода равно $46 \text{ м}^3/\text{с}$. Наибольшие значения входящего потока наблюдаются в центральной части разреза по всей толще. Максимальный отток отмечается на склоне Новой Земли и составляет $478 \text{ м}^3/\text{с}$. На разрезе через Карские Ворота среднее многолетнее значение расхода составляет $1827 \text{ м}^3/\text{с}$. Наибольший отток в самой глубоководной части разреза от 20 м до дна составляет более $7500 \text{ м}^3/\text{с}$ (максимум $12000 \text{ м}^3/\text{с}$). На материковом шельфе в восточной части разреза расход около $200 \text{ м}^3/\text{с}$. На шельфе Новой Земли отмечается противотечение из Карского моря в Баренцево объемом $257 \text{ м}^3/\text{с}$.

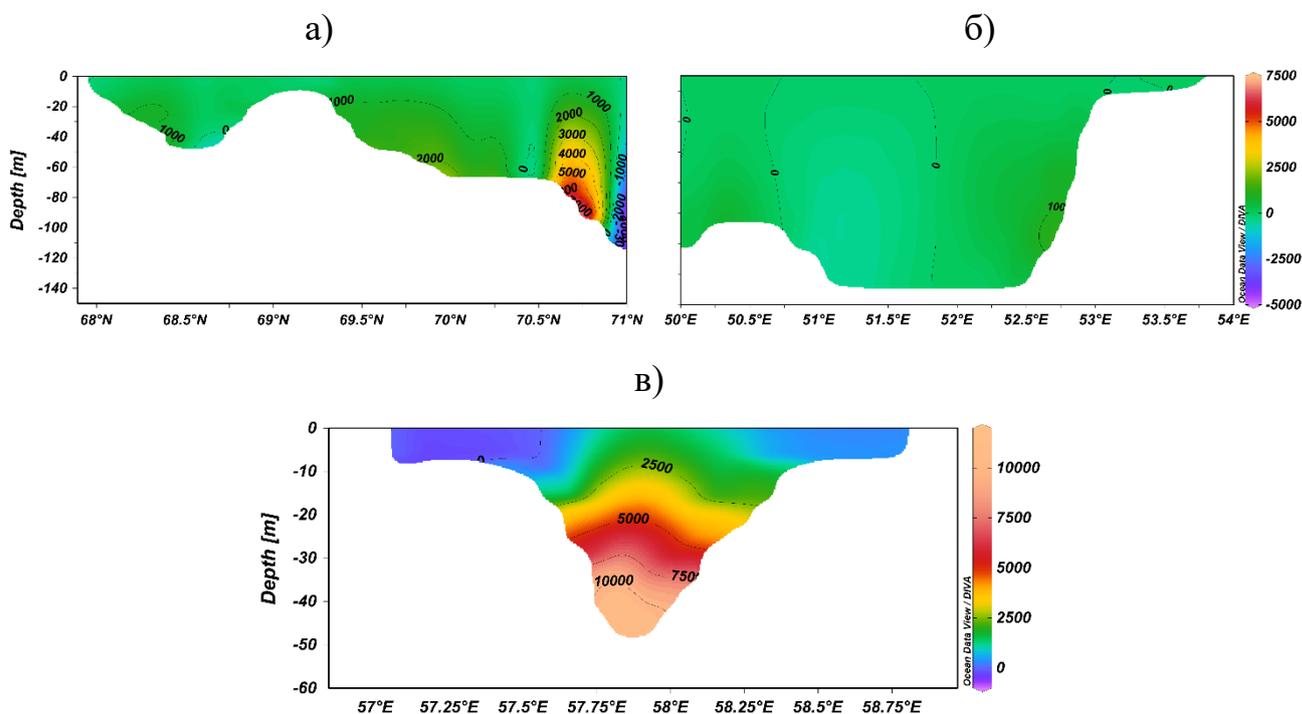


Рисунок 3.4 – Средние многолетние оценки объемного расхода ($\text{м}^3/\text{с}$) в ячейках на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

Распределение потока тепла почти полностью повторяет распределение объемного расхода (рисунок 3.5). На меридиональном разрезе по 50° в.д. среднее многолетнее значение потока тепла равно 10,53 ГВт. Максимальный приход наблюдается в придонном слое в северной части разреза ($70.5-70.75^{\circ}$ с.ш.) и составляет 73,16 ГВт. У дна на широте $69.75-70^{\circ}$ с.ш. также отмечается повышенный, относительно других областей разреза, приток тепла (около 20 ГВт). На широте 71° наблюдается поворот течения, происходит отток тепла величиной 22,72 ГВт. На широтном разрезе по 71° с.ш. среднее многолетнее значение потока тепла равно 0,46 ГВт. Максимальные значения входящего потока тепла наблюдаются в центральной части ($51-51.5^{\circ}$ в.д.) разреза 2,12 ГВт. Максимальный отток отмечается на склоне Новой Земли и составляет 4,93 ГВт.

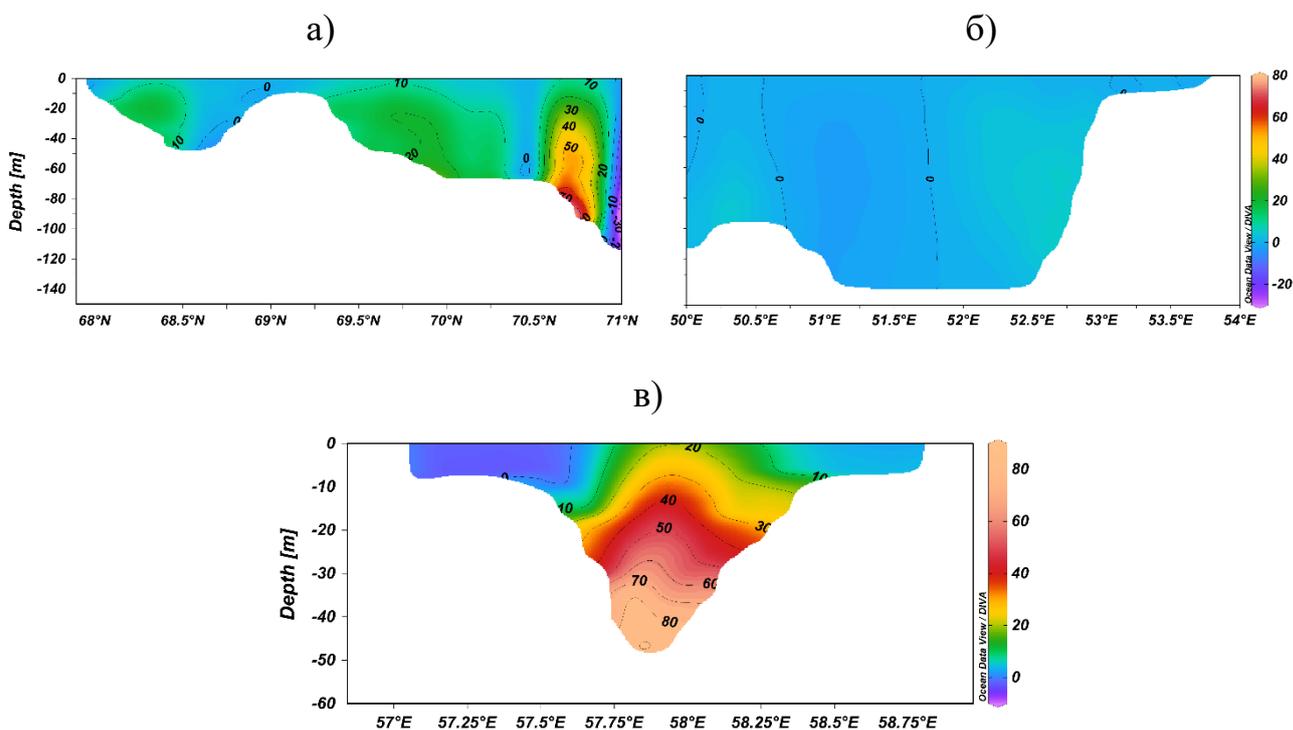


Рисунок 3.5 – Средние многолетние оценки потока тепла (ГВт) в ячейках на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

На разрезе через Карские Ворота среднее многолетнее значение потока тепла составляет 18,12 ГВт. Максимальный отток тепла в самой глубоководной

части разреза от 20 м до дна составляет более 50 ГВт (максимальное значение 89,92 ГВт). На материковом шельфе в восточной части разреза поток минимален (около 10 ГВт). На шельфе Новой Земли отмечается противотечение из Карского моря в Баренцево с величиной потока тепла 2,84 ГВт.

Распределение потока соли почти полностью повторяет распределение объемного расхода (рисунок 3.6).

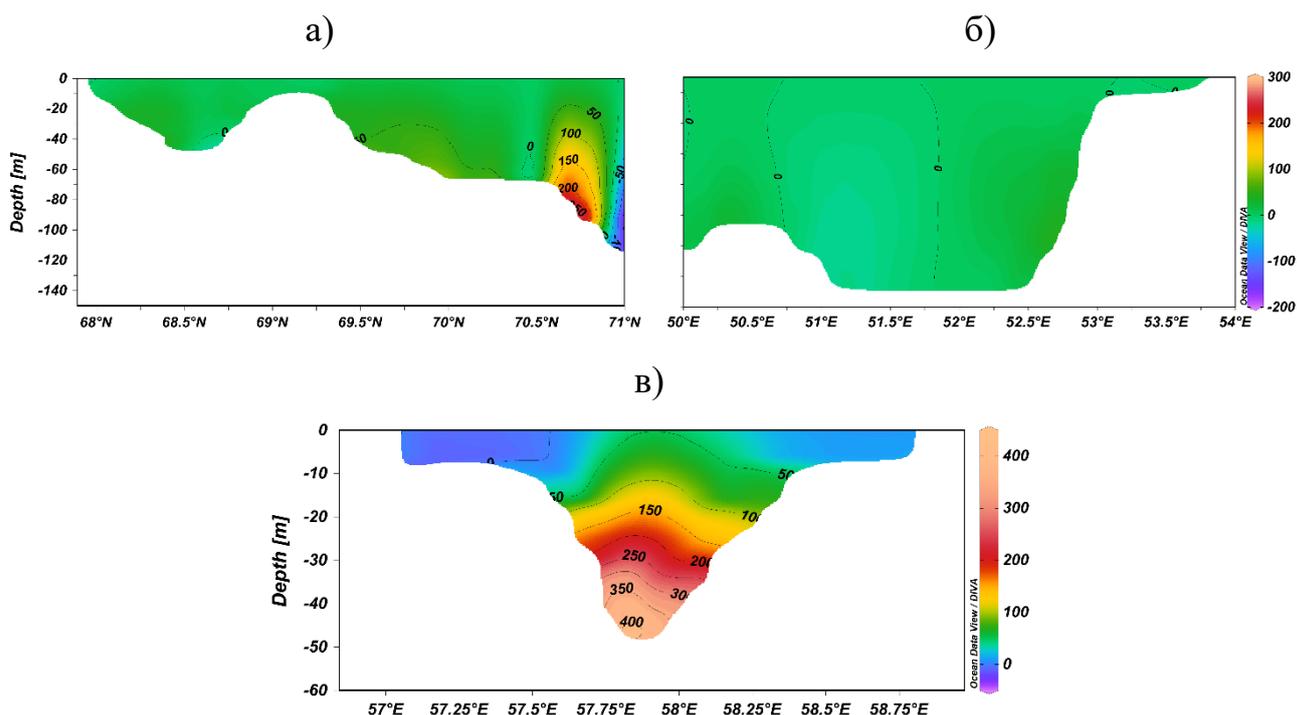


Рисунок 3.6 – Средние многолетние оценки потока соли (т/с) в ячейках на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

На меридиональном разрезе по 50° в.д. среднее многолетнее значение потока соли равно 23,97 т/с. Максимальный приход наблюдается в придонном слое в северной части разреза ($70.5-70.75^{\circ}$ с.ш.) и составляет 250,51 т/с. На широте 71° наблюдается поворот течения, происходит отток соли величиной 178,13 т/с. На широтном разрезе по 71° с.ш. среднее многолетнее значение потока соли равно 1,62 т/с. Максимальные значения входящего потока соли наблюдаются в центральной части ($51-51.5^{\circ}$ в.д.) разреза 17,01 т/с.

Максимальный отток отмечается на склоне Новой Земли и составляет 41,97 т/с. На разрезе через Карские Ворота среднее многолетнее значение потока соли составляет 60,85 т/с. Максимальный отток соли в самой глубоководной части разреза от 20 м до дна составляет более 150 т/с (максимальное значение 407,16 т/с). На материковом шельфе в восточной части разреза поток минимален (около 50 т/с). На шельфе Новой Земли отмечается противотечение из Карского моря в Баренцево с величиной потока соли 8,71 т/с.

Уровень моря – положение свободной поверхности Мирового океана, измеряемое по отвесной линии относительно некоторого уровня отсчета. В данном случае за ноль принята поверхность геоида. В целом по всему Печорскому морю наблюдается пониженный, относительно среднего уровня Мирового океана, уровень моря (рисунок 3.7), который примерно отражает рельеф дна.

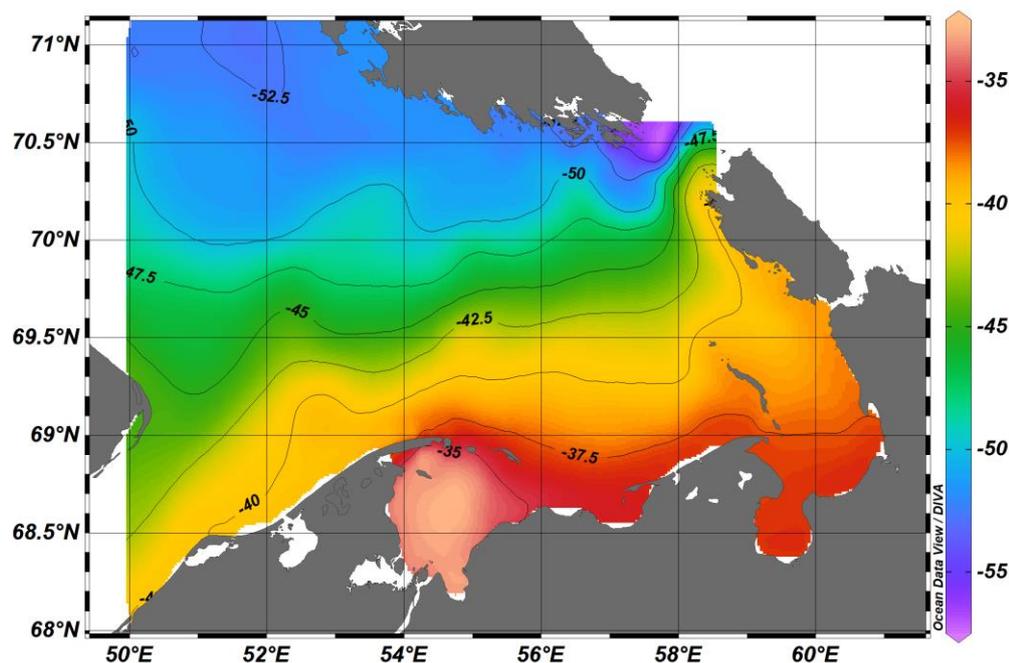


Рисунок 3.7 – Среднее многолетнее распределение значений уровня моря (см)

Величина отклонения составляет от -57 до -33 см, среднее многолетнее значение составляет -44 см. Отмечается увеличение уровня моря с севера на юг. Низший уровень со значением более 50 см наблюдается в районе Новой Земли

в северной части моря. Наивысший уровень поверхности с отклонением менее 40 см в шельфовой зоне на юго-востоке моря. В Печорской губе отклонение уровня наименьшее (33-35 см) из-за влияния стока р. Печора.

Общее количество осадков – накопленные жидкие и твердые атмосферные осадки, выпадающие на поверхность Земли за сутки. Параметр представляет собой сумму крупномасштабных и конвективных осадков. Используемый в работе параметр не включает туман, росу или осадки, которые испаряются в атмосфере до того, как они попадают на поверхность Земли. Величина осадков на всей акватории Печорского моря преобладает над испарением (рисунок 3.8).

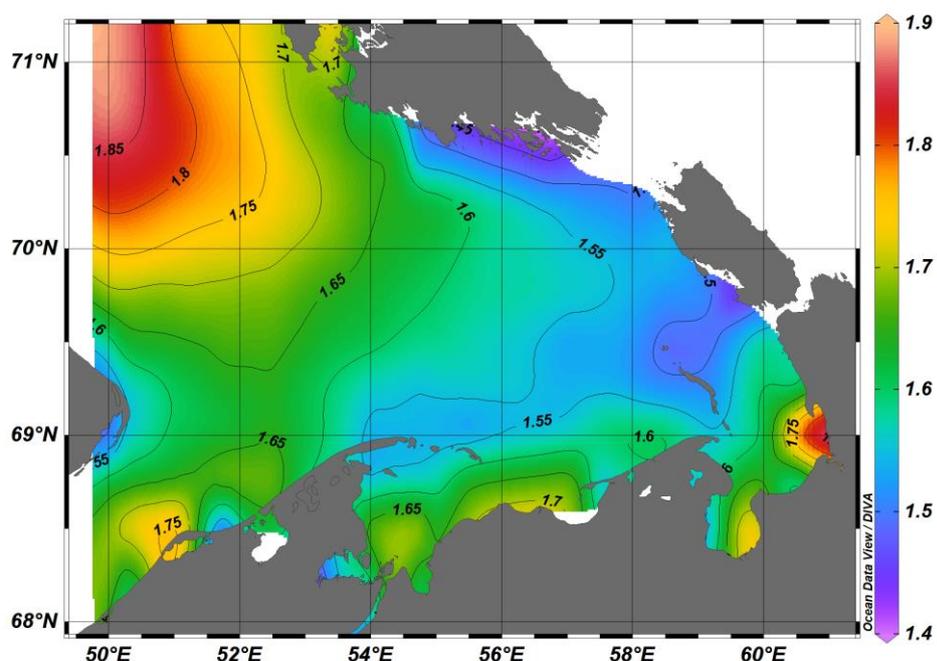


Рисунок 3.8 – Среднее многолетнее распределение осадков (мм/сут)

Количество осадков изменяется в пределах от 1,44 до 1,88 мм/сут, среднее многолетнее значение равно 1,63 мм/сут. Основное количество осадков (более 1,7 мм с максимумом 1,88 мм) выпадает над открытой северо-западной частью моря. Повышенный уровень осадков также наблюдается в Печорской и Перевозной губе (от 1,6 до 1,8 мм). Минимальная величина осадков в

центральной и северо-восточной частях моря (от Новой Земли до о. Вайгач), значения здесь менее 1,55 мм.

Испарение – накопленное количество воды, испарившееся с поверхности Земли за сутки. Над всем Печорским морем значения испарения отрицательные (рисунок 3.9), что говорит о преобладании процесса испарения воды с поверхности над процессом конденсации. Величина испарения снижается (по модулю) с северо-запада на юго-восток. Диапазон изменения составляет от 0,45 до 1,46 мм/сут. Максимальное испарение (более 1 мм/сут) в открытой северо-западной части Печорского моря, а минимальное (0,45-0,6 мм/сут) вдоль материка – в Печорской и Перевозной губе.

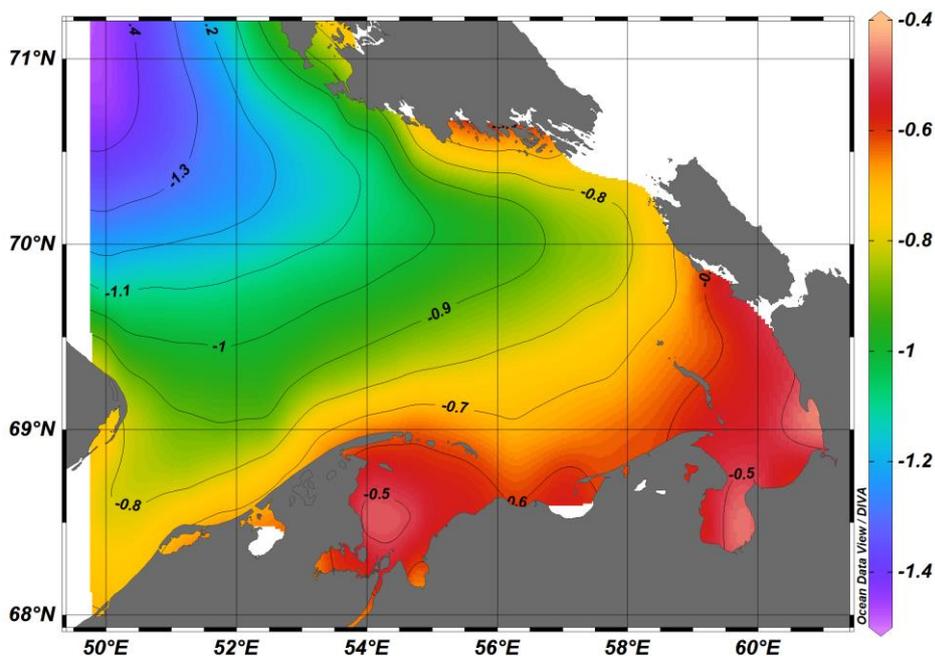


Рисунок 3.9 – Среднее многолетнее распределение испарения (мм/сут)

Теплообмен с атмосферой – процесс переноса тепла из одной среды в другую. В качестве составляющих теплообмена использовались скрытый и явный турбулентные потоки, коротковолновое и длинноволновое излучения.

Скрытый турбулентный поток тепла – это передача скрытого тепла, возникающего в результате изменений фаз воды, таких как испарение или конденсация, между поверхностью Земли и атмосферой под воздействием

турбулентного движения воздуха. Отрицательные значения на всей акватории моря показывают, что поток направлен снизу вверх. Распределение затрат тепла на испарение повторяет распределение величины испарения. Для Печорского моря характерно снижение скрытого турбулентного потока с северо-запада на юго-восток (рисунок 3.10 (а)). Скрытый турбулентный поток тепла изменяется от 13,27 до 42,21 Вт. Среднее многолетнее значение (по модулю) составляет 25,60 Вт. Максимальные затраты тепла на испарение наблюдаются в открытой северо-западной части моря и достигают более 40 Вт. Минимальные значения (менее 18,50 Вт) на юго-востоке вдоль материка от Печорской губы до пр. Югорский Шар.

Явный турбулентный поток тепла – передача тепла между поверхностью Земли и атмосферой в результате турбулентного движения воздуха (но исключая любую передачу тепла в результате конденсации или испарения). Величина ощутимого теплового потока определяется разницей в температуре между поверхностью и вышележащей атмосферой, скоростью ветра и шероховатостью поверхности. Отрицательные значения показывают, что поток направлен снизу вверх, а вдоль материка наблюдаются положительные значения. Явный турбулентный поток снижается с северо-запада на юго-восток (рисунок 3.10 (б)). Явный турбулентный поток тепла изменяется от 0,58 до -36,88 Вт. Среднее многолетнее значение (по модулю) составляет 18,77 Вт. Максимальная передача тепла (более 30 Вт) от поверхности моря наблюдается в открытой его части. Вдоль материковой части отмечается прием тепла морем с величиной явного потока тепла от 0 до 0,58 Вт.

Солнечная радиация, приходящая на поверхность (коротковолновое излучение) – это количество солнечного излучения, которое достигает горизонтальной плоскости на поверхности Земли (как прямого, так и рассеянного) за вычетом количества, отраженного земной поверхностью (которое определяется альбедо). Количество солнечной радиации снижается с северо-запада на юг и восток (рисунок 3.10 (в)). Величина коротковолнового излучения изменяется от 54,81 до 70,23 Вт. Среднее многолетнее значение

составляет 65,12 Вт. Максимальное количество солнечной радиации, достигающей поверхности моря, отмечается в открытой части между Новой Землей и о. Колгуев (более 68,5 Вт). Минимальный приход солнечной радиации наблюдается вдоль берегов от Карских Ворот до Печорской губы (менее 60,5 Вт).

Тепловое излучение с поверхности (длинноволновое или земное излучение) – относится к излучению, испускаемому атмосферой, облаками и поверхностью Земли. Этот параметр представляет собой разницу между нисходящим и восходящим тепловым излучением на поверхности Земли. Отрицательные значения показывают, что поток направлен снизу вверх, восходящее излучение превышает нисходящее на всей акватории Печорского моря. Отмечается снижение теплового излучения с северо-запада на юг (рисунок 3.10 (г)). Величина земного излучения изменяется от 34,62 до 47,49 Вт. Среднее многолетнее значение (по модулю) составляет 41,03 Вт. В открытой части моря значения максимальны и составляют более 42 Вт. Минимальное тепловое излучение с поверхности отмечается вдоль материка, а именно в Печорской и Хайпудырской губе, составляет менее 37 Вт.

В результате суммирования всех четырех компонентов теплового баланса поверхности моря, оказывается, что почти на всей акватории Печорского моря значения суммарного теплообмена с атмосферой отрицательные (рисунок 3.11), поток тепла направлен снизу вверх – море отдает тепло в атмосферу. С северо-запада на юго-восток наблюдается снижение теплоотдачи. Величина теплообмена составляет от 4,88 до -57,1 Вт. Среднее многолетнее значение (по модулю) составляет 20,30 Вт. Максимальная отдача (выше 40 Вт) отмечается на северо-западе моря, куда заходят теплые атлантические воды. Положительные значения теплообмена наблюдаются в Печорской губе (значения изменяются от 0 до 4,88 Вт) и Хайпудырской губе (значения изменяются от 0 до 2,8 Вт). В этих районах происходит получение морем тепла, т.к. данная область большую часть года покрыта льдом. В теплый период море отдает свое тепло на таяние льда.

Концентрация морского льда (рассчитанная с учетом летнего периода)

– площадь, занятая морским льдом, по отношению к общей рассматриваемой площади. Концентрация морского льда в Печорском море увеличивается с северо-запада на юго-восток в пределах от 0,11 до 0,56 (рисунок 3.12).

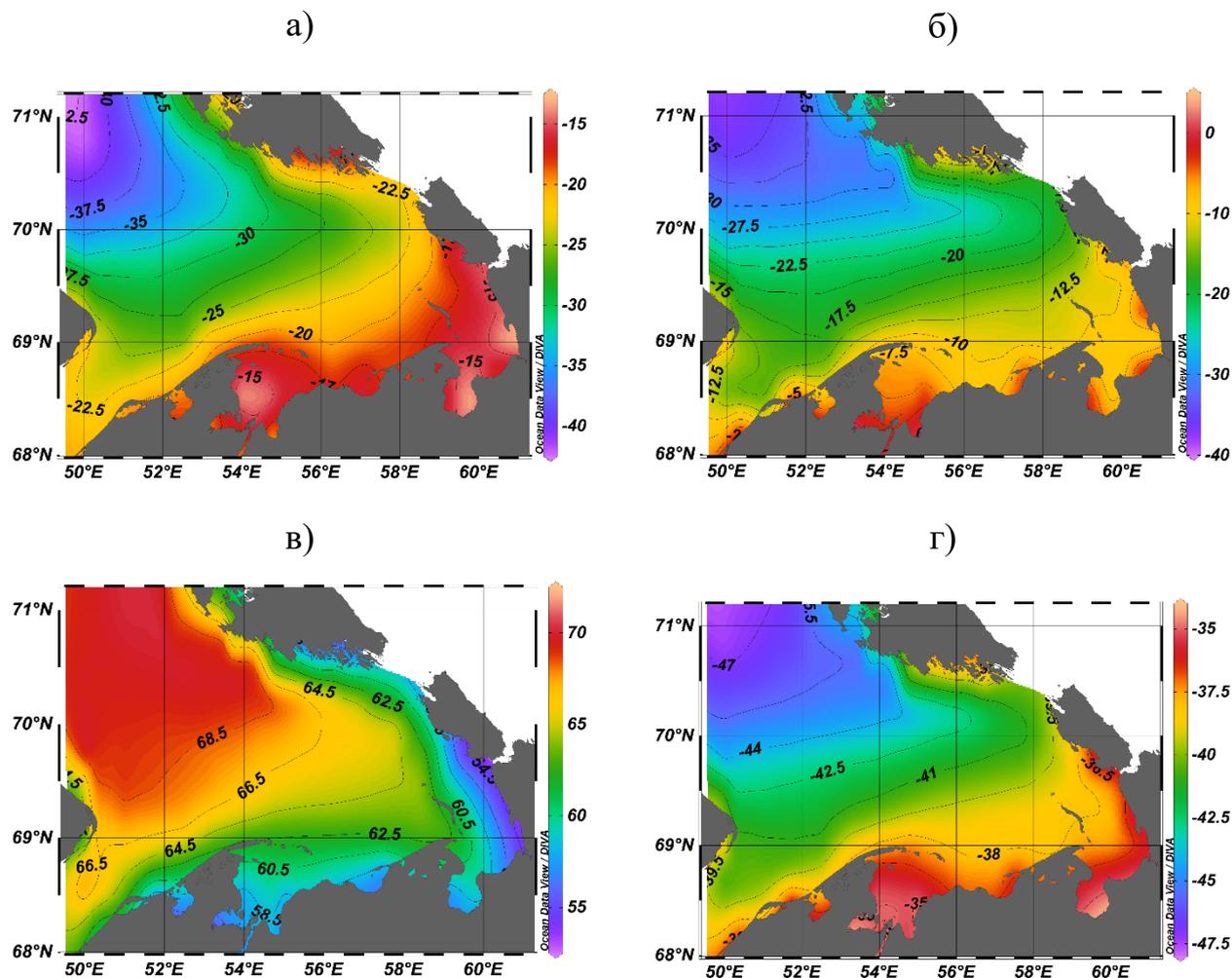


Рисунок 3.10 – Среднее многолетнее распределение составляющих теплообмена с атмосферой (Вт): скрытый турбулентный поток тепла (а), явный турбулентный поток тепла (б), солнечная радиация, приходящая на поверхность (в), тепловое излучение с поверхности (г)

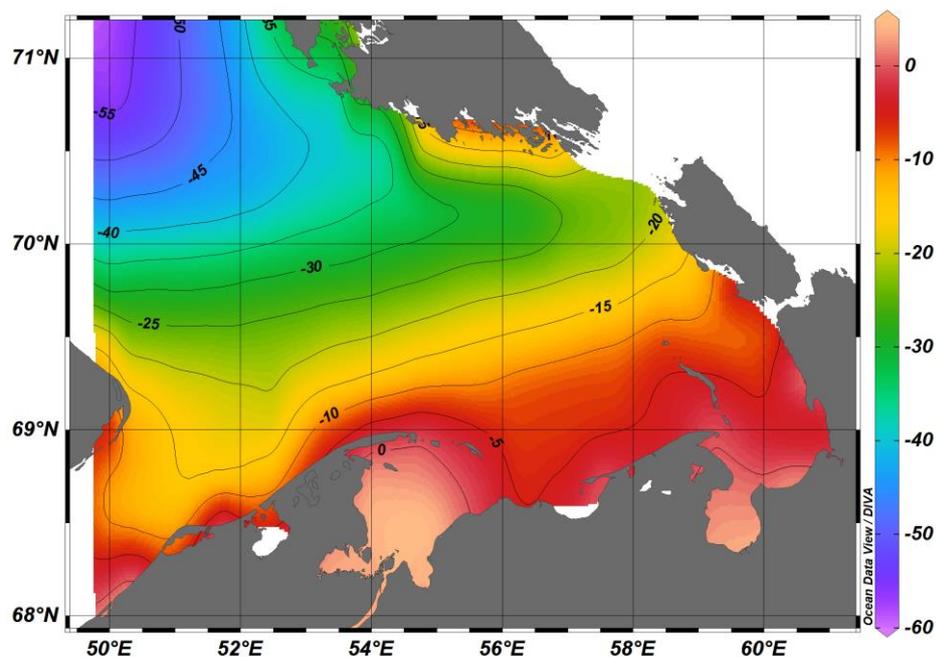


Рисунок 3.11 – Среднее многолетнее распределение значений суммарного теплообмена с атмосферой (Вт)

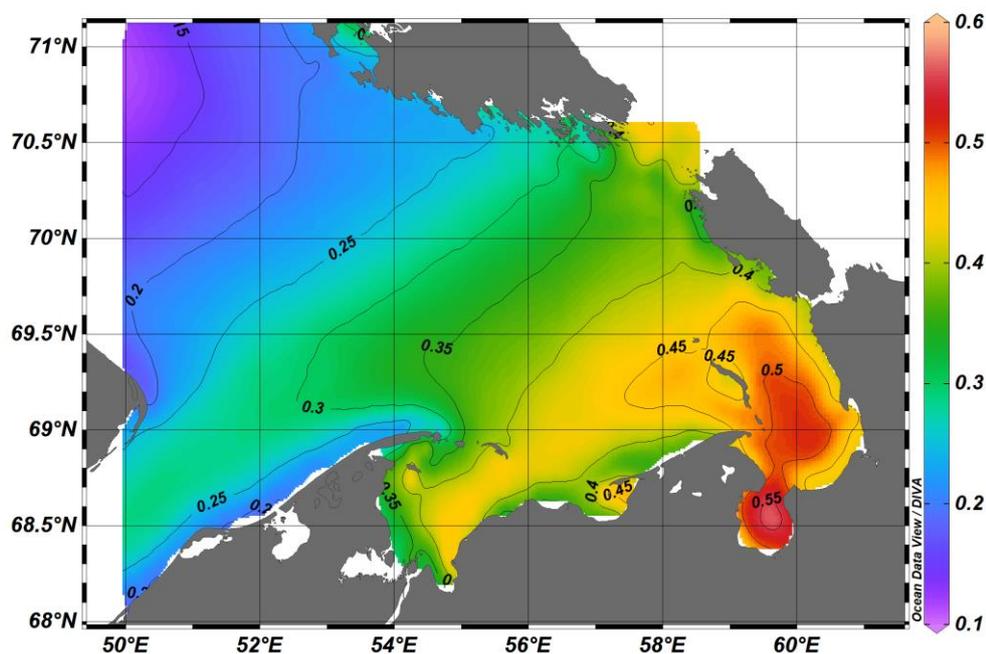


Рисунок 3.12 – Среднее многолетнее распределение концентрации льда

Среднее многолетнее значение концентрации льда равно 0,31. Наименьшая концентрация льда (менее 0,25) наблюдается в северо-западной открытой части моря (достигая 0,11) за счет влияния теплых атлантических вод,

и вдоль материка в Поморском проливе. В центральной части Поморского пролива концентрация льда выше, т.к. отмечается приход беломорских льдов. Наибольшее скопление льда (более 0,50) на юго-востоке моря в Перевозной губе, а в Хайпудырской губе достигаются максимальные значения концентрации льда 0,55-0,56. В данную область отходят ветви Печорского течения, приносящие беломорский лед и лед р. Печора. Поступающий порциями лед смерзается, образуя скопления больших торосистых полей [25]. За счет малой глубины в Хайпудырской губе может образовываться припай.

3.2 Водный, тепловой и солевой балансы Печорского моря

Водный и тепловой балансы замыкались по уравнениям (14) и (15) для всего объема моря в указанных границах, а солевой баланс определялся только потоком соли F_s .

Средние многолетние результирующие значения потоков по разрезам (адвекция) составляют (приходящий поток – западная и северная границы, уходящий – Карские Ворота) (рисунок 3.13):

- объемный расход: приход – 0,40 Св; уход – 0,40 Св;
- поток тепла: приход – 5,92 ТВт; уход – 4,09 ТВт;
- поток соли: приход – 13,98 кт/с; уход – 13,75 кт/с.

В многолетнем усреднении основной поток воды и связанные с ним потоки тепла и соли направлены с северо-западного угла региона (Колгуево-Печорское течение) транзитом в Карское море через пролив Карские ворота.

В среднем многолетнем усреднении сумма всех основных компонентов баланса составляет (рисунок 3.14):

- для водного баланса: приход – 0,52 Св, уход – 0,53 Св;
- для теплового баланса: приход – 7,08 ТВт, уход – 7,12 ТВт;
- для солевого баланса: приход – 18,05 кт/с, уход – 17,82 кт/с.

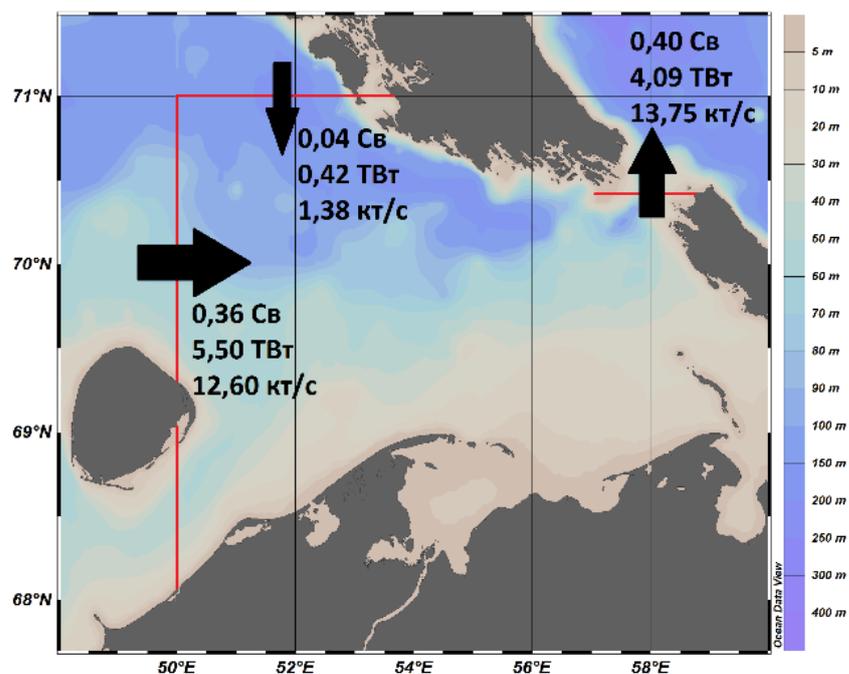


Рисунок 3.13 – Средние многолетние результирующие значения потоков на границах Печорского моря

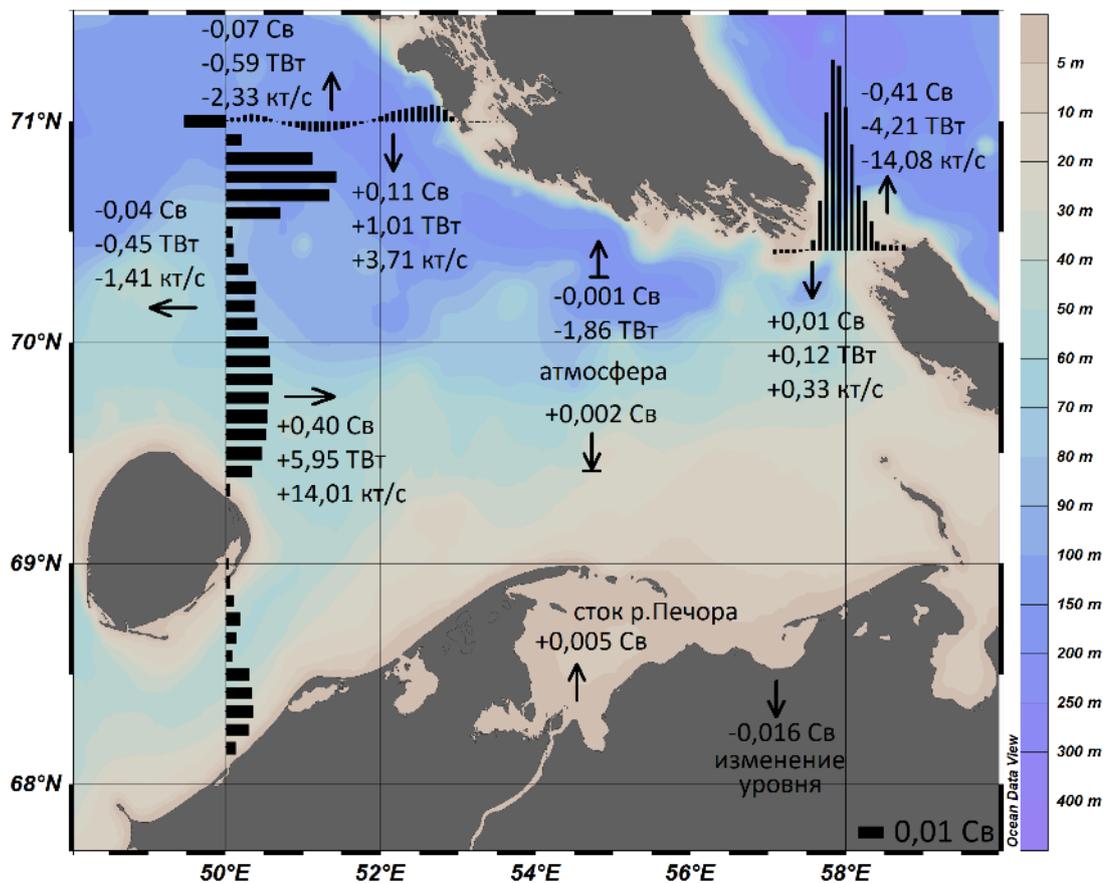


Рисунок 3.14 – Оценки водного (Св), теплового (ТВт) и солевого (кт/с) баланса Печорского моря (стрелками показаны направления потоков)

Для объемного, теплового и солевого балансов были рассчитаны невязки, которые показывают, происходит ли накопление вод, тепла и соли в регионе. В составе компонентов водного, теплового и солевого балансов (таблица 3.1) можно отметить следующее.

В среднем многолетнем усреднении весь приходящий через границы, со стоком р. Печора и осадками объем вод (0,52 Св) практически равен испарению, уходу через границы акватории и изменению объема за счет уровня моря (0,53 Св).

Таблица 3.1 – Основные компоненты баланса в среднем многолетнем усреднении за 1993-2018 гг.

Компоненты баланса	Приход	Уход	Невязка	Доля %
Водный баланс, Св				
Интегральный объемный расход на границах (адвекция)	0,515	0,513		
Сток р. Печора	0,005			
Атмосферные осадки	0,002			
Изменение уровня		0,016		
Испарение		0,001		
Водный баланс	0,52	0,53	-0,01	1,63
Тепловой баланс, ТВт				
Интегральный поток тепла на границах (адвекция)	7,08	5,25		
Теплоотдача в атмосферу		1,86		
Тепловой баланс	7,08	7,12	-0,04	0,56
Солевой баланс, кт/с				
Солевой баланс	18,05	17,82	0,23	1,27

Избыток тепла, поступающего в акваторию Печорского моря с трансформированной северо-атлантической водой вследствие водообмена с соседними регионами (7,08 ТВт), почти полностью компенсируется расходом за счет взаимодействия с атмосферой (7,12 ТВт, где уход через границы 5,25

ТВт и уход в атмосферу 1,86 ТВт). Невязка в тепловом балансе может возникать из-за неучета тепла, приходящего с атмосферными осадками и ледообразованием. Также дополнительным источником тепла в Печорском море является речной сток, но влияние теплового стока р. Печора почти не распространяется дальше Печорской губы.

В балансе соли наблюдается невязка в поступлении за счет адвекции из соседних акваторий (18,05 кт/с) и уходе (17,82 кт/с) через границы Печорского моря. Невязка может быть связана с материковым стоком пресных вод, атмосферными осадками, процессами испарения и ледообразования, которые не учитывались.

В водном балансе по значениям притока и оттока вод за счет адвекции наблюдается накопление вод в регионе. В результате происходит повышение уровня моря.

В тепловом балансе по значениям адвекции течениями наблюдается накопление тепла Печорским морем, которое компенсируется взаимодействием с атмосферой.

Рассчитанная невязка солевого баланса показывает накопление соли в Печорском море, которая отражается в виде превышения притока соли над оттоком. Это может проявляться в увеличении солености моря.

Невязки, полученные в ходе расчетов балансов, малы и составляют для водного баланса – 1,63 %, теплового – 0,56 % и солевого – 1,27 %. Невязка может быть связана с тем, что не учитывался объем вод от приносимого из соседних акваторий льда, его таяния и образования. Но из-за малой величины невязки можно сделать вывод о том, что суммарный объем вод от этих параметров незначителен.

В целом, в регионе все виды балансов выполняются с достаточной точностью. Это может говорить о том, что используемые для расчетов (независимые друг от друга) источники данных достаточно хорошо сбалансированы между собой даже при оценке малого региона и адекватно отражают картину происходящих здесь физических процессов.

3.3 Временная изменчивость компонентов водного, теплового, солевого балансов Печорского моря

3.3.1 Общая временная изменчивость

Для среднегодовых рядов рассматриваемых параметров за период 1993-2018 гг. были определены среднее значение, минимум, максимум, оценены линейные тренды. Рассчитан коэффициент вариации, показывающий степень изменчивости характеристики. Результаты представлены в таблице 3.2.

Для западной границы Печорского моря (меридиональный разрез) выявлено, что средняя многолетняя скорость течения по разрезу равна 2,30 см/с (см. Приложение А рисунок А.1 (а)). Размах вариации составляет 1,98 см/с, что превышает 4 величины СКО и говорит о значительном отклонении в 1998 году, когда значение скорости снизилось до 0,85 см/с. Коэффициент вариации при этом указывает на малую изменчивость ряда (18,1 %). Величина линейного тренда, который является значимым, составляет 0,021 см/с за год. Среднегодовые значения скорости течения за период 1993-2018 гг. возрастали. Температура воды на границе (см. Приложение А рисунок А.1 (б)) за рассматриваемый период имеет среднее многолетнее значение равное 1,33 °С. Размах изменчивости ряда составляет 3,31 °С и показывает значительные отклонения в 1998 году, когда температура была минимальна (-0,49 °С), и в 2016 году (2,82 °С) – максимальная за весь период. По величине коэффициента вариации можно сказать, что ряд температуры воды имеет значительную изменчивость (55,7 %).

Таблица 3.2 – Описательные статистики среднегодовых рядов рассматриваемых параметров за 1993-2018 гг. (красным выделены статистически значимые величины линейного тренда ($\alpha = 0,05$) и коэффициенты вариации со значительной изменчивостью ряда ($>33\%$))

		Среднее \pm СКО	Минимум	Максимум	Коэффициент вариации %	Величина линейного тренда, год ⁻¹
разрез по 50 ⁰ в.д.	Скорость течения, см/с	2,30 \pm 0,42	0,85	2,84	18,08	0,021
	Температура воды, °С	1,33 \pm 0,74	-0,49	2,82	55,69	0,066
	Соленость, ‰	34,12 \pm 0,12	33,86	34,32	0,36	0,006
	Расход воды, Св	0,36 \pm 0,07	0,13	0,45	18,10	0,003
	Поток тепла, ТВт	5,50 \pm 1,76	0,56	8,99	32,06	0,147
	Поток соли, кт/с	12,60 \pm 2,29	4,71	15,56	18,22	0,122
разрез по 71 ⁰ с.ш.	Скорость течения, см/с	0,30 \pm 0,19	0,0	0,69	63,69	0,015
	Температура воды, °С	-0,06 \pm 0,42	-0,96	0,83	740,96	0,030
	Соленость, ‰	34,59 \pm 0,13	34,38	34,79	0,37	0,011
	Расход воды, Св	0,04 \pm 0,02	0,00	0,09	63,49	0,002
	Поток тепла, ТВт	0,42 \pm 0,35	-0,49	1,37	83,84	0,031
	Поток соли, кт/с	1,38 \pm 0,88	-0,02	3,17	63,80	0,067
Карские Ворота	Скорость течения, см/с	31,03 \pm 5,29	14,33	40,91	17,05	0,411
	Температура воды, °С	0,55 \pm 0,73	-1,35	2,10	133,20	0,063
	Соленость, ‰	33,60 \pm 0,18	33,34	33,90	0,53	0,017
	Расход воды, Св	0,40 \pm 0,07	0,18	0,53	17,23	0,006
	Поток тепла, ТВт	4,09 \pm 1,73	0,23	7,53	42,28	0,154
	Поток соли, кт/с	13,75 \pm 2,37	6,48	18,16	17,25	0,199
Сток р. Печора, м ³ /с		4878,5 \pm 557,3	3740,0	6280,0	11,42	-15,11
Осадки, мм/сут		1,63 \pm 0,16	1,29	1,90	9,55	0,004
Уровень, см		-44,44 \pm 2,95	-51,26	-37,02	6,63	0,291
Испарение, мм/сут		0,88 \pm 0,19	0,46	1,21	21,99	0,019
Теплоотдача в атмосферу, ТВт		1,86 \pm 0,82	0,68	3,83	44,04	0,067
Концентрация льда, доли		0,21 \pm 0,07	0,09	0,41	33,58	-0,005

Выявлен значимый линейный тренд на увеличение температуры воды величиной $0,066\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Средняя многолетняя соленость воды на западной границе (см. Приложение А рисунок А.1 (в)) составляет $34,12\text{ }‰$. Размах вариации $0,46\text{ }‰$ не превышает 4 СКО, что указывает на малую изменчивость ряда. Величина линейного тренда ряда солености воды составляет $0,006\text{ }‰/\text{год}$, соленость за рассматриваемый период значительно возростала.

На северной границе Печорского моря (широтный разрез) средняя многолетняя скорость течения равна $0,30\text{ см}/\text{с}$ (см. Приложение А рисунок А.2 (а)). Размах изменения значений составляет $0,69\text{ см}/\text{с}$, отклонений не выявлено. Но коэффициент вариации ($63,7\text{ }%$) указывает на значительную изменчивость ряда. Скорость течения изображена в направлении на юг, она значительно уменьшалась с величиной линейного тренда $-0,015\text{ см}/\text{с}$ за год. Течение, направленное на север, возростало. По графику среднегодовых значений температуры воды (см. Приложение А рисунок А.2 (б)) видно, что размах вариации составляет $1,79\text{ }^{\circ}\text{C}$ со средним многолетним значением $-0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значительные отклонения от среднего отмечаются в 1998 году ($-0,96\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в 2016 году ($0,83\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ряд температуры воды имеет значительную изменчивость с коэффициентом вариации $741\text{ }%$. Значимый линейный тренд $0,030\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ показывает увеличение температуры воды в 1993-2018 гг. Средняя многолетняя соленость воды по разрезу за рассматриваемый период равна $34,59\text{ }‰$ (см. Приложение А рисунок А.2 (в)). Изменчивость ряда мала, размах вариации составляет $0,41\text{ }‰$. Соленость воды со временем увеличивалась. Величина линейного тренда, который является значимым, составляет $0,011\text{ }‰/\text{год}$.

В проливе Карские Ворота за 1993-2018 гг. среднее многолетнее значение скорости течения (см. Приложение А рисунок А.3 (а)) равно $31,03\text{ см}/\text{с}$. Размах вариации $26,58\text{ см}/\text{с}$ превышает 4 СКО, что указывает на значительное отклонение. Оно наблюдается в 1998 году, когда скорость течения снизилась до $14,33\text{ см}/\text{с}$. Величина линейного тренда, который является значимым, составляет $0,411\text{ см}/\text{с}$ за год. Скорость течения в проливе Карские Ворота за рассматриваемый период возросла. Температура воды на разрезе через пролив

(см. Приложение А рисунок А.3 (б)) имеет среднее многолетнее значение $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Интервал изменений значений ряда равен $3,45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент вариации для ряда температуры воды в проливе равен $133,2\%$, что говорит о значительной изменчивости значений. Отклонения выявлены в 1998 году ($1,35\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в 2016 году ($2,10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Величина линейного тренда, который является значимым, составляет $0,063\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и указывает на рост температуры воды за 1993-2018 гг. Среднее многолетнее значение солёности воды (см. Приложение А рисунок А.3 (в)) равно $33,60\%$, размах вариации составляет $0,56\%$. Изменчивость ряда мала, значительных отклонений нет. Среднегодовые значения солёности за рассматриваемый период увеличивались. Величина значимого линейного тренда составляет $0,017\text{ }‰/\text{год}$.

По графикам всех трех рассматриваемых разрезов отмечаются аномально низкие значения скорости течения и температуры воды, которая имеет отрицательное значение, в 1998 году. В этот же год наблюдалась максимальная за весь период 1993-2018 гг. концентрация льда. По данным ГМС Нарьян-Мар зима 1998 г. была суровая [9]. Вероятно, этим можно объяснить сильное снижение скорости течения и уменьшение температуры воды.

Сток р. Печора за период 1993-2018 гг. (см. Приложение А рисунок А.4) имеет среднее многолетнее значение $4878\text{ м}^3/\text{с}$. Размах вариации составляет $2540\text{ м}^3/\text{с}$, что превышает 4 СКО. Значительные отклонения выявлены в 2007 году ($6280\text{ м}^3/\text{с}$) и в 2013 году ($3740\text{ м}^3/\text{с}$). За весь рассматриваемый период сток незначительно снижался, величина линейного тренда составляет $-15\text{ м}^3/\text{с}$ за год.

Среднее многолетнее значение уровня Печорского моря равно -44 см (см. Приложение А рисунок А.5). Размах вариации 14 см – больше 4 СКО, что указывает на наличие значительных отклонений в ряду. Низший уровень -51 см наблюдался в 1998 году, а наивысший -37 см в 2018 году. Коэффициент вариации ($6,6\%$) показывает малую изменчивость ряда. За счет адвекции течениями на акватории Печорского моря в период с 1993 по 2018 год происходило накопление вод. Это привело к повышению уровня моря.

Величина линейного тренда, который является значимым, составляет 0,29 см/год.

Количество атмосферных осадков за 1993-2018 гг. (см. Приложение А рисунок А.6) имеет среднее многолетнее значение равное 1,63 мм/сут. Размах вариации 0,61 мм/сут. Значительное отклонение отмечалось в 1998 году и составляло 1,29 мм/сут. Величина линейного тренда, которая отражает значимое увеличение, составляет 0,004 мм/сут за год. Испарение в этот период (см. Приложение А рисунок А.7) имеет размах вариации 0,75 мм/сут и среднее многолетнее равное 0,88 мм/сут. Значительное отклонение также отмечается в 1998 году и составляет 0,46 мм/сут. Испарение значительно возросло с величиной линейного тренда 0,019 мм/сут за год.

Средняя многолетняя величина теплоотдачи за 1993-2018 гг. составляет 1,86 ТВт (см. Приложение А рисунок А.8). Размах вариации 3,14 ТВт, при коэффициенте вариации 44,0 % изменчивость ряда считается значительной. Отклонение более 2 СКО от среднего отмечалось в 2009 году и составляет 3,83 ТВт. На акваторию Печорского моря через границы поступало тепло, которое накапливалось и уходило в атмосферу. Теплоотдача имеет значимый положительный тренд величиной 0,067 ТВт/год.

Значение средней многолетней концентрации льда, рассчитанной с учетом летних месяцев, за 1993-2018 гг. составляет 0,21 (см. Приложение А рисунок А.9). Размах вариации 0,32, коэффициент вариации 33,6 % – изменчивость ряда значительна. Максимальное значение концентрации льда отмечено в 1998 году (0,41). За рассматриваемый период площадь, занятая льдом, уменьшалась. Величина линейного тренда, который является значимым, составляет -0,005 доли площади за год.

3.3.2 Вертикальное распределение оценок трендов в адвекции на границах Печорского моря

Для границ Печорского моря построены вертикальные разрезы с распределением величин тренда скорости течения (рисунок 3.15), температуры (рисунок 3.16), солёности воды (рисунок 3.17).

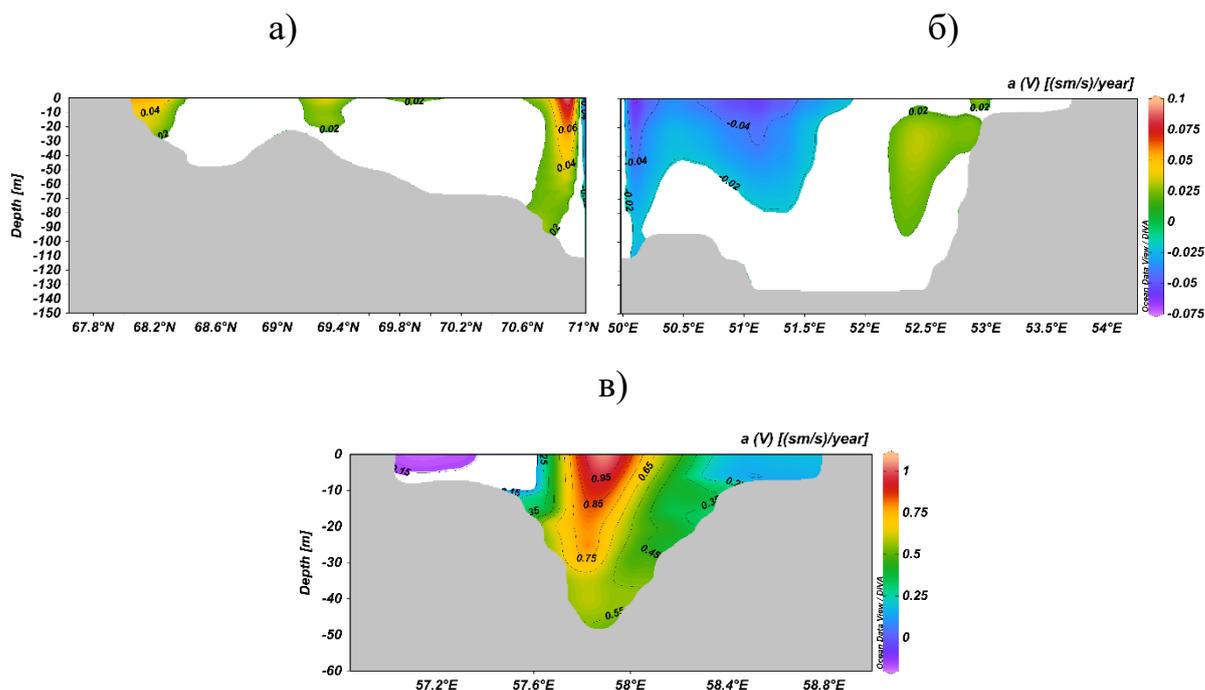


Рисунок 3.15 – Распределение величин тренда скорости течения ($\text{см/с} \cdot \text{год}^{-1}$) (показаны только статистически значимые величины трендов) на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

У скорости течения на меридиональном разрезе (рисунок 3.15 (а)) значимые линейные тренды изменяются от $0,02$ до $0,10$ см/с за год, что говорит об усилении заходящего в акваторию течения. Очаги значимых трендов отмечаются в южной ($68-68,4^{\circ}$ с.ш.) и северной ($70,6-71^{\circ}$ с.ш.) частях разреза, а также севернее о. Колгуев, где рост скорости наименьший (около $0,02$ см/с за год). Сильнее всего значения скорости течения растут на поверхности до глубины 20 м на $70,6-71^{\circ}$ с.ш. ($0,06 - 0,10$ см/с за год). На широтном разрезе (рисунок 3.15 (б)) тренды значимы в основном в западной части и у о. Новая

Земля на глубине 10-70 м. На западе значения тренда отрицательны, течение в северном направлении снизилось с величиной тренда 0,02-0,05 см/с за год. Значит заходящее в Печорское море течение усилилось. У склона Новой Земли выходящий поток увеличивался в среднем на 0,02 см/с за год. В Карских Воротах величина трендов не значима только в области перемены направления течения (рисунок 3.15 (в)). Входящее течение у Новой Земли имеет величину тренда 0,15 см/с за год. Выходящее течение сильнее всего за рассматриваемый период усилилось на поверхности до 10 м в центральной части разреза (более 0,90 см/с за год).

Температура воды на западной границе имеет величину тренда от 0,01 до 0,06 °C/год и уменьшается от поверхности ко дну (рисунок 3.16 (а)).

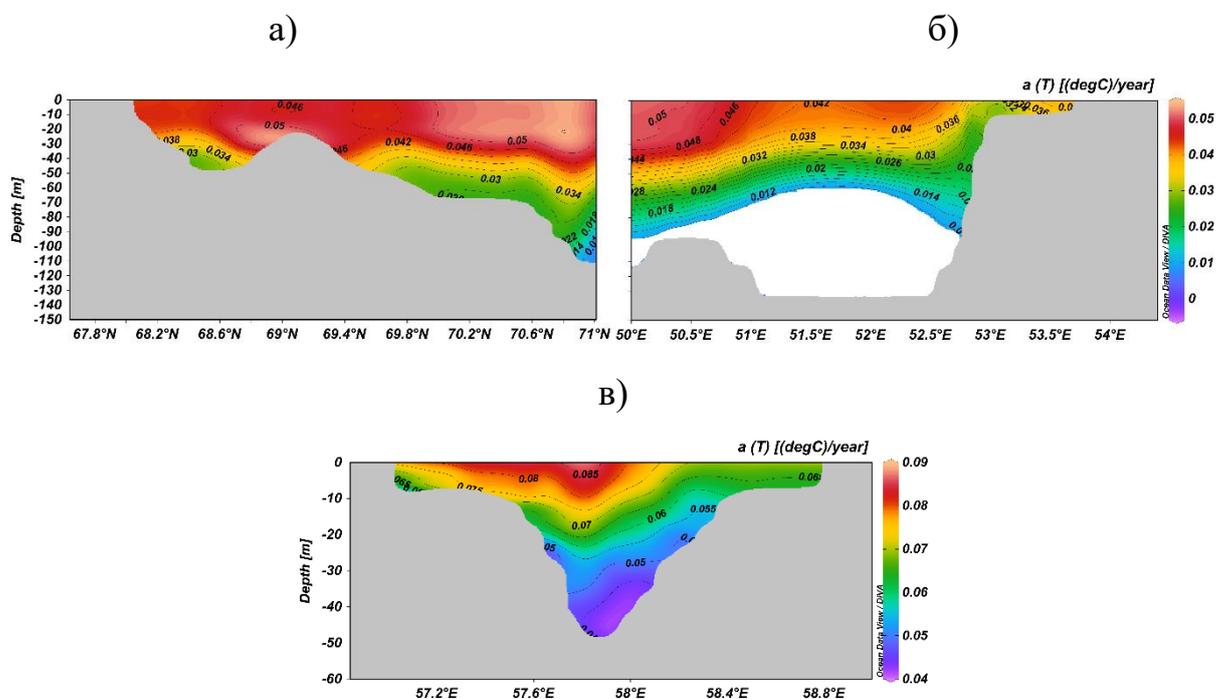


Рисунок 3.16 – Распределение величин тренда температуры воды (°C/год) (показаны только статистически значимые величины трендов) на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

На всем разрезе тренды значимы. Наибольшее увеличение температуры наблюдается в северной части разреза в слое от 0 до 30 м с величиной тренда

более $0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. На широтном разрезе (рисунок 3.16 (б)) незначимые тренды наблюдались в глубоководной части. Наибольшая величина тренда отмечена в западной части разреза и составляет более $0,045 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. С глубиной величина тренда уменьшается. В Карских Воротах тренды значимы по всему разрезу (рисунок 3.16 (в)). Их величина снижается с глубиной от $0,09$ до $0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Максимальная величина тренда $0,08\text{-}0,09 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ на поверхности в центральной части разреза. Минимальный тренд (менее $0,045 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$) в глубоководной части на восточном склоне.

Соленость воды на западной границе (рисунок 3.17 (а)) имеет значимую величину тренда $0,0025\text{-}0,008 \text{ }‰/\text{год}$ в поверхностном слое.

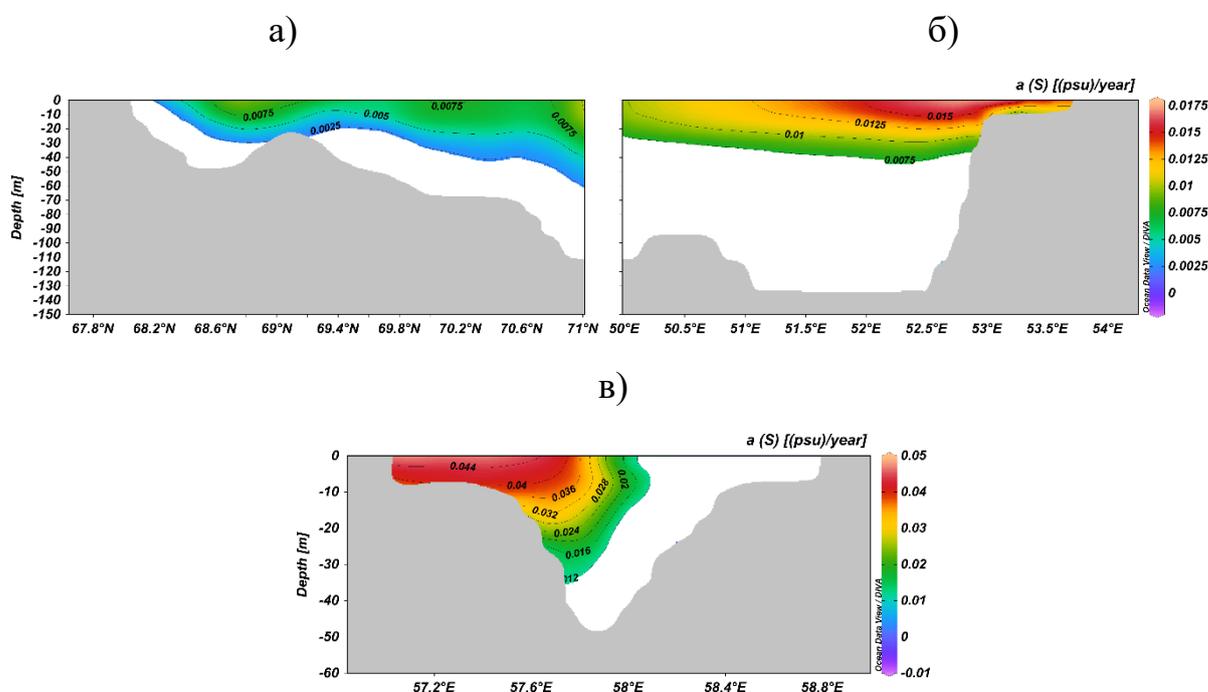


Рисунок 3.17 – Распределение величин тренда солености воды ($\text{‰}/\text{год}$) (показаны только статистически значимые величины трендов) на границах Печорского моря: западная граница по 50° в.д. (а), северная граница по 71° с.ш. (б), Карские Ворота (в)

На северной границе (рисунок 3.17 (б)) значимые тренды также только на поверхности и изменяются от $0,0075$ до $0,0175 \text{ }‰/\text{год}$. Максимальная величина тренда солености в слое 0-5 м в восточной части разреза (более $0,015 \text{ }‰/\text{год}$). На разрезе через Карские Ворота тренды значимы в западной части разреза

(рисунок 3.17 (в)). Величина тренда солености воды снижается с запада на восток от 0,05 до 0,012 ‰/год.

3.3.3 Оценка величины трендов потоков в Печорском море

За рассматриваемый период 1993-2018 гг. объем вод, поступающих со стоком р. Печора, незначительно снизился (величина тренда $-1,5 \cdot 10^{-5}$ Св/год). Количество поступающей с атмосферными осадками воды имеет незначимый положительный тренд ($4,0 \cdot 10^{-6}$ Св/год).

На всей акватории Печорского моря пониженный уровень моря, который со временем растет, поэтому и количество воды, уходящее на подъем уровня до среднего уровня Мирового океана, со временем незначительно растет ($1,0 \cdot 10^{-4}$ Св/год). Уходящий за счет испарения поток воды имеет незначимый положительный тренд ($2,1 \cdot 10^{-5}$ Св/год).

Суммарные значения водного баланса (приток и отток вод) за период с 1993 по 2018 гг. изображены на рисунке 3.18. Среднее многолетнее значение притока составляет $0,52 \pm 0,07$ Св. Размах вариации 0,35 Св превышает 4 СКО, изменчивость ряда по коэффициенту вариации мала (13,9 %). Отмечается значительное отклонение от среднего в 1998 году (0,29 Св), что объясняется снижением скорости течения и малым количеством осадков. Это привело к снижению уровня моря. Величина значимого положительного линейного тренда притока вод составляет 0,003 Св/год. Среднее многолетнее значение оттока равно $0,53 \pm 0,07$ Св. Размах вариации превышает 4 СКО и составляет 0,34 Св. Коэффициент вариации указывает на малую изменчивость ряда (13,5 %). Значительные отклонения выявлены в 1998 году, когда значение оттока было минимально (0,35 Св), и в 2018 году, когда отток максимален (0,68 Св). Отток за рассматриваемый период увеличивался, линейный тренд значим и составляет 0,008 Св/год.

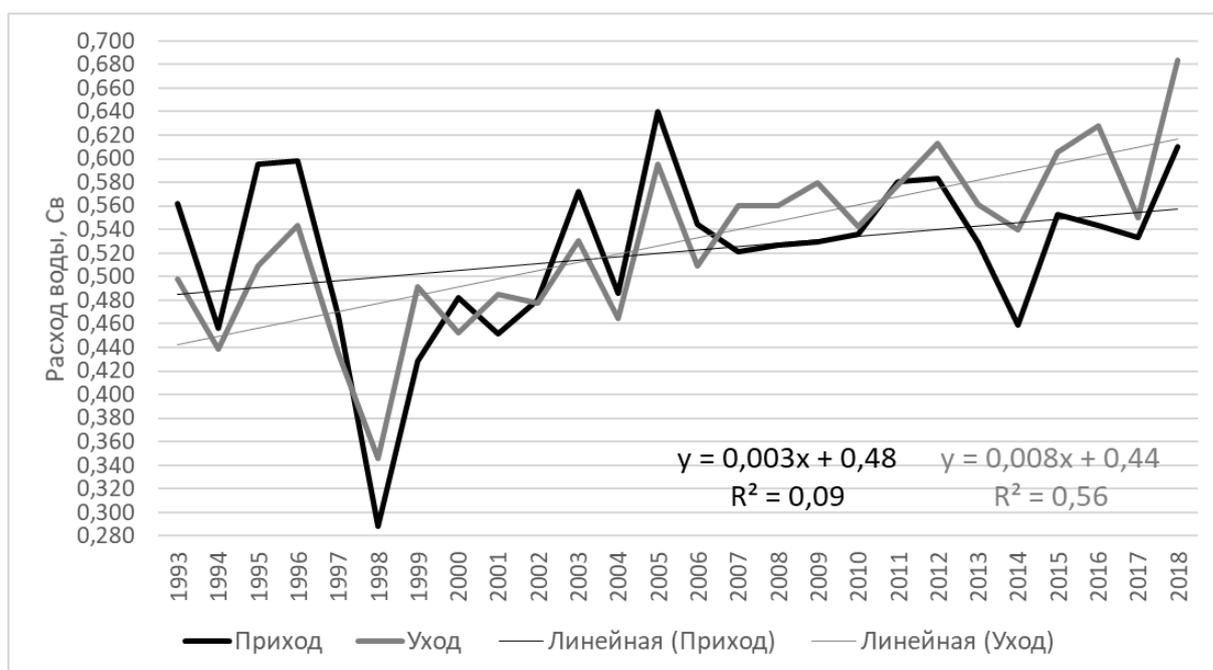


Рисунок 3.18 – Среднегодовые значения суммарного водного баланса и их линейные тренды

Среднегодовые значения теплового баланса за 1993-2018 гг. изображены на рисунке 3.19. Среднее многолетнее значение притока тепла равно $7,08 \pm 1,88$ ТВт. Размах изменчивости ряда $8,83$ ТВт больше 4 СКО. По коэффициенту вариации равному $26,6\%$ видно, что изменчивость ряда невелика. Значительное отклонение, которое может быть обусловлено низкой средней температурой поступающих вод и малой скоростью течения, отмечается в 1998 году и составляет $1,70$ ТВт. Приток тепла за рассматриваемый период значительно увеличился. Величина линейного тренда составляет $0,15$ ТВт/год. Среднее многолетнее значение оттока тепла равно $7,12 \pm 2,52$ ТВт. Размах вариации $10,58$ ТВт, изменчивость ряда велика (коэффициент вариации $35,4\%$). Минимальное значение в 1998 году ($1,70$ ТВт) и максимальное значение в 2018 году ($12,28$ ТВт) являются значительными отклонениями. Величина положительного линейного тренда, который является значимым, составляет $0,26$ ТВт/год. Скачки, возникающие в 2009, 2012, 2016 и 2018 годах, могут возникать из-за повышения в эти годы теплоотдачи в атмосферу.

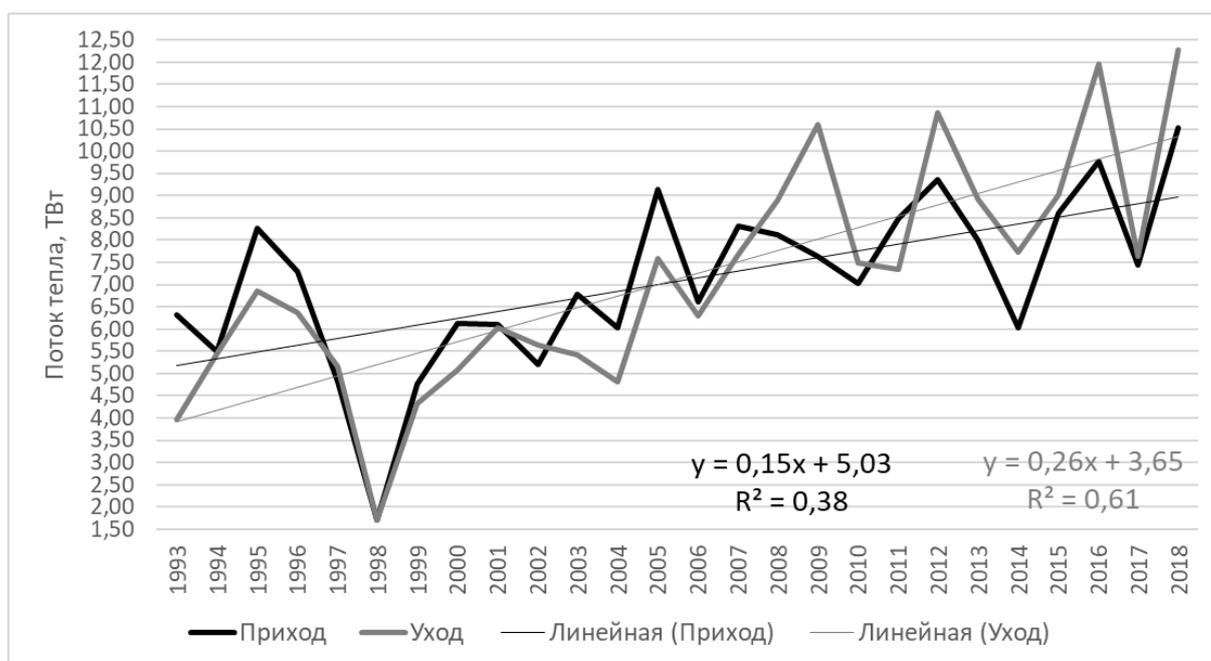


Рисунок 3.19 – Среднегодовые значения суммарного теплового баланса и их линейные тренды

Среднегодовые значения солевого баланса за 1993-2018 гг. изображены на рисунке 3.20. Так как в солевом балансе учитывалась только адвекция, временной ход потоков соли повторяет ход расхода воды. Среднее многолетнее значение притока соли равно $18,05 \pm 2,58$ кт/с. Размах вариации 12,38 кт/с, изменчивость ряда мала (14,3 %). Значительное отклонение выявлено в 1998 году (9,81 кт/с). Приток соли значительно увеличился с величиной тренда 0,11 кт/с за год. Среднее многолетнее значение оттока соли равно $17,82 \pm 2,54$ кт/с. Размах вариации 11,79 кт/с, изменчивость ряда по коэффициенту вариации мала (14,2 %). Наибольшие отклонения наблюдаются в 1998 и 2018 году со значениями 11,44 и 23,24 кт/с соответственно. Отток соли имеет значимый положительный тренд величиной 0,25 кт/с за год.

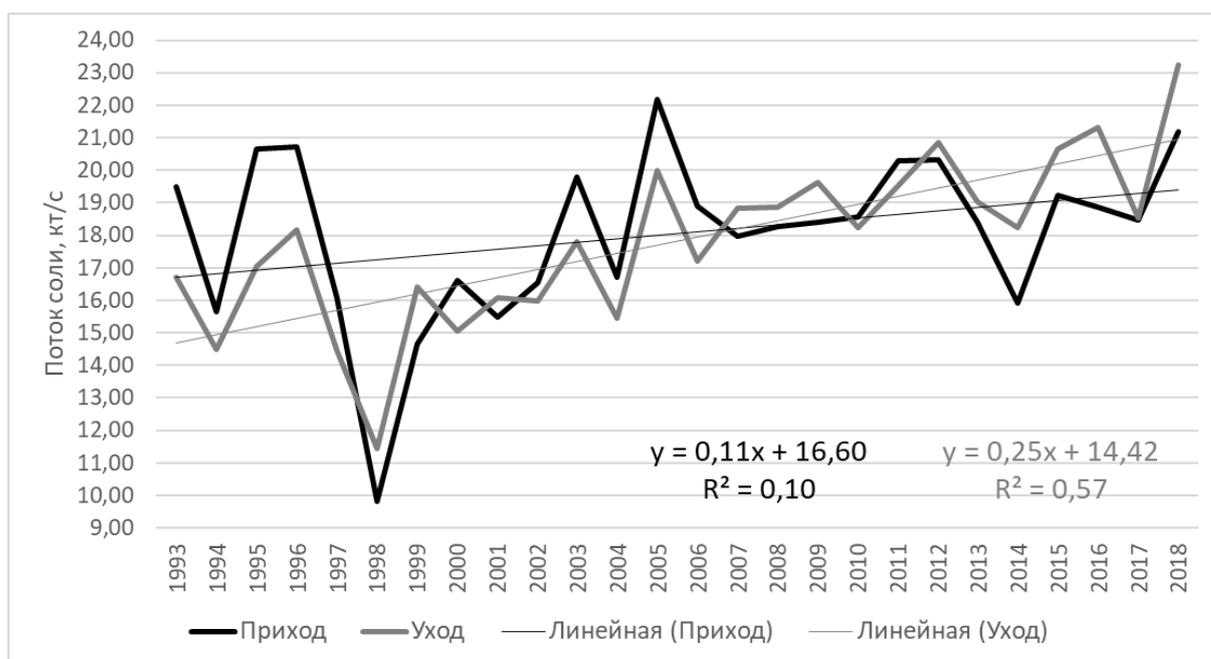


Рисунок 3.20 – Среднегодовые значения суммарного солевого баланса и их линейные тренды

Потоки воды, тепла и соли через вертикальный разрез на западной границе Печорского моря за исследуемый период имеют значимый положительный тренд, что указывает на усиление притока северо-атлантических вод в акваторию. Это отражается и в увеличении солёности, температуры воды, испарения и отдачи тепла в атмосферу.

За 1993-2018 гг. объем теплой и соленой северо-атлантической воды, поступающей в регион через северную часть западной границы с ветвью Колгуево-Печорского течения, увеличивался. Вместе с выявленными значительными трендами потоков тепла и соли в проливе Карские Ворота [26] можно сделать вывод о возрастающем транзите северо-атлантической воды через бассейн Печорского моря в Карское море. Также выявлено, что и течение Литке, несущее вдоль Новой Земли арктические воды из Карского моря, усилилось.

Таблица 3.3 – Тренды среднегодовых значений балансов (красным цветом выделены статистически значимые величины ($\alpha = 0,05$))

Компоненты баланса	Приход	Уход
Величина линейного тренда водного баланса, Св/год		
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) разрез по 50 ⁰ в.д.	0,003	-0,0002
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) разрез по 71 ⁰ с.ш.	-0,0003	0,002
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) Карские Ворота	0,00005	0,0057
Сток р. Печора	-0,00002	-
Атмосферные осадки	0,000004	-
Изменение уровня	-	0,0001
Испарение	-	0,00002
Водный баланс	0,003	0,008
Величина линейного тренда теплового баланса, ТВт/год		
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) разрез по 50 ⁰ в.д.	0,147	0,0007
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) разрез по 71 ⁰ с.ш.	0,0013	0,033
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) Карские Ворота	0,0029	0,156
Теплоотдача в атмосферу	-	0,067
Тепловой баланс	0,15	0,26
Величина линейного тренда солевого баланса, кт/с за год		
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) разрез по 50 ⁰ в.д.	0,114	-0,008
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) разрез по 71 ⁰ с.ш.	-0,009	0,058
Интегральный объемный расход на границах (адвекция) Карские Ворота	0,002	0,201
Солевой баланс	0,11	0,25

Заключение

Таким образом, на основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

В качестве компонентов водного баланса рассматривались: адвекция воды на границах акватории, речной сток, изменение уровня моря, осадки и испарение. В тепловом балансе учитывались адвекция тепла течениями, которая компенсировалась взаимодействием с атмосферой. Солевой баланс составлялся только из адвекции из соседних акваторий.

В среднем многолетнем усреднении сумма всех основных компонентов баланса составляет:

- для водного баланса: приход – 0,52 Св, уход – 0,53 Св;
- для теплового баланса: приход – 7,08 ТВт, уход – 7,12 ТВт;
- для солевого баланса: приход – 18,05 кт/с, уход – 17,82 кт/с.

Главную роль в формировании водного баланса играет адвекция через границы акватории (для притока – 98,7 %, для оттока – 96,8 %). Основной поток вод – Колгуево-Печорское течение, направлен с северо-западного угла акватории транзитом через пролив Карские Ворота в Карское море. Меньший по величине поток заходит в регион через Поморский пролив (Беломорское течение). Вторым по значимости компонентом является колебание уровня моря, которое составляет 3,0 % от общего объема оттока. Сток р. Печора, атмосферные осадки и испарение вносят наименьший вклад в баланс (менее 1,0 % каждая из составляющих). В тепловом балансе основной вклад вносит адвекция тепла течениями (приток – 100 %, отток – 73,8 %). Теплоотдача в атмосферу составляет 26,2 % от всего уходящего из акватории тепла. Баланс соли на акватории полностью формируется адвекцией вод на границах.

Невязки в расчете балансов составляют для водного баланса – 1,63 %, теплового – 0,56 % и солевого – 1,27 %. Малая величина невязок показывает, что используемых компонентов достаточно для описания водного, теплового и солевого балансов на акватории Печорского моря. На акватории все виды

балансов выполняются с достаточной точностью, что говорит о сбалансированности независимых друг от друга источников данных, используемых для расчетов.

За период 1993-2018 гг. объемный расход воды, тепла и соли на акватории Печорского моря имеют значимые положительные тренды, которые формируются в большей степени адвективными составляющими. В величину суммарных трендов притоков наибольший вклад вносят тренды адвекции на западной границе, а в величину трендов оттока – потоки в Карское море. Наибольшие значения коэффициентов тренда в скорости течения, температуре и солёности воды наблюдаются в поверхностном слое на северо-западе акватории. В проливе Карские Ворота отмечается значительное увеличение температуры и скорости в центральной части в слое 0-10 м, а солёность сильнее растёт в западной части пролива вдоль склона Новой Земли.

Увеличение атлантической воды, поступающей в регион с Колгуево-Печорским течением, вместе с положительными трендами потоков тепла и соли в Карских Воротах указывают на возрастание транзита северо-атлантических вод через бассейн Печорского моря в Карское море. Вместе с этим усилилось и течение Литке, несущее холодные арктические воды в Баренцево море.

Список источников

1. Прищепа О.М., Нефедов Ю.В., Айрапетян М.Г. Углеводородный потенциал акваториального арктического сектора севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции по результатам региональных исследований // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Том 15. № 1. 2020. 7 с. doi: 10.17353/2070-5379/4_2020
2. Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря / под ред. акад. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 153-166. doi:10.29006/978-5-6045110-0-8/(13)
3. Печорское море. Экологический атлас. Санкт-Петербург, 2018. 143 с.
4. Болтунов А. Н., Дубинин М. Ю., Ежов А. Е., Ларионов М. В., Новоселов А. П., Пухова М. А., Фролова Е. А. Районы ограничения антропогенной деятельности: Печорское море. Нефтегазовый комплекс. Мурманск: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 76 с.
5. Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л., Огородов С.А., Тарасов Г.А. Печорское море: прошлое, настоящее, будущее // Океанология. Том 47. № 6. 2007. С. 927-939.
6. Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 260 с.
7. Гидрология Баренцева моря // ГУ "ААНИИ" – URL: http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?sea_code=5§ion=6 (Дата обращения: 20.05.2023)
8. Атлас Арктики / ред. А.Ф. Трешников. М.: Главное управление геодезии и картографии при совмине СССР, 1985. 204 с.
9. Рябченко С.В., Драчкова Л.Н., Евдокимова И.О., Зарубина Л.А., Попкова С.В. Тематический отчет №2 по ледовым условиям Печорского моря // Архангельск: САФУ, 2020. 38 с.

10. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. Москва: изд-во МГУ, 1982. 146 с.
11. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. VI. Баренцево море. Вып. 3. Мурманск, 1984. 273 с.
12. Чеботарев А.И. Общая гидрология (воды суши) / под ред. Л.А. Чепелкиной. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 544 с.
13. Smedsrud L. H. et al. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century // *Rev. of Geophys.* 2022. 36 с. doi:10.1029/2020RG000725
14. Морозов Е. Г. Внутренние волны в проливе Карские ворота // Экосистема Карского моря - новые данные экспедиционных исследований: Материалы научной конференции. Москва, 27–29 мая 2015 года / ред. Флинт М.В. Москва: ООО "АПР", 2015. С. 19-23.
15. Щука С. А., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А., Корж А. О. Структура течений в проливе Карские ворота // Экосистема Карского моря - новые данные экспедиционных исследований: Материалы научной конференции. Москва, 27–29 мая 2015 года / ред. Флинт М.В. Москва: ООО "АПР", 2015. С. 39-45.
16. Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J. L., Semtner A. J. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. 16 p. doi:10.1029/2001JC001039
17. Simonsen K., Haugan P. M. Heat budgets for the Arctic Mediterranean and sea surface heat flux parameterizations for the Nordic Seas // *Journal of Geophysical Research*, 101, 1996. P. 6553–6576. doi:10.1029/95JC03305
18. Akperov M.G., Semenov V.A., Mokhov I.I., Parfenova M.R., Dembitskaya M.A., Bokuchava D.D., Rinke A., Dorn W. The influence of ocean heat transport in the Barents Sea on the regional sea ice and the atmospheric static stability // *Ice and Snow*. 2019. P. 529–538. doi:10.15356/2076-6734-2019-4-438

19. Harms I. H., Karcher M. J. Kara Sea freshwater dispersion and export in the late 1990s // J. Geophys. Res. Vol. 110. 2005. 9 p. doi:10.1029/2004JC002744

20. Дианский Н. А., Фомин В. В., Кабатченко И. М., Грузинов В.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика № 1 (13), 2014. С. 57-73.

21. E.U. Copernicus Marine Service Information, Global Ocean Physics Reanalysis. – URL: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030

22. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). – URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means>

23. Севастьянова Л.Ю. Ледовый режим устьевой области реки Печора. ВКР (магистерская диссертация) РГГМУ. СПб, 2023.

24. Доронин Ю.П. Физика океана. СПб.: Изд. РГГМУ, 2000. 296 с.

25. Лосет С. Сравнение условий окружающей среды некоторых морей северного ледовитого океана / С. Лосет, К. Шхинек, Е. Михаленко, О. Т. Гудместад, П. Страсс, Р. Фредеркинг, Т. Карна // Навигация и гидрография. № 4. 1997. С. 44-45.

26. Гордеева С.М., Дешова Д.В. Перенос воды, тепла и соли в проливе Карские Ворота // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН». Севастополь, 20-24 сентября 2021 г. С. 225-226.

Географическое положение Печорского моря (рисунок 1.1). Источник – URL: https://pandia.ru/text/86/034/images/img1_172.png

Приложение А.

Межгодовой ход компонентов водного, теплового и солевого балансов Печорского моря

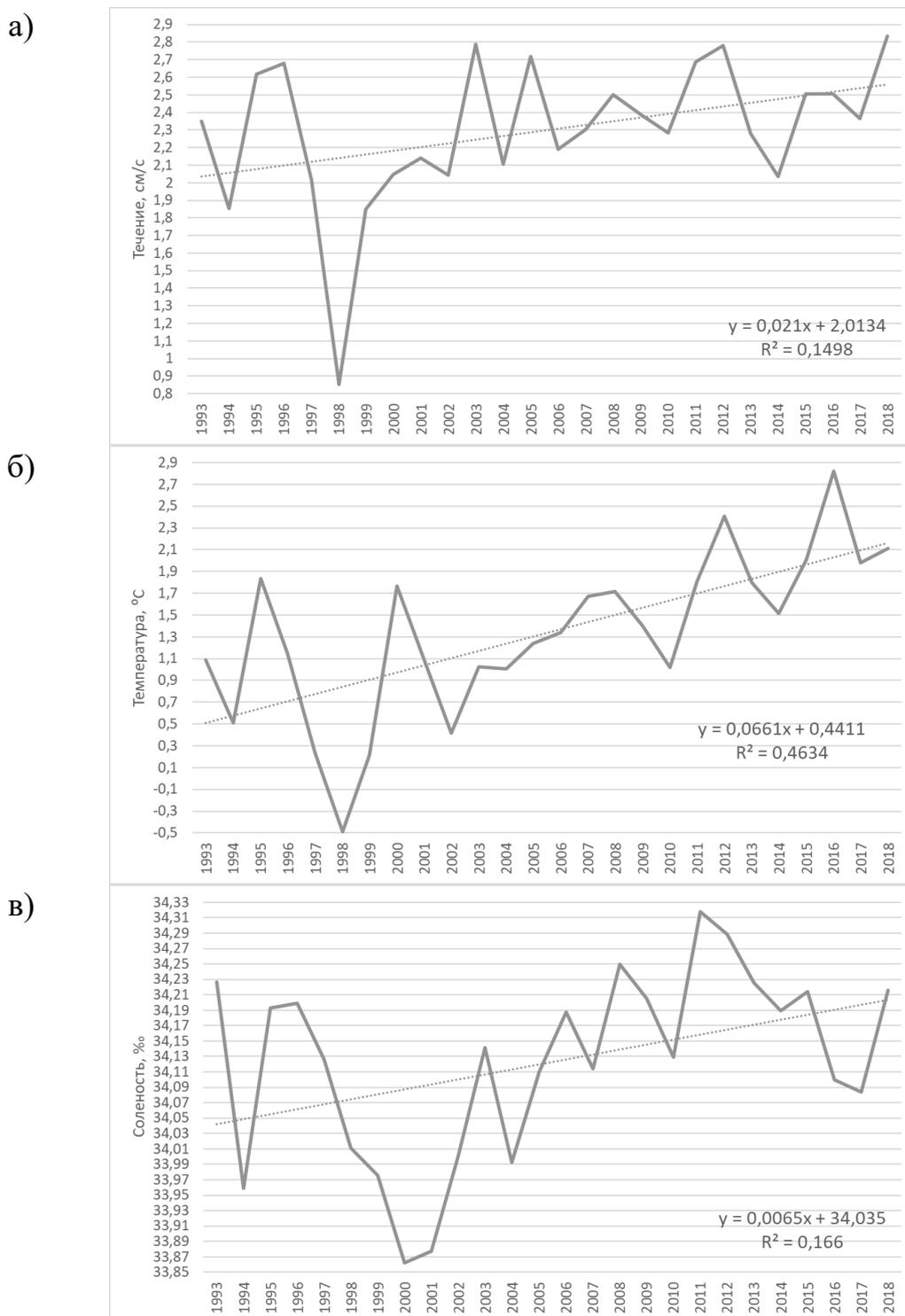


Рисунок А.1 – Среднегодовые значения скорости течения (см/с), температуры (°C) и солености воды (%) по меридиональному разрезу и их линейные тренды с 1993 по 2018 гг.

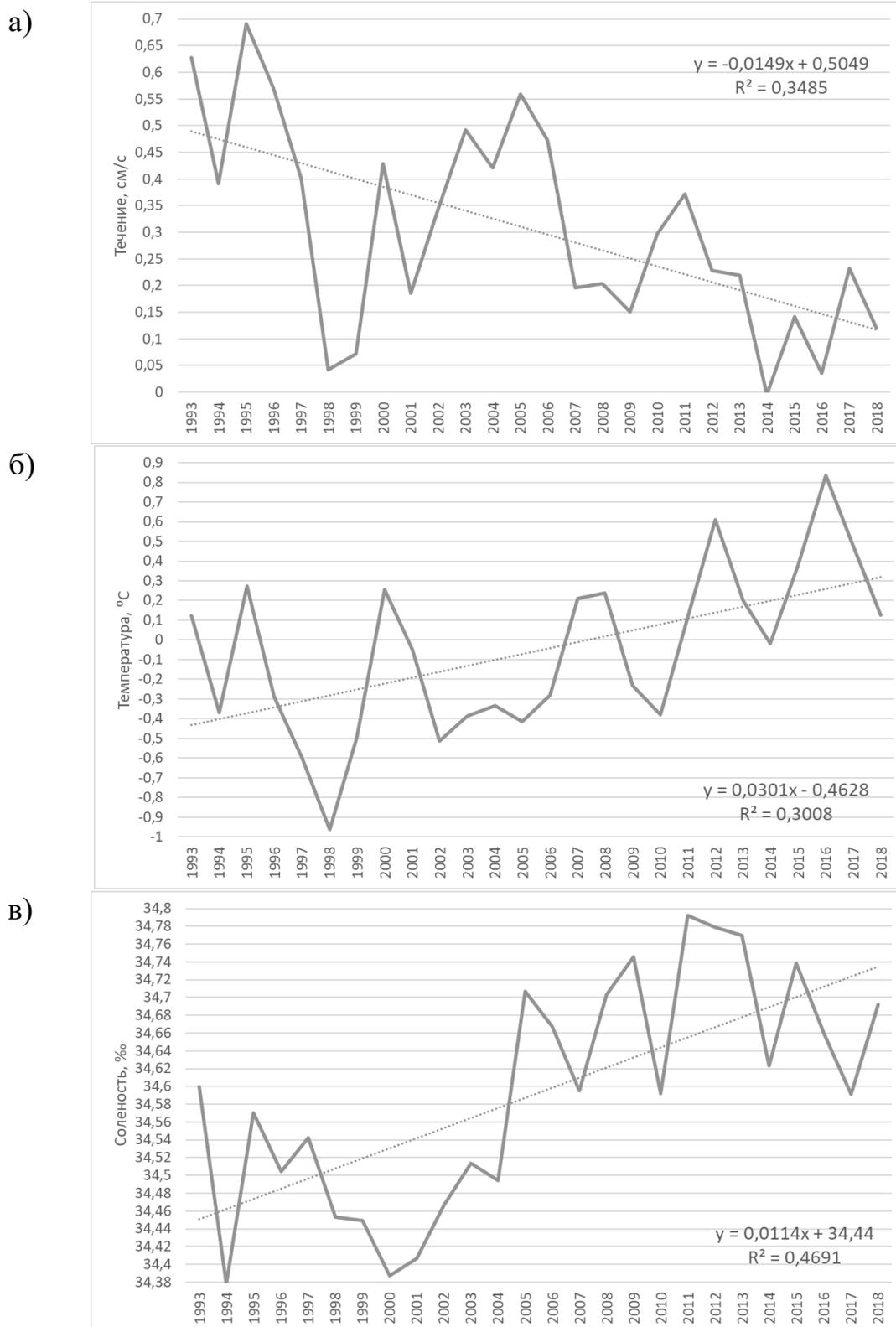
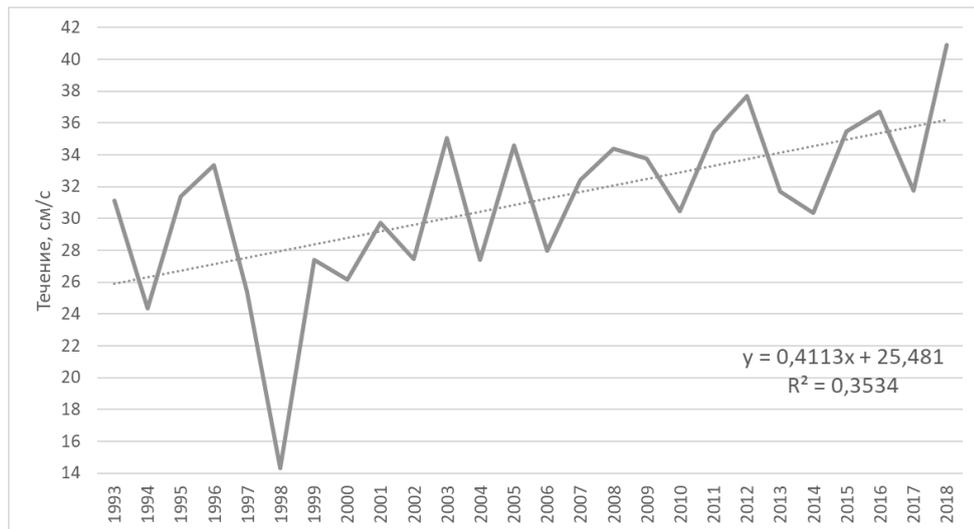


Рисунок А.2 – Среднегодовые значения скорости течения (см/с), температуры (°С) и солёности воды (‰) по широтному разрезу и их линейные тренды с 1993 по 2018 гг.

а)



б)



в)

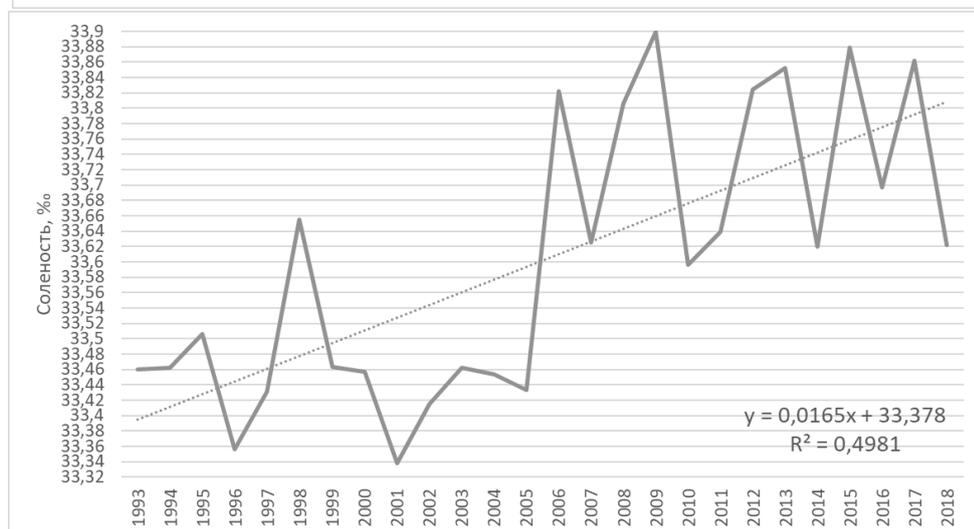


Рисунок А.3 – Среднегодовые значения скорости течения (см/с), температуры (°С) и солености воды (‰) по проливу Карские Ворота и их линейные тренды с 1993 по 2018 гг.

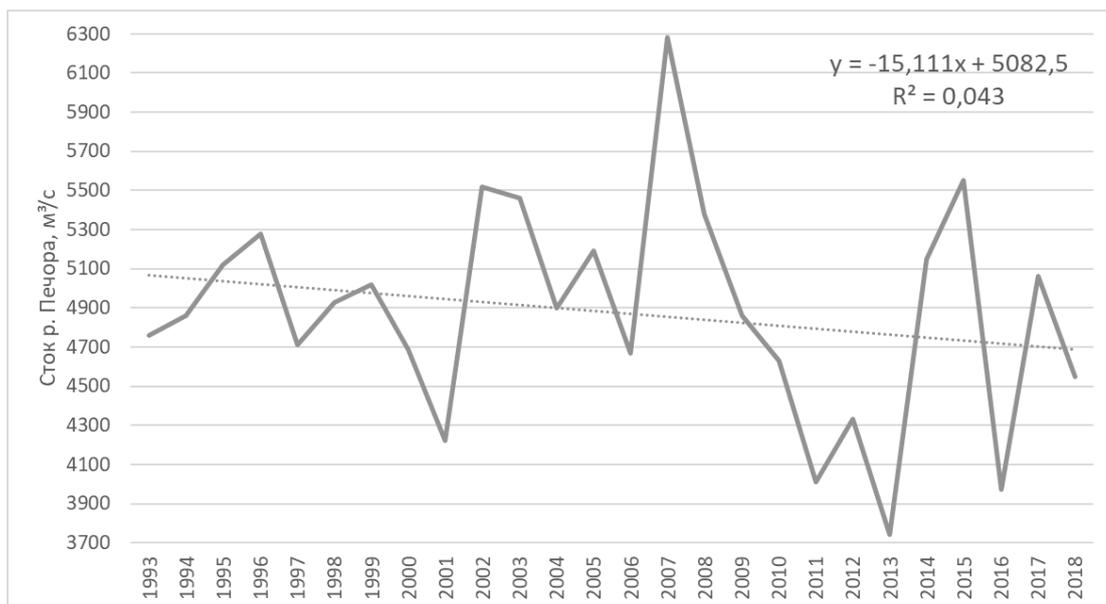


Рисунок А.4 – Среднегодовые значения стока р. Печора (м³/с) с линейным трендом за период с 1993 по 2018 гг.



Рисунок А.5 – Среднегодовые значения уровня моря (см) с линейным трендом за период с 1993 по 2018 гг.

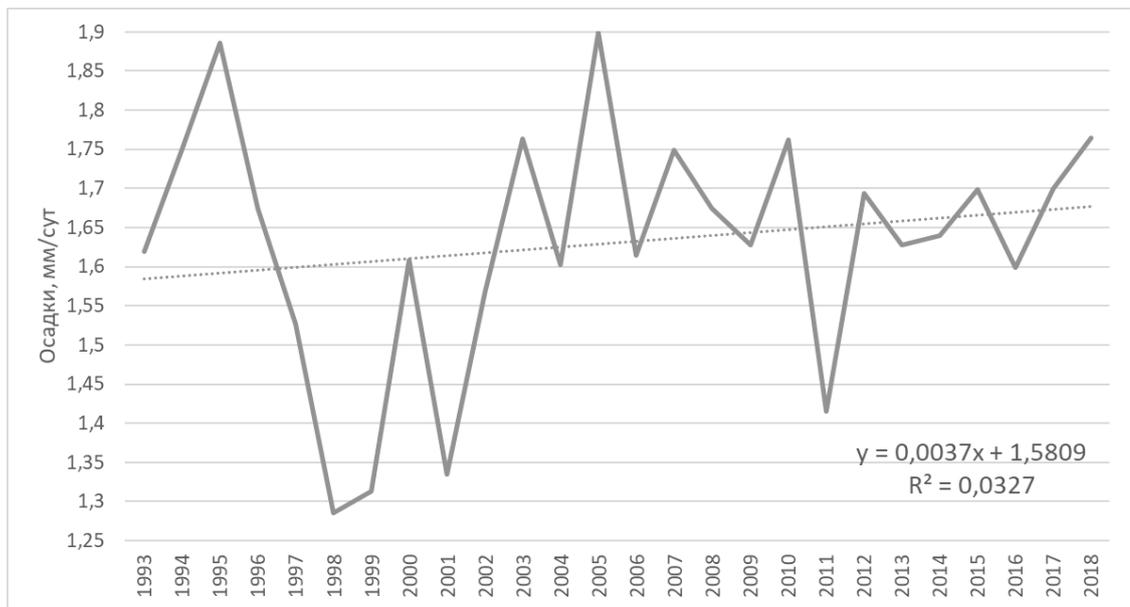


Рисунок А.6 – Среднегодовые значения атмосферных осадков (мм/сут) с линейным трендом за период с 1993 по 2018 гг.

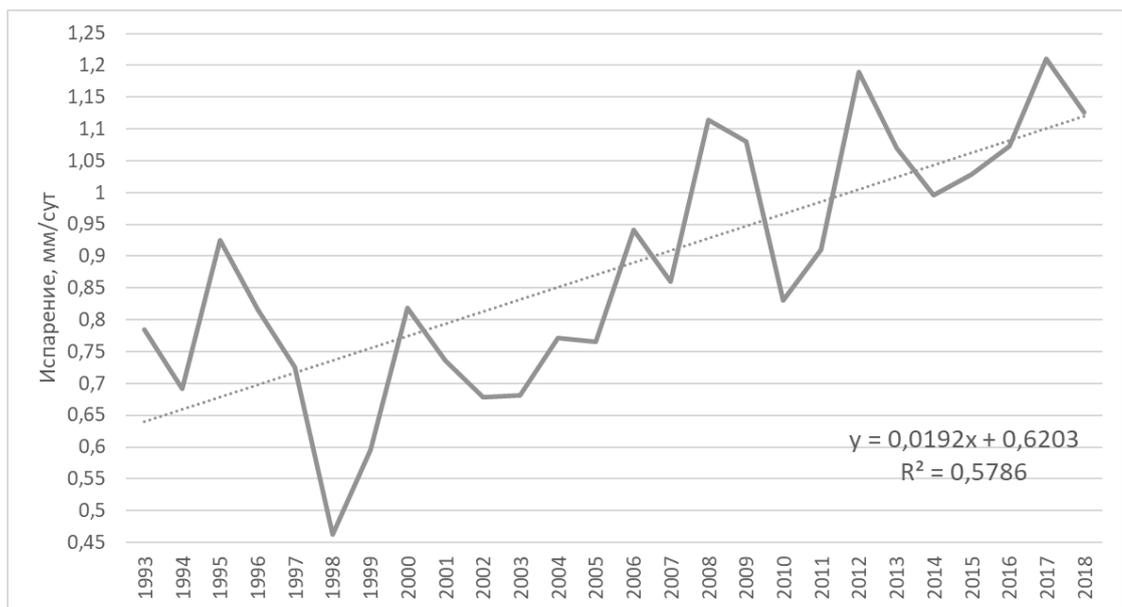


Рисунок А.7 – Среднегодовые значения испарения (мм/сут) с линейным трендом за период с 1993 по 2018 гг.

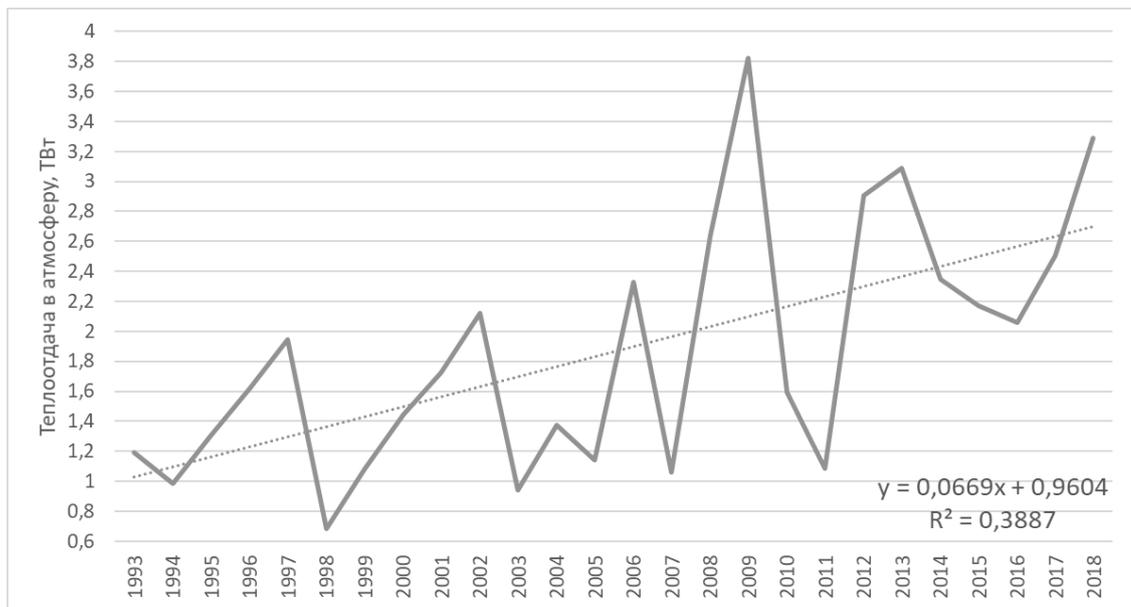


Рисунок А.8 – Среднегодовые значения теплоотдачи в атмосферу (ТВт) с линейным трендом за период с 1993 по 2018 гг.

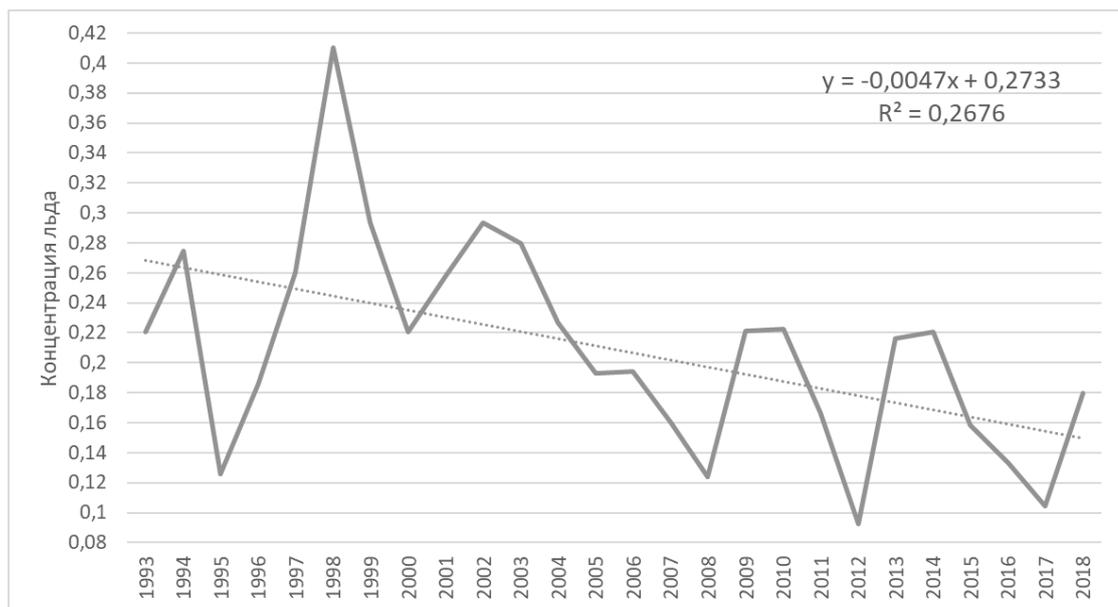


Рисунок А.9 – Среднегодовые значения концентрации льда с линейным трендом за период с 1993 по 2018 гг.