



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления  
прибрежными зонами

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Климатическая оценка динамики берингоморских вод в Чукотском  
море»

Исполнитель: Филипсон Валерий Антонович

Руководитель: к.г.н., доцент, Гордеева Светлана Михайловна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«04» 06 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1 Физико-географическое описание района исследования.....	5
1.1 Географическое описание района .....	5
1.2 Береговая линия.....	6
1.3 Морфология дна .....	6
1.4 Особенности климата .....	8
1.5 Речной сток .....	10
1.6 Уровень моря.....	10
1.7 Течения.....	11
1.8 Гидрологический режим.....	12
1.9 Ледовый режим .....	13
1.10 Обзор исследований по потокам воды, тепла и соли в исследуемом регионе.....	13
Глава 2 Методы исследования и исходные данные .....	15
2.1 Описание исходных данных, использованных в работе.....	15
2.2 Расчетные формулы и методы исследования.....	16
Глава 3 Климатическая оценка потоков воды, тепла и соли в Чукотском море	18
3.1 Многолетнее усредненное состояние гидрофизических характеристик .....	18
3.2 Многолетнее усредненное состояние потоков воды, тепла и соли .....	21
3.3 Оценка распределения линейного тренда для скорости течения, температуры и солености воды .....	25
3.4 Оценка распределения линейного тренда для объемного расхода воды, потоков тепла и соли.....	28
3.5 Оценка распределения линейного тренда для расхода воды, потоков тепла и соли после годового сглаживания .....	31
3.6 Оценка линейного тренда интегральных по разрезу объемного расхода, потоков тепла и соли.....	35
Список источников .....	43

## ВВЕДЕНИЕ

Северный Ледовитый океан (СЛО) – активно изучаемая и наиболее развивающаяся часть прибрежных территорий Российской Федерации. В районе СЛО проходит Северный морской путь, который является наиболее кратким маршрутом между Европейской частью России и Дальним Востоком. Воздействие суровых климатических условий оказывает существенное влияние на проведение контактных измерений в морях, входящих в состав Северного Ледовитого океана.

Чукотское море, являющееся самым восточным морем, омывающим берега России, играет важную роль в прохождении судов на Дальний Восток. Практически круглый год акватория моря покрыта льдом, что затрудняет доскональное исследование гидрометеорологических характеристик контактным методом.

Также Чукотское море является одной из самых продуктивных океанических экосистем в мире. Шельфовое морское дно и сезонный ледяной покров обеспечивают питательные вещества и нетронутую среду обитания для множества организмов, от моржей до ледяных тюленей, китов, миллионов морских птиц [1].

Потоки воды, тепла и соли, направленные из Тихого океана в Северный Ледовитый океан оказывают значительное влияние на ледяной покров в Чукотском море.

Целью работы является оценка и анализ динамики берингоморских вод в арктическом бассейне, а именно в Чукотском море.

Задачи, которые требовалось выполнить для достижения поставленной цели:

1. Совершить обзор научных исследований по теме потоков воды, тепла и соли в исследуемом регионе;
2. Выполнить оценку межгодового распределения гидрофизических характеристик на разрезе в Чукотском море;

3. Провести анализ среднего многолетнего состояния потоков воды, тепла и соли в исследуемом регионе;
4. Оценить межгодовую изменчивость меридиональной скорости течения, температуры и солености;
5. Оценить межгодовую изменчивость расхода воды, потоков тепла и соли.

Результаты работы были апробированы на конференциях и конкурсах.

1. Конференция Студенческого Научного Общества (СНО) Института гидрологии и океанологии РГГМУ (Санкт-Петербург, 20-21 апреля 2023);
2. XII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование» (Москва, 23-27 октября 2024);
3. Конкурс научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии (Санкт-Петербург, 26 декабря 2023, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Санкт-Петербургский филиал);
4. Конференция Студенческого Научного Общества (СНО) Института гидрологии и океанологии РГГМУ (Санкт-Петербург, 19 апреля 2024);
5. Межрегиональная молодежная научно-практическая конференция «Моря и воды суши в теории и практике» (Санкт-Петербург, 19 апреля 2024);
6. Конкурс научных проектов «Гидрометеорологические исследования в акватории Северного морского пути» (Санкт-Петербург, 2024);
7. VIII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Владивосток, 13-17 мая 2024).

# Глава 1 Физико-географическое описание района исследования

## 1.1 Географическое описание района

Чукотское море – материковое окраинное море Северного Ледовитого океана (рисунок 1.1).

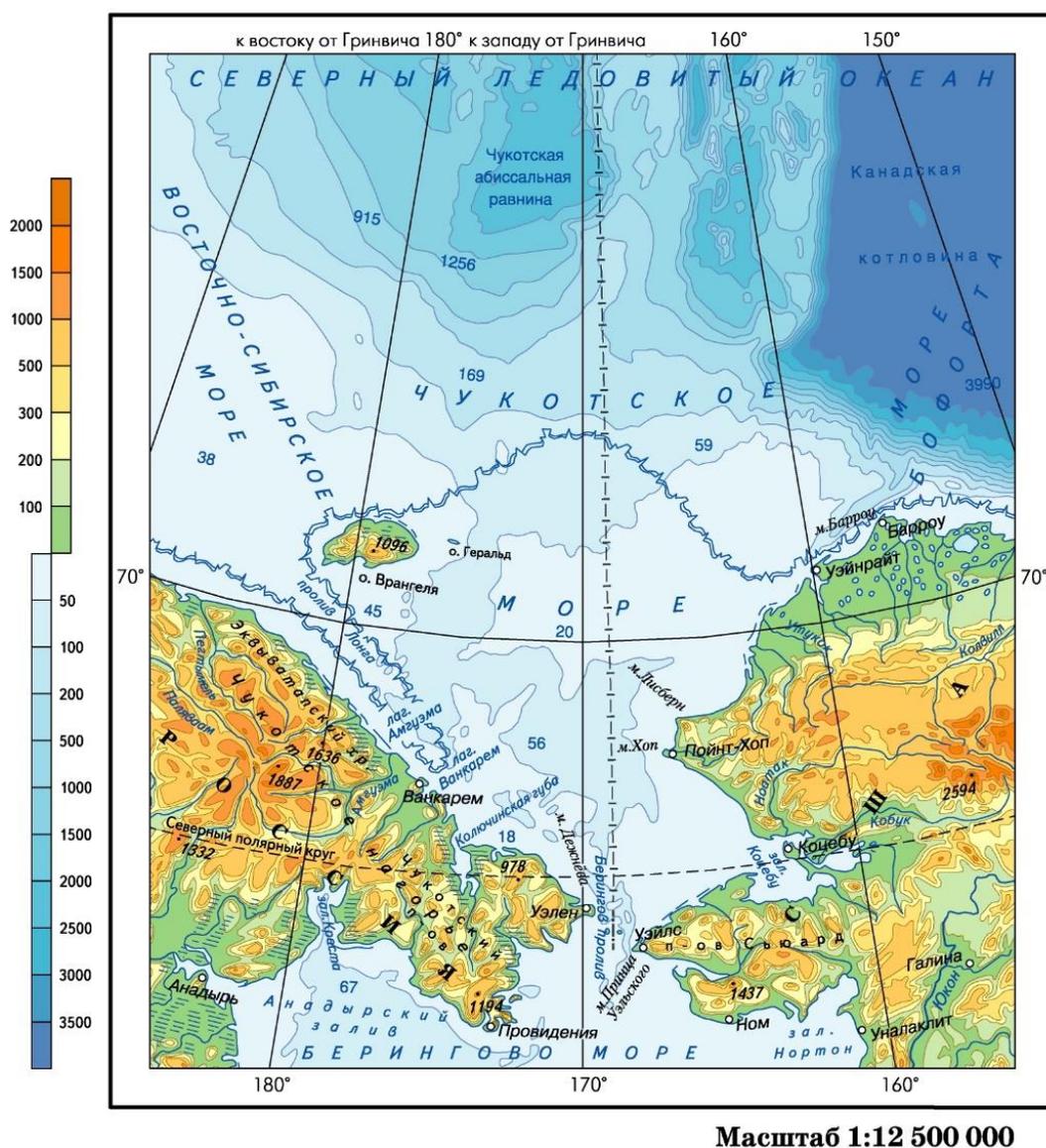


Рисунок 1.1 – Географическое положение Чукотского моря [2]

На западе Чукотское море граничит с Восточно-Сибирским морем и соединяется с ним проливом Лонга, восточной границей является условная

линия от м. Барроу по меридиану 156° з.д. до края шельфа (72° с.ш.), на юге – с Беринговым морем, с которым оно соединяется Беринговым проливом. В качестве северной границы служит также условная линия, совпадающая с внешним краем шельфа.

Внутри области, ограниченной границами, море имеет площадь 595 тыс. км<sup>2</sup>, объем вод 45 тыс. км<sup>3</sup>. Средняя глубина составляет 77 метров, наибольшая глубина 1256 м. Все море лежит в пределах шельфа, имеет сообщение с морями Восточно-Сибирским и Бофорта, на севере открыто граничит с Арктическим бассейном. На юге граничит с Беринговым морем, соединяясь с ним проливом.

Островов в море достаточно мало: самый крупный остров Врангеля расположен на западной границе и является северной границей пролива Лонга. Среди небольших островов выделяются такие как: Геральд, Колючин и Идлидья.

## 1.2 Береговая линия

Береговая линия моря не имеет обширного количества больших заливов, так как слабо изрезана. Среди значительных по размерам имеется только два – Колючинская губа и залив Коцебу. Также выделяется по своим размерам бухта Шишмарева и группа сильно распресненных лагун (лагуна Амгуэма, Ванкарем), которые расположились непрерывной цепочкой вдоль берега почти от мыса Якан до острова Идлидья, который расположен несколько западнее мыса Сердце-Камень. Данные лагуны отделяются от моря узкими песчаными косами. Такие же лагуны характерны для побережья Аляски от мыса Принца Уэльского до залива Коцебу и от мыса Лисберна до мыса Барроу.

## 1.3 Морфология дна

Рельеф дна в Чукотском море довольно ровный (рисунок 1.2). Море расположено в пределах шельфа. Изобаты 10 и 25 м подходят близко к матерiku и следуют очертаниям береговой линии. Более половины площади дна занимают

глубины менее 50 м, только 6% — свыше 100 м. В северной части глубины возрастают до 200 м и более (максимально 1256 м). На территории шельфа присутствует два подводных каньона. Каньон Геральд проходит около 175 западной долготы. Каньон Барроу направлен параллельно побережью Аляски. В северной части моря расположено несколько возвышенностей. Большая часть дна покрыта тонким слоем рыхлого ила, песка и гравия [3].

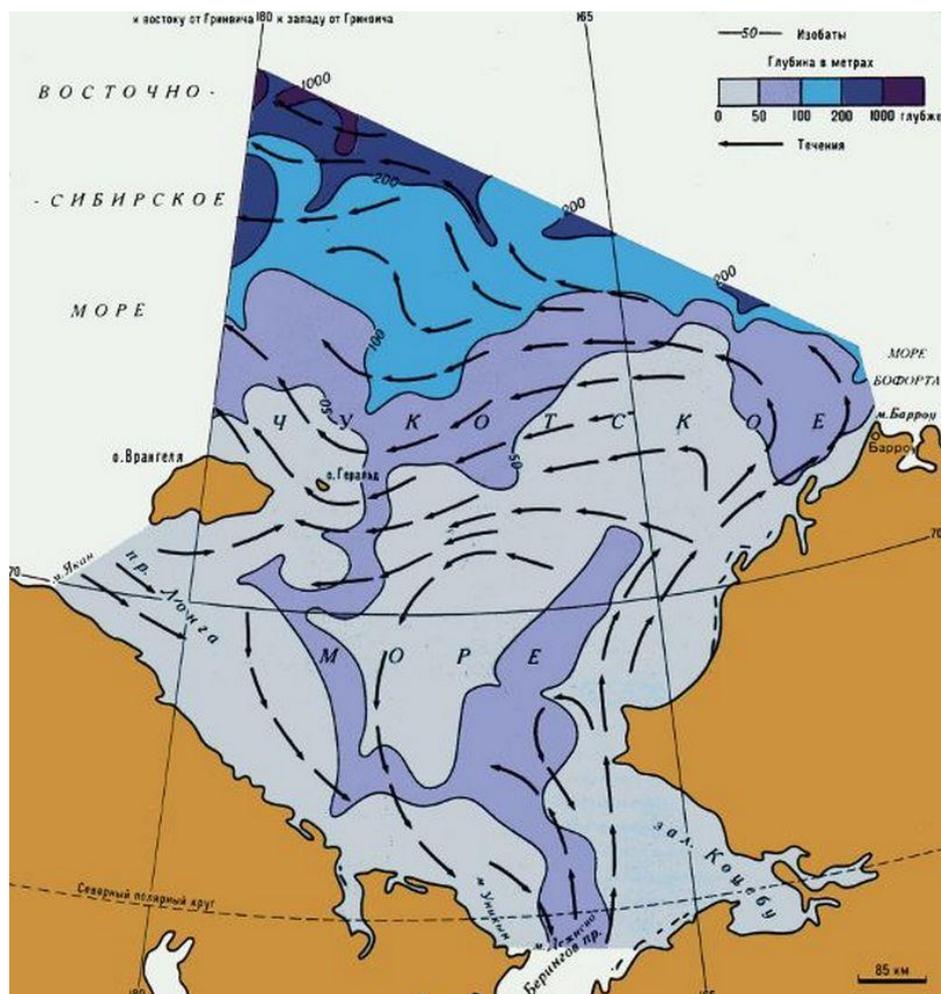


Рисунок 1.2 – Рельеф дна и течения Чукотского моря [4]

Чукотское море располагается на высокой широте, имеет обширную границу для взаимодействия с Северным Ледовитым океаном, а также находится вблизи Тихого океана. Все эти факторы оказывают непосредственное влияние на климат, который принимает характерные черты полярного морского климата.

#### 1.4 Особенности климата

Климат моря формируется под воздействием нескольких барических образований. С юго-запада к нему распространяется остrog сибирского антициклона, на севере расположен арктический антициклон, на юго-востоке – североамериканский антициклон, а на юге – алеутский циклон. Все эти образования наиболее ярко выражены в зимний сезон [5]. Температура воздуха самого холодного месяца (февраля) в среднем достигает в Уэлене  $-28^{\circ}\text{C}$ , на о. Врангеля  $-25^{\circ}\text{C}$  и на м. Шмидта  $-28^{\circ}\text{C}$  [6]. Зимой преобладают северо-восточные порывистые ветры. Зимой холодная погода может нарушаться южными ветрами, приносящими более теплый воздух с Берингова моря.

Весной сезонные области высокого давления разрушаются, направление ветров становится неустойчивым.

На рисунке 1.3 представлены карты результирующего ветра, рассчитанного для двух периодов: 1979 – 1996 гг. и 1997 – 2015 гг. для акваторий Восточно-Сибирского и Чукотского морей для навигационных месяцев (июнь-ноябрь).

Летом над Азией начинает образовываться область низкого давления, алеутская депрессия смещается к востоку. В северной – северные и северо-восточные, вдоль американского побережья дуют восточные ветры, а в южной его части могут наблюдаться ветры южные и юго-восточные. Осредненные максимальные значения скорости ветра в летний период близки к  $12\text{ м/с}$  [7]. Средняя температура самого теплого месяца – июля изменяется по акватории моря от  $2^{\circ}\text{C}$  на севере до  $6^{\circ}\text{C}$  на юге. В отдельные дни она на побережье может повышаться до  $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$ . Погода летом неустойчивая, облачная, с частыми дождями.

В сентябре Чукотское море во власти устойчивых северо-восточных, северных и восточных ветров, и эта циркуляция сохраняется все осенние и зимние месяцы. Осенью для Чукотского моря характерно значимое усиление

ветров, наиболее заметное для южной части моря (средняя скорость ветра в октябре-ноябре достигает 8-9 м/с). Также отмечается нарастание средних максимальных скоростей ветра до 15-17 м/с. [7].

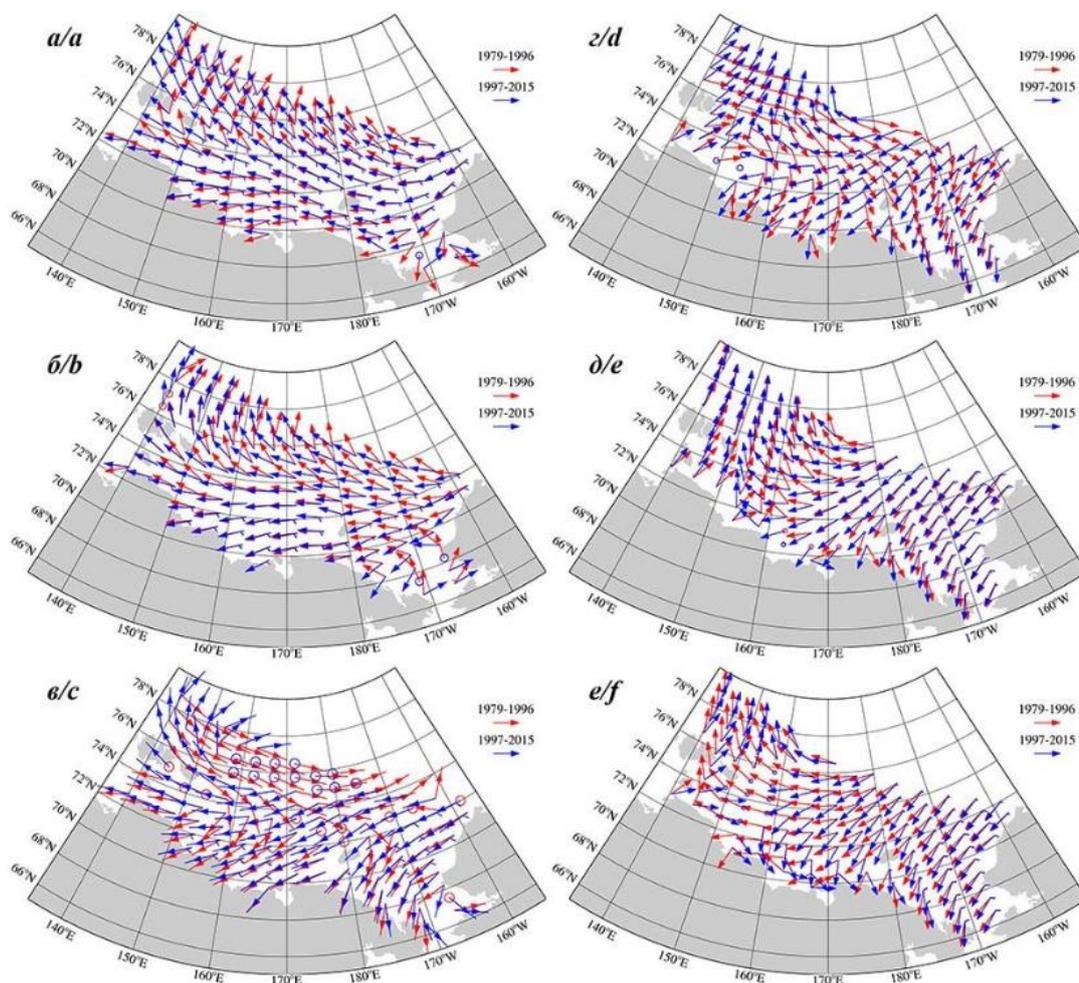


Рисунок 1.3 – Результирующий ветер над Восточно-Сибирским и Чукотским морями для июня (а), июля (б), августа (в), сентября (г), октября (д) и ноября (е) [7]

## 1.5 Речной сток

В основном пресные воды поступают в акваторию Чукотского моря через реку Амгуэму. Её воздействие на распреснение Чукотского моря проявляется локально, узкой прибрежной полосой вблизи реки до Колючинской губы.

Материковый сток в Чукотское море весьма мал – около  $72 \text{ км}^3/\text{год}$ , что составляет около 5% общего берегового стока во все арктические моря [6,8]. Реки Аляски приносят  $54 \text{ км}^3/\text{год}$ , реки Чукотки –  $18 \text{ км}^3/\text{год}$ , небольшая доля приходится на реки, образованные стоком с ледников острова Врангеля [9]. Столь небольшой береговой сток не влияет существенно на крупномасштабные гидрологические условия Чукотского моря, но может влиять на температуру и соленость прибрежных вод [10].

## 1.6 Уровень моря

На станциях в Чукотском море наблюдается повышение уровня со скоростью  $0.07 \text{ мм/год}$  [11].

Приливы в Чукотском море возбуждаются приливными волнами различных направлений: с севера из Центрального Арктического бассейна, с запада через пролив Лонга и с юга, со стороны Тихого океана через Берингов пролив. Характер приливов в основном полусуточный, но сложение различных волн дает пеструю картину в распределении высот уровня и скоростей течений [5]. В целом Чукотском море величина приливов небольшая, у берегов Чукотского полуострова всего  $0.1-0.15 \text{ м}$ . Скорости приливных течений равны  $1-2 \text{ см/с}$ , но в отдельных районах могут достигать  $70-80 \text{ см/с}$ .

Существенную роль в колебаниях уровня Чукотского моря играют сгонно-нагонные явления. На большей части побережья колебания уровня, обусловленные сгонно-нагонным действием ветров, не превышают  $0.6 \text{ м}$ , но на отдельных участках они могут достигать  $2-2.2 \text{ м}$  [6], а в исключительных случаях и больше [5].

## 1.7 Течения

Тихоокеанские воды, попадая в Чукотское море через Берингов пролив разделяются на три основные водные массы, каждая из которых обладает разными свойствами (рисунок 1.4). Самая западная ветвь берингоморских вод следует на север и на широте мыса Хоп разделяется на две. Одна отклоняется на северо-запад в сторону острова Врангеля и далее огибает его по восточной стороне, часть воды этой ветви проходит далее на запад в сторону Восточно-Сибирского моря через пролив Лонга.

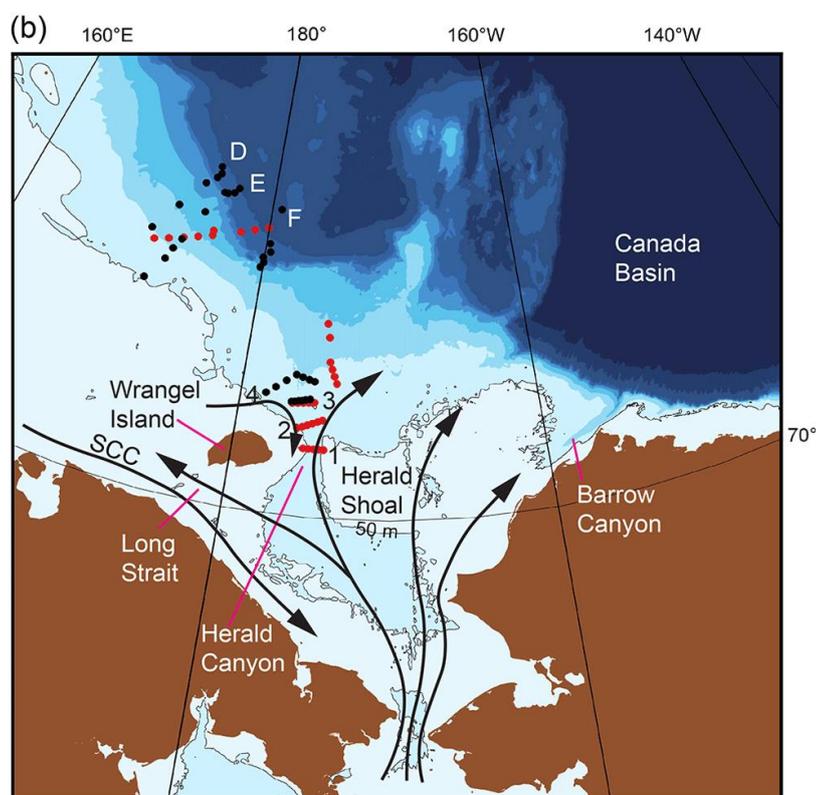


Рисунок 1.4 – Схематичная циркуляция в Чукотском море [14]

Центральная ветвь движется на север и уходит на восток, обходя банку Геральда и движется по мелководью Ханна.

Третья ветвь течения, идущая от Берингова пролива, отклоняется на северо-восток и далее следует вдоль побережья Аляски до мыса Барроу

Три первоначальные водные массы, поступающие в Чукотское море через Берингов пролив, имеют разную соленость и концентрацию питательных веществ. Анадырская вода является самой соленой, а также имеет самую высокую концентрацию питательных веществ [12]. Вода с высоким содержанием питательных веществ также, как правило, находится на западной стороне Чукотского моря, где самые высокие концентрации наблюдаются на дне и более низкие - в поверхностных водах летом, когда преобладает первичная продукция [13].

### 1.8 Гидрологический режим

Зимой и в начале весны температура в подледном слое воды распределяется довольно равномерно по пространству моря и равна  $-1,6—1,8$  °С. В конце весны на поверхности чистой воды она повышается до  $-0,5—0,7$  °С у кромки льдов и до  $+2—3$  °С у Берингова пролива. Летний прогрев и приток тихоокеанских вод со среднемесячной температурой от  $0,2$  до  $4,0$  °С повышают поверхностную температуру Чукотского моря, но она неодинакова от места к месту. В целом западная часть моря холоднее, чем восточная, где главным образом распространяются теплые тихоокеанские воды. Зимой и в начале весны температура повсюду примерно одинакова от поверхности до дна и равна  $-1,7—1,8$  °С. Осенью охлаждение воды распространяется от поверхности вглубь, выравнивая температуру по вертикали [6].

На величину и пространственно-временное распределение солености на поверхности Чукотского моря влияют неодинаковый по сезонам приток тихоокеанских, а в прибрежной зоне и речных вод. Для зимы и начала весны характерна повышенная соленость подледного слоя, равная примерно 31‰ на западе, близкая к 32‰ в центральной и северо-восточной частях и наиболее высокая ( $33,0—33,5$ ‰) в районе Берингова пролива, куда распространяются относительно соленые тихоокеанские воды. С конца весны и в течение лета соленость увеличивается с запада на восток примерно от 28 до  $30—32$ ‰, что

отражает взаимодействие вод холодного Чукотского и теплого Тихоокеанского течений. Осенью с началом льдообразования начинается повсеместное увеличение солености и ее более равномерное распределение на поверхности моря. В конце лета повышение солености на поверхности моря начинает выравнивать ее по вертикали. Осенью этот процесс продолжает развиваться за счет осолонения при льдообразовании, которое вследствие местных условий происходит неодинаково по всей акватории моря. Соответственно в одних районах выравнивание солености завершается осенью, а у других — только к концу зимы [6].

### 1.9 Ледовый режим

В Чукотском море льды существуют круглый год. Зимой с ноября – декабря по май – июнь море сплошь покрыто льдом – неподвижным у самого берега и плавучим вдали от него. Припай развит незначительно, ширина не превышает 10 – 20 км, толщина может достигать 170 см. За припаем располагаются дрейфующие льды. Большею частью это одно- и двухлетние ледяные образования толщиной 150— 180 см. На севере моря встречаются многолетние тяжелые льды [15].

Для Чукотского моря характерны отличительные черты, которые определяют ледовые условия в акватории на протяжении всего года. Одним из следствий климатических изменений стало резкое сокращение площади распространения морского льда. Большое влияние на отступление ледового покрытия Чукотского моря с апреля по июнь имеют притоки тепла из Берингова пролива. Корреляция между двумя этими процессами составляет 80% [16].

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

В исследовании [17] рассматривается межгодовая изменчивость солёности Чукотского моря в период с 1993 по 2020 гг. Особенности солёности были рассмотрены в безледный период года. После анализа измерений солёности были выявлены два типа распространения летних вод Берингова моря: «западный» и «восточный». Первый тип вод можно охарактеризовать как тихоокеанские воды проникающие в северо-западную часть моря. При «восточном» типе, воды текут вдоль побережья Аляски. Также на западе наблюдаются участки с низкой солёностью ~29 епс. В формировании двух типов, вышеописанных вод влияние оказывают не только воды Берингова пролива, но и Восточно-Сибирское течение, распространяющееся вдоль Чукотского полуострова. Западное течение приносит холодные и пресные воды, что приводит к уменьшению солёности в западной части моря. Также, отмечается, что перенос Восточно-Сибирского течения увеличился примерно на 0.2 Св, а приток через Берингов пролив уменьшился. В результате описанных изменений в годы с интенсивным западным течением (1994, 2002, 2012 и 2016 гг.) средняя солёность по всему шельфу снизилась на 0.3 – 0.5 епс.

Также, в исследовании [18] приводятся оценки климатических трендов для температуры и солёности в Беринговом проливе и прилегающих акваториях в период 1950 – 2020 гг. По результатам был выявлен нагрев вод, поступающих в Чукотское море в летний период на  $+0.12^{\circ}\text{C}/10$  лет, в зимний период  $+0.14^{\circ}\text{C}/10$  лет. Вместе с этим выделен тренд в сторону опреснения вод. Для летнего сезона это  $-0.06$  ЕПС/10 лет и  $-0.03$  ЕПС/10 лет в зимний период. Кроме того, были проведены оценки роста потока тепла через Берингов пролив в Чукотское море вследствие климатического тренда, которые составили  $+2.4 \cdot 10^{19}$  Дж/10 лет.

## Глава 2 Методы исследования и исходные данные

### 2.1 Описание исходных данных, использованных в работе

В качестве базы исходных данных морских параметров (меридиональная компонента скорости, температура, соленость) в данной работе был использован реанализ CMEMS GLORYS12V1 морской службы Copernicus.

Продукт GLORYS12V1 представляет собой глобальный реанализ CMEMS global ocean eddy-resolving (с разрешением по горизонтали  $1/12^\circ$ , шагом сетки  $0.083^\circ$ , с 50-ю вертикальными уровнями), который охватывает альтиметрию с 1993 года.

GLORYS12V1 в основном основывается на текущей системе глобального прогнозирования CMEMS в режиме реального времени. Компонентами модели является платформа NEMO, разработанный в ECMWF атмосферный реанализ ERA-Interim, затем, в последние годы, ERA5. Наблюдения обрабатываются с помощью фильтра Калмана пониженного порядка. Ассимилируются данные наземного высотомера (аномалия уровня моря), спутниковые данные о температуре поверхности моря, концентрации морского льда, а также вертикальные профили температуры и солености *in situ*. Более того, схема 3D-VAR обеспечивает коррекцию медленно меняющихся крупномасштабных изменений температуры и солености.

Этот продукт включает в себя файлы средних значений за день и месяц по температуре, солености, течениям, уровню моря, глубине смешанного слоя и параметрам льда сверху донизу. Выходные файлы данных о глобальном океане отображаются в стандартной регулярной сетке  $1/12^\circ$  (приблизительно 8 км) и на 50 стандартных уровнях [19].

Для долгопериодной оценки динамики берингоморских вод в Чукотском море из архива выбирались данные о меридиональной компоненте скорости течения, температуре и солености для одного широтного разреза (рисунок 2.1)

по параллели  $68^{\circ}33'$ с.ш., на долготах от  $177^{\circ}58'$  до  $166^{\circ}58'$  в.д. – от восточного побережья России на западе до побережья Аляски на востоке.

Диапазон исследования по времени начинался с января 1993 года и заканчивался декабрем 2020 года. Данные включали измерения на 19 горизонтах от поверхности до дна (55,76 м).



Рисунок 2.1 – Расположение точек на широтном разрезе по  $68^{\circ}33'$ с.ш.

## 2.2 Расчетные формулы и методы исследования

Для оценки берингоморских вод в арктическом бассейне, для каждой ячейки разреза отдельно рассчитывались объемный расход, потоки тепла и соли по формулам (1), (2) и (3) соответственно [20]. Затем рассчитанные значения суммировались на всем разрезе и на отдельных вертикалях. Поток тепла рассчитывался относительно температуры замерзания воды ( $-1,8^{\circ}\text{C}$ ). Соленость относительно 0,0 епс.

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

где  $Q$  – объемный расход,  $\text{Св}$ ;

$V$  – скорость течения в центре каждого слоя,  $\text{м/с}$ ;

$\Delta H$  – толщина слоя,  $\text{м}$ ;

$\Delta R$  – расстояние между точками,  $\text{м}$ ;

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

где  $F_t$  – поток тепла,  $\text{Вт}$ ;

$C_p$  – удельная теплоемкость воды, равная  $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ ;

$\rho$  – плотность воды, равная  $1035 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$T$  – температура морской воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_f$  – минимальная температура морской воды в данной точке,  $-1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

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

где  $F_s$  – поток соли,  $\text{г/с}$ ;

$S_w$  – соленость морской воды,  $\text{епс}$ .

Также для выявления усиления или ослабления динамики в исследуемом регионе оценивалась величина линейного тренда, как для гидрологических характеристик, так и для самих потоков [21].

Уравнение линейного тренда можно представить в виде уравнения:

$$y = a_1 t + a_0,$$

где  $t$  – время;

$a_1$  – коэффициент тренда

Оценка производилась в каждой ячейке разреза по среднемесячным значениям на основе оценки значимости коэффициента тренда  $a_1$  по  $t$ -критерию Стьюдента с уровнем значимости  $\alpha$  равным  $0.05$ .

### 3.1 Многолетнее усредненное состояние гидрофизических характеристик

В многолетнем усреднении основной поток воды направлен из Тихого океана в Северный Ледовитый океан (рисунок 3.1).

На широтном разрезе по  $68^{\circ}33'$  с.ш., и на долготе  $177^{\circ}58'$  -  $166^{\circ}58'$  в.д., среднее многолетнее значение скорости течения составило  $0.6$  см/с. Максимальные величины скорости наблюдаются в восточной части разреза у мыса Пойнт-Хоп (побережье Аляски) в поверхностном слое от  $0$  до  $20$  метров ( $2.5 - 3$  см/с). От побережья Чукотки в западной части разреза до  $175^{\circ}42'$  западной долготы наблюдается противотечение, направленное из Северного Ледовитого океана в Берингово море. Максимальная скорость, наблюдаемая в западной части разреза –  $0.2$  см/с. В центральной части разреза скорости по всей толщ от поверхности до дна варьируются в диапазоне от  $0.002$  до  $1$  см/с. Подавляющую часть разреза занимает поток, идущий на север – в Северный Ледовитый океан.

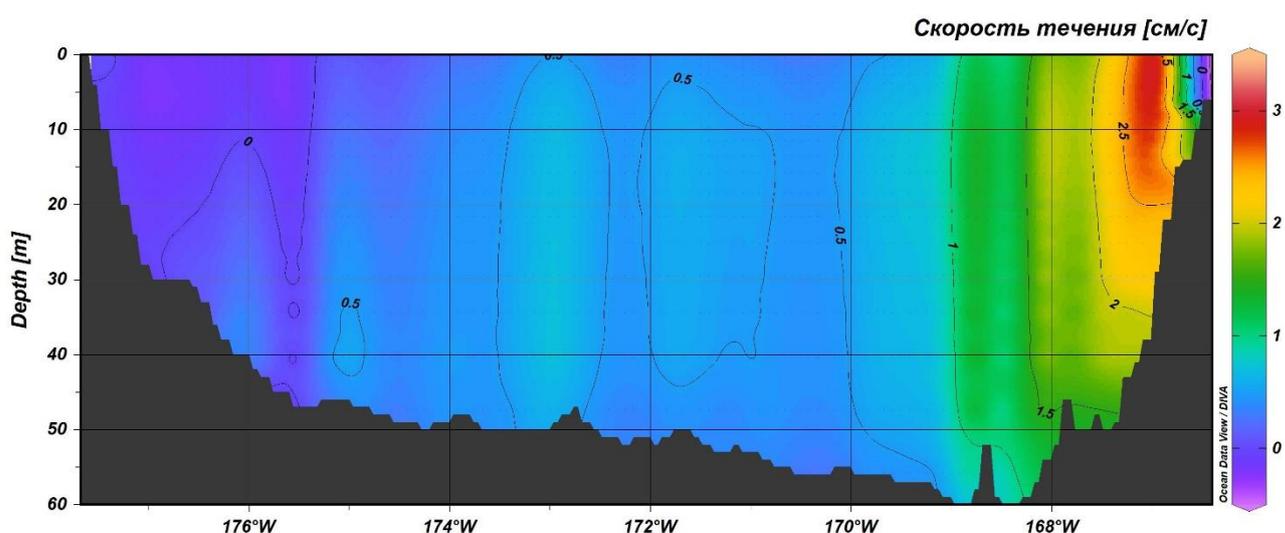


Рисунок 3.1 – Средняя многолетняя за период 1993-2020 гг. скорость течения (см/с) на широтном разрезе по  $68^{\circ}33'$  с.ш.

Распределение температуры на разрезе (Рисунок 3.2) имеет ярко выраженную область высоких значений в восточной части разреза. Далее, распространяясь на запад, теплая вода занимает поверхностный слой до 20 метров. Температуры в нем изменяются в пределах от 0.02 °С у дна до 1.16 °С на поверхности. Среднее значение температуры за весь период времени на всем разрезе составило 0.59 °С. Максимальные величины температуры воды наблюдается в мелководной части у мыса Пойнт-Хоп и достигают 1.68 °С. В центральной части у дна температура опускается до 0.5 °С. У западного склона относительно холодная вода располагается очагом начиная с глубины 8 метров и до дна практически всю толщу воды занимают отрицательные температуры. Минимума они достигают в придонной части – -0.6 °С.

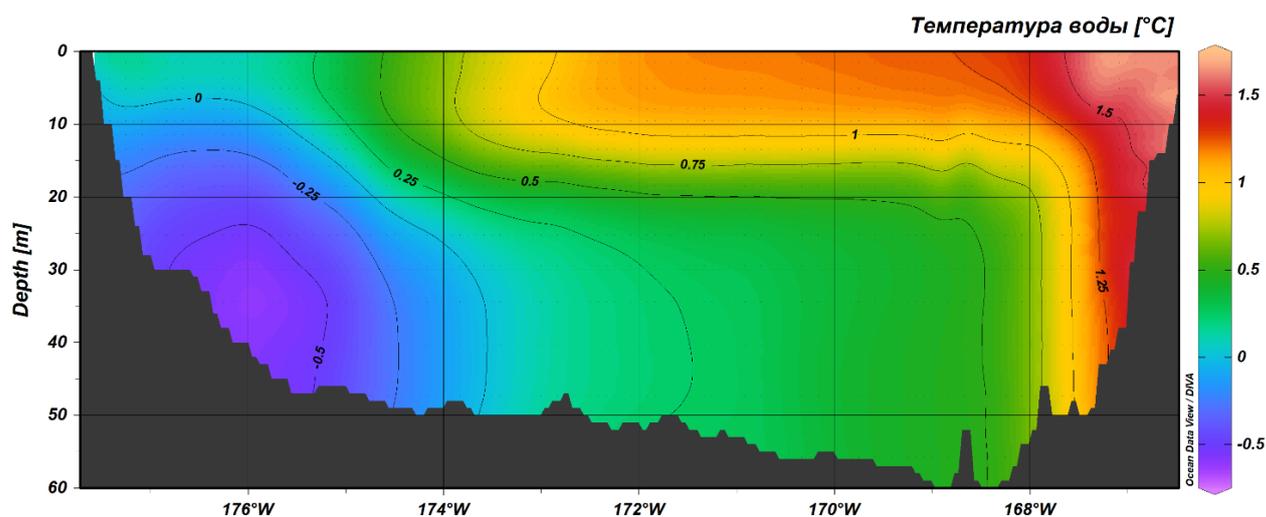


Рисунок 3.2 – Средняя многолетняя за период 1993-2020 гг. температура воды (°С) на широтном разрезе по 68°33' с.ш.

Среднее многолетнее распределение солёности (Рисунок 3.3) имеет ярко выраженное ядро высоких значений в центральной части разреза. У дна величина солёности достигает максимального значения – 32.77 епс. Обширная область высоких значений убывает в сторону берегов и поверхности. В восточной части разреза солёность достигает 31.5 епс в поверхностном слое. В западной части у Чукотского полуострова наблюдаются минимальные значения на разрезе – 28.33

епс. Низкие значения солености, относительно расположенных в центре и на востоке могут быть связаны с узкой струей пресных и холодных вод, направленных с севера на юг, из Северного Ледовитого океана в Тихий. Среднее многолетнее значения солености воды по всему разрезу составило 31.75 епс.

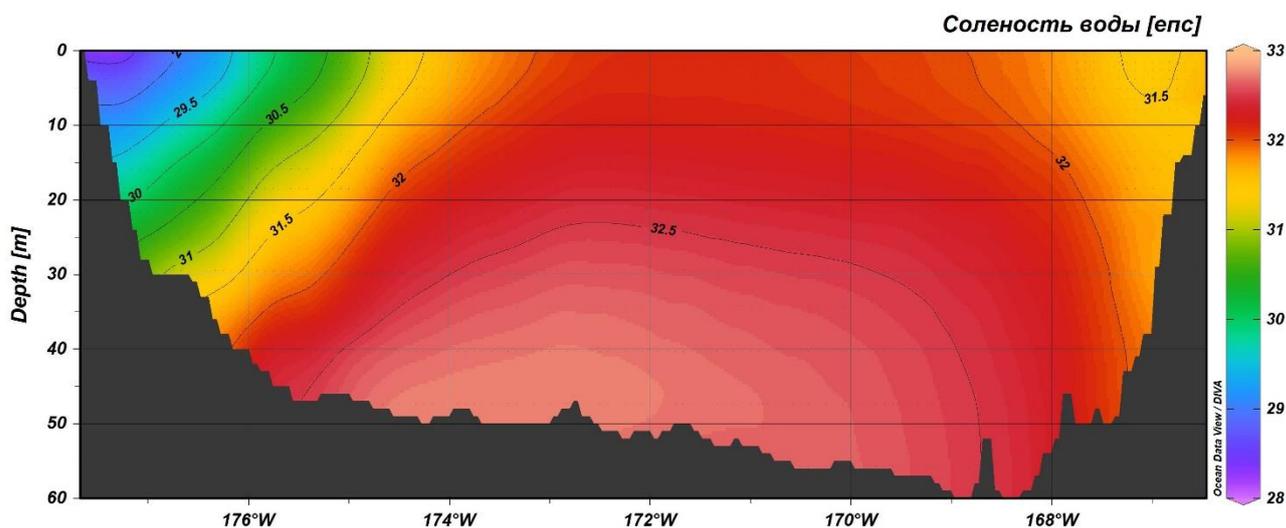


Рисунок 3.3 – Средняя многолетняя за период 1993-2020 гг. соленость воды (епс) на широтном разрезе по 68°33' с.ш.

Таким образом, делая вывод о характере распределения скоростей течений, температуре и солености воды на широтном разрезе по 68°33' с.ш. видно, что основной поток с высокими скоростями 1 – 3 см/с располагается в восточной части у берегов Аляски. Это теплые, поверхностные берингоморские воды с температурой 0.75 – 1.68 °С. Они распространяются в поверхностном слое моря до глубины 20 метров. Соленость обладает ядром высоких значений в середине разреза и достигает максимума в придонном слое (32.77 ЕПС). Также у берегов Чукотского полуострова в западной части разреза наблюдается противотечение с низкими скоростями 0.002 – 2 см/с. Температура воды в этой области низкая, начиная с 8 метров значения отрицательные. Минимальные температуры находятся у дна – -0.6 °С. Соленость вод, поступающих из Северного Ледовитого океана ниже тихоокеанских – 28.33 против 32.16 епс.

### 3.2 Многолетнее усредненное состояние потоков воды, тепла и соли

Для оценки берингоморских вод в арктическом бассейне, в каждой ячейке разреза отдельно рассчитывались объемный расход воды, потоки тепла и соли.

На рисунке 3.4 показан средний многолетний поток (расход) воды за период с января 1993 по декабрь 2020 гг. Среднее значение расхода воды на всем разрезе составило  $588.32 \text{ м}^3/\text{с}$ . Во многом поток воды определяется скоростями течений (см. рисунок 3.1) и, несмотря на малые величины скоростей в придонном и подповерхностном слоях, их значительные объемы определяют максимумы расхода у восточного склона ( $4043.85 \text{ м}^3/\text{с}$  в ячейке). В слое до 10 метров глубины объемный расход не превышает  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ . Далее, в слое от 10 до 30 метров происходит увеличение переносимой воды до  $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ . И наконец в придонной части разреза поток воды достигает максимума.

Повторяя картину скоростей воды (см. рисунок 3.1), в западной части исследуемого разреза наблюдается область течения, которое направлено из Северного Ледовитого океана. Среднее значение расхода воды составляет  $2.78 \text{ м}^3/\text{с}$  и распространяется до  $175.42 \text{ з.д.}$  Максимальная величина потока воды  $294.48 \text{ м}^3/\text{с}$ . Также, в центральной части разреза присутствует область высоких значений, которые могут быть проявлением центрального потока вод, идущих из Тихого океана. Величины находятся в пределах от  $500 \text{ м}^3/\text{с}$  у поверхности до  $1500 \text{ м}^3/\text{с}$  в придонном слое.

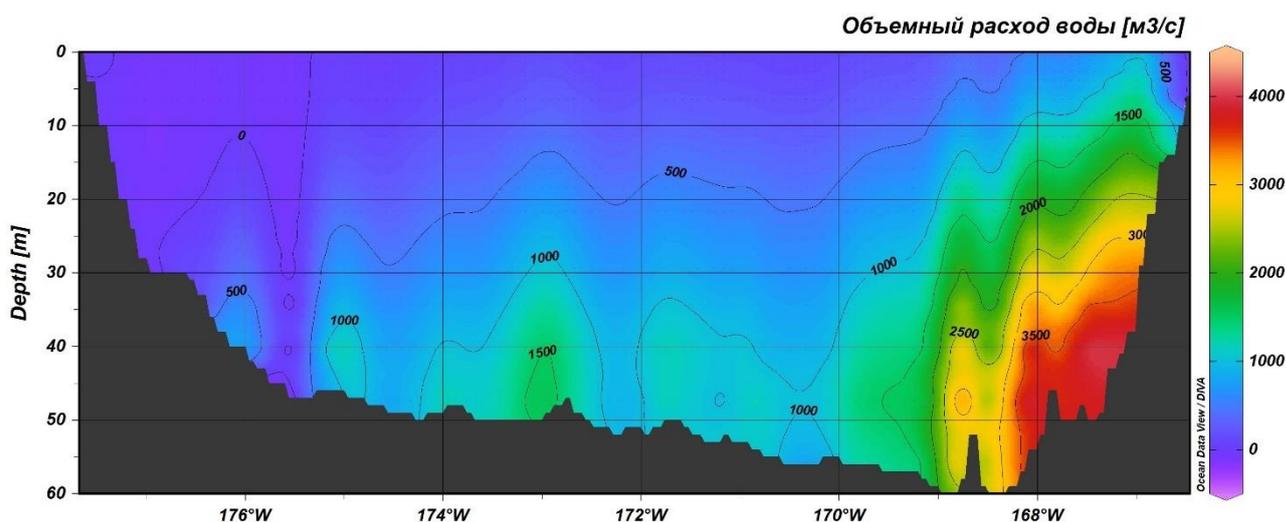


Рисунок 3.4 – Средний многолетний за период 1993-2020 гг расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$  в ячейке) через широтный разрез по  $68^{\circ}33'$  с.ш.

Среднее значение потока тепла (рисунок 3.5) на всем разрезе составило 6.93 ГВт. Для него ситуация схожа с расходом воды (см. рисунок 3.4). Среднее значение в пределах  $170^{\circ} - 166^{\circ}58'$  з.д составляет 16.49 ГВт. В этой части сосредоточена область максимальных значений – у восточного склона (побережье Аляски). На поверхности и до 15 метров величина потока тепла увеличивается от 10.81 ГВт до 30.9 ГВт. Предела значений поток тепла достигает в придонном слое – 58.25 ГВт. В центральной части разреза проходит менее теплая масса воды – величина потока тепла увеличивается с глубиной. Между  $175^{\circ}17'$  и  $174^{\circ}83'$  з.д. присутствует зона более высоких значений, относительно тех, которые находятся западнее и восточнее. Поток тепла здесь в 2-3 раза больше. На поверхности значения находятся в пределах от 0.11 до 0.22 ГВт. У дна от 5.5 до 6.5 ГВт.

Начиная с долготы  $175^{\circ}33'$  и двигаясь дальше на запад, вплоть до берегов Чукотки наблюдается обратное течение. В некоторых местах оно распространяется не по всей толще воды: в придонной части поток направлен с юга на север. Но с  $176^{\circ}83'$  з.д. весь поток направлен в Тихий океан по всей толще. Максимальная величина, наблюдаемая в «противотечении» – 2.08 ГВт.

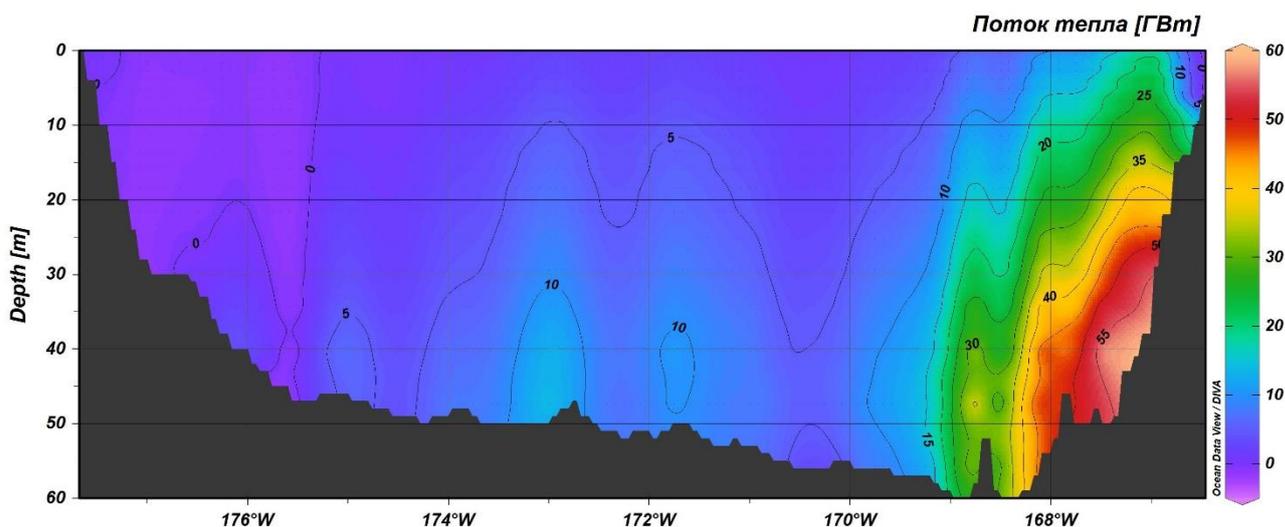


Рисунок 3.5 – Средний многолетний за период 1993-2020 гг поток тепла (ГВт в ячейке) через широтный разрез по 68°33' с.ш.

Поток соли распространяется у дна (рисунок 3.6). Среднее значение в многолетнем усреднении на всем разрезе равняется 0.03 Мт/с. Во многом поток соли повторяет расход воды и тепла, имея максимальные значения в восточной части разреза. От 170° з.д. и до мыса Пойнт-Хоп в слое до 10 метров величина потока колеблется от 0.004 до 0.05 Мт/с. Далее, в слое от 10 до 30 метров поток возрастает с 0.01 до 0.11 Мт/с. С 30 метров и до дна величина потока также растет: 0.03 – 0.13 Мт/с. С продвижением на запад ниже горизонта 30 метров поток соли имеет достаточно высокие значения – ниже 0.025 Мт/с они не опускаются. В подповерхностном слое до 20 метров поток соли находится в пределах 0.003 – 0.022 Мт/с.

Западнее 175°33' з.д. также присутствует обратный поток. Он занимает большую часть в толще воды, хотя в некоторых местах придонного слоя присутствует и струя, идущая на север. Максимальное значение «северного» потока – 0.01 Мт/с. К склону Чукотского полуострова поток уменьшается и достигает минимального значения – 0.00004 Мт/с.

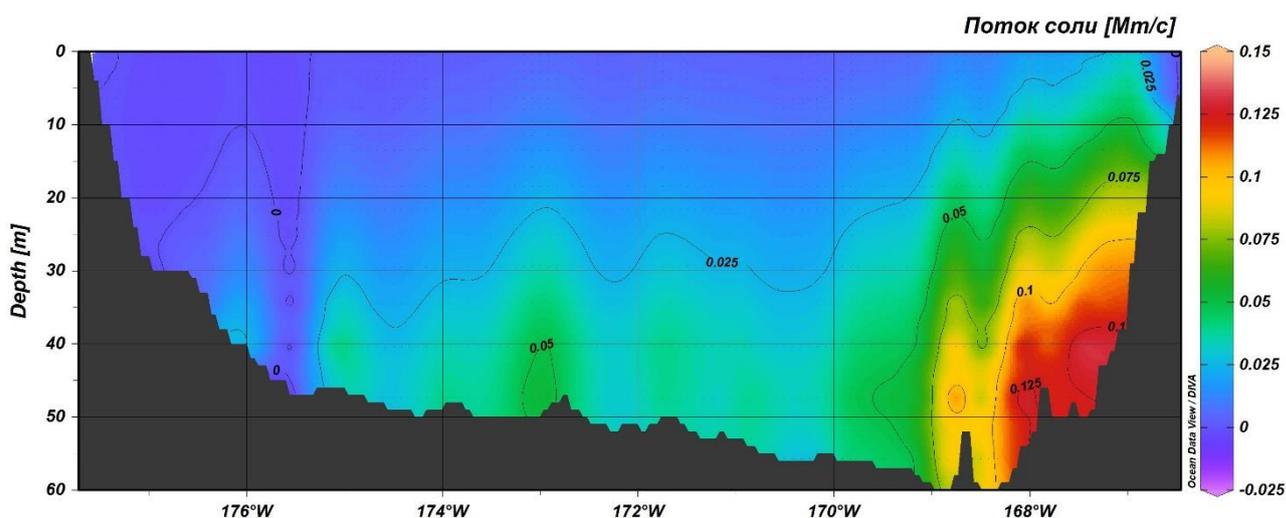


Рисунок 3.6– Средний многолетний за период 1993-2020 гг поток соли (Мт/с в ячейке) через широтный разрез по 68°33' с.ш.

В таблице 1 представлены средние за период 1993 – 2020 гг. интегральные характеристики расхода воды, потоков тепла и соли через широтный разрез по 68°33' с.ш. По таблице можно сделать вывод, что основная часть воды, тепла и соли поступает в Северный Ледовитый океан из Тихого океана и лишь малая часть идет из вод Чукотского моря на юг.

Таблица 1

Средние многолетние (1993-2020 гг.) значения расхода воды  $Q$ , потоков тепла  $F_t$  и соли  $F_s$  на широтном разрезе 68°33'с.ш.

Поток	Суммарный	На север	На юг
$Q$ [Св]	1,34	1,40	-0,06
$F_t$ [ТВТ]	15,78	16,59	-0,81
$F_s$ [Мт/с]	44,42	46,35	-1,93

В распределении потоков воды, тепла и соли присутствуют схожие черты. Основная часть сосредоточена у склона Аляски, где теплые и соленые воды, проходя через Берингов пролив следуют дальше на север. Проходя вплотную к побережью Аляски, далее они распространяются на восток и уходят в море

Бофорта. В центральной части проходят меньшие объемы воды. Также они менее теплые и соленые. В западной части разреза присутствует обратное течение, которое может быть продолжением Восточно-Сибирского течения. Этот поток можно охарактеризовать маленькими объемами воды, низким тепло- и солесодержанием.

### 3.3 Оценка распределения линейного тренда для скорости течения, температуры и солености воды

Для гидрологических характеристик в каждой ячейке разреза оценивался линейный тренд (рисунок 3.7). Значимые коэффициенты тренда ( $\alpha=0.05$ ) выделены точками.

Для меридиональной скорости есть две характерные области со значимыми положительными трендами (рисунок 3.7а). Первая находится в восточной части разреза у побережья Аляски. Наибольшие величины тренда расположены в подповерхностном слое до 15 метров. Максимальное значение тренда – 0.02 см/с за мес. Это соответствует максимальным скоростям течений (см. рисунок 3.1), которые также имеют область максимальных значений в подповерхностном слое у мыса Пойнт-Хоуп. Следовательно, на востоке происходит увеличение скорости течения с юга на север. Наличие обширной зоны отрицательных величин трендов у берегов Чукотского полуострова говорит об усилении скоростей, направленных из Северного Ледовитого океана в Тихий. Максимальных значений величина тренда достигает в слое от 10 до 30 метров – 0.01 см/с за мес.

На всем разрезе наблюдается положительный тренд по температуре (рисунок 3.8), что говорит о повышении температуры в подповерхностном и срединном слоях. С глубиной коэффициенты трендов убывают и наблюдается небольшое повышение в придонном слое рассматриваемой области (0.001 °C в мес. В западной части разреза находится область значимых коэффициентов

тренда. Максимальный коэффициент тренда располагается в подповерхностном слое –  $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$  в мес.

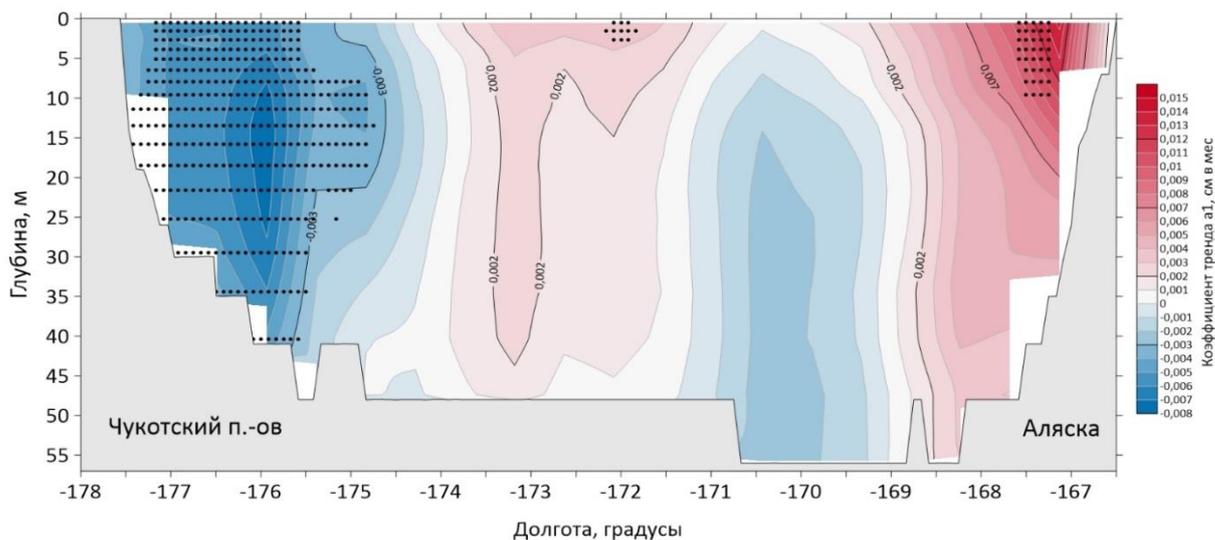


Рисунок 3.7 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на широтном разрезе по  $68^{\circ}33'$  с.ш. для меридиональной скорости течения. Значимые коэффициенты тренда ( $\alpha=0.05$ ) выделены точками

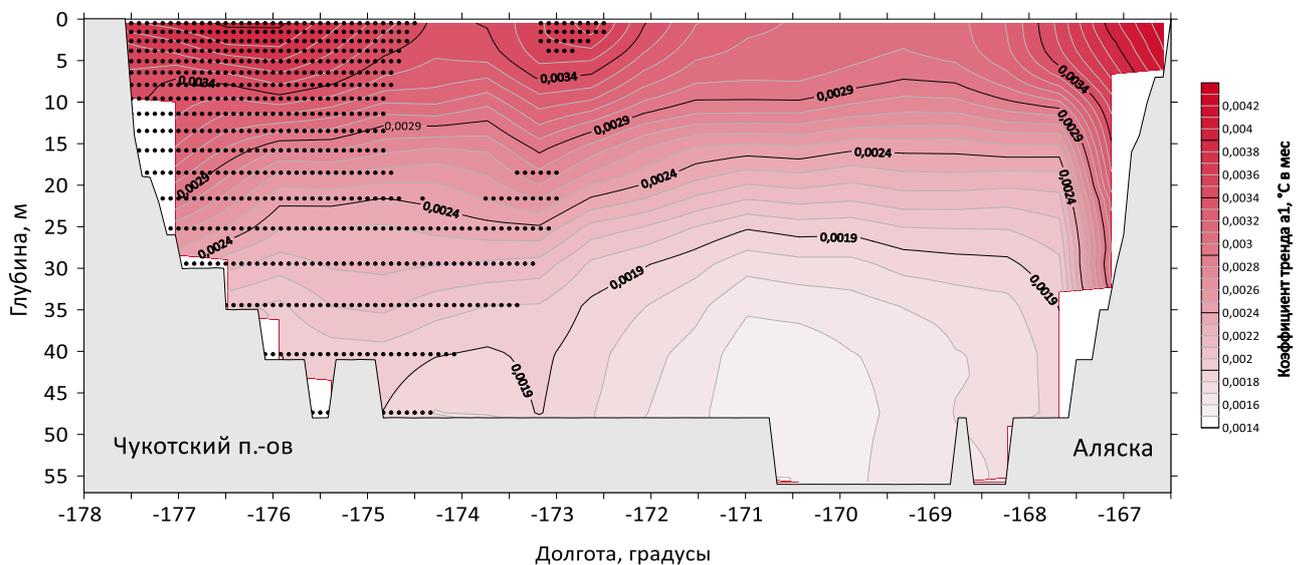


Рисунок 3.8 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на широтном разрезе по  $68^{\circ}33'$  с.ш. для температуры воды. Значимые коэффициенты тренда ( $\alpha=0.05$ ) выделены точками

В восточной части исследуемой области происходит значимое осолонение воды (0.001 епс в мес) (рисунок 3.9). В этой области также распределены значимые коэффициенты тренда. В центральной части разреза не происходит осолонения воды, что может быть связано с малой соленостью поступающих вод. В западной части отмечается распреснение воды.

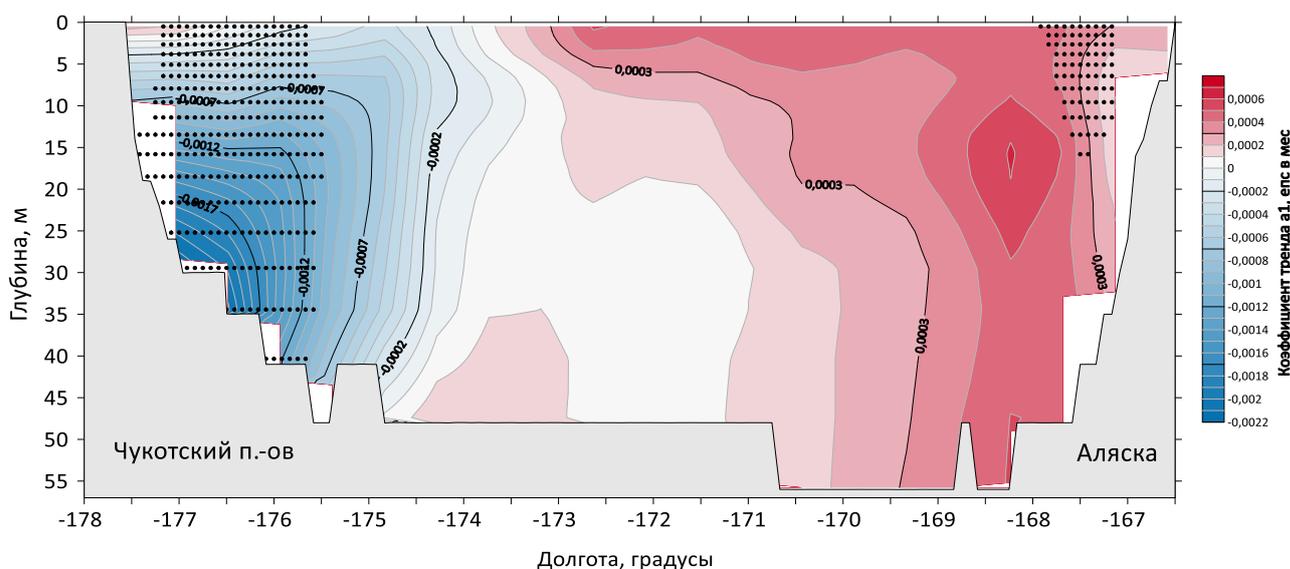


Рисунок 3.9 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на широтном разрезе по 68°33' с.ш. для солености воды. Значимые коэффициенты тренда ( $\alpha=0.05$ ) выделены точками

Таким образом, во временной изменчивости температуры, солености и скорости воды присутствует тренд. Во всех случаях он в большей степени выражается около обоих побережий – западного и восточного. Это может обосновываться наличием двух основных потоков. На востоке, тихоокеанские воды приносят все больше тепла и соли, что приводит к потеплению и осолению поверхностных и подповерхностных слоев. На западе, у побережья Чукотки пресные и холодные воды, идущие из Арктики все больше распресняют воды Чукотского моря. Также на западе идет увеличение скоростей воды, что показывает возросшую динамику в этом регионе.

### 3.4 Оценка распределения линейного тренда для объемного расхода воды, потоков тепла и соли

Для объемного расхода на широтном разрезе присутствует четыре выделяющиеся области (рисунок 3.10). В восточной части, у берегов Аляски происходит усиление потока. Зона усиление расположена восточнее  $169^\circ$  з.д. Максимум коэффициент тренда достигает в придонном слое ( $1.1 \text{ м}^3/\text{с}$  в мес). Между  $171^\circ$  и  $169^\circ$  выделяется зона ослабления южного потока, который идет из Тихого океана в Северный Ледовитый. У поверхности коэффициент тренда мал – его величина варьируется от 0 на поверхности до  $-0.2 \text{ м}^3/\text{с}$  в мес на глубине 20 метров. У дна же коэффициент тренда достигает максимума ( $-0.6 \text{ м}^3/\text{с}$  в мес) Западнее, в промежутке  $174^\circ$ - $171.5^\circ$  наблюдается область усиления расхода воды. Коэффициенты тренда в ней растут с глубиной. На поверхности максимум равняется  $0.1 \text{ м}^3/\text{с}$  в мес, а у дна достигает  $0.4 \text{ м}^3/\text{с}$  в мес. У западного склона очагом располагается область западного течения, где идет усиление потока. В этой части максимум расположен у дна –  $-1 \text{ м}^3/\text{с}$  в мес.

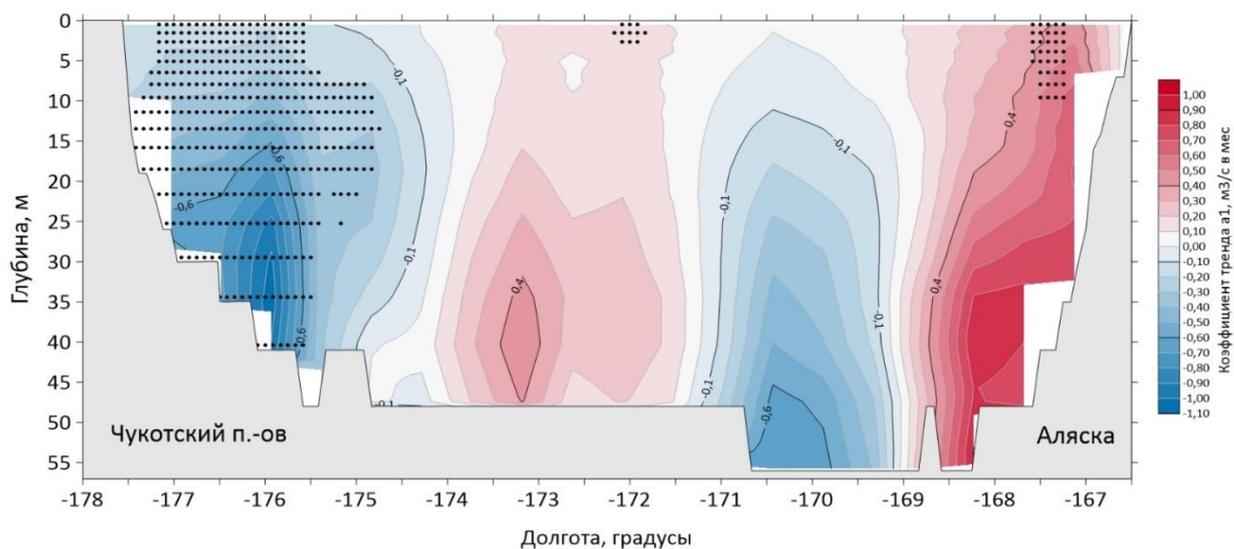


Рисунок 3.10 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на широтном разрезе по  $68^\circ 33'$  с.ш. для объемного расхода воды

Распространение коэффициентов тренда для потока тепла (Рисунок 3.11) повторяет картину для расхода воды. Выделяется четыре основные области. В восточной части разреза расположена зона усиления потока тепла. Очаг наибольших коэффициентов «вытянут» от поверхности до глубины 35 метров. Коэффициенты варьируются в пределах от 0.004 до 0.044 ГВт в мес. Западнее, от поверхности до 25 метров усиления или ослабления потока нет. В промежутке  $175^{\circ}$  –  $171^{\circ}$  расположен участок усиления потока тепла со значимыми коэффициентами тренда. От поверхности к дну коэффициенты тренда растут (0.002 – 0.016 ГВт в мес). У берега Чукотского полуострова наблюдается участок усиления северного потока, идущего из Северного Ледовитого океана. В придонном слое, коэффициенты являются значимыми (-0.006 ГВт в мес). На поверхности также выделяется область значимых коэффициентов (-0.023 ГВт в мес).

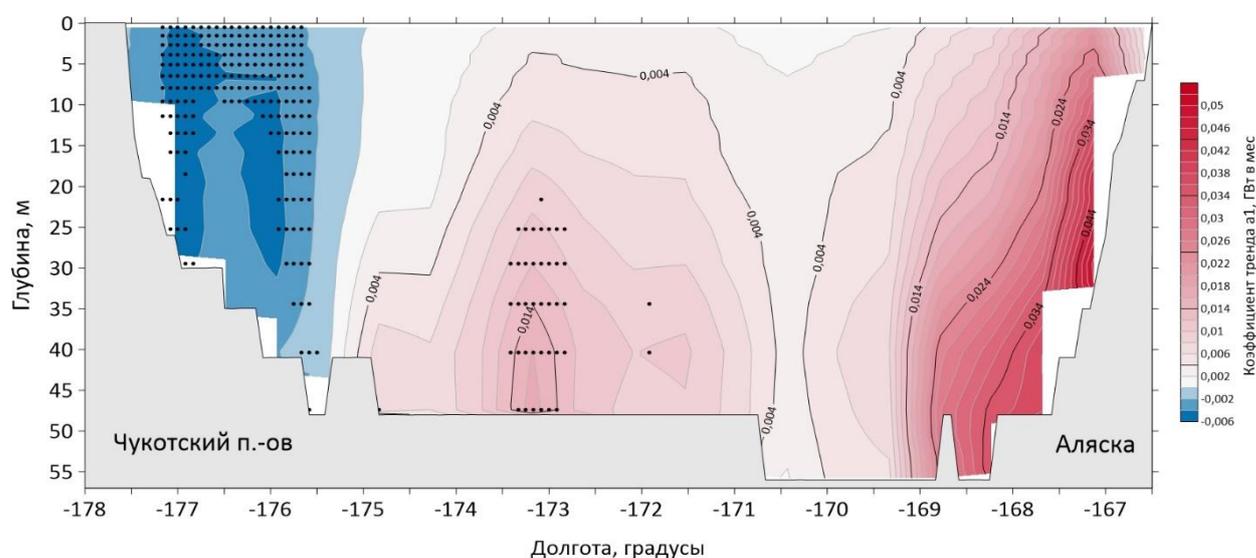


Рисунок 3.11 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг на широтном разрезе по  $68^{\circ}33'$  с.ш. для потока тепла

На разрезе с распределением коэффициентов линейного тренда для потока соли (Рисунок 3.12) отчетливо видны две области со значимыми коэффициентами: у берега Чукотки и в восточной части у побережья Аляски. В

западной части от поверхности до дна значимые коэффициенты линейного тренда изменяются в пределах  $-0.004$  –  $-0.03$  кт/с в мес. Также в центральной части исследуемого разреза отмечаются две области с незначимыми трендами. В промежутке  $174^\circ$  з.д. –  $171.5^\circ$  з.д. слой от поверхности до 15 метров тренда нет. Далее с продвижением ко дну коэффициент увеличивается с  $0.005$  до  $0.02$  кт/с в мес.

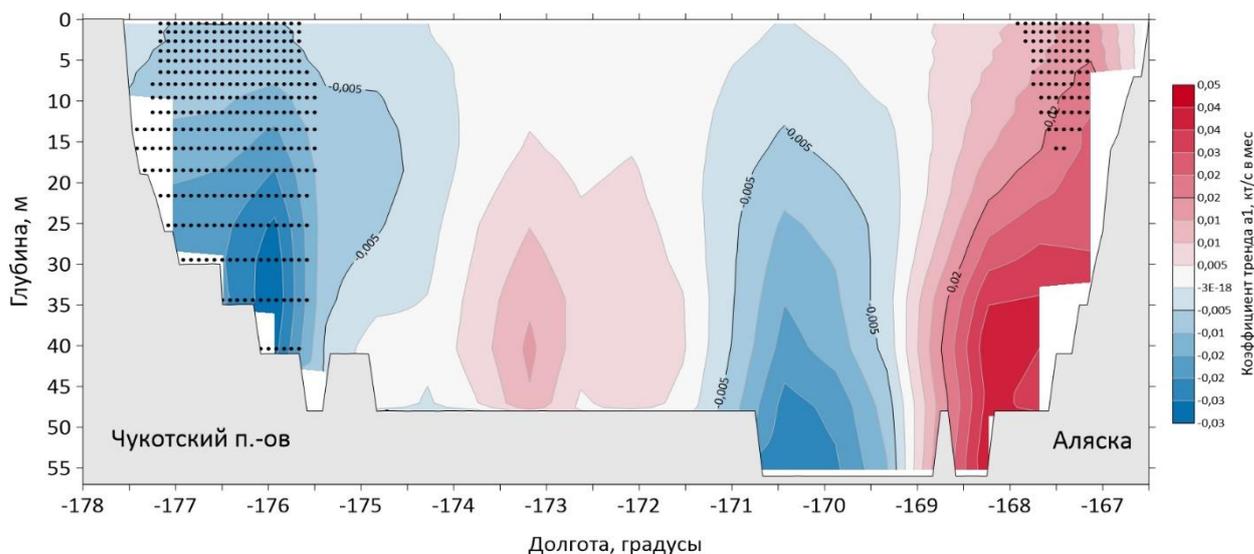


Рисунок 3.12 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на широтном разрезе по  $68^\circ 33'$  с.ш. для потока соли

Временная изменчивость потоков воды, тепла и соли через широтный разрез в Чукотском море во многом повторяет изменчивость гидрофизических характеристик. Основные области усиления или ослабления расположены у обоих побережий. Также для потоков воды и соли присутствуют две незначимые области в центральной части разреза. Более западная характеризует усиление потоков, а восточная, наоборот, ослабление. Для потока тепла и в центральной и в восточной части исследуемой области происходит усиление динамики.

Области значимых коэффициентов для потоков воды и соли сосредоточены у обоих побережий, где проходят основные течения в регионе. В западной части для потока тепла расположены очаги значимых коэффициентов, что показывает усиление северного потока на юг и объем переносимого им

тепла. В распределении значимых коэффициентов линейного тренда для потока тепла присутствует одна отличительная область, которой нет на других разрезах. Она расположена у дна в центральной части разреза (между  $173.5^\circ - 172.5^\circ$ ).

### 3.5 Оценка распределения линейного тренда для расхода воды, потоков тепла и соли после годового сглаживания

В связи с тем, что для среднемесячных значений слишком большая внутригодовая дисперсия тренд на фоне нее «невидим» и является незначимым. Вследствие этого было произведено осреднение значений по годам. По полученным среднегодовым значениям также был рассчитан линейный тренд и произведена его оценка по критерию Стьюдента с уровнем значимости  $\alpha=0.05$ .

На фоне распределения коэффициента линейного тренда по среднемесячным значения (см. рисунок 3.10) в среднегодовом усреднении выделяется больше зон со значимыми коэффициентами (рисунок 3.13). На разрезе проявляется четыре области значимых коэффициентов. В западной части происходит усиление северного течения, что повторяет картину среднемесячного распределения. Величина коэффициентов растет с глубиной и меняется от  $-1 \text{ м}^3/\text{с}$  в год на поверхности до  $-13 \text{ м}^3/\text{с}$  в год у дна, где расположено ядро усиления потока. При среднегодовом усреднении выделились две центральные области, где расположены значимые коэффициенты. Очаг наибольших значений расположен у дна ( $6 \text{ м}^3/\text{с}$  в год). Восточнее, между  $171^\circ$  з.д. и  $169^\circ$  з.д. происходит значимое ослабление южного потока, направленного в Северный Ледовитый океан. Максимум линейный тренд достигает в придонном слое ( $-6 \text{ м}^3/\text{с}$  в год). У берега Аляски идет усиление потока, но значимая область находится только в подповерхностном слое до 15 метров. Наибольшие величины расположены вплотную у берега, с отдалением они уменьшаются. Значимые величины меняются в пределах  $4 - 7 \text{ м}^3/\text{с}$  в год.

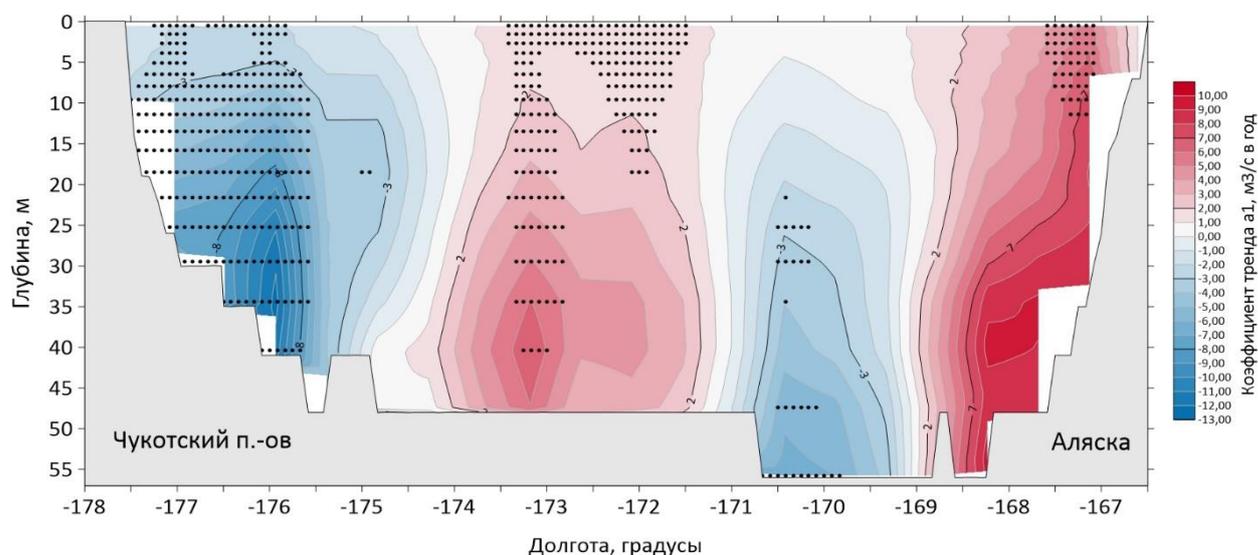


Рисунок 3.13 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на разрезе через Чукотское море для среднегодовых значений объемного расхода воды

В распределении коэффициентов линейного тренда для среднегодовых значений потока тепла (см. рисунок 3.14) стали значимы несколько областей. В восточной части исследуемой области стала значима зона у склона Аляски. От поверхности до глубины она постепенно сужается. Максимальный коэффициент тренда расположен на глубине 30 метров (0.55 ГВт в год). От поверхности до максимума коэффициенты растут в пределах 0.05 – 0.5 ГВт в год. Также в центральной части область значимых коэффициентов увеличилась. Начиная с глубины 5 метров происходит значимое усиление потока тепла. Коэффициенты изменяются от 0.05 ГВт в год у поверхности до 0.15 ГВт в год у дна. У берегов Чукотского полуострова происходит усиление северного потока тепла. Области значимых коэффициентов расположены у очагов усилений (-0.05 ГВт в год).

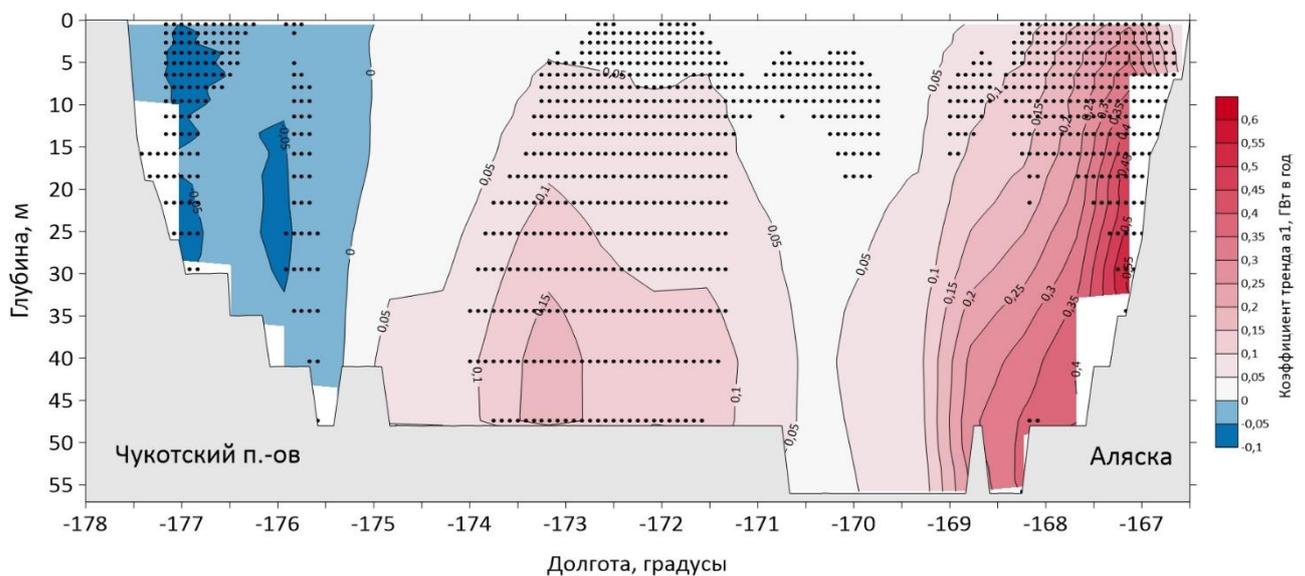


Рисунок 3.14 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на разрезе через Чукотское море для среднегодовых значений потока тепла

При усреднении среднемесячных значений до среднегодовых в распределении коэффициентов линейного тренда для потока соли на разрезе выделились новые области значимых коэффициентов (рисунок 3.15). В центральной части между  $172.5^{\circ}$  и  $171.5^{\circ}$  з.д. в слое от поверхности до глубины 15 метров проявилась область значимых коэффициентов. Они практически не изменяются с глубиной и находятся на отметке 0.05 кт/с в год. Далее, в слое от 25 до 50 метров тренд также значим и его величина выше, чем у поверхности (0.15 кт/с в год). Восточнее, у дна располагается ядро со значимым трендом, где происходит ослабевание потока соли, идущего с юга. Максимальная величина тренда здесь -0.2 кт/с в год. У берега Аляски ситуация практически не изменилась – вдоль берега от поверхности до дна находятся максимальные величины трендов, также они увеличиваются от поверхности до дна. Очаг значимых коэффициентов расположен у поверхности, в слое до 15 метров. Максимальное значение здесь подходит вплотную к берегу (0.3 кт/с в год). Минимальное у поверхности (0.1 кт/с в год). В западной части разреза произошло сокращение значимых коэффициентов. От поверхности до глубины

10 метров для диапазона  $177^{\circ}$  -  $175.5^{\circ}$  з.д. тренд стал незначим. Далее до дна тренд растет и достигает максимума ( $-0.35$  кт/с в год).

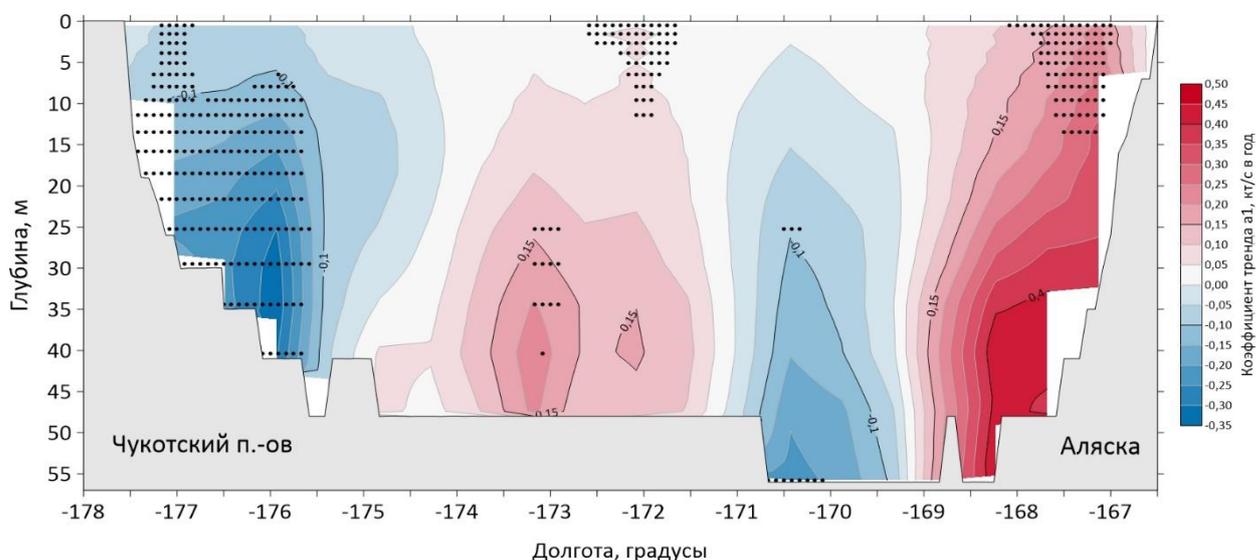


Рисунок 3.15 – Распределение коэффициентов линейного тренда за период 1993-2020 гг. на разрезе через Чукотское море для среднегодовых значений потока соли

После осреднения среднемесячных значений до среднегодовых в распределении значимых коэффициентов тренда произошли изменения. Для объемного расхода ~~потока~~ воды выделились две значимые области в центральной части разреза. Одна из них, расположенная ближе к берегам Аляски описывает ослабление или разворот потока, направленного на север. Вторая, находящаяся между  $174^{\circ}$  и  $171^{\circ}$  з.д. характеризует усиление южного потока. Во временной изменчивости потока тепла область значимых коэффициентов сократилась. Лишь небольшая область северного потока является значимой в среднегодовом усреднении. Для потока соли, как и для потока воды выделяются четыре значимые области. Две из них расположены у обоих побережий. У склона Чукотки происходит увеличение объема переносимой соли. У Аляски наблюдается значимое усиление в подповерхностном слое до 15 метров. Две оставшиеся области двумя очагами находятся в центральной части разреза. Значимое усиление происходит в придонном слое между  $173.5^{\circ}$  и  $172.5^{\circ}$  з.д.

Значимое ослабление южного потока также расположено у дна немного восточнее (между  $171^\circ$  и  $170^\circ$  з.д.).

3.6 Оценка линейного тренда интегральных по разрезу объемного расхода, потоков тепла и соли.

Также были рассчитаны коэффициенты тренда по среднемесячным значениям интегральных по широтному разрезу  $68,3^\circ$  с.ш. объемного расхода, потоков тепла и соли в Беринговом и Чукотском морях и проведена оценка их статистической значимости. Расчеты производились отдельно для потоков, направленных на север, в Северный Ледовитый океан, и на юг в Тихий океан. Коэффициенты трендов приведены в таблице 2, значимые коэффициенты выделены жирным шрифтом. Оценки трендов для Берингова моря взяты из работы [22].

Как видно из таблицы 2, статистически значимыми являются тренды только для потоков, направленных на юг, в западной части разреза. Несмотря на незначимость, потоки на север, в восточной части разреза, также усиливаются, так что в полном потоке два разнонаправленных тренда нивелируются. Это хорошо видно на рисунке 3.16, где представлены интегральные по разрезу среднемесячные значения расхода воды, потоков тепла и соли. Очевидно, что в межгодовой изменчивости расхода воды и потока соли в целом по разрезу в среднемесячном усреднении тренд не выявляется. А тренд в потоке тепла определяется общим потеплением на разрезе (см. рисунок 3.16 б).

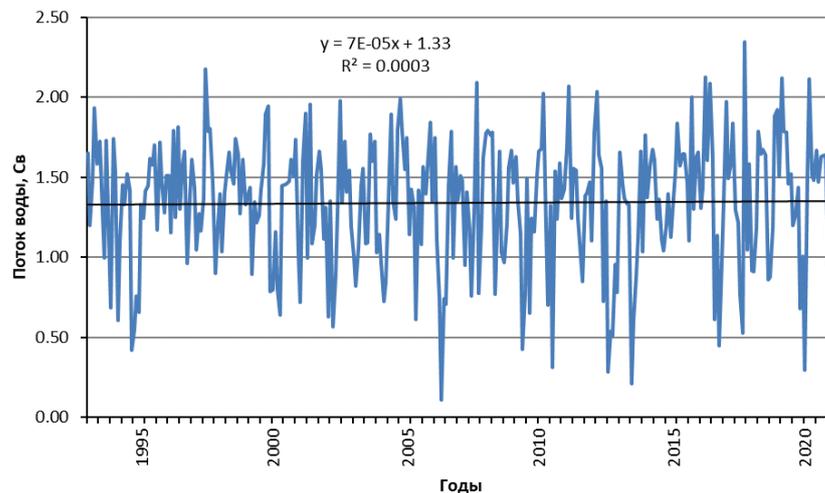
Таблица 2– Коэффициенты линейного тренда для объемного расхода, потоков тепла и соли в Чукотском море и Беринговом проливе за период 1993-2020 гг.

Жирным шрифтом выделены значимые ( $\alpha=0.05$ ) коэффициенты тренда

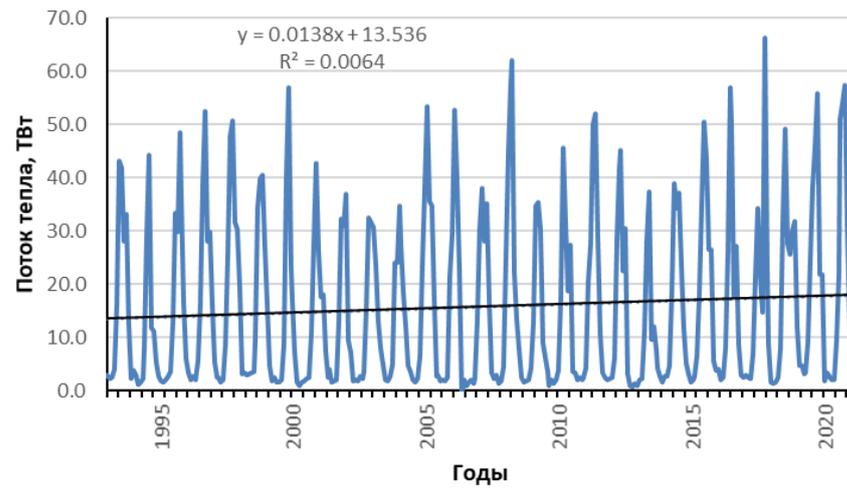
Параметры	Чукотское море	Берингов пролив
Объемный расход, (м <sup>3</sup> /с) в мес		
Полный поток	71	109.5
Поток на север	205	115.9
Поток на юг	<b>-134</b>	-6.5
Поток тепла, ТВт в мес		
Полный поток	0.0138	0.0130
Поток на север	<b>0.0161</b>	0.0132
Поток на юг	<b>-0.0023</b>	-0.0002
Поток соли, (кТ/с) в мес		
Полный поток	0.0034	0.0040
Поток на север	0.0077	0.0043
Поток на юг	<b>-0.0043</b>	-0.0003

На рисунке 3.17 представлены интегральные по разрезу среднемесячные потоки воды, отдельно направленные на север (см. рисунок 3.17 а) и направленные на юг (см. рисунок 3.17 б). В обоих потоках виден положительный тренд на их усиление. Вследствие этого можно сделать вывод об увеличении объемов воды, идущих как из Тихого океана, так и из Северного Ледовитого.

а)



б)



в)

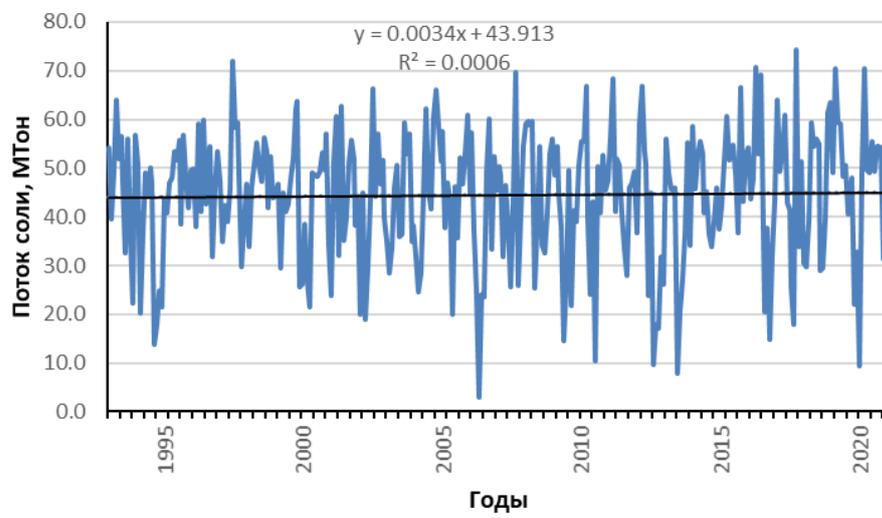


Рисунок 3.16 – Межгодовая изменчивость интегральных потоков воды (а), тепла (б) и соли (в) через Чукотское море за период с января 1993 по декабрь 2022 гг

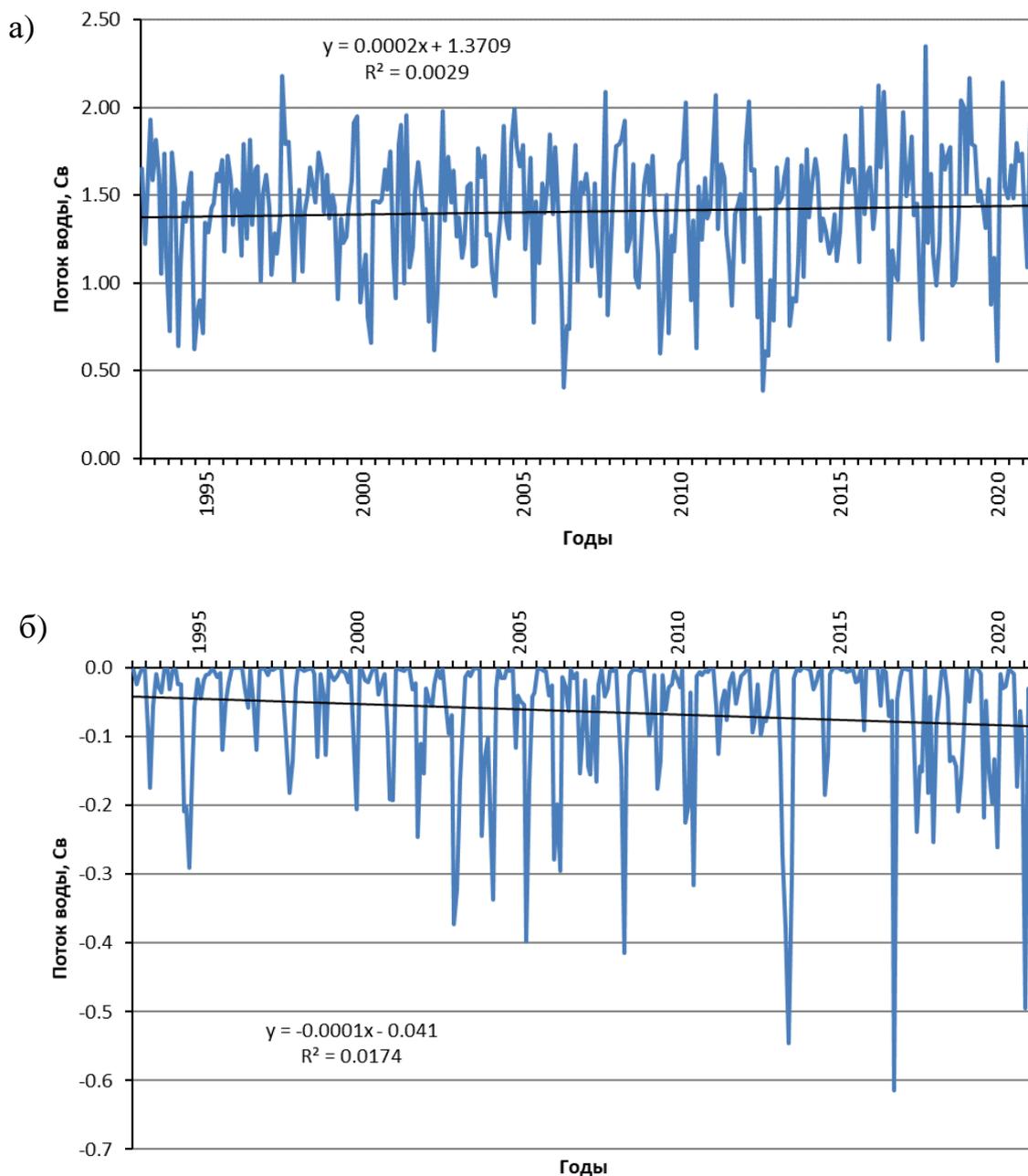


Рисунок 3.17 – Межгодовая изменчивость интегральных потоков воды, направленных на север (а), и направленных на юг (б) через Чукотское море за период с января 1993 по декабрь 2022 гг

Поток тепла, направленный на север (см. рисунок 3.18 а) имеет значимый коэффициент тренда. Происходит его усиление, объем переносимого им тепла увеличивается. Поток, идущий из СЛО, также значимо усиливается, что говорит о большем количестве тепла, приходящего из арктического бассейна.

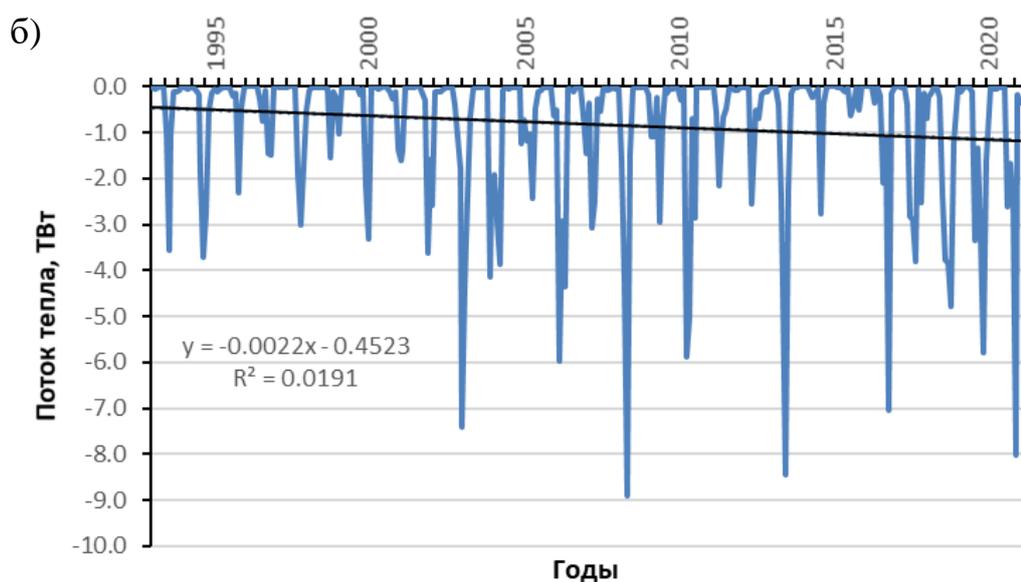
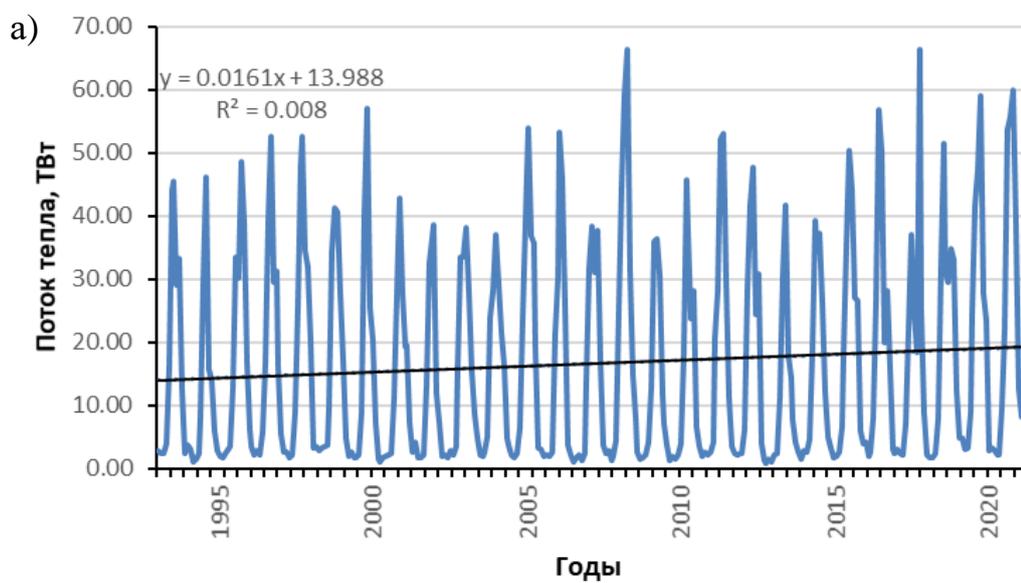


Рисунок 3.18 – Межгодовая изменчивость интегральных потоков тепла, направленных на север (а), и направленных на юг (б) через Чукотское море за период с января 1993 по декабрь 2022 гг

Для разнонаправленных потоков соли, статистически значимым является только направленный на юг (см. рисунок 3.19 б). Южный поток, проходящий через Берингов пролив, также усиливается, что в конечном счете приводит к нивелированию общего потока переносимой соли.

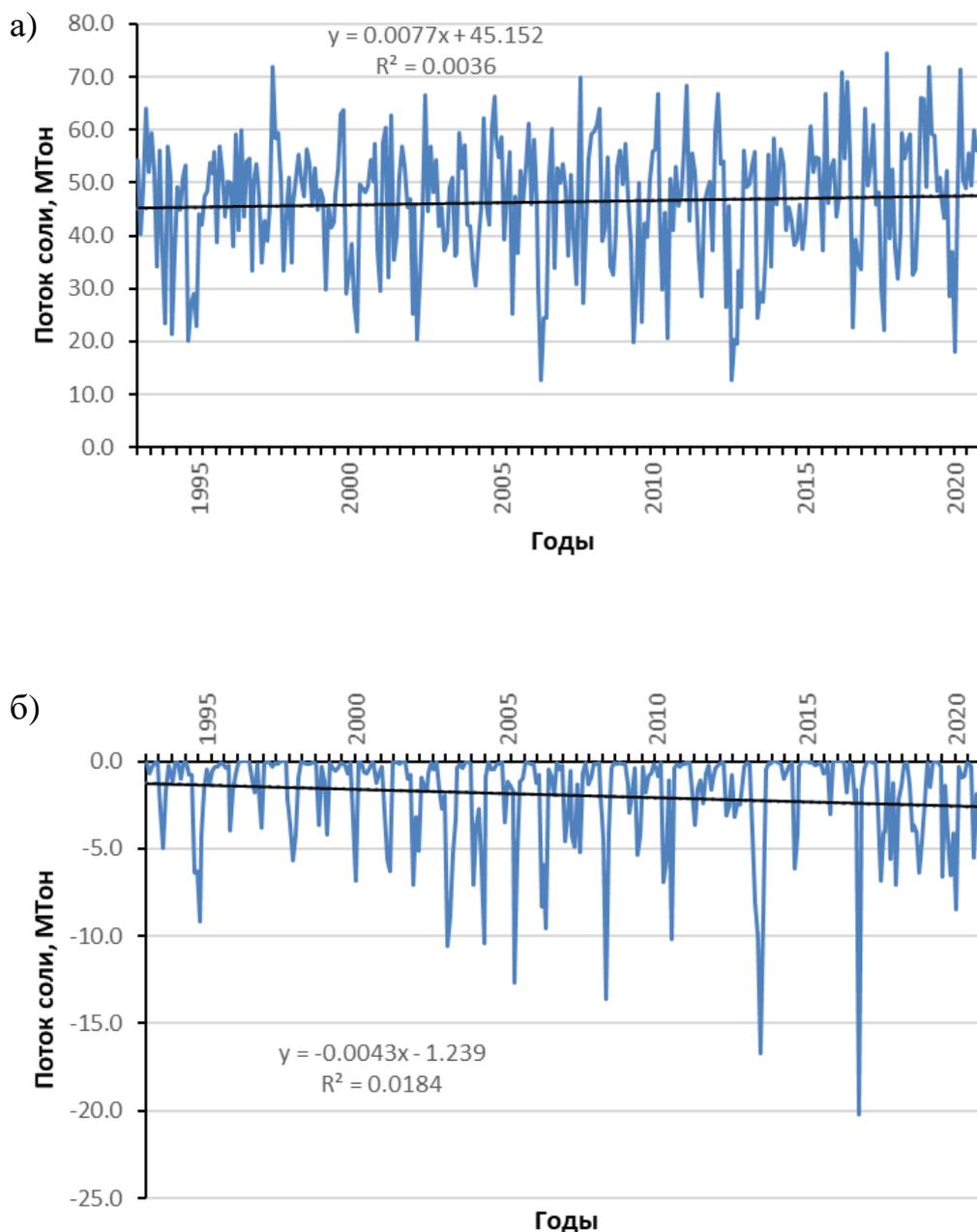


Рисунок 3.19 – Межгодовая изменчивость интегральных потоков соли, направленных на север (а), и направленных на юг (б) через Чукотское море за период с января 1993 по декабрь 2022 гг

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного анализа и оценки состояния берингоморских вод в Чукотском море были сформулированы следующие выводы.

В работе были рассмотрены средние многолетние состояния таких гидрофизических характеристик как: меридиональная скорость течения, температура и соленость. Восточная часть характеризуется высокими значениями скоростей течений и температур воды. Максимумы они достигают в подповерхностном слое до 10 метров. Соленость имеет ярко выраженное ядро в центральной придонной части разреза и убывает к обоим берегам. В западной части отмечается противотечение с маленькими скоростями, низкими значениями температуры и солености воды, направленное из Северного Ледовитого океана в Тихий.

В распределении потоков водных масс, тепла и соли есть общие черты. Основная часть сконцентрирована у склона Аляски, где тёплые и насыщенные солями воды, проходя через Берингов пролив, продолжают движение на север. Проходя близко к побережью Аляски, они затем распространяются на восток и уходят в море Бофорта. В центральной части проходят меньшие объемы воды. Также они менее тёплые и содержат меньше солей. В западной части разреза наблюдается обратное течение. Этот поток характеризуется небольшими объёмами воды и низким содержанием тепла и растворённых солей.

Средние многолетние значения для расхода воды, потоков тепла и соли через широтный разрез в Чукотском море составили 1.34 Св, 15.78 ТВт и 44.42 Мт/с соответственно.

Во временной изменчивости температуры, солености и скорости воды присутствует тренд. Во всех случаях он в большей степени выражается около обоих побережий – западного и восточного. Это может обосновываться наличием двух основных потоков.

Временная изменчивость потоков воды, тепла и соли через широтный разрез в Чукотском море во многом повторяет изменчивость гидрофизических характеристик. Основные области усиления или ослабления расположены у обоих побережий.

По оценкам коэффициентов линейного тренда, все потоки через Чукотское море, направленные из Северного Ледовитого океана в Тихий, усиливаются, причем только эти тренды являются статистически значимыми, за исключением потока тепла, идущего на север – он тоже является значимым.

## Список источников

1. Glenn R. Van Blaricom, Leah R. Gerber, Robert L. Brownell Jr., Marine Mammals, Extinctions of, Encyclopedia of Biodiversity. Second Edition, – Academic Press, 2013.– Pp. 64-93. DOI.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00187-8.
2. Моря России — Чукотское море/ География. URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-chukotskoe-more/> (дата обращения 15.05.2024).
3. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана.– М., 1970.
4. Fishbiosystem. URL: <http://fishbiosystem.ru/Map/Chukchi> (дата обращения 17.05.2024).
5. Сухой В.Ф. Моря Мирового океана.– Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 288 с.
6. Добровольский А.Д. Залогин Б.С. Моря СССР.– М., Изд-во МГУ, 1982 г.– 192 с.
7. Плотников В.В., Вражкин А.Н., Мезенцева Л.И. Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 7. С.103-115.
8. Пивоваров С.В. Химическая океанография Арктических морей России: учебное пособие. – СПб.: Гидрометеиздат, 1999. – 105 с.
9. Зонн И.С. Костяной А.Г., Куманцов М.И. Чукотское море. Энциклопедия / под общ. ред. А.Н. Косарева. – М. Международные отношения, 2013. 176 с.
10. Залогин Б.С. Косарев А.Н. Природа мира. Моря – М.: Мысль, 1999. – 400 с

11. Медведев И.П. Особенности сезонных колебаний уровня в морях Российской Арктики // *Океанология*. 2021. Т.61,№6. С.869-886. DOI: 10.31857/S0030157421060095
12. Deleersnijder E., Hansell D. Carbon and Nitrogen cycling within the Bering-Chukchi Seas // *Progress In Oceanography*. 1989. No.22. Pp. 277.
13. Codispoti, L.A., Richards, F.A.. Micronutrient Distributions in the East Siberian and Laptev Seas during summer 1963 // *Arctic*. 1968. No.21. DOI: 10.14430/arctic3251.
14. Kinney C.J., Assmann K.M., Maslowski W., Björk G., Jakobsson M., Jutterström S., Lee Y.J., Osinski R., Semiletov I., Ulfsbo A., Wählström I., Anderson L.G. On the circulation, water mass distribution, and nutrient concentrations of the western Chukchi Sea // *Ocean Sci.*. 2022. No.18. Pp.29–49. DOI: 10.5194/os-18-29-2022/
15. ГОСТ Р 58283–2018. Нефтяная и газовая промышленность. Арктические операции. Учет ледовых нагрузок при проектировании морских платформ (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 ноября 2018 г. N 1008-ст) URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/704/70445.pdf> (дата обращения 18.05.2024).
16. Serreze M., Crawford A., Stroeve J., Barrett A., Woodgate R. Variability, trends, and predictability of seasonal sea ice retreat and advance in the Chukchi Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. No.121. DOI: 10.1002/2016JC011977.
17. Zhuk V.R., Kubryakov A.A. Interannual Variability of Salinity in the Chukchi Sea and Its Relationships with the Dynamics of the East Siberian Current during 1993–2020 // *Remote Sens*. 2023, No.15, Pp. 5648. DOI: 10.3390/rs15245648
18. Кильматов Т.Р., Попов А.С. Климатический тренд температуры и солености в Беринговом проливе в последние десятилетия // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 4-3(54). С. 101-104. DOI 10.37220/МИТ.2021.54.4.094

19. Global Ocean Physics Reanalysis/ E.U. Copernicus Marine Service Information. [Электронный ресурс] URL: [https://resources.marine.copernicus.eu/productdetail/GLOBAL\\_REANALYSIS\\_PHY\\_001\\_030](https://resources.marine.copernicus.eu/productdetail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030) (дата обращения 20.04.2024).

20. Наумов Л.М., Гордеева С.М. Боковой перенос тепла и соли в Лофотенском бассейне: сравнение на основе трех баз данных / Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 43–55. DOI: 10.7868/S207366732003003X

21. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 424 с.

22. Игнатъев, Д. Е. Средняя многолетняя оценка потоков воды, тепла и соли через Берингов пролив // Гидрология и океанология–2023: сборник материалов конференции Студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ, Санкт-Петербург, 20 апреля 2023 года. – Казань: ООО "Бук", 2023. – С. 184-191.