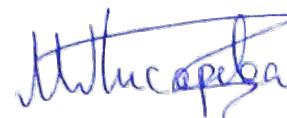


На правах рукописи



Писарева Мария Николаевна

**СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД ЧУКОТСКОГО МОРЯ
В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД**

Специальность 1.6.17 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Писарев Сергей Викторович

Официальные оппоненты: **Дианский Николай Ардальянович**
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Кровнин Андрей Сергеевич
доктор географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»**

Защита состоится «__» _____ 2022 г. в _____ ч. _____ мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.090.02, при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский проспект, д.36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и изученность темы исследования.

Поступление тихоокеанских вод (ТВ) на север через Берингов пролив оказывает большое влияние на гидрологические характеристики вод, физические процессы и экосистему Северного Ледовитого океана (СЛО). Холодные и плотные ТВ, приходящие в Канадскую котловину Арктического бассейна (АБ) СЛО зимой и весной, образуют галоклин [Rudels, 2019], препятствующий обмену теплом нижележащих атлантических вод с поверхностью. ТВ также являются важным источником биогенных веществ, составляющих основу первичной продукции и фундаментальной составляющей углеродного цикла [Codispoti et al., 2005]. Приток теплых ТВ летом и осенью вносит существенный вклад в уменьшение ледяного покрова [Shimada et al., 2006; Steele et al., 2010]. Кроме того, летние ТВ являются источником пресной воды в СЛО [Pickart et al., 2013].

Процессы в Беринговом и Чукотском морях трансформируют ТВ на их пути в СЛО [Woodgate et al., 2005a]. Из-за небольшой глубины Чукотского моря и его достаточно обширной площади течения моря находятся под сильным воздействием атмосферных процессов, рельефа морского дна, а также сезонного ледяного покрова, что обуславливает сильную временную изменчивость гидрологической структуры вод [Coachman et al., 1975]. Понимание процессов поступления ТВ в СЛО, а также их свойств, динамики и трансформации на пути в АБ – в Беринговом и Чукотском морях – является неотъемлемой частью изучения климатической системы Земли и имеет как фундаментальное научное, так и прикладное значения, особенно в условиях изменяющегося климата Арктики [IPCC, 2022].

Ввиду труднодоступности района, суровых климатических условий и, главным образом, наличия ледяного покрова более шести месяцев в году, течения и трансформация вод на Чукотском шельфе в настоящее время изучены в меньшей степени, чем в других районах. Кроме того, государственная граница между РФ и США, проходящая через Чукотское море и Берингов пролив, также зачастую затрудняет проведение экспедиционных работ во всем регионе одновременно.

Для того, чтобы обеспечить возможность проведения экспедиционных работ сразу во всем регионе, Российская академия наук (РАН) и Национальная администрация по океану и атмосфере США (NOAA) в 2003 году совместно запустили программу «РУСАЛКА» – Российско-Американское долговременное исследование Арктики. Главной задачей программы было проведение долговременных исследований с целью выявления причин и следствий климатических изменений в тихоокеанском секторе СЛО, а также объяснения изменений ледяного покрова в Беринговом и Чукотском морях. В рамках программы с 2004 г.

проводились систематические наблюдения в регионе: ежегодная установка и обслуживание автономных океанографических заякоренных буйковых станций (АБС) в проливе, а также проведение океанологических экспедиций. Использование этих натуральных данных предоставило автору уникальную возможность идентифицировать и описать водные массы на чукотском шельфе, составить карты распространения течений в летне-осенний период и изучить динамику вод региона под влиянием атмосферного воздействия.

Цель работы: изучение структуры и динамики водных масс на чукотском шельфе в летне-осенний период, при помощи анализа натуральных данных, данных атмосферного реанализа, а также результатов численного моделирования.

Согласно обозначенной цели, были решены следующие задачи:

- анализ характеристик водных масс, их происхождения, динамики, и переносов в районе Чукотского моря и Берингова пролива с использованием современных и исторических натуральных данных, а также результатов численного моделирования;
- оценка межгодовой изменчивости водных масс Чукотского моря;
- анализ аномальной гидрологической структуры вод Чукотского моря в 2009 г. и объяснение причин ее возникновения;
- численное моделирование формирования аномальной циркуляции вод в районе Берингова пролива;
- исследование ветрового апвеллинга в каньоне Барроу как механизма переноса атлантических вод на чукотский шельф.

Предметом защиты является **новое решение актуальной научной проблемы** – описание структуры и динамики водных масс на чукотском шельфе в летне-осенний период 2002–2012 гг., а также оценка климатических предпосылок формирования локальных особенностей циркуляции вод моря.

Научную новизну исследования составляют **основные положения, выносимые на защиту:**

1. Впервые дано детальное описание структуры водных масс (аляскинской прибрежной, берингоморской, тихоокеанской зимней, сибирской прибрежной) шельфа Чукотского моря в летне-осенний период 2004, 2009, 2012 гг. на основании комплексного анализа гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик и проведена оценка их межгодовой изменчивости;

2. Построены схемы распространения водных масс Чукотского моря в летне-осенний период 2004, 2009, 2012 гг. Рассчитаны переносы отдельных водных масс через Берингов пролив, юг Чукотского моря, каньон Геральда и пролив Лонга: перенос аляскинских

вод варьировался от 1,87 до 0,002 Св, берингоморских вод от 1,35 до 0,01 Св, сибирских вод от 0,34 до 0,01 Св, зимних вод от 0,79 до 0,04 Св.;

3. На основе анализа натуральных данных проекта «РУСАЛКА» впервые показано, что поворот Аляскинского прибрежного течения мористее в сторону побережья Чукотки, далее – его вынос на юг через Берингов пролив в Берингово море и обратное поступление через западную часть Берингова пролива, а также формирование придонного компенсационного течения берингоморских вод с восточной стороны Берингова пролива происходят в результате экмановского переноса под воздействием аномально сильных северо-восточных ветров, что подтверждается результатами численного моделирования. Установлено, что за период 2000–2012 гг. 10% северо-восточных ветров над акваторией могли вызывать такую аномальную циркуляцию;

4. Выявлено 54 ветровых апвеллинга в верховье каньона Барроу за 2002–2004 гг. Установлено, что атлантические воды приносились на чукотский шельф в результате таких апвеллингов только в холодный сезон и большинство случаев значительного уменьшения сплоченности льда в верховье каньона и в районе Чукотской полыньи совпадает с наблюдениями апвеллинга. Оценено, что за период 1979–2014 гг. могло происходить 482 ветровых апвеллинга в верховье каньоне Барроу;

5. Впервые показана связь распределения скоростей течений в Чукотском море с пространственным распределением бентосных организмов инфауны и эпифауны с разным типом питания, а также с пространственным распределением донных осадков по типу преобладающего размера на основе комплексных натуральных данных. Фильтраторы чаще встречаются в районах с высокими скоростями потоков (и максимальными размерами донных осадков): в районе Аляскинского прибрежного течения, в каньоне Геральда и в Центральном каньоне. Однако в целом на чукотском шельфе преобладают грунтоеды, что совпадает с представлениями об относительно невысоких скоростях течений на шельфе (следствием чего является осаждение более мелких частиц грунта).

Достоверность полученных результатов. Использованные в диссертации данные получены с использованием современного океанографического оборудования, откалиброванного в соответствии с международными стандартами качества. Основные положения, выносимые на защиту, опубликованы в ведущих океанологических журналах [Pisareva et al., 2015a, б, 2018, 2019]. Кроме того, результаты исследования постоянно подтверждаются новейшими натурными данными, получаемыми в Чукотском море в ходе других экспедиций, а также опубликованными результатами их анализа [Ershova et al., 2015a, б; Pickart et al., 2019; Shroyer, Pickart, 2019; Lin et al., 2019б; Pacini et al., 2019; Baker et al., 2020б]. Некоторые результаты работы подтверждают выводы, опубликованные другими

отечественными и зарубежными учеными, изучающими Чукотское море. Косвенным подтверждением достоверности выводов работы являются проявления описанных процессов в самой природе Чукотского моря и наблюдаемые мореплавателями – такими как таяние полей морского льда в местах поступления теплых ТВ и визуальное определение течений по наличию взвешенных веществ.

Научное и практическое значение исследования. В работе охарактеризована структура, распределение, динамика и межгодовая изменчивость водных масс Чукотского моря в летне-осенний период. Построенные схемы распространения водных масс моря могут быть использованы для анализа химической и биологической структуры моря, так как течения непосредственно влияют на биогеохимические процессы и функционирование экосистемы. Полученные сведения о скоростях и направлениях течений, их изменчивости под воздействием атмосферных процессов, а также их влияния на параметры и динамику ледяного покрова, необходимы для обеспечения безопасности судоходства в регионе, развития рыболовства и нефтегазовой отрасли, а также жизнедеятельности населения, в особенности – в условиях меняющегося климата. Результаты работы могут быть использованы при проведении мониторинга, моделирования и прогнозирования климатических условий и ледовой обстановки в Чукотском море и прилегающих областях.

Личный вклад автора. Автор участвовала в шести океанологических рейсах в район исследования, в которых были получены натурные данные, использованные в диссертации; выполнила обработку и анализ современных и исторических натурных данных. При непосредственном участии автора была выполнена подготовка к проведению численных экспериментов по исследованию механизмов циркуляции вод в районе Берингова пролива и в Чукотском море; автор предложила интерпретацию результатов моделирования. Автор обеспечила подготовку полученных результатов к опубликованию в ведущих рецензируемых журналах, а также представила результаты на конференциях и семинарах.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на научных конференциях и встречах ведущих исследователей проекта «РУСАЛКА» в г. Майами, США (2012 г.), в г. Санкт-Петербург, Россия (2013 г.), в г. Гонолулу, США (2014 г.), на симпозиуме Морских Наук на Аляске в Анкоридже, США (2015 г.), на семинарах физического сектора Института Океанологии им. П.П. Ширшова в г. Москва, Россия (2014, 2017 гг.) и Вудсхольского Океанографического Института в г. Вудс Хол, США (2015 г.), на встрече Тихоокеанской Арктической Группы в г. Сиэтл, США (2014 г.), на Федеральном Арктическом Форуме «Дни Арктики в Москве» (2015 г.), на двух международных конференциях по наукам о Мировом Океане в г. Гонолулу, США (2014 г.) и в Новом Орлеане, США (2016 г.), на семинаре «Биогеохимические исследования в морях Сибирского шельфа»,

в г. Киль, Германия (2016 г.), на II Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана» в Москве (2017 г.), на конференции организации по морским наукам Северной Пацифики «ПИКЕС – 2017» во Владивостоке (2017 г.), на пятой Всероссийской конференции по прикладной океанографии (2017 г.) в Государственном океанографическом институте имени Н.Н. Зубова, на конференции «Пятый международный симпозиум по исследованию Арктики» в г. Токио, Япония (2018 г.), на конференции «Четвертый Симпозиум по морским наукам» в г. Сямынь, Китай (2019 г.), на конференции «Европейская Ассамблея по наукам о Земле» в г. Вена, Австрия (2019 г.). Полученные схемы распространения водных масс, а также выводы по гидрологической структуре Чукотского моря использовались автором при планировании успешно проведенного рейса проекта «РУСАЛКА» 2014 года.

Кроме того, выводы настоящей диссертации были использованы автором для подготовки океанологических описаний приоритетных для охраны морских районов Арктики по программе по сохранению биологического разнообразия «Сеть приоритетных для сохранения морских районов Арктики» (ArcNet) в рамках работы по гранту Всемирного фонда природы (WWF) России.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 7 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья, опубликованная вне перечня ВАК, 6 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объем работы составляет 146 страниц. Текст исследования иллюстрирован 41 рисунком и 3 таблицами. Библиографический список включает 216 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность: научному руководителю Сергею Викторовичу Писареву за помощь и поддержку на всех этапах выполнения и написания работы; Роберту Пикарту за поддержку и совместную работу по написанию и публикации статей; Кэти Крэйн, инициатору и руководителю проекта «РУСАЛКА»; коллегам из ИО РАН за плодотворные дискуссии; команде и научному составу экспедиций НИС «Профессор Хромов» и ледокола «Nealy»; Е.Г. Морозову и П.О. Завьялову за ценные советы; Маршаллу Шварцу за помощь в работе во время рейсов; А.А. Островскому и С.М. Шаповалову за организацию рейсов проекта; Каролине Нобре за помощь в обработке данных; а также семье и друзьям за тепло и поддержку. Различные этапы работы были выполнены при поддержке проекта «РУСАЛКА».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, предмет защиты, отражена научная новизна и практическая значимость исследования, даны положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, представлены сведения о личном вкладе автора, апробации работы, а также приведен список опубликованных автором работ.

В **Главе 1** приведен обзор современного состояния изученности гидрологической структуры и динамики вод Чукотского моря; представлены общее физико-географическое описание (**раздел 1.1**) и исторический обзор исследований региона (**раздел 1.2**).

Раздел 1.3 посвящен классификации водных масс Чукотского моря.

Средний перенос вод через Чукотское море и Берингов пролив направлен на север из-за разницы уровней Тихого океана и СЛО и в последние десятилетия превышает 1 Св [Woodgate et al., 2012, 2017]. Циркуляция основных течений в Чукотском море во многом подчиняется орографии бассейна [Stabeno et al., 2018]. ТВ, поступающие на север через Берингов пролив, разделяются на несколько «ветвей» на своем пути через чукотский шельф (рис. 1): на северо-запад в каньон Геральда, на север через Центральный каньон по направлению к банке Анны и к каньону Барроу на северо-востоке [Pickart et al., 2004; Lin et al., 2019]. Описанные ветви переносят ТВ: аляскинскую прибрежную водную массу (АПВ) через восточную часть Берингова пролива и вдоль побережья Аляски, летнюю берингоморскую (БВ) в западной части пролива, через Центральный каньон и к каньону Геральда, а также тихоокеанскую зимнюю водную массу (ЗВ) в придонном слое в зимнее время. Перенос БВ через пролив Лонга на запад имеет непостоянный характер [Горбунов, 1957; Weingartner et al., 1999].

Теплая и пресная АПВ (6–10 °С и 30–31 епс) питается материковым стоком с Аляски на север Берингова моря, переносится горизонтальной адвекцией на север в узком прибрежном Аляскинском течении (АПТ, 10–20 км в ширину) и наблюдается в Чукотском море с весны до осени.

БВ (1–4 °С и 32,2–33 епс) формируется в результате смешения богатой биогенными веществами анадырской водной массы и более холодных и пресных берингоморских шельфовых вод вблизи Берингова пролива.

Холодная и соленая ЗВ формируется и модифицируется на севере Берингова моря и в Чукотском море в результате сильного атмосферного воздействия, образования ледяного покрова, конвективного перемешивания в разводьях и полыньях [Weingartner et al., 1998]. В результате значительного осолонения при ледообразовании может формироваться «гипер-

соленая» ЗВ (ГЗВ; [Itoh et al., 2012]), а в результате нагрева водной толщи – остаточная ЗВ (ОЗВ; [Pickart et al., 2016]). Все три типа тихоокеанских зимних вод (ЗВ, ОЗВ и ГЗВ) богаты биогенными веществами, которые они получают из донных осадков в результате конвекции [Lowry et al., 2015]. В зимнее время ЗВ вовлекаются в стабильную антициклоническую циркуляцию над банками чукотского шельфа, что обуславливает часто наблюдаемую в этих районах высокую сплоченность морского льда [Кулаков, Сенько, 1993].

Сибирская прибрежная водная масса (СПВ) формируется в результате холодного и пресного стока сибирских рек и переносится с запада на восток из Восточно-Сибирского моря через пролив Лонга в направлении Берингова пролива Сибирским прибрежным течением (СПТ). Под влиянием благоприятных для даунвеллинга западных ветров формируется гидрологический фронт между хорошо развитым СПТ и окружающими водами, под воздействием восточных ветров, провоцирующих апвеллинг, СПТ слабо развито, или же вовсе отсутствует [Weingartner et al., 1999].

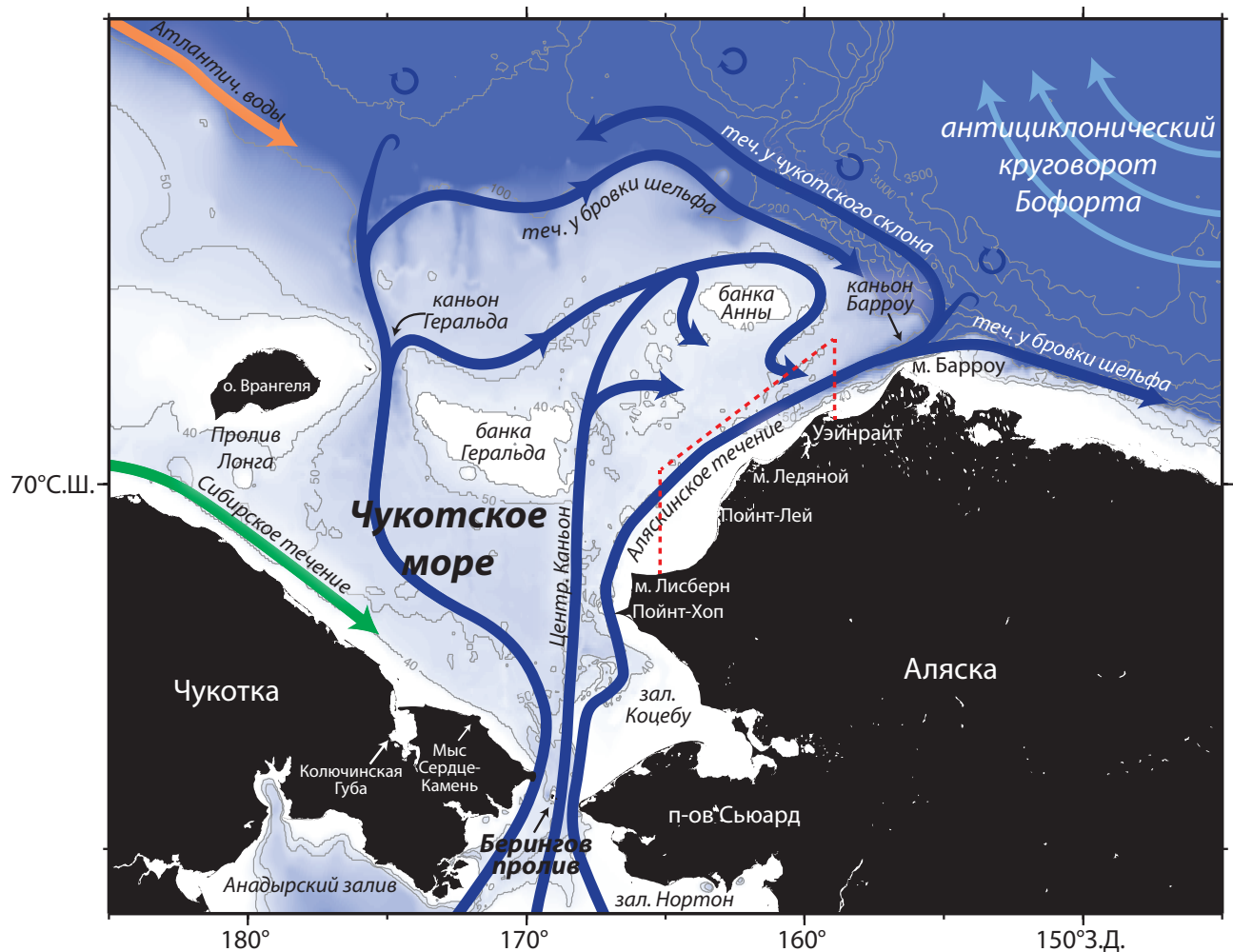


Рисунок 1 - Карта-схема течений Чукотского моря. Красной пунктирной линией отмечено местоположение Чукотской полыньи

Поверхностная арктическая водная масса (ПАВ) формирует пресный и холодный поверхностный слой, образованный в результате таяния морских льдов на севере района.

В результате апвеллинга теплые и соленые атлантические воды (АВ) могут подниматься по каньонам Геральда и Барроу на чукотский шельф и взаимодействовать с вышележащими водами моря и ледяным покровом, поддерживать существование полыней и влиять на биологическую продуктивность района [Hirano et al., 2016; Ladd et al., 2016].

Климатические условия описаны в **разделе 1.4**. Чукотское море круглогодично находится под влиянием антициклона над морем Бофорта (ВН), Алеутской депрессии (АЛ), а также Сибирского и Юконского антициклонов. Градиент давления между ВН и АЛ порождает формирование восточных и северо-восточных ветров, являющихся среднеклиматическими в регионе [Wood et al., 2015].

В **Главе 2** приведено описание **используемых данных и методов исследования**. В диссертации используются данные океанологических съемок проекта «РУСАЛКА» 2004, 2009, 2012 гг.: гидрологические, гидрохимические, гидробиологические, геологические. Для уточнения карт-схем распространения водных масс на чукотском шельфе использовались данные по видовому разнообразию зоопланктона на станциях, так как зоопланктонные сообщества являются хорошим индикатором происхождения вод [Павштикс, 1984; Ershova et al., 2015].

В работе также были использованы данные по скоростям течений в летне-осенний период 1990–2014 гг., данные АБС в Беринговом проливе в 2008–2009 гг., данные АБС в каньоне Барроу в 2002–2004 гг., массив STD-данных базы данных Мирового Океана (WOD) за 1920–2013 гг., данные по давлению на уровне моря и ветрам на высоте 10 м над уровнем моря атмосферного реанализа NARR, данные метеорологической станции на мысе Барроу, батиметрические данные глобальной цифровой модели рельефа ETOPO2, а также данные новой Региональной цифровой модели превышений Аляски ARDEM.

Интеграл касательного напряжения ветра для изучения ветрового влияния на распределение и динамику водных масс рассчитывался как:

$$I_w = \int_{t_1}^{t_2} \tau_a(t) dt, \quad (1)$$

где τ_a – компонента касательного напряжения ветра, направленная вдоль потока, а t_1 и t_2 – время начала и конца каждого ветрового «события».

Ветровой апвеллинг в верховье каньона Барроу выделялся по двум критериям: (1) наличие северо-восточного ветра по данным метеорологической станции на мысе Барроу, (2) течение в верховье каньона направлено на юго-запад. Интегральный индекс апвеллинга рассчитывался как:

$$FRI = \int_{t_{us}}^{t_{ue}} |U(t)| dt, \quad (2)$$

где $U(t)$ – скорость течения по данным АБС, а t_{us} , t_{ue} – время начала и конца каждого апвеллинга.

Для изучения влияния ветрового воздействия на гидрологическую структуру вод Берингова пролива и интерпретации натуральных данных были проанализированы результаты численных экспериментов с применением идеализированной модели MITgcm [Marshall et al., 1997]. В рамках работы была также построена карта распределения интегрированной по глубине скорости течений в летний период 2009 г. по результатам численного моделирования при помощи Модели морского льда и океана [Wang et al., 2014].

Глава 3 посвящена описанию гидрологической структуры вод Чукотского моря по данным экспедиций 2004, 2009 и 2012 гг., а также исследованию климатических предпосылок формирования циркуляции вод по данным атмосферного реанализа.

В **разделе 3.1** представлены T,S-диаграммы и описаны водные массы. По данным экспедиций проекта «РУСАЛКА» 2004, 2009 и 2012 гг. выделены T,S-диапазоны для водных масс на чукотском шельфе: АПВ ($3 < T < 14,7$ °С, $16,5 < S < 32,6$), БВ ($-0,5 < T < 6$ °С, $32 < S < 33,4$), ЗВ (0 °С $< T$, $30,5 < S < 33,64$), СПВ ($-1,6 < T < 6$ °С, $16,3 < S < 30,5$), АВ ($-1,26 < T < 0$ °С, $33,6 < S < 34,4$), ПАВ ($-1,6 < T < 6$ °С, $16,3 < S < 32$). Водные массы имели повышенные температуры во время экспедиции 2004 г., пониженные – во время съемки 2009 г.

В **разделе 3.2** построены карты-схемы распространения АПВ, ЗВ, БВ, СПВ в летне-осенний период 2004, 2009, 2012 гг. Распространение АПВ, БВ и ЗВ в августе 2004 г. (рис. 2) совпадает с картиной распространения водных масс в море, описанной в литературе [Coachman et al., 1975]. СПТ не наблюдалось во время съемки 2004 г.

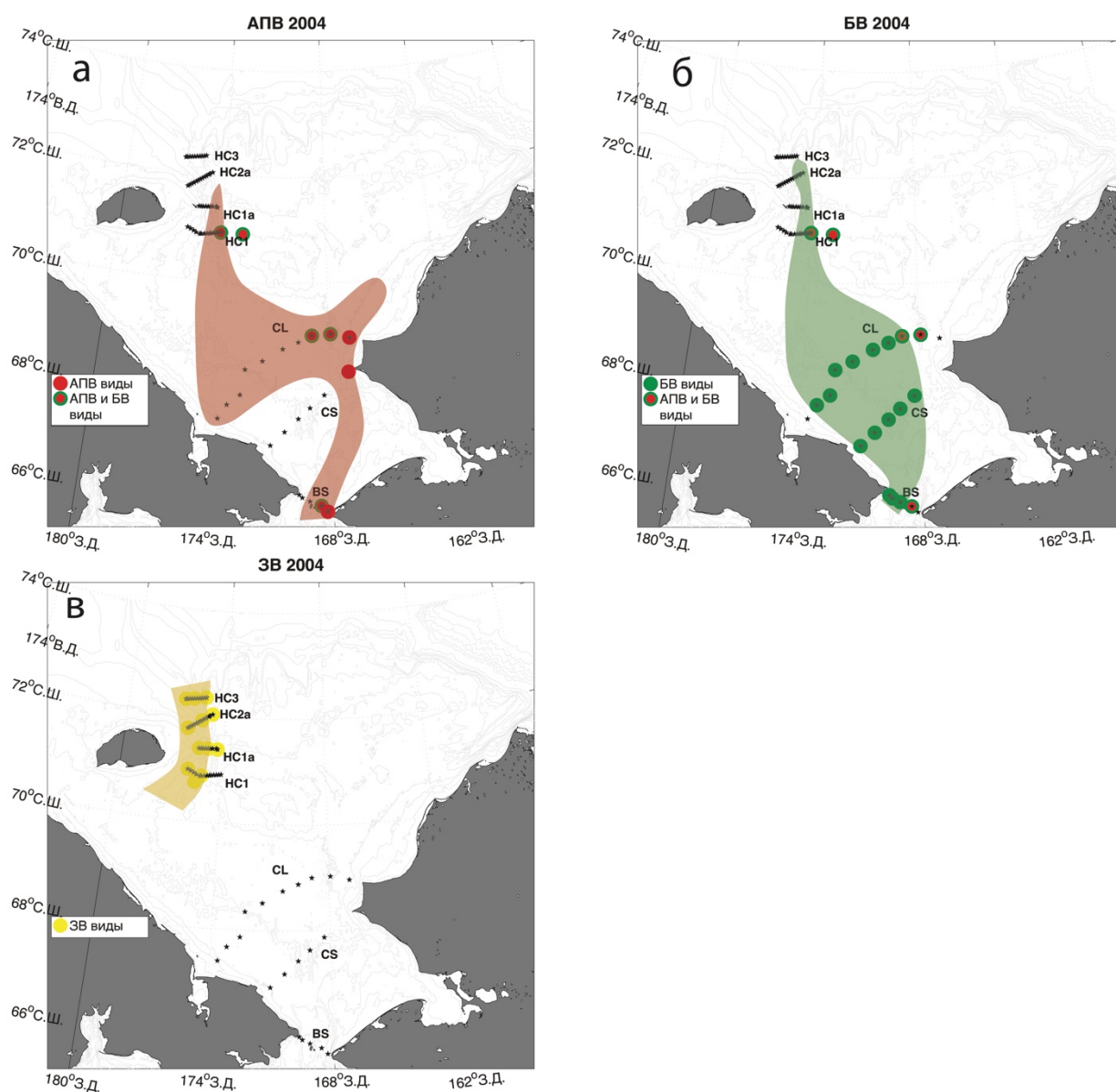


Рисунок 2 - Карта-схема ареалов распространения водных масс по данным рейса проекта «РУСАЛКА» в августе 2004 г. Разноцветными кружками показаны сообщества зоопланктона, характерные для определенных водных масс

В сентябре 2009 г. наблюдалось аномальное распределение водных масс в южной, центральной и западной частях Чукотского моря (рис. 3). АПВ, всегда наблюдающаяся в узком АПТ на небольшом расстоянии от побережья США, в сентябре 2009 г. впервые была измерена с западной стороны Берингова пролива. Ближе к берегу АПВ занимала всю толщу, однако восточнее, по мере отдаления от берега, постепенно замещалась БВ на придонных горизонтах. БВ в сентябре 2009 г. наблюдалась у берегов Аляски. Таким образом, во время съемки 2009 две водные массы поменялись местами в проливе. При этом направление их движения через пролив не изменилось: обе водные массы распространялись на север со скоростями от 30 до 85 см/с.

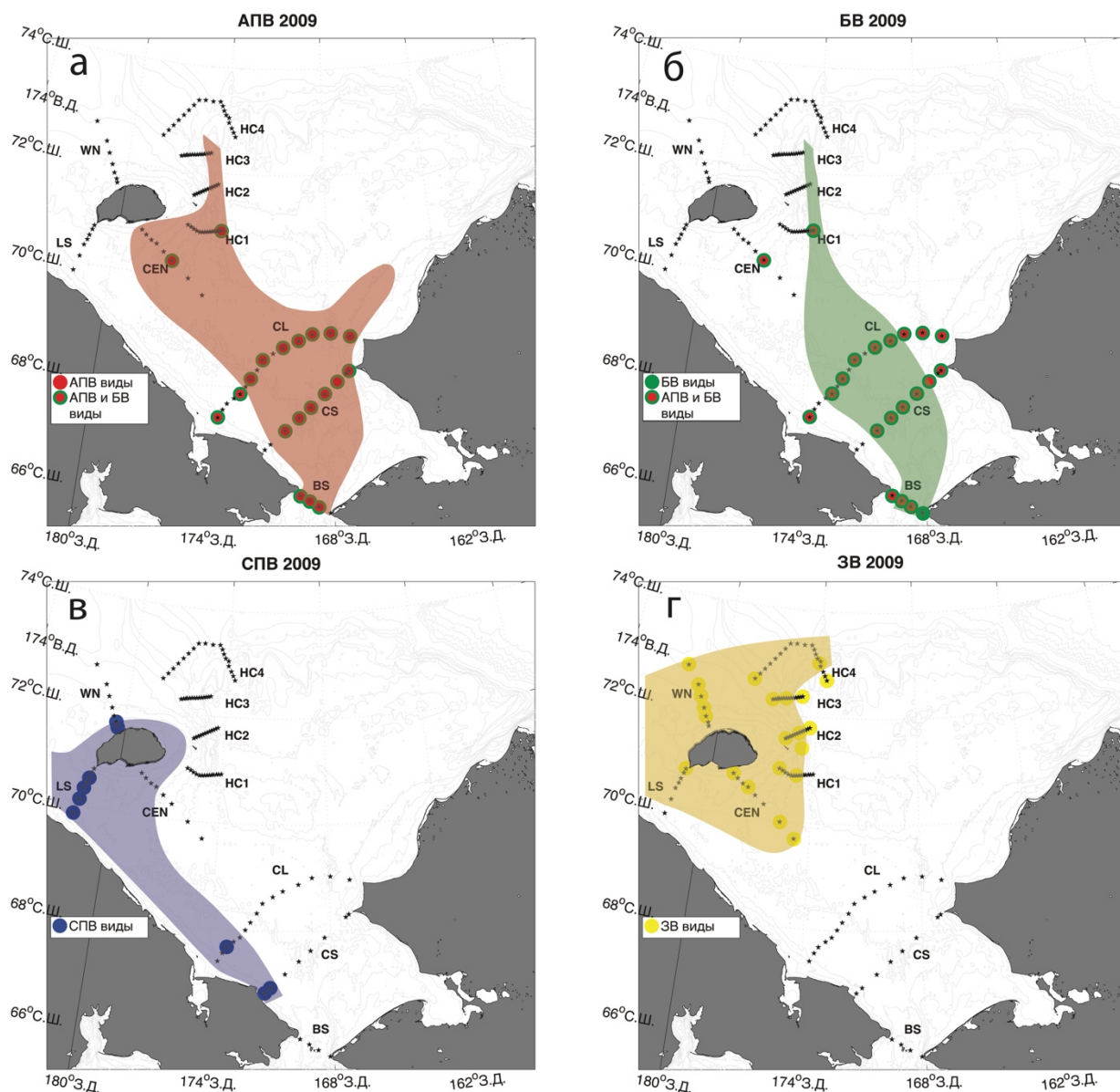


Рисунок 3 - Карта-схема ареалов распространения водных масс по данным рейса проекта «РУСАЛКА» в сентябре 2009 г. Разноцветными кружками показаны сообщества зоопланктона, характерные для определенных водных масс

Обычно АПТ имеет максимальные скорости в поверхностном слое восточной части пролива [Coachman et al., 1975], однако в сентябре 2009 г. АПВ в западной части пролива имела наибольшие скорости в придонном слое. В изучаемый период и АПВ, и БВ наблюдались по всему южному и западному чукотскому шельфу. Наличие теплых пресных вод с характеристиками АПВ в северо-западной части чукотского шельфа в сентябре 2009 г. аномально для гидрологической структуры моря. В сентябре 2009 г. ЗВ повсеместно наблюдалась вокруг острова Врангеля, что является ее обычным ареалом распространения. Аналогично с результатами измерений рейса августа 2004 г., анализ данных 2009 г. показал, что ЗВ поступала в каньон Геральда на его западном склоне и по мере продвижения к устью

каньона перемещалась на восток. Под влиянием северных ветров, благоприятных для формирования даунвеллинга вдоль побережья Чукотки, пресная и теплая СПВ распространялась на юго-восток в СПТ. Имеющиеся данные позволяют предположить, что СПВ и ЗВ вовлекались в антициклоническую циркуляцию вокруг острова Врангеля. Вблизи Берингова пролива СПТ отклонялось мористее и перемешивалось с окружающими водами. АВ была измерена лишь на одном разрезе в устье каньона Геральда в 2009 г.

Из-за тяжелых погодных условий в 2012 г. не были выполнены океанологические измерения в Беринговом проливе, а высокая сплоченность льда не позволила судну войти до каньона Геральда. Наблюдения АПВ и БВ в сентябре 2012 г. соответствовали известным ареалам распространения этих вод (рис. 4). СПТ в сентябре 2012 г. имело большую ширину по сравнению с наблюдениями съемки 2009 г. Наличие СПВ на станциях у самых берегов острова Врангеля позволяет предположить, что, как и в сентябре 2009 г., в 2012 г. существовала антициклоническая циркуляция СПВ вокруг острова. В сентябре 2012 г. ЗВ впервые была измерена на юге моря у побережья Чукотки в летне-осенний период.

В разделе 3.3 рассчитаны переносы каждой водной массы на разрезах 2004 и 2009 гг.: перенос АПВ варьировался от 1,87 до 0,002 Св, БВ от 1,35 до 0,01 Св, СПВ от 0,34 до 0,01 Св, ЗВ от 0,79 до 0,04 Св.

В разделе 3.4 рассматривается атмосферное воздействие во время экспедиций. В сентябре 2009 и 2012 гг. наблюдались аномально сильные северо-восточные ветры. Было выявлено, что в результате экмановского переноса под воздействием аномально сильного северо-восточного ветра, в 2009 г. произошел поворот АПТ мористее в сторону побережья Чукотки, а далее – его вынос на юг через Берингов пролив в Берингово море и обратное поступление АПВ через западную часть Берингова пролива после релаксации ветра. БВ вовлекалась в эту аномальную циркуляцию, формируя компенсационное течение в придонном слое Берингова пролива. АПВ так же наблюдалась в каньоне Геральда.

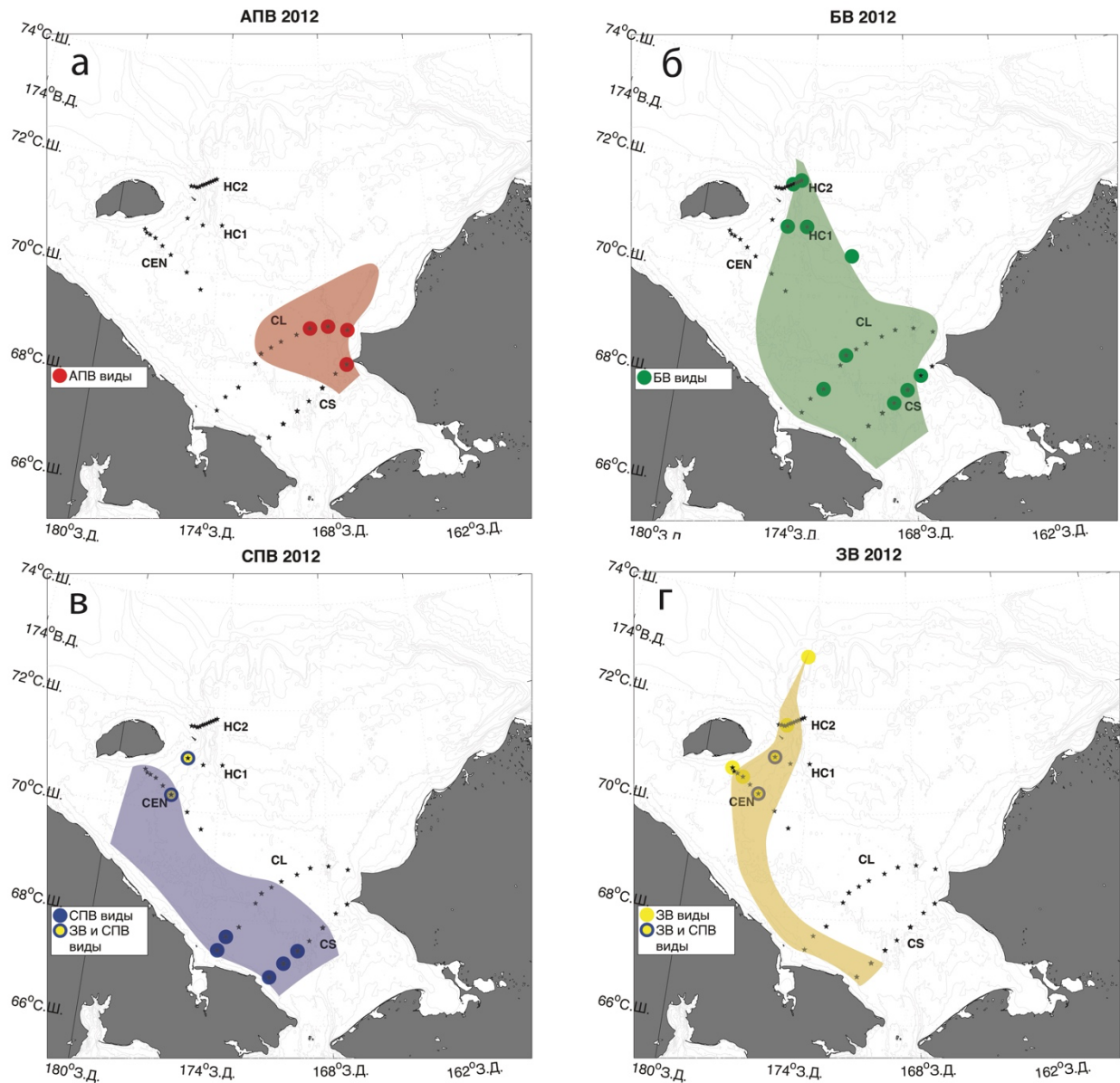


Рисунок 4 - Карта-схема ареалов распространения водных масс по данным рейса проекта «РУСАЛКА» в сентябре 2012 г. Разноцветными кружками показаны сообщества зоопланктона, характерные для определенных водных масс

Анализ I_w для северо-восточного ветра над Беринговым проливом за 2000–2012 гг. показал, что «перестановка» водных масс в проливе и широкое пространственное распространение АПВ может быть повторяющимся феноменом на чукотском шельфе в конце осени (рис. 5).

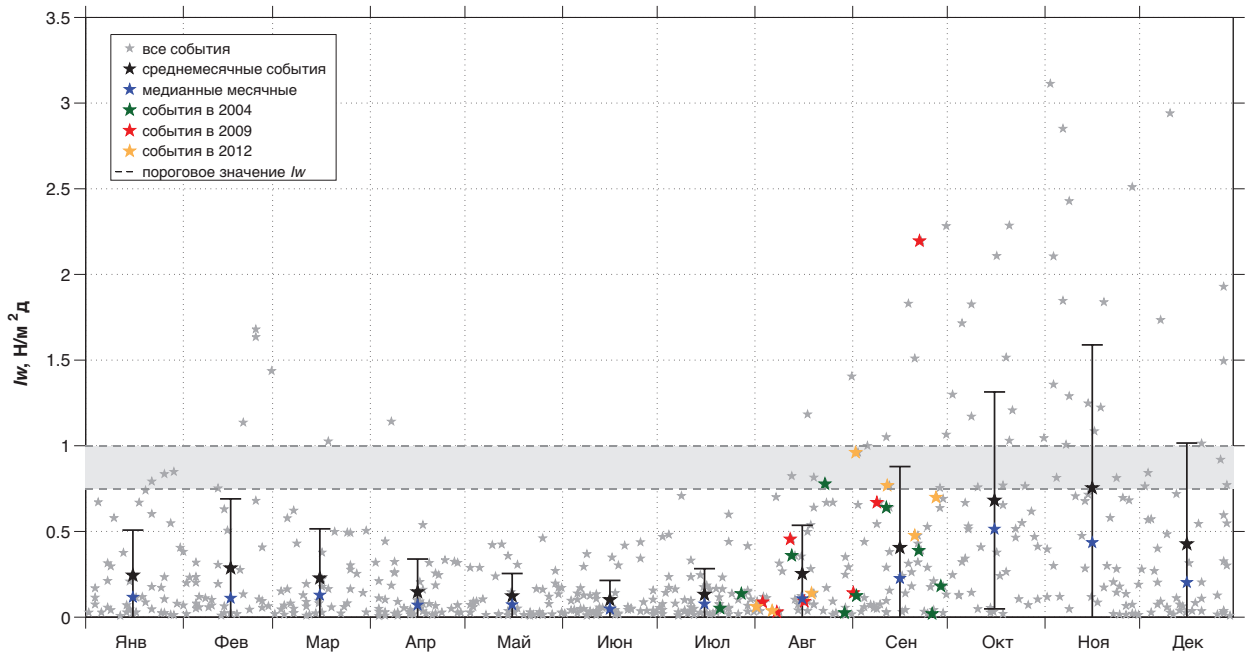


Рисунок 5 - I_w ($\text{Н/м}^2\text{д}$) над Беринговым проливом для «событий» северо-восточного ветра за 2000–2012 гг. Серыми звездочками обозначены I_w для всех «событий», черными – средние I_w за период, синими – медианные значения I_w , красными – I_w за август и сентябрь 2009 г., зелеными – за август и сентябрь 2004 г., оранжевыми – за август и сентябрь 2012 г. Стандартные отклонения отмечены черными отрезками. Серой заливкой отмечено пороговое значение I_w , выше которого возможен экмановский перенос вод согласно результатам модели (см. Главу 4)

Глава 4 посвящена изучению роли атмосферы в формировании локальных особенностей структуры вод Чукотского моря.

Анализ данных АБС в Беринговом проливе подтвердил наличие в сентябре 2009 г. аномального распределения водных масс в Беринговом проливе: поступление АПВ через западную часть пролива, а БВ – через восточную (**раздел 4.1**).

Анализ результатов численного моделирования в **разделе 4.2** предоставил динамическое объяснение такой «перестановки» водных масс в Беринговом проливе в сентябре 2009 г., а также аномального распространения водных масс на шельфе в результате экмановского переноса. Показано, что появление АПВ в каньоне Геральда инициировано «перестановкой» водных масс в Беринговом проливе.

В **разделе 4.3** описана структура вод каньона Барроу по данным АБС, выявлено 54 ветровых апвеллинга в верховье каньона под воздействием хорошо развитых ВН и АЛ (**раздел 4.4**). 33 апвеллинга приносили воды с положительной аномалией плотности, 21 – с отрицательной (рис. 6).

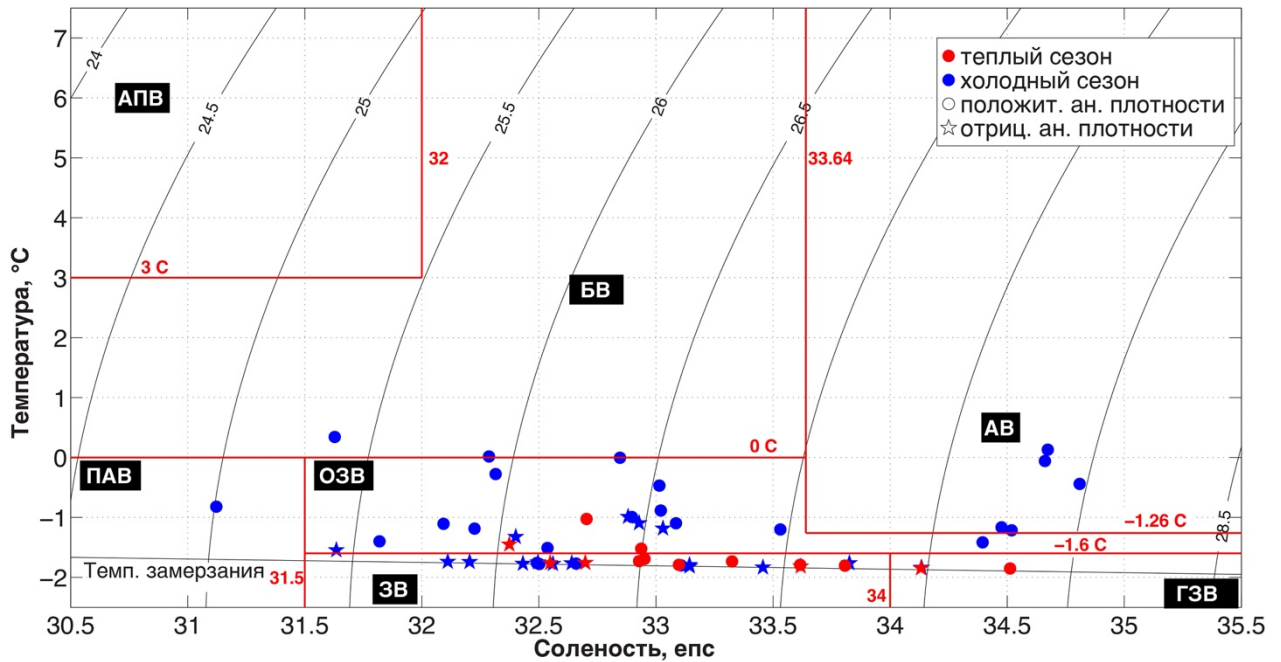


Рисунок 6 - T,S-диаграмма пиков (в момент максимальной скорости течения) апвеллингов с положительной (кругами) и отрицательной (звездами) аномалиями плотности в верховье каньона Барроу по данным АБС за 2002–2004 гг. Красными точками отмечены апвеллинги, произошедшие с апреля по сентябрь, синими – с октября по март. Диапазоны изменения T,S-характеристик водных масс показаны красными линиями

Апвеллинги с отрицательной аномалией плотности почти всегда происходили в холодный сезон из-за однородности гидрологической структуры в каньоне. Было выявлено, что ветровые апвеллинги в каньоне Барроу и на шельфовом склоне моря Бофорта [Schulze, Pickart, 2012] вызываются одним и тем же ветровым воздействием и в большинстве случаев происходят одновременно. АВ приносилась на чукотский шельф в результате апвеллинга в каньоне Барроу только в холодный сезон, что согласуется с исследованиями [Lin et al., 2019a] на склоне моря Бофорта. Во время теплого сезона почти все апвеллинги приносили ЗВ из-за того, что именно в это время года эта водная масса широко распространена на севере шельфа Чукотского моря. Появление АВ в результате апвеллинга на чукотском шельфе происходило в три раза реже по сравнению с апвеллингами ЗВ из-за того, что АВ надо пройти большое расстояние, чтобы достигнуть верховья каньона. Выявлена статистически значимая зависимость между сильным северо-восточным ветром и возникновением апвеллинга: в 2002–2004 гг. 82 % событий северо-восточного ветра с $I_w > 0,2 \text{ Н/м}^2\text{д}$ вызвали апвеллинг (рис. 7). За период 1979–2014 гг. могло происходить как минимум 482 апвеллинга в верховье каньона Барроу.

Показана зависимость между появлением апвеллинга в каньоне Барроу и образованием Чукотской полыньи: большинство случаев значительного уменьшения сплоченности льда совпадает с наблюдениями апвеллинга, а два самых больших относительных уменьшения

сплоченности льда в районе были связаны с самыми сильными апвеллингами, которые принесли на чукотский шельф АВ.

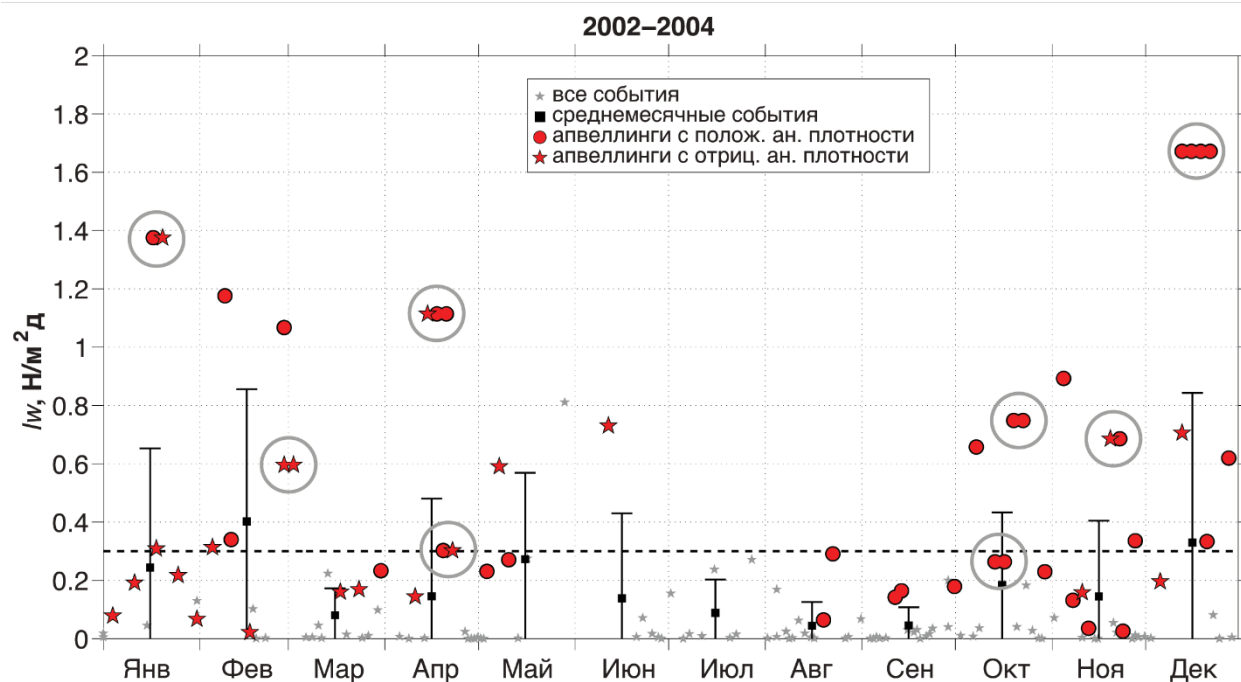


Рисунок 7 - I_w ($\text{Н/м}^2\text{д}$) для северо-восточного ветра за 2002–2004 гг. по данным метеостанции на мысе Барроу. Серыми звездочками обозначены I_w для всех «событий», черными – средние I_w за период. Стандартные отклонения отмечены черными отрезками. I_w , которые спровоцировали апвеллинг в верховье каньона отмечены красными символами, из них в серые круги обведены I_w для апвеллингов, вызванных одним и тем же «событием»

В **Главе 5** рассмотрены водные массы Чукотского моря, источники их формирования, их распространение и изменчивость на основе исторических данных (**раздел 5.1**). Полученные карты распространения водных масс по историческим данным (рис. 8) повторяют известные сведения о течениях в море, а также подтверждают выводы настоящей диссертации. Воды с T,S-характеристиками АПВ были обнаружены вдоль всего побережья Аляски от острова Нунивак в восточной части Берингова моря до каньона Барроу, в Центральном желобе и даже в каньоне Геральда. Подтверждается возможность переноса СПВ на север от Берингова пролива через Центральный каньон, а также заход СПВ в каньон Геральда и огибание ею острова Врангеля. В **разделе 5.2** приводятся карты течений Чукотского моря, полученные с использованием доступных натуральных данных по скоростям течений, а также в результате численных экспериментов. Карта-схема скоростей течения, полученная по натурным данным и карта-схема скоростей течения, построенная по результатам численного моделирования, хорошо согласуются друг с другом и отображают схожий характер циркуляции на чукотском шельфе в летний период: усиление скоростей в Беринговом проливе, каньоне Барроу, с восточной стороны каньона Геральда. Ослабление течений основных ветвей на обеих картах хорошо объясняется изменениями градиента батиметрии.

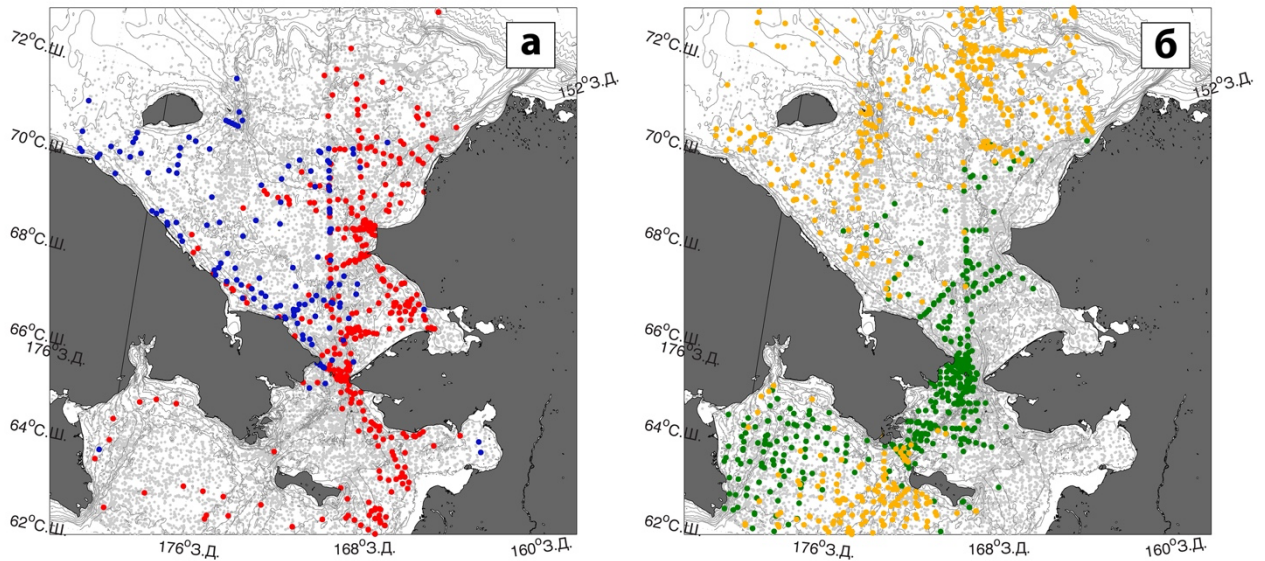


Рисунок 8 - Районы распространения водных масс Чукотского моря и прилегающих областей по данным WOD. На рисунке (а): АПВ (красным) и СПВ (синим); на рисунке (б): БВ (зеленым) и ЗВ (желтым). Серыми точками показаны все доступные за 1920–2013 гг. океанологические станции массива WOD

В качестве апробации результатов в **разделе 5.3**, полученные карты течений сравниваются с пространственным распределением бентосных организмов инфауны и эпифауны с разным типом питания, а также с пространственным распределением донных осадков по типу преобладающего размера на основе комплексных натуральных данных. Согласно литературным источникам, тип питания бентосных организмов зависит от скоростей течения в районе [Feder et al., 1994, 2007; Grebmeier et al., 2006; Blanchard et al., 2013]. В частности, организмам – фильтраторам для питания необходимы большие объемы воды, следовательно, они чаще всего встречаются в районах с высокими скоростями потоков. Организмы – грунтоеды, в свою очередь, питаются органическим веществом, оседающим на дно, а значит – чаще присутствуют в районах со слабыми течениями [Grebmeier et al., 2006; Nelson et al., 2014]. Анализ построенных карт пространственного распределения бентосных организмов инфауны и эпифауны (рис. 9) показал, что фильтраторы преобладают в эпифауне и инфауне вблизи побережья Аляски, от мыса Хоуп до каньона Барроу, что обуславливается наличием в районе быстрого АПТ. Кроме того, повышенная биомасса фильтраторов наблюдается в каньоне Геральда и в Центральном каньоне. Однако в целом на чукотском шельфе преобладают грунтоеды, что совпадает с представлениями об относительно невысоких скоростях течений на шельфе. Выявленная взаимосвязь обосновывает использование комплексного подхода в анализе распространения течений для будущих исследований в море.

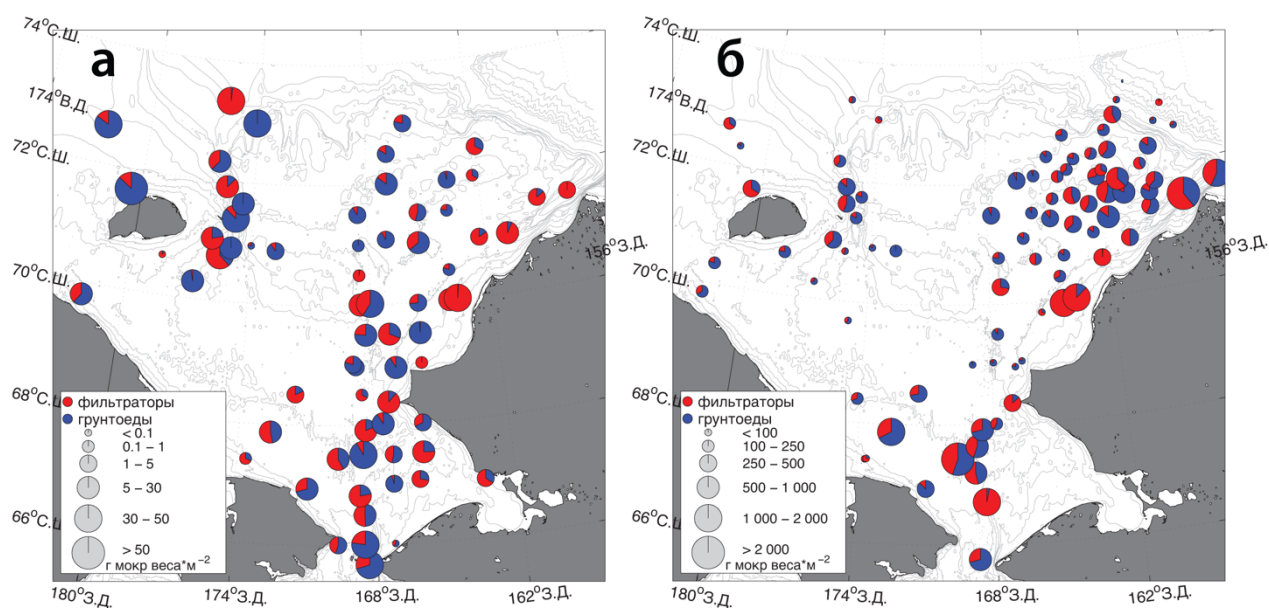


Рисунок 9 - Соотношение фильтраторов (красным) и грунтоедов (синим) в эпифауне (а) и инфауне (б) на станциях на чукотском шельфе. Размер каждого круга пропорционален биомассе на станции (г мокрого веса*м⁻²)

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. В результате использования метода комплексного анализа гидрологических, гидрохимических, гидробиологических и геологических параметров были построены карты-схемы распространения водных масс на чукотском шельфе в августе 2004, сентябре 2009 и сентябре 2012 гг. Для основных водных масс чукотского шельфа (АПВ, БВ, СПВ, ЗВ) были рассчитаны переносы на каждом из выполненных в 2004, 2009 гг. разрезов (в том числе – через Берингов пролив, пролив Лонга, южную часть моря, каньон Геральда).

2. Впервые было проанализировано наличие АПВ в каньоне Геральда, а также «перестановка» водных масс в Беринговом проливе: в сентябре 2009 г. АПВ наблюдалась на западной стороне Берингова пролива в придонном слое, в то время как БВ находилась с восточной стороны пролива у берегов Аляски.

3. Предложено динамическое объяснение такого аномального распространения водных масс в сентябре 2009 г.: в результате сильных ветров северо-восточного направления происходит экмановский перенос АПТ к Чукотскому побережью, его вынос на юг через Берингов пролив в Берингово море и обратное поступление АПВ через западную часть Берингова пролива после остановки ветра. БВ вовлекается в аномальную циркуляцию формируя компенсационное течение в придонном слое Берингова пролива.

4. Анализ результатов численных экспериментов по исследованию механизмов циркуляции вод в районе Берингова пролива на основе гидродинамической модели позволил

провести оценку возможности «перестановки» течений в Беринговом проливе под влиянием экмановского переноса.

5. Был исследован перенос АВ на чукотский шельф посредством ветрового апвеллинга в каньоне Барроу, описана зависимость образования полыней у побережья Аляски от возникновения апвеллингов и ветрового воздействия, а также оценена возможность возникновения апвеллинга в верховье каньона за 1979–2014 гг.

6. Проведенное сравнение карт течений на чукотском шельфе в летне-осенний период с данными по бентосным сообществам и гранулометрическому составу дна свидетельствует о взаимосвязи этих параметров и предоставляет обоснованность использования комплексного подхода для будущих исследований в море.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Pisareva M.N.** Flow of Pacific water in the Western Chukchi Sea: Results from the 2009 RUSALCA expedition / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, M.A. Spall, C. Nobre, D.J. Torres, G.W.K. Moore, T.E. Whitledge // *Deep-Sea Res. I.* – 2015. – Vol. 105. – P. 53–73. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.08.011>.

2. **Pisareva M.N.** The relationship between patterns of benthic fauna and zooplankton in the Chukchi Sea and physical forcing / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, K. Iken, E.A. Ershova, J.M. Grebmeier, L.W. Cooper, B.A. Bluhm, C. Nobre, R.R. Hopcroft, H. Hu, J. Wang, C.J. Ashjian, K.N. Kosobokova, T.E. Whitledge // *Oceanography.* – 2015. – Vol. 28. – № 3. – P. 68–83. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.58>.

3. **Pisareva M.N.** An overview of the recent research on the Chukchi Sea water masses and their circulation // *RJES.* – 2018. – Vol. 18. – № ES4005. doi:10.2205/2018ES000631.

4. **Pisareva M.N.** On the nature of wind-forced upwelling events in Barrow Canyon / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, P. Lin, P.S. Fratantoni, T.J. Weingartner // *Deep-Sea Res. II.* – 2019. – Vol. 162. – P. 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.02.002>.

5. Baker M. Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions / M. Baker, K.K. Kivva, **M.N. Pisareva**, J. Watson, J. Selivanova // *Deep-Sea Res. II.* – 2020. – Vol. 177. – № 104802. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104802>.

6. Osadchiev A.A. Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes / A.A. Osadchiev, I.P. Medvedev, S.A. Shchuka, M.E. Kulikov, E.A. Spivak, **M.N. Pisareva**, I.P. Semiletov // *Ocean Science.* – 2020. – Vol. 16. – P. 781–798. <https://doi.org/10.5194/os-16-781-2020>.

7. Osadchiev A.A. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas / A.A. Osadchiev, **M.N. Pisareva**, E.A. Spivak, S.A. Shchuka, I.P. Semiletov // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – 13041. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70096-w>.

Статья, опубликованная в издании вне перечня ВАК по специальности:

8. Кивва К.К. Роль физических процессов в формировании весеннего «цветения» фитопланктона в Беринговом море / К.К. Кивва, Ю.В. Селиванова, **М.Н. Писарева**, А.А. Сумкина // Труды ВНИРО. – 2020. – Т. 181. С. 206–222.

Тезисы докладов на конференциях, опубликованные в сборниках:

1. **Pisareva M.N.** On the nature of wind-forced upwelling in Barrow Canyon / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, P.S. Fratantoni, T.J. Weingartner // PICES-2017. Environmental changes in the North Pacific and impacts on biological resources and ecosystem services. – 2017. – P. 68.

2. **Pisareva M.N.** The Flow of pacific water in the Chukchi Sea: Results from RUSALCA expeditions / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, M.A. Spall, G.W.K. Moore, K. Iken, E.A. Ershova, J.M. Grebmeier, L.W. Cooper, B.A. Bluhm, R.R. Hopcroft, C.J. Ashjian, K.N. Kosobokova // PICES-2017. Environmental changes in the North Pacific and impacts on biological resources and ecosystem services. – 2017. – P. 103.

3. **Писарева М.Н.** О природе апвеллинга в каньоне Барроу по данным автономной заякоренной станции / М.Н. Писарева, Р.С. Пикарт, П.С. Фратантони, Т.Дж. Вайнгартнер // КИМО: Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2017. – С. 218.

4. **Pisareva M.N.** On the nature of wind-forced upwelling in Barrow Canyon / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, P.S. Fratantoni, T.J. Weingartner // ISAR-5. The changing Arctic and its regional to global impact: from information to knowledge and action. – 2018. – G6S6-O01.

5. **Pisareva M.N.** On the nature of wind-forced upwelling in Barrow Canyon / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, P. Lin, P.S. Fratantoni, T.J. Weingartner // Geophys. Res. Abstr. – 2019. – Vol. 21. – EGU2019-1552.

6. **Pisareva M.N.** On the nature of wind-forced upwelling in Barrow Canyon / M.N. Pisareva, R.S. Pickart, P.S. Fratantoni, T.J. Weingartner, P. Lin // The Fourth Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences. XMAS-IV Oral Abstracts. – 2019. – O-M3-13.