

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

АРТАМОНОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 551.465

**СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КРУПНОМАСШТАБНОЙ
ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД И ТЕРМОХАЛИННЫХ ФРОНТОВ
ЮЖНОЙ АТЛАНТИКИ**

11.00.08 – океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Севастополь – 2005

Диссертация является рукописью
Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте Национальной академии наук Украины

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук, профессор
Брянцев Валентин Алексеевич, Южный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии
Министерства аграрной политики Украины, ведущий научный сотрудник

Доктор географических наук, профессор
Суховой Викторина Федоровна, Одесский государственный экологический университет Министерства образования и науки Украины, профессор кафедры океанологии

Доктор биологических наук, профессор
Самышев Эрнест Зайнуллинович, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, главный научный сотрудник

Ведущая организация:

Институт геологических наук Национальной академии наук Украины,
г. Киев

Защита диссертации состоится "27" января 2006 г. в 11 часов
на заседании Специализированного ученого совета Д. 50.158.01
Морского гидрофизического института
по адресу: 99011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского гидрофизического института
по адресу: 99011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Автореферат разослан "23" декабря 2005 г.

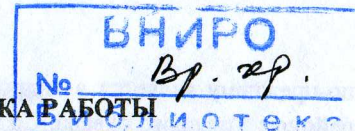
Ученый секретарь

Специализированного ученого совета Д. 50.158.01
доктор географических наук

 **Совга Е.Е.**

1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность темы. Исследование особенностей циркуляции вод и гидрологических фронтов, как на региональном уровне, так и в целом для всего океана имеет фундаментальное научное и практическое значение для решения проблем формирования и изменчивости климата, определения высокопродуктивных районов промысла. Южная Атлантика (ЮА) является промежуточным звеном в глобальной термохалинной циркуляции, связывающей Северную Атлантику с другими океанами. Глубинные воды Северного полушария, которые формируются в Атлантике, распространяются на юг, где попадают в систему Антарктического циркумполярного течения. С этим течением они следуют в восточном направлении в Индийский и Тихий океаны. В свою очередь в Южной Атлантике расположены источники формирования Субтропической и Антарктической промежуточной водных масс, которые, распространяясь на север, оказывают влияние на режим вод Северной Атлантики. Важная роль ЮА в процессах глобального теплообмена обусловлена более высокой, по сравнению с Северной Атлантикой, энергией атмосферной циркуляции. Она вызывает в этом регионе более мощные течения. В Южном полушарии действуют Южное пассатное течение (ЮПТ), перенос которого почти вдвое выше, чем Северного пассатного течения, и Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), которое по своей мощности не имеет аналогов в Мировом океане. Интенсивная циркуляция вод и наличие мощных источников формирования водных масс способствуют образованию в ЮА системы крупномасштабных фронтов, которые определяют распределение здесь зон высокой биологической продуктивности. Украина, став в 1995 г. членом Комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики, подтвердила свой интерес к изучению и освоению биоресурсов ЮА. Оптимальная эксплуатация биологических ресурсов и контроль экологического равновесия между вылавливаемыми и воспроизводимыми объектами промысла требуют совершенных методов долгосрочного прогноза состояния экологических систем и их абиотических составляющих, в частности, течений и фронтов. Гидрологические фронты и течения играют также важную роль при формировании крупномасштабных аномалий термохалинных характеристик, так как являются границами климатических зон. Они влияют на размеры, ориентацию, направление распространения и продолжительность существования аномалий, определяя тем самым региональные особенности межгодовой изменчивости гидрофизических полей.

Несмотря на важную роль протекающих в ЮА процессов, этот регион

по-прежнему является в гидрологическом отношении наименее изученным районом Мирового океана. Со времени последних отечественных обобщений исследований структуры вод в ЮА (Грузинов, 1986; Саруханян, Смирнов, 1986) прошло почти 20 лет. Исследования зарубежных авторов 80-90 гг. прошлого века базируются, главным образом, на материалах отдельных экспедиций (Peterson, Stramma, 1991). До настоящего времени мало работ, в которых проводился бы совместный анализ сезонной изменчивости поля ветра, кинематической и термохалинной структуры вод. Остается много нерешенных проблем, связанных с особенностями циркуляции вод, существуют разногласия в определении географического положения фронтов и их сезонной изменчивости.

За последние годы выполнена серия международных и отечественных океанографических экспериментов в различных районах ЮА, что позволило существенно увеличить массив океанографических данных для этого региона. В настоящее время созданы современные банки океанографической информации. Кроме гидрологических данных накоплен почти 30-летний ряд спутниковых измерений поверхностной температуры океана (ТПО) и 10-летний ряд альтиметрических наблюдений. Эти данные расширяют наши возможности в исследовании пространственно-временной изменчивости структуры вод океана. В связи с вышесказанным представляется актуальным обновить наши представления о циркуляции вод, мощности фронтов, объемах водных масс, особенностях их сезонной динамики в Южной Атлантике. Для этого были обобщены накопленные к настоящему времени океанографические данные, представленные в современных массивах гидрологической и спутниковой информации, а также привлечены новые данные, полученные при выполнении Национальной программы исследований Украины в Антарктиде в ходе Украинских морских антарктических экспедиций (УАЕ).

Связь работы с научными программами. Диссертационная работа выполнена в рамках следующих государственных программ и проектов:

1. Проект "Исследование океана как энергетической и динамической системы глобального уровня с целью прогнозирования изменений климата, погоды, навигационных условий и реализации морских технологий" (шифр "Среда", № госрегистрации 0194U035127).
2. Проект "Исследование пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей и процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера" (шифр "Океан-атмосфера", № госрегистрации 0196U015534).
3. Проект "Исследование изменений климата в системе океан – атмосфера – литосфера на глобальных и региональных масштабах" (шифр

"Океан-климат", № госрегистрации 0101U001023).

4. Программа "Державна програма досліджень України в Антарктиці" (утверждена Постановлением КМ Украины № 719 от 04.07.1996 г.).

Цель и задачи исследований. Цель диссертационной работы – исследовать среднее состояние циркуляции вод и крупномасштабных фронтов в Южной Атлантике и их сезонную изменчивость на основе анализа наиболее полных современных массивов гидрологических и спутниковых данных. Установить основные механизмы, контролирующие сезонную изменчивость циркуляции вод и гидрологических фронтов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучались особенности пространственно-временной изменчивости основных внешних факторов (поля ветра, радиации, теплового баланса океана), управляющих движением вод и влияющих на формирование фронтов.
2. Исследовались фоновые термохалинные условия формирования циркуляции и крупномасштабных фронтов ЮА.
3. Анализировалась общая схема циркуляции ЮА по результатам обработки гидрологических массивов и спутниковых данных по альтиметрии, исследовались особенности сезонной изменчивости геострофических течений и их связь с изменчивостью крупномасштабного поля ветра.
4. Исследовались климатические фронты ЮА в полях температуры и солености, уточнялись критерии их выделения, закономерности сезонной изменчивости на основе массивов гидрологических и спутниковых данных.
5. Исследовалась сезонная изменчивость водных масс ЮА, оценивалась их связь с положением и интенсивностью крупномасштабных фронтов.
6. Анализировались структура фронтов, характеристики геострофической циркуляции, термохалинные характеристики водных масс в малоизученной западной части моря Скотия и в проливе Брансфилда по результатам наблюдений в Украинских морских антарктических экспедициях.

Объект и предмет исследований. *Объект* исследований – комплекс гидрологических явлений: течения, гидрологические фронты и водные массы Южной Атлантики.

Предмет исследований – среднее состояние, сезонная изменчивость циркуляции вод, гидрологических фронтов и водных масс ЮА; выделение главных критериев определения положения фронтов; оценка связи интенсивности фронтов и объемов водных масс в различных климатических зонах; выявление основных механизмов формирования фронтов.

Методы исследования. Работа выполнена на основе традиционных принципов и методов классической океанографии, применяемых при обработке и анализе фактических и климатических данных, а именно динамический метод расчета течений, T,S-анализ, объемно-статистический T,S-анализ, метод гармонического анализа, дисперсионный и корреляционный анализы. Для верификации закономерностей распределения гидрофизических полей, полученных по гидрологическим данным, были привлечены спутниковые измерения ТПО и данные по альтиметрии.

Научная новизна полученных результатов. На основе анализа современных гидрологических и спутниковых массивов исследованы циркуляция вод и фронты ЮА, установлены закономерности их сезонного цикла:

- впервые показана крупномасштабная реакция ЮА на сезонные вариации поля ветра, которая проявляется в увеличении (уменьшении) площадей Южного субтропического антициклонического (ЮСАК) и Южного тропического циклонического (ЮТЦК) круговоротов при ослаблении (усилении) пассата и смещении западных ветров в умеренных широтах на юг (север);

- впервые установлено, что сезонная изменчивость круговоротов сопровождается ослаблением (усилением) системы экваториальных противотечений и усилением (ослаблением) и смещением ветвей Южного пассатного течения на север (юг), а течений умеренных широт на юг (север). Сезонный сигнал геострофических течений на поверхности океана запаздывает с запада на восток на 2-4 месяца. Максимальное запаздывание (до 6 месяцев) наблюдается в Антарктическом циркумполярном течении;

- впервые показано, что структура фронтальной системы в тропиках асимметрична относительно экватора и фронты в южных тропиках более интенсивны на востоке океана, а в умеренных широтах – на западе. В сезонной изменчивости фронтов преобладает годовой сигнал, который определяется вариациями поля ветра и теплового баланса океана. В антарктической зоне интенсивность фронтов зависит от ветра и ледового режима. Впервые были выделены новые фронты, которым даны соответствующие названия: Фронт Северной ветви Южного пассатного течения, Южные ветви Южного тропического и Южного субэкваториального фронтов;

- определено, что сезонная изменчивость очагов формирования водных масс связана с широтными смещениями фронтов, амплитуда которых определяется особенностями рельефа дна и вертикальной мощностью фронтов. Установлено, что площади основных субтропических водных масс

и их периферийных модификаций в сезонном цикле изменяются в противофазе;

- установлено, что воды Зоны слияния морей Уэдделла и Скотия (ЗСУС) между Южными Оркнейскими и Южными Шетландскими островами в летний период формируются в результате опускания вод моря Уэдделла в зоне конвергенции поверхностных течений под влиянием поля ветра. Фронт, формирующий западный участок ЗСУС, образуется в результате адвекции теплой и соленой Циркумполярной глубиной водной массы в пролив Брансфилда при ее взаимодействии с холодными и менее солеными глубинными водами этого пролива.

Практическая значимость полученных результатов. Результаты работы могут быть использованы при решении ряда прикладных проблем:

1. Задач навигационного обеспечения и безопасности мореплавания в штормовом и навигационно-опасном регионе Мирового океана – Южной Атлантике и антарктических водах; проблем ледового прогнозирования, в морской геологии и спутниковой гидрофизики.

2. Для прогноза внутригодовой изменчивости биологических полей, ресурсных оценок и разработки методов долгосрочного прогноза состояния популяции антарктического криля, эффективного поиска и промысла криля и рыбы на акватории Атлантического сектора Антарктики.

3. При составлении атласов по гидрологии Атлантики.

4. При планировании исследований в Украинских антарктических экспедициях в субтропических и полярных широтах Южной Атлантики.

5. При моделировании циркуляции и структуры вод в качестве граничных условий.

6. При создании курсов лекций по региональной океанографии для студентов и аспирантов.

7. Полученные диссертантом результаты включены в национальные отчеты Украинского антарктического центра, Международной Антарктической комиссии, опубликованы в ведущих украинских и российских периодических изданиях.

Личный вклад автора. Автором сформулирована основная концепция и разработана методология исследований по теме диссертации. В диссертации использованы материалы, полученные, с участием автора, в 11-ти океанических экспедициях (10, 11, 15, 41, 43-й рейсы НИС “Академик Вернадский”, 30 и 36-й рейсы НИС “Михаил Ломоносов”, 60 и 61-й рейсы НИС “Эрнст Кренкель”, 3 и 4-й рейсы НИС “Горизонт”), проводивших исследования в Тропической и Южной Атлантике. В экспедициях автор возглавлял работу отрядов гидрологии и течений, принимая участие в

планировании и проведении экспериментальных исследований. Основная часть расчетов по теме диссертации и их анализ выполнены автором самостоятельно. Без соавторов опубликованы работы [1-8], другая часть вошедших в диссертацию результатов опубликована в соавторстве. В работах [12, 13, 18, 23, 25, 27, 28, 38] изложены результаты экспедиционных исследований, в которых автор ставил задачи и руководил работой отрядов океанографии, принимал участие в забортных работах, обработке и анализе полевых материалов. В работах [9, 10, 17, 20, 24, 32, 37] соискателем обобщены результаты полевых исследований в тропической зоне Атлантического океана по материалам нескольких экспедиций. В работах [16, 26] изложены результаты океанографического эксперимента в районе Украинской антарктической станции "Академик Вернадский". Автор участвовал в его проведении, обработке и анализе полученных материалов. В работах [11, 14, 15, 19, 22, 30, 31, 34, 36, 41] расчет геострофических течений и циркуляции вод, объемно-статистический анализ водных масс выполнены автором самостоятельно. В работах [29, 33, 35, 39, 42] соискателем сформулирована главная концепция о связи интенсивности крупномасштабных круговоротов ЮА с положением фронтов и источников формирования водных масс, проведены расчеты и анализ результатов. В работах [21, 40] диссертантом предложены подход к исследованию фронтов с использованием спутниковых измерений ТПО и методика оценки достоверности результатов по независимым контактным и спутниковым измерениям.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы были представлены: на 6-й региональной конференции "Комплексное изучение природы Атлантического океана" (Калининград, 1991); симпозиуме "Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана" (Монако, 1991); Международных конференциях "Oceans, Atmosphere, Hydrology Noulimar Geophysics" (Вашингтон, 1993, 1994, 1995); Международной конференции "TOGA 95" (Хобарт, 1995); Международной конференции "Dynamics of ocean and atmosphere" (Москва, 1995); Международном симпозиуме "International Year of the Ocean, Oceanic Fronts and Related Phenomena, K. Fedorov Memorial Symposium" (Санкт-Петербург, 1998); Международной конференции "World Ocean Circulation Experiment (WOCE), Ocean Circulation and Climate" (Галифакс, 1998); симпозиуме "International Union of Geodesy and Geophysics" (Бирмингем, 1999); конференции Европейского Геофизического Сообщества (Париж, 2000); семинаре отдела экспедиционных исследований УкрНЦЭМ (Одесса, 2000); на заседании кафедры океанологии Таврического Национального университета (Симферополь, 2000); семинарах рабочей группы

"Антарктика" МГИ НАН Украины (Севастополь, 2001, 2002); семинаре кафедры океанологии Одесского Государственного университета (Одесса, 2001); I-й и II-й Украинских конференциях по Антарктике (Киев, 2001, 2004); Международных конференциях "Системы контроля окружающей среды" (Севастополь, 2001, 2002, 2004); Международной конференции "Гидрометеорология и охрана окружающей среды-2002" (Одесса, 2002); научно-технических семинарах Украинского антарктического центра (Киев, 2002, 2003); заседаниях Ученого совета Морского гидрофизического института НАН Украины (Севастополь, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 143 работы (две коллективные монографии, 55 статей в научных журналах, 16 статей в сборниках научных трудов, 15 статей в Бюллетенях Украинского антарктического центра, 6 препринтов МГИ НАН Украины, 9 статей депонировано в ВИНТИ, 40 тезисов докладов на научных конференциях), из них 8 работ опубликовано без соавторов. Требованиям ВАК Украины к научным изданиям, в которых публикуются результаты диссертационных работ по специальности "океанология", соответствуют 38 работ [1-4, 9-42], в которых полностью отражены основные результаты диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка литературы и содержит список условных сокращений. Диссертация изложена на 363 страницах машинописного текста, куда входит 120 рисунков. Список литературы включает 342 источника, из которых половина принадлежит зарубежным исследователям.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено краткому обзору истории исследования данного вопроса и его актуальности, определены цель и задачи; объект и предмет исследований, дана общая характеристика используемых материалов, обоснована фундаментальная и прикладная значимость работы. Показана связь работы с государственными научными программами и проектами.

В первом разделе дано описание физико-географических условий в регионе, фоновых термохалинных характеристик и их сезонной изменчивости. В подразделе 1.1 анализируются факторы, формирующие структуру вод Южной Атлантики. Описаны особенности рельефа дна (пункт 1.1.1) на основе батиметрической карты, построенной автором по данным массива World Ocean Database (WOD-98). В пунктах 1.1.2, 1.1.3 по данным массивов (Hellerman, Rosenstein, 1983) и (Climatology Interdisciplinary Data Collection-98 (CIDC-98)) анализируются особенности барического и

ветрового поля над ЮА. Подчеркивается доминирующее влияние на климат региона областей высокого давления: Южноатлантического субтропического (ЮАСА) и Антарктического антициклонов, центров низкого давления у побережья Аргентины, в районе Южных Оркнейских и Южных Сандвичевых островов и в море Уэдделла. Максимальные амплитуды годовой гармоника поля давления наблюдаются в зоне антарктической депрессии, у берегов Бразилии и Юго-Западного побережья Африки. В Антарктическом антициклоне давление изменяется с полугодовым периодом, поэтому пояс низкого давления вокруг Антарктиды с декабря по март и с июня по сентябрь смещается к Южному полюсу. Отмечается, что на большей части Южной Атлантики в сезонной изменчивости ветров преобладает годовой период, в умеренных и полярных широтах увеличивается вклад полугодовой гармоника.

В пункте 1.1.4 уточняется сезонная изменчивость составляющих теплового баланса поверхности океана ЮА на основе новых данных Н.А. Тимофеева и А.В. Юровского (2004). Размерность величин дана в скобках в МДж/м²/сут. Показано, что наибольшие значения радиационного баланса R_n (> 20) наблюдаются на северной периферии ЮАСА. Наименьшие значения R_n (< 6) характерны для антарктических вод у кромки льдов. На этих широтах максимум R_n (10-11) наблюдается в декабре-январе. В июне-июле значения R_n становятся отрицательными (-2). Максимальная теплоотдача (21) за счет затрат тепла на испарение и турбулентный обмен ($H+LE$) отмечается в июне-июле между 10-15° ю.ш. и 20-30° з.д., когда здесь значения R_n минимальны, а скорость ветра максимальна. Южнее 40° ю.ш. и восточнее 10° з.д. дважды в году (в мае и октябре) значения $H+LE$ становятся отрицательными.

Основной максимум внешнего теплового баланса Bo (> 6) наблюдается на востоке тропиков. Отрицательные значения Bo (< -9) отмечены на южной периферии ЮАСА, в круговороте моря Уэдделла. Максимальные амплитуды годовой гармоника Bo характерны для восточной части ЮАСА (> 10) и для района Фолклендского течения (> 9). Максимум Bo (> 12) на большей части акватории ЮА наблюдается в декабре. В мае-июле в зоне схождения Бразильского и Фолклендского течений и в области Южно-Атлантического течения отмечается теплоотдача через поверхность океана (-10 -- -12).

В следующем подразделе 1.2 исследуется сезонная изменчивость гидрологических полей. В пункте 1.2.1 обсуждаются ошибки определения их сезонного сигнала. Отмечается, что преобладающими являются погрешности, возникающие вследствие синоптической и межгодовой изменчивости. Суммарная погрешность разовых измерений не только

достигает, но порой превышает амплитуду сезонного сигнала. Отмечается, что сглаживание гидрологических полей позволяет уменьшить ошибку восстановления сезонного сигнала до 10-30%. Показано также, что при обеспеченности среднемесячных значений параметра 10-15 измерениями погрешность оценки амплитудно-фазовых характеристик годового сигнала не превышает 10-15%. Анализ распределения среднеквадратичных отклонений (СКО) температуры поверхности океана, рассчитанных по наиболее обеспеченным измерениям спутниковым данным, позволил установить, что на большей части ЮА сезонный ход ТПО в 2-3 раза превышает ее межгодовые вариации (рис. 1а).

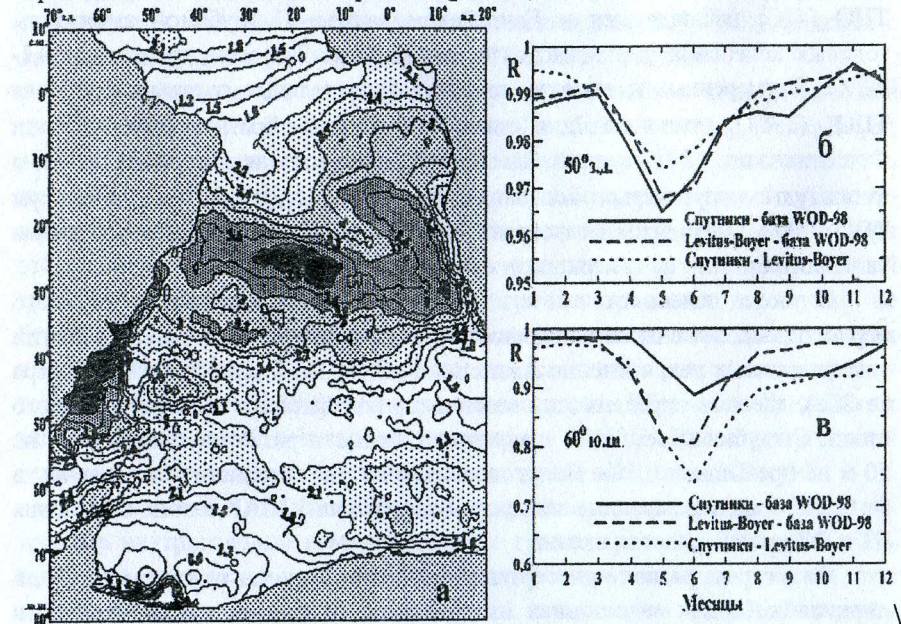


Рис. 1. Пространственное распределение $СКО_{сез}/СКО_{мес}$ по спутниковым данным (а), внутригодовой ход коэффициента корреляции между ТПО по трем типам данных вдоль 50° з.д. (б) и 60° ю.ш. (в).

Особое внимание в этом подразделе уделяется сравнению сезонной изменчивости ТПО по разным типам данных (база WOD-98; массив Levitus, Boyer, 1994; спутниковые измерения ТПО). Получены высокие значения коэффициентов корреляции (R) при 95%-ном уровне значимости между среднемесячными полями ТПО по трем массивам данных. Минимальные значения R (~ 0.75) отмечаются зимой Южного полушария, когда гидрологических наблюдений мало. В теплые месяцы, которые наиболее

обеспечены данными, величины R близки к 1 (~ 0.95). Сравнение сезонного хода полей ТПО, величин амплитуд годовой гармоника, рассчитанных по трем массивам, также показало тесную связь ($R \sim 0.74-0.98$) между различными типами данных (рис. 1 б, в). Эти результаты дали основание автору использовать спутниковые измерения для верификации сезонного цикла поля ТПО и температурных фронтов, рассчитанных по гидрологическим данным.

Для уточнения фоновых гидрологических условий в пункте 1.2.2 анализируются термохалинная структура вод и ее сезонная изменчивость. Отмечается, что максимальные значения амплитуды годовой гармоника ТПО (4°C) наблюдаются в Гвинейском заливе. С глубиной амплитуды годовых колебаний уменьшаются и на горизонте 200 м не превышают $0.1-0.2^\circ\text{C}$. В умеренных и высоких широтах значительные годовые колебания ТПО ($3-4^\circ\text{C}$) типичны для зоны схождения Бразильского (БТ) и Фолклендского (ФТ) течений. Здесь же отмечаются максимальные значения амплитуды полугодовых колебаний температуры ($0.5-0.7^\circ\text{C}$). Максимум ТПО в ЮА приходится на февраль-март, что обусловлено сезонным ходом теплового баланса на поверхности океана.

В поле солёности области максимальной изменчивости годового периода расположены на поверхности океана в прибрежных районах вблизи устьев крупных рек, а именно Амазонки ($> 3\text{‰}$), Ла-Платы ($> 1.5\text{‰}$), Нигера ($> 2\text{‰}$), где они определяются сезонными колебаниями осадков и речного стока. С глубиной сезонные изменения солёности резко уменьшаются и на 50 м не превышают 0.1‰ . Полугодовая амплитуда сезонного хода солёности ($> 0.1\text{‰}$) наиболее значима на южной периферии ЮСАК в зоне схождения БТ и ФТ на поверхности океана.

Во втором разделе диссертации уточняются схема крупномасштабной циркуляции вод и ее сезонная изменчивость. В подразделе 2.1 приведен обзор изученности течений ЮА. Показано, что наиболее исследованы течения тропической зоны океана, зона схождения БТ и ФТ, АЦТ в проливе Дрейка. Подчеркивается, что сезонная изменчивость течений ЮА изучена слабо. Далее в подразделе 2.2 анализируются результаты диагностического моделирования течений по трем моделям, отражающим основные направления диагноза циркуляции вод. Первая – это модель общей циркуляции океана (ИЛЮ0-модель) с шагом расчетной сетки 1° (Иванов, Лебедев, 2000). Вторая, так называемая “грубая”, модель EG94 имеет разрешение, типичное для моделей “океан-атмосфера”, используемых при исследовании климатической изменчивости (England, Garçon, 1994). Шаг расчетной сетки составляет 1.8° по долготе и 1.6° по широте. Третья модель,

включенная в анализ, – вихререзающая модель Parallel Ocean Climate Model (POCM) с шагом расчетной сетки 0.4° по долготе и 0.25° по широте (Semther, Chervin, 1992).

При сравнении результатов разных модельных расчетов отмечено, что, несмотря на некоторые отличия, главные элементы циркуляции вод ЮА воспроизводятся разными моделями одинаково. К ним относятся: основные крупномасштабные круговороты, перенос вод в западном погранслое из Южного в Северное полушарие, восточное экваториальное противотечение, зона схождения БТ и ФТ и АЦТ. Эти элементы циркуляции приняты за основу при дальнейшем анализе результатов расчетов геострофических течений, при этом расчеты по гидрологическим данным, сопоставляются с данными по альтиметрии и измерениями ТПО со спутников.

В подразделе 2.3 исследуются крупномасштабная геострофическая циркуляция вод и ее сезонная изменчивость на базе массива (Levitus, Boyer, 1994). На этих данных основываются также результаты, изложенные в пунктах 2.3.1-2.3.5 и подразделе 2.4. Установлено, что Южный субтропический антициклонический круговорот прослеживается в слое 0-3000 м, при этом глубже 1000 м его интенсивность уменьшается в 4-5 раз. Южный тропический циклонический круговорот распространяется до глубин не более 1000 м. Отмечено, что сезонная изменчивость поля динамических высот относительно 1000 м характеризуется наибольшими амплитудами годовой гармоника ($5-10$ дин. см) в зоне схождения БТ и ФТ, в Гвинейском заливе, на западной и северной перифериях ЮСАК. Вклад полугодовой гармоника возрастает в Гвинейском заливе, в зоне схождения БТ и ФТ.

Установлено, что климатические круговороты испытывают значительные внутrigодовые изменения своих границ (рис. 2). Выявлена связь между скоростью юго-восточного пассата, широтным положением оси западного переноса в умеренных широтах и площадью ЮСАК. Показано, что реакция океана на сезонные вариации крупномасштабного поля ветра проявляется в изменении границ и площадей ЮСАК и ЮТЦК. Ослабление (усиление) юго-восточного пассата и смещение на юг (на север) оси западного переноса в умеренных широтах в начале (середине) года сопровождается асинхронным увеличением (уменьшением) площадей ЮСАК и ЮТЦК. Изменение площадей динамических ложбин (гребней) круговоротов, сопровождается увеличением (уменьшением) объемов теплых и холодных вод в центральных частях круговоротов. Наиболее тесная связь между полем ветра и динамикой вод наблюдается при фазовом сдвиге в 3-4 месяца для ЮСАК и 4-5 месяцев для ЮТЦК.

В пунктах 2.3.3-2.3.5 изложены результаты исследования сезонной

изменчивости климатических геострофических течений, образующих круговороты ЮА. Впервые описан сезонный цикл градиентных составляющих трех ветвей Южного пассатного течения и Южного экваториального противотечения (ЮЭП). Показано, что в центральной части океана (30° з.д.) скорость Северной ветви ЮПТ (СВ ЮПТ) достигает максимальных значений в сентябре (25 см/с), почти в фазе с максимумом скорости ветра. На востоке (10° з.д.) в интенсивности СВ ЮПТ и поля ветра отмечены два максимума – один в июне, другой в ноябре. Для Центральной ветви ЮПТ (ЦВ ЮПТ) на 30° з.д. максимум скорости (24 см/с) наблюдается в марте. Восточнее (10° з.д.) он смещается на июнь, при этом несколько уменьшается (22 см/с), а стрежень течения занимает крайнее северное положение (4° ю.ш.) в июле и декабре.

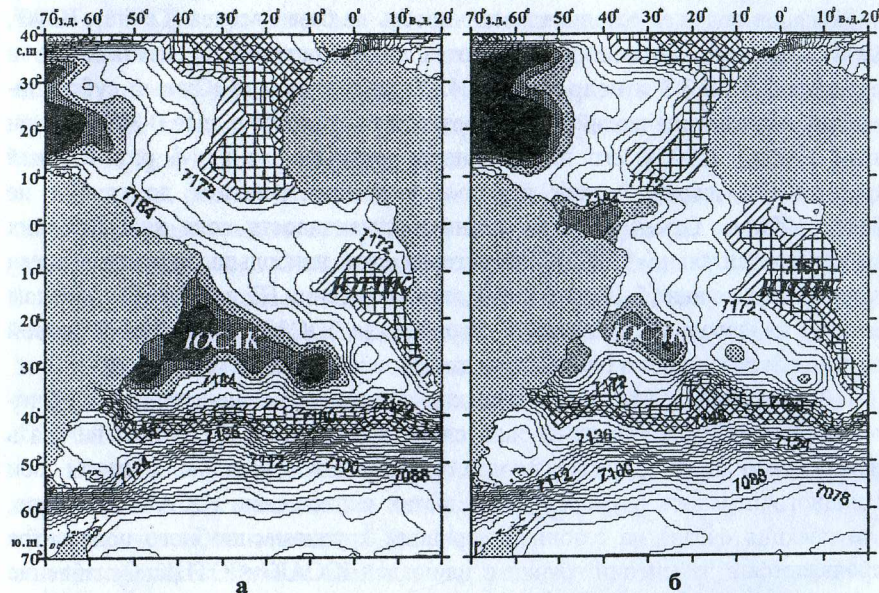


Рис. 2. Динамическая топография (отн. 1000 дб) в марте (а) и сентябре (б).

Установлено, что Южное экваториальное противотечение в центральной части океана на 30° з.д. проявляется во второй половине года. При этом климатические скорости его невелики, максимум (4 см/с) отмечается в августе, когда усиливается юго-восточный пассат. В восточной части Гвинейского залива южнее экватора выделены две струи восточного направления. Северная струя служит продолжением течения Ломоносова и названа Северной ветвью ЮЭП. Более интенсивная южная струя является

продолжением собственно ЮЭП, формирующегося в центральной части океана. Этот поток назван Южной ветвью ЮЭП (ЮВ ЮЭП). Сезонные колебания скорости ЮВ ЮЭП на 10° в.д. имеют полугодовой сигнал с максимумами в апреле (4 см/с) и декабре (6 см/с). При этом поле ветра имеет здесь годовой сигнал, что свидетельствует о влиянии на интенсивность ЮВ ЮЭП ветровых условий, существующих над другими, более отдаленными районами океана.

В пункте 2.3.4 исследуется внутригодовая изменчивость системы течений ЮСАК, которая включает Южную ветвь ЮПТ (ЮВ ЮПТ), Бразильское, Южно-Атлантическое (ЮАТ) и Бенгельское (БенТ) течения. Показано, что на 10° з.д. меридиональная структура ЮВ ЮПТ имеет два максимума скорости, поскольку образуется за счет слияния вод БенТ и ЮАТ. Северная, более мощная струя, которой соответствует основной максимум, наиболее развита в феврале (7 см/с). На 30° з.д. ЮВ ЮПТ характеризуется только одним экстремумом скорости, который смещается с 12° ю.ш. в мае на 18° ю.ш. в августе. Максимальная скорость течения ($5-6$ см/с) отмечена в апреле-мае.

Показано, что между 10° и 20° ю.ш. Бразильское течение как градиентный поток над глубинами более 1000 м большую часть года не проявляется. С июня по сентябрь, когда усиливается юго-восточный пассат и ЮВ ЮПТ смещается к югу, здесь выделяется слабый поток южного направления со скоростями $2-3$ см/с. На 20° ю.ш. БТ существует в течение всего года с максимумом скорости (6 см/с) в январе. Южнее 25° ю.ш. большая часть БТ разворачивается на восток и, следуя по антициклонической траектории, замыкает внутреннюю циркуляцию ЮСАК. Усиление скорости БТ здесь наблюдается в марте (4 см/с) и в августе (7 см/с). В поле локального ветра преобладает годовая волна, что свидетельствует о его слабом влиянии на скорость БТ. Полугодовой сигнал отмечается также в изменении скорости Южно-Атлантического течения, проходящего южнее БТ. На 50° з.д. максимумы скорости ЮАТ (6 см/с) наблюдаются в декабре и июне. Между 40° и 10° з.д. в сезонном ходе скорости этого течения, как и в локальном ветре, преобладает годовой период с максимумами ($6-7$ см/с) в мае на 40° з.д. и в октябре на 10° з.д. Стрежень ЮАТ смещается на юг в декабре-январе, на север – в июле, т.е. почти в противофазе со смещениями ЮВ ЮПТ.

Установлено, что Бенгельское течение усиливается восточнее 10° в.д. между 25° и 35° ю.ш., где его подпитывают воды ЮАТ и течения Агульяс (ТАг). Скорости БенТ невелики и составляют $4-7$ см/с. Несмотря на интенсивную сезонную изменчивость поля ветра, градиентная скорость БенТ

изменяется слабо, с годовой амплитудой не превышающей 2-3 см/с.

Оценки внутригодового хода характеристик течений в Антарктическом секторе (пункт 2.3.5) показали, что на северной границе пролива Дрейка в сезонном цикле скорости АЦТ преобладает годовой период с максимумом (9 см/с) в мае. Аналогичная изменчивость отмечена в поле ветра. На южной стороне пролива в изменении скорости течения отмечается слабый полугодовой сигнал с максимумами (3-4 см/с) в марте и октябре. Полугодовая изменчивость наблюдается здесь и в поле меридионального компонента ветра. В море Скотия выделены три ветви АЦТ – Северная (СВ), Центральная (ЦВ) и Южная (ЮВ). Во внутригодовом ходе скорости СВ АЦТ преобладает годовой сигнал, а на востоке океана, ближе к Африке, – полугодовой. Центральная ветвь АЦТ наиболее четко проявляется на западе региона. Здесь скорость изменяется незначительно с максимумом (7 см/с) в июле. В центральной части океана скорости ЦВ АЦТ уменьшаются до 2-5 см/с. Южная ветвь АЦТ в море Скотия имеет наибольшие скорости (3-4 см/с) в марте-апреле. В целом в зоне АЦТ отмечается общая интенсификация скоростей течений в западной части океана. В сезонном цикле усиление течений, как и основная интенсификация поля ветра, наблюдаются в первую половину года.

В следующем подразделе 2.4 исследуется сезонная изменчивость геострофических течений по данным спутниковой альтиметрии, представляющим среднемесячные аномалии уровня океана (АУО), осредненные за период с ноября 1992 по август 2002 года. Динамические высоты на поверхности океана вычислялись как сумма АУО и среднегодовых значений динамических высот, рассчитанных по гидрологическим данным. Расчеты стандартных отклонений, связанных с внутригодовой и межгодовой изменчивостью АУО, показали, что в зонах интенсивных течений сезонный сигнал в несколько раз превышает межгодовую изменчивость. Сравнение характеристик геострофических течений, рассчитанных по альтиметрическим и гидрологическим данным, выявили хорошее соответствие фаз их сезонных сигналов.

На основе альтиметрии установлены новые закономерности сезонного цикла зональных течений (рис. 3). Показано, что сезонный сигнал скорости Северной ветви ЮПТ запаздывает с востока на запад, при этом на 10° з.д. максимум скорости (30 см/с) наблюдается в июле, а на 30° з.д. – в сентябре. В ЦВ ЮПТ запаздывание наблюдается с запада на восток: на 30° з.д. максимум скорости (35 см/с) наблюдается в апреле, а на Гринвиче – в июле (40 см/с). Сезонный сигнал скорости ЮЭП между 20° и 10° з.д. изменяется почти в фазе с ЦВ ЮПТ, достигая максимальных значений (12 см/с) в июле.

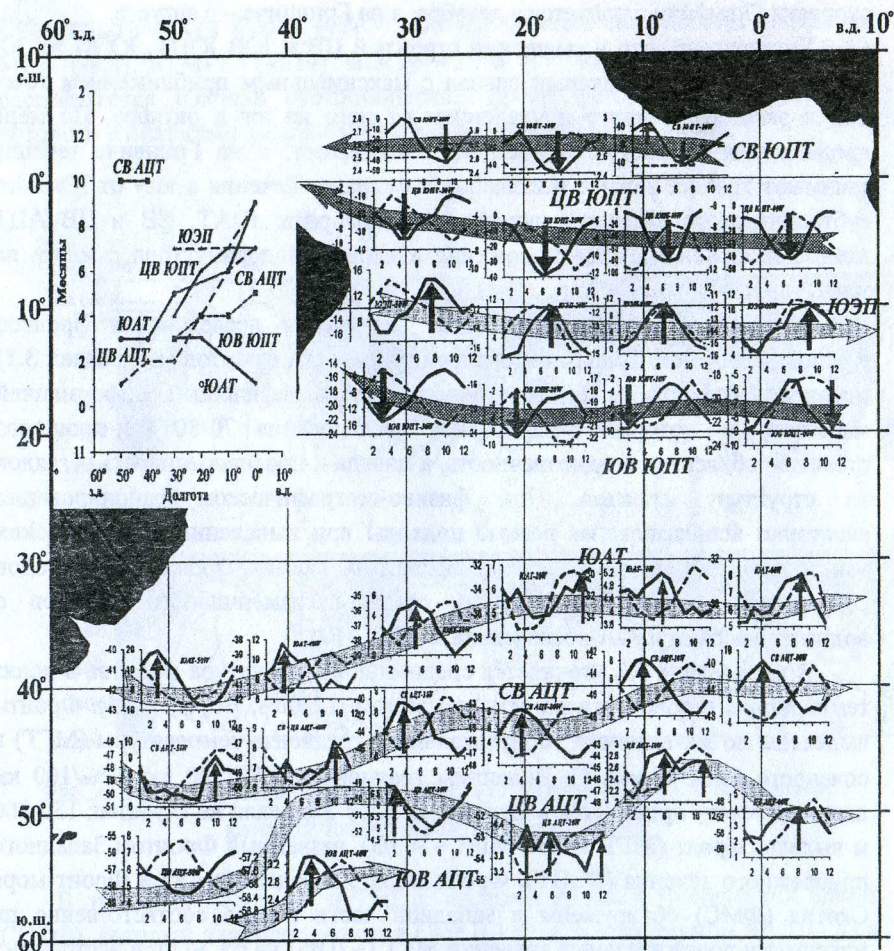


Рис. 3. Внутригодовой ход скорости (сплошная линия) и положения стрежней (пунктир) зональных геострофических течений по данным альтиметрии (на врезке дано время наступления максимума геострофической скорости для разных течений).

По альтиметрическим данным подтверждено, что в сезонной изменчивости скорости ЮАТ преобладает годовой сигнал. Показано, что наблюдается запаздывание сигнала с запада на восток почти на полгода. Максимум скорости (20 см/с) отмечен на 50° з.д. в марте, а на Гринвиче – в сентябре (8 см/с). В СВ АЦТ максимум скорости (9 см/с) наблюдается в марте на 30° з.д. и в мае на Гринвиче. Заметное запаздывание сезонного сигнала зарегистрировано и в Центральной ветви АЦТ, так на западе (50° з.д.) максимум

скорости (7 см/с) наблюдается в декабре, а на Гринвиче – в августе.

Установлено, что в смещении стрежней ЦВ и ЮВ ЮПТ, ЮЭП на 30° з.д. наблюдается одинаковый сигнал с максимальным приближением течений к экватору в марте и удалением от него на юг в октябре. По мере продвижения на восток этот сигнал запаздывает, и на Гринвиче течения занимают крайнее южное положение в феврале. Течения к югу от Южного субтропического антициклонического круговорота: ЮАТ, СВ и ЦВ АЦТ занимают крайнее южное положение в первую половину года с марта по май.

В третьем разделе излагаются результаты исследования фронтов Южной Атлантики. В кратком обзоре изученности фронтов (подраздел 3.1) отмечено, что слабая обеспеченность океанографической информацией массивов, на которых базировались исследования 70-80 гг. прошлого столетия, объясняет неоднозначность, а иногда и противоречивость взглядов на структуру фронтов. При физико-географическом районировании акватории использовались разные подходы при выделении климатических зон и фронтов, поэтому даже в последних схемах фронтов 90-х годов сохраняются противоречия. Связь сезонной изменчивости фронтов с водными массами в ЮА исследована слабо.

В подразделе 3.2 уточняется среднегодовая структура фронтов в полях температуры и солёности на основе массива (Levitus, Boyer, 1994). Фронты выделены по максимумам горизонтального градиента температуры (МГТ) и солёности (МГС) (рис. 4). Величины градиентов в °С/100 км и ‰/100 км далее по тексту приводятся в скобках. В море Уэдделла на глубинах 150-800 м выделен фронт (МГТ ~ -0.4, МГС ~ -0.03), названный Фронтом Западного прибрежного течения (ФЗПТ). Фронт моря Уэдделла (ФМУ) и Фронт моря Скотия (ФМС) обнаружены в западной части океана соответственно по максимуму положительных значений МГТ (~ 0.05) на 65 ю.ш. и экстремуму отрицательных значений МГТ (~ -0.25) в районе 58-60° ю.ш.

Впервые отмечено, что Антарктический полярный фронт (АПФ), практически достигающий дна, образуется в результате взаимодействия разных водных масс: в верхнем 250-метровом слое контактируют Антарктическая зимняя (АЗВ) и Антарктическая промежуточная (АПрВ) водные массы (МГТ ~ -0.6, МГС ~ -0.05), глубже 250 м АПФ разделяет АПрВ и Циркумполярную глубинную водную массу (ЦГВ), при этом МГТ ~ -0.04 и МГС ~ -0.08. Глубже 800 м взаимодействуют ЦГВ и Североатлантическая глубинная водные массы и фронт более четко проявляется в поле температуры (МГТ ~ -0.1).

Установлено, что самым интенсивным из полярных фронтов является

Субантарктический фронт (САФ). Он проявляется по высоким значениям МГТ (-1.3) и МГС (-0.19) между 42° и 45° ю.ш. К северу от САФ располагается Южный субтропический фронт (ЮСБТФ), интенсивность которого в поле температуры значительно меньше (МГТ ~ -0.6).

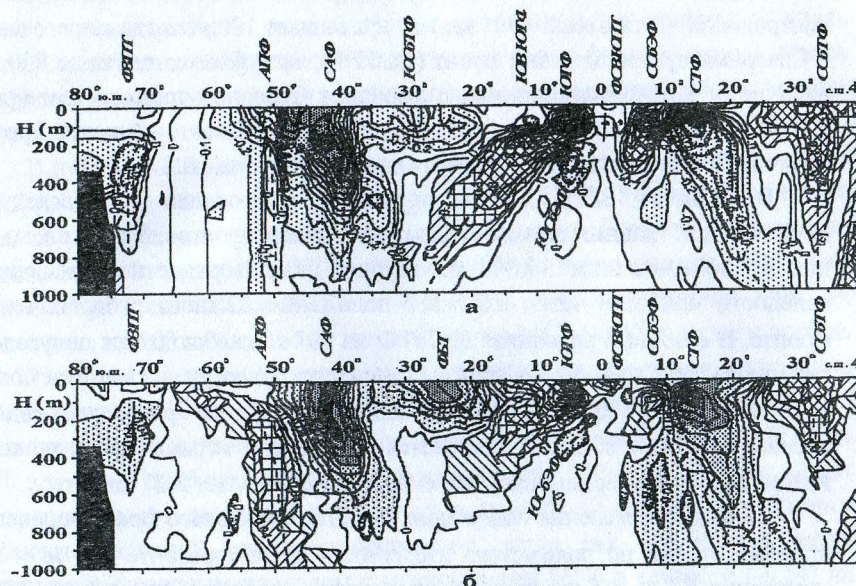


Рис. 4. Распределение среднегодовых МГТ (а) и МГС (б) и положение климатических фронтов вдоль 30° з.д.

В тропиках между 5° и 7° ю.ш. выделен Южный тропический фронт (ЮТФ), который наиболее развит в слое 0-150 м, с максимумом МГТ (1.4) и МГС (0.17) на глубине 100 м. Впервые между 10° и 12° ю.ш. на глубинах 200-250 м обнаружено второе ядро ЮТФ (МГТ ~ 0.8, МГС ~ 0.1). Его происхождение связано с влиянием Южного экваториального противотечения, разделяющего ЮТФ на две ветви. Вторая подповерхностная ветвь названа Южной ветвью ЮТФ (ЮВ ЮТФ). Под ЮТФ в слое 150-450 м выделен максимум отрицательных значений МГТ (-0.4) и МГС (-0.04). В известных классификациях крупномасштабных фронтов он не описан. По аналогии с Северным субэкваториальным фронтом (ССБЭФ) этот фронт был назван Южным субэкваториальным фронтом (ЮСБЭФ). Между 10° и 15° ю.ш. в слое 0-50 м обнаружена Южная ветвь ЮСБЭФ, которая является аналогом Северной ветви ССБЭФ. Она усиливается к востоку, значения МГТ достигают -0.3 на 20° з.д. и -0.8 на 10° в.д. Автором введено также понятие –

Фронт Северной ветви ЮПТ (ФСВ ЮПТ), который расположен севернее экватора, на 1-4° с.ш., в слое 0-150 м и выделяется по значениям МГТ (-0.1) и МГС (0.08).

Показано, что система фронтов тропиков и субтропиков Атлантики асимметрична относительно экватора. Вертикальная мощность ЮСБТФ в центральной части океана (30° з.д.) не превышает 100 м, тогда как его аналог – Северный субтропический фронт (ССБТФ), заглубляется почти до 800 м. В отличие от Южного тропического фронта, в Северном тропическом фронте (СТФ) вторая ветвь не прослеживается. Южный субэкваториальный фронт, в отличие от Северного, не выходит на поверхность океана.

В пунктах 3.3.1, 3.3.2 следующего подраздела 3.3 исследуется изменчивость главных термохалинных признаков фронтов. Установлено, что положение изохалины 34.8‰ на глубине подповерхностного максимума солености наиболее четко отражает положение Южного субтропического фронта. В сезонных вариациях ЮСБТФ на 50° з.д. наблюдается полугодовая гармоника, при этом фронт дважды смещается к северу – в марте и ноябре. Восточнее, на 40° з.д., в изменении положения фронта преобладает годовой сигнал, при этом ЮСБТФ смещается на север в период с мая по июль. Размах сезонных меридиональных смещений составляет 2-3° широты.

Сезонные изменения положения Субантарктического фронта оценены в проливе Дрейка по положению изотермы 4°C на горизонте 200 м, в зоне схождения БТ и ФТ по границе максимума солености на глубине 150 м. Вдоль материкового склона Патагонии САФ проходит над изобатами 500-700 м. Максимальная сезонная изменчивость положения САФ отмечается восточнее 50° з.д., при этом размах сезонных смещений по широте достигает 3°, а в крайнем северном положении он находится в ноябре. Антарктический полярный фронт определялся по положению подповерхностного минимума температуры на 200-метровой глубине. Фронт смещается по широте на 1-2°, занимая крайнее северное положение в сентябре-октябре.

Анализ структуры температурных фронтов на основе массива WOD-98 и ХВТ-зондирований по программе WOCE (1991 - 1996 гг.) показал, что на поверхности ЮСБТФ прослеживается между изотермами 16° и 20°C; САФ западнее 50° з.д. – между изотермами 11° и 14°C, а восточнее 50° з.д. – между изотермами 8° и 10°C. Положение изотермы 4°C в слое 100-200 м позволяет проследить САФ от пролива Дрейка до слияния БТ и ФТ. Антарктический полярный фронт в верхнем 100-метровом слое наиболее четко проявляется между изотермами 1° и 3°C. Характерной особенностью сезонной изменчивости фронтов является смена значений температур,

которым соответствуют экстремумы градиентов. В летне-осенние месяцы ЮСБТФ наблюдается в температурном диапазоне 18-20°C, зимой – 13-16°C, САФ, соответственно 10-13°C и 8-10°C. Отмечается также, что использование различных климатических критериев для анализа сезонной изменчивости фронтов позволяет определить ее качественные особенности. Вместе с тем, показано, что косвенные критерии могут изменяться вдоль фронта и по сезонам. При дальнейшем исследовании фронтов использовался наиболее универсальный критерий – максимум градиента термохалинных характеристик.

В пункте 3.3.3 рассматривается сезонная изменчивость фронтов в полях МГТ и МГС на основе массива (Levitus, Boyer, 1994). Установлено, что на разных участках внутригодовой ход характеристик фронтов существенно отличается. Фронт СВ ЮПТ в центральной части океана (30° з.д.) максимально усиливается (МГТ ~ -0.3, МГС ~ 0.13) в августе (рис. 5). Восточнее, на 20° з.д., он имеет два максимума МГТ (-0.47) в июне и ноябре. На 10° з.д. он снова изменяется с годовым периодом, достигая максимума (-0.76) в июле. Южный тропический фронт на горизонте максимального проявления (100 м) имеет годовой сигнал с максимумом МГТ в мае (2.0) на 30° з.д. На Гринвиче максимум обостренности ЮТФ (0.7) запаздывает примерно на три месяца и отмечается в августе. Сезонный ход Южного субэкваториального фронта незначителен, тогда как его Южная ветвь изменяется с годовым периодом с максимумами МГТ в сентябре (-0.54) на 30° з.д. и в августе (-0.82) на 20° з.д. Восточнее 10° з.д. годовой сигнал ЮВ ЮСБЭФ запаздывает и максимум МГТ наблюдается в августе (-0.51) на 10° з.д. и в ноябре (-1.16) на 10° в.д.

В сезонном ходе интенсивности Фронта Бразильского течения (ФБТ) на поверхности океана отмечен полугодовой сигнал с максимумами МГТ (~ -1.0) в январе и октябре, МГС (~ -0.3) – в январе и мае на 50° з.д., в июне и декабре (МГТ ~ -0.9) и в апреле и августе (МГС ~ -0.2) на 40° з.д. На 30° з.д. ФБТ выражен более четко в поле солености и изменяется с годовым периодом (экстремум МГС ~ -0.17 в январе). Южный субтропический фронт у берегов Южной Америки и в центральной части океана также изменяется с полугодовым периодом с экстремумами МГТ (~ -0.9) в январе и ноябре на 50° з.д.; в феврале и августе на 30° з.д. На 40° з.д. в поле температуры фронт усиливается (МГТ ~ -1.3) в феврале, в поле солености (МГС ~ -0.3) в мае. На горизонте 100 м преобладает годовой сигнал с экстремумом МГТ (-0.9) в январе.

В сезонном ходе интенсивности Субантарктического и Антарктического полярного фронтов в проливе Дрейка и в море Скотия преобладает

годовой сигнал с экстремумами МГТ (-1.6) в феврале для САФ и июне для АПФ. Фронтальный раздел САФ+АПФ (40° з.д.) изменяется с полугодовым периодом с экстремумами МГТ в феврале (-1.5) и августе (-1.4).

По гидрологическим данным установлено, что наиболее интенсивными фронтами в южных тропиках являются ЮТФ, ЮВ ЮСБЭФ и ЮВ ЮТФ. Максимальная внутригодовая изменчивость отмечается для ЮТФ. Наиболее обостряются в первой половине года ЮСБЭФ, ЮВ ЮТФ, в середине года – ЮТФ, во второй половине года – ЮВ ЮСБЭФ. Для ЮТФ, ЮВ ЮСБЭФ, ЮВ ЮТФ характерно запаздывание годового сигнала с запада на восток на несколько месяцев. В умеренных и полярных широтах наиболее интенсивным является Субантарктический фронт. В изменчивости фронтов преобладает годовой сигнал. В зоне слияния АПФ и САФ, в ЮСБТФ и ФБТ ближе к побережью Южной Америки прослеживается полугодовой сигнал.

Дальнейший анализ дистанционных измерений ТПО показал, что, несмотря на некоторые различия, структура фронтов и их сезонная изменчивость на поверхности по гидрологическим данным в целом согласуются с результатами, полученными по спутниковым данным. Кроме того, на основе более обеспеченных спутниковых измерений были получены новые закономерности сезонной изменчивости фронтов. Эти результаты обсуждаются в подразделе 3.4. Спутниковые измерения ТПО за период с 1985 по 2001 гг. были осреднены по месяцам (величины МГТ даны в °С/54 км).

Установлено, что Фронт Северной ветви ЮПТ и Южный тропический фронт максимально приближаются к экватору в марте-апреле в период усиления (ослабления) северо-(юго)-восточного пассата. На востоке океана в сезонных смещениях положения ФСВ ЮПТ и ЮВ ЮСБЭФ наблюдается полугодовой сигнал, обусловленный пассатным и муссонным режимами.

Показано, что зональный участок Фронта Бразильского течения, образующийся в результате его рециркуляции, прослеживается далеко на восток вплоть до 10° з.д. На западе океана (примерно до 40° з.д.) в сезонных вариациях интенсивности фронта преобладает полугодовая гармоника. Далее на восток интенсивность ФБТ изменяется с годовым периодом. Южнее Фронта Бразильского течения выделены две ветви Южного субтропического фронта. Более слабая северная ветвь (СВ ЮСБТФ) в течение года мало меняет свою интенсивность (МГТ ~ -0.34), но при этом существенно смещается в широтном направлении с 37° ю.ш. в июне до 33° ю.ш. в ноябре. Другая, более интенсивная, Южная ветвь (собственно ЮСБТФ) прослеживается между 37° и 43° ю.ш. На меридианах 50° з.д. и 20° в.д. в сезонных вариациях интенсивности фронта преобладает полугодовой сигнал с экстремумами МГТ на 50° з.д. (-0.85) в мае и (-0.7) октябре и на 20° в.д. (-1.2)

в январе и июле. В центральной части океана интенсивность фронта изменяется с годовым периодом с экстремумами МГТ (-0.7) в первую половину года (февраль-март) (рис. 5).

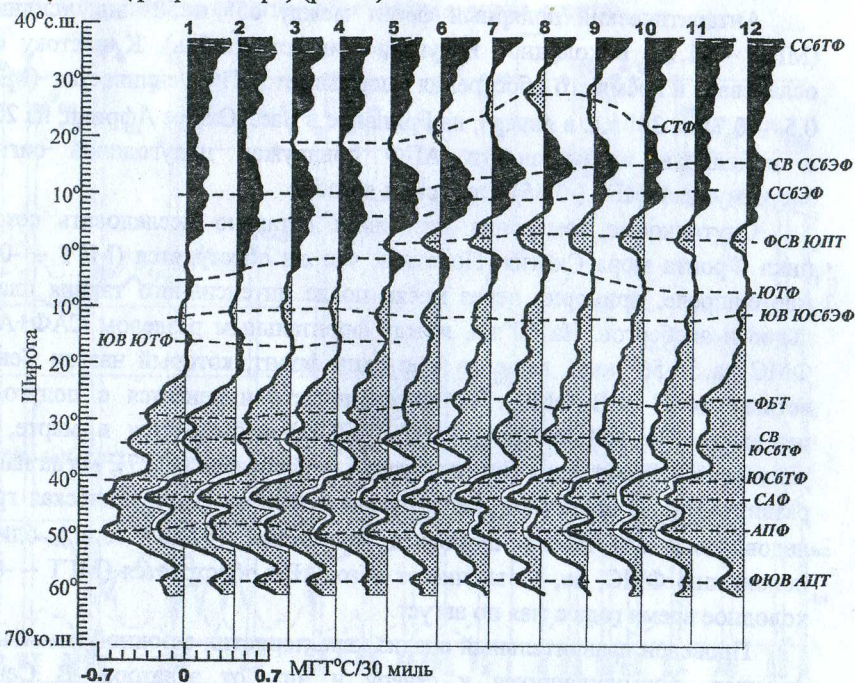


Рис. 5. Широтное распределение МГТ по месяцам и положение основных фронтальных разделов вдоль 30° з.д. по спутниковым данным.

В полярных областях, где гидрологических данных мало, сезонная изменчивость фронтов хорошо проявляется по спутниковым измерениям ТПО. Установлено, что Субантарктический фронт в проливе Дрейка и севернее Фолклендских островов, где прогретые шельфовые воды взаимодействуют с более холодными водами Западной ветви ФТ, максимально обостряется (МГТ ~ -0.65) в апреле. При развороте фронта на восток в зоне взаимодействия ФТ и БТ впервые выделены две ветви САФ: одна в районе 46-47° ю.ш., другая около 43-44° ю.ш. с соответствующими максимумами обострения МГТ (-0.45 и -0.72) в марте.

В сезонном ходе интенсивности САФ+АПФ, как и по гидрологическим данным, отмечаются два экстремума МГТ – в феврале (-1.33) и в августе (-1.37). Восточнее интенсивность САФ также изменяется с полугодовым

периодом. Первый экстремум (~ -1.0) отмечается в марте, наступление второго (~ -1.0) смещается с августа на ноябрь в направлении с запада на восток.

Антарктический полярный фронт между 65° и 50° з.д. усиливается (МГТ ~ -1.15) в холодное полугодие (август-октябрь). К востоку фронт ослабевает и время его обострения запаздывает. АПФ усиливается (МГТ ~ -0.5 – -0.7) на 30° з.д. в январе, на Гринвиче в мае. Южнее Африки, на 20° в.д. в изменении интенсивности АПФ обнаружен полугодовой сигнал с экстремумами МГТ (-0.55) в августе и декабре.

Спутниковые измерения позволили детально исследовать сезонный цикл Фронта моря Скотия. Показано, что он обостряется (МГТ ~ -0.35) в марте-апреле, примерно через месяц после интенсивного таяния плавучих льдов и айсбергов. На 40° з.д. между фронтальным разделом САФ+АПФ и ФМС на $55-56^\circ$ ю.ш. выделен еще один фронт, который назван Северной ветвью ФМС (СВ ФМС). Ее интенсивность изменяется с полугодовым периодом. Первый экстремум МГТ (-0.22) наблюдается в марте, когда усиливается Фронт моря Скотия, второй – в сентябре (-0.27), когда наиболее развит АПФ. В восточной части океана выделена Антарктическая граница ледовитости (АГЛ). Ее широтное положение ($57-61^\circ$ ю.ш.) близко к положению ФМС, но, в отличие от него, АГЛ обостряется (МГТ ~ -0.25) в холодное время года с мая по август.

Проведен сравнительный анализ характеристик сезонной изменчивости фронтов, формирующихся к северу и югу от экватора. В Северном полушарии южнее 40° с.ш. наиболее интенсивными фронтами являются СВ ССБЭФ (среднегодовое значение МГТ ~ 0.4) и ФСВ ЮПТ (-0.35), а самым слабым – СТФ (-0.07). Для ССБТФ и ССБЭФ значительные сезонные вариации интенсивности (СКО ~ 0.1) характерны в западной части океана, а для ФСВ ЮПТ – на востоке. Максимальные внутригодовые СКО положения фронтов составляют по широте $2-3.5^\circ$ и отмечаются для ССБТФ, СТФ, ССБЭФ и для Северной ветви ССБЭФ (рис. 6).

Фронты на северной периферии ССАК усиливаются в зимний период Северного полушария, а в тропической зоне, преимущественно, летом. Фронты в Южном полушарии интенсивнее, так как энергия атмосферной циркуляции здесь выше. Сезонные смещения положения фронтов здесь, наоборот, существенно меньше. Максимальные СКО широтного положения, типичные для ФБТ и СВ ЮСБТФ, не превышают $1-1.5^\circ$. На востоке океана максимальные среднегодовые значения МГТ характерны для ЮВ ЮСБЭФ (-0.62) и ЮСБТФ (-1.11), на западе для САФ+АПФ (-1.33), САФ (-1.15) и АПФ (-0.95). Высокие величины СКО и соответственно значительная

сезонная изменчивость интенсивности свойственна САФ (~ 0.12), АПФ (~ 0.15), ЮСБТФ (~ 0.11). В южных тропиках фронты усиливаются преимущественно зимой Южного полушария. В субтропиках и умеренных широтах большинство фронтов обостряются летом-осенью.

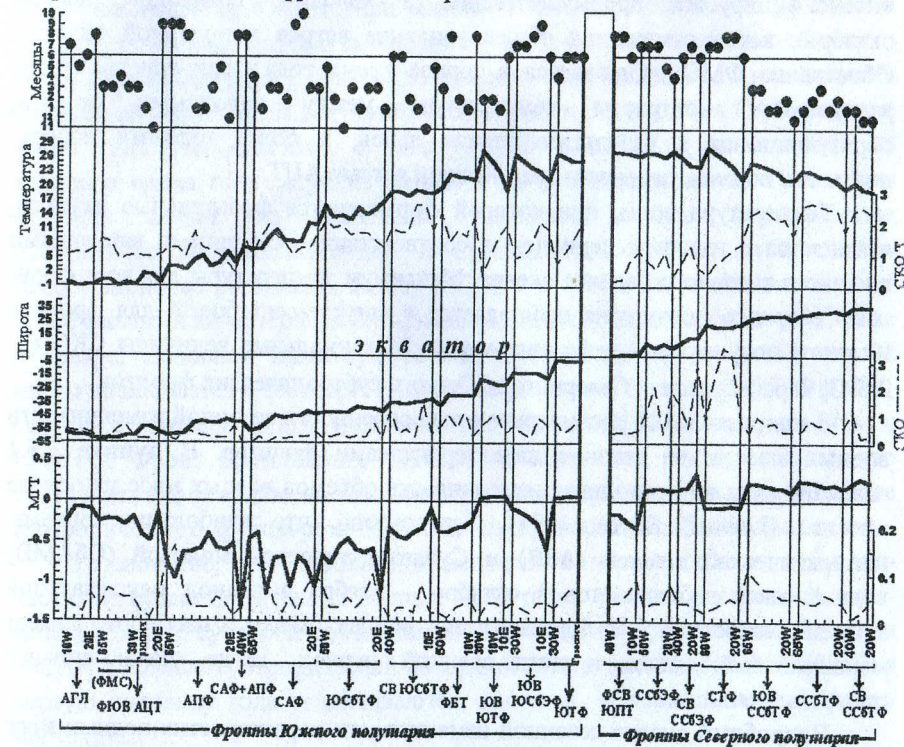


Рис. 6. Статистические характеристики зональных фронтов Атлантического океана в поле ТПО. В направлении сверху вниз: месяц наступления максимума обостренности фронтов (точки), среднегодовые температура, при которой формируется фронт, широта и значения МГТ (сплошные линии), и их внутригодовые СКО (пунктир). На нижней оси указаны аббревиатуры фронтов и меридианы, на которых они рассматриваются.

Совместный анализ внутригодовой изменчивости интенсивности фронтов, поля ветра и внешнего теплового баланса позволил высказать предположения о причинах вызывающих сезонную изменчивость некоторых фронтов. Показано, что ССБЭФ усиливается в середине года, в период усиления меридиональной неравномерности пассатных ветров в тропиках.

Обострение САФ севернее Фолклендских островов происходит осенью (в апреле), в период максимального контраста между прогретыми водами островного шельфа и более холодными водами Западной ветви ФТ. АПФ интенсифицируется преимущественно в холодное полугодие (август-октябрь), когда отмечается общее усиление ветров в полярной области. Обострение ФМС наблюдается в теплое время года (март-апрель), когда усиливаются контрасты температуры между холодными водами, образующимися в результате таяния льдов, и более теплыми поверхностными водами, переносимыми Южной ветвью АЦТ.

Температура воды, при которой формируются фронтальные разделы, изменяется с годовым периодом в соответствии с сезонными вариациями внешнего теплового баланса океана. Максимум температуры для всех фронтов Северного полушария наблюдается в августе-сентябре, а для фронтов Южного полушария – в феврале-марте. Максимальные величины СКО (2-2.5°C) характерны для Северного и Южного субтропических фронтов.

В подразделе 3.5 рассматриваются особенности сезонной изменчивости водных масс и ее связь с характеристиками фронтов. В пункте 3.5.1 анализируется внутригодовая изменчивость объемов водных масс на основе массива (Levitus, Boyer, 1994). Установлено, что наибольшие объемы Антарктической зимней (АЗВ) и Субантарктической модовой (СБАМВ) водных масс наблюдаются в октябре – ноябре в период максимальной зимней конвекции. Субтропическая водная масса, наоборот, имеет максимальный объем в летне-осенний период, когда океан сильнее прогревается.

Подробный анализ сезонной изменчивости характеристик водных масс выполнен для пролива Дрейка, который относительно хорошо обеспечен наблюдениями. Распределение амплитуд сезонных колебаний объемов вод показало, что их максимум между 58° и 60° ю.ш. (при температуре ~ 2.5-3.5°C) характеризует сезонные изменения объема АПрВ севернее АПФ.

Максимум амплитуды сезонных колебаний объемов соленых вод (> 34.6‰) прослеживается южнее 60° ю.ш. и связан с внутригодовым смещением границы ЦГВ. Характер сезонной изменчивости объемов основных поверхностных водных масс подтвердил концепцию о локальном механизме формирования поверхностных вод. Максимальная сезонная изменчивость объемов водных масс наблюдается вблизи крупномасштабных фронтов – Антарктического полярного и Субантарктического. В пределах АПрВ отмечаются верхний и нижний максимумы изменчивости объемов вод, природа которых связана с изменчивостью АПФ и САФ.

Полученные закономерности сезонной изменчивости поверхностных

водных масс находят свое подтверждение при анализе спутниковых данных в разделе 3.5.2. Установлено, что наибольшие объемы Субантарктической и Субтропической модовых водных масс наблюдаются зимой-осенью, когда расстояние между ФБТ, ЮСБТФ и САФ увеличивается. Наибольший объем АПрВ наблюдается в марте при максимальном расстоянии между САФ и АПФ. Установлено, что при смещении системы фронтов в холодное (теплое) время года на север (юг), САФ мало изменяет свое положение из-за близости Фолклендского плато. В результате расстояние между АПФ и САФ в теплое время года увеличивается, а между САФ и ЮСБТФ уменьшается. В холодное время года ситуация меняется на противоположную. Положение фронтов влияет на изменение площадей очагов формирования Антарктической промежуточной и Субантарктической модовой водных масс. Изменение расстояния между ЮСБТФ и ФБТ в сезонном цикле носит более сложный характер с двумя максимумами, наблюдающимися в сентябре и январе. Основным максимум объема Субтропической модовой водной массы наблюдается в сентябре. Изменение расстояния между ЮСБТФ и ФБТ связано с большей амплитудой сезонных смещений ФБТ по сравнению с ЮСБТФ. Фронт Бразильского течения по вертикали развит меньше, что определяет его реакцию на сезонные изменения границ и площади Южного субтропического круговорота под влиянием крупномасштабного поля ветра.

Установлено, что сезонная изменчивость поверхностных субтропических и субантарктических водных масс тесно связана с сезонной динамикой Южного субтропического антициклонического круговорота. Площади ЮСАК и Южной субтропической поверхностной водной массы (ЮСБТПВ) в первую половину года увеличиваются, достигая максимальных величин в марте (рис. 7).

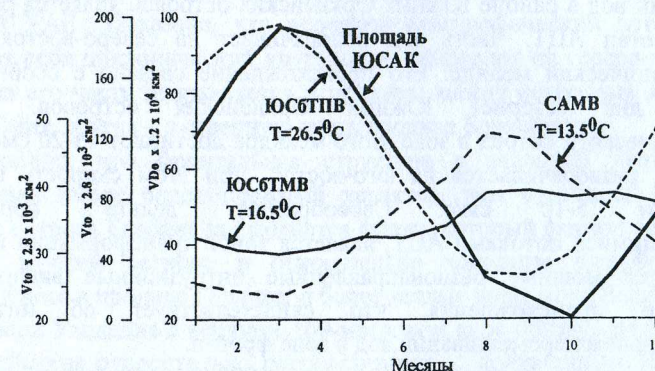


Рис. 7. Внутригодовой ход площадей ЮСАК и поверхностных водных масс.

В это время за счет смещения фронтов в южном направлении на южной периферии ЮСАК площади Южной субтропической (ЮСБТМВ) и Субантарктической (САМВ) модовых водных масс сокращаются до минимума. Их количество увеличивается в августе-сентябре, когда ЮСАК уменьшается, а Фронт Бразильского течения и Южный субтропический фронт смещаются на север.

В четвертом разделе исследуются особенности формирования фронтов в Зоне слияния вод морей Уэдделла и Скотия. В подразделе 4.1 подчеркивается, что существуют разные мнения о механизмах формирования вод ЗСУС. В числе возможных причин указывают зимнюю конвекцию (Deason, Moorey, 1975). Однако, зимнее выхолаживание и формирование льда способствуют увеличению солености поверхностных вод. Конвективные токи должны повышать соленость подповерхностных вод в ЗСУС, что не подтверждается наблюдениями. Другим источником низкосоленых и холодных вод в летний период может быть таяние айсбергов, громадное количество которых находится в ЗСУС в летнее время (Patterson, Sievers, 1980). В пунктах 4.2.1-4.2.3 на основе анализа наиболее полного массива гидрологических данных (WOD-1998) установлено, что основным механизмом формирования вод ЗСУС в летний период является опускание вод моря Уэдделла под влиянием конвергенции поверхностных течений. Эта конвергенция образуется в области локального антициклонического круговорота, который формируется под воздействием регионального поля ветра.

В подразделе 4.3 (пункт 4.3.1) анализируются новые данные о структуре вод Фронта моря Скотия по результатам наблюдений во 2-й и 3-й УАЕ (март-апрель 1997, 1998 гг.) показано, что главной особенностью циркуляции вод в районе Южных Оркнейских островов является раздвоение Южной ветви АЦТ. Часть вод поворачивает на северо-восток, образуя антициклонический меандр. Его происхождение связано с особенностями рельефа дна севернее Южных Оркнейских островов. Скорости геострофического потока в зоне этого меандра достигают 15-20 см/с. Другая часть вод разворачивается на юго-восток, при этом скорость потока не превышают 5-10 см/с. Своеобразная "дельта", образованная разделяющимися потоками АЦТ, является зоной трансформации вод. Здесь проявляются мощные разнонаправленные интрузионные внедрения вод различного происхождения, что свидетельствует об интенсивном горизонтальном перемешивании вод в зоне фронта.

Исследования, выполненные в 1997, 1998 гг., выявили существенные межгодовые вариации. Аномалии температуры и солености в 1998 г.

достигали соответственно -1°C и 0.3-0.4‰. На основе T,S-анализа сделан вывод, что аномалии термохалинных параметров обусловлены интенсивным выносом вод в море Скотия из моря Уэдделла. Скорость поверхностных течений северо-восточного направления достигала 1 м/с. Фронт моря Скотия был смещен к северу относительно своего среднего месячного положения на сотни миль. Интенсивное проникновение вод моря Уэдделла на север сопровождалось выносом большого числа айсбергов. Осенью 1997 г. зафиксировано 1343 айсберга, тогда как за это время в 1998 г. их количество увеличилось почти вдвое и достигло 2510. Согласно (Murphy *et al.*, 1998), такая интенсивная межгодовая изменчивость в продуцировании айсбергов связана с долгопериодными колебаниями гидрометеорологических условий

В пункте 4.3.2 анализируются новые результаты исследования Фронта моря Уэдделла в проливе Брансфилда. На основе массива WOD-98 установлено, что в районе северо-западного шельфа Антарктического полуострова взаимодействуют воды разного генетического происхождения. Это холодные и относительно соленые воды моря Уэдделла, которые поступают через пролив Брансфилда с востока, и холодные, но распресненные за счет таяния льда, воды моря Беллингаузена, распространяющиеся вдоль Антарктического полуострова с юго-запада. В результате взаимодействия этих водных масс в западной части пролива Брансфилда формируется фронтальный раздел, который, как и связанное с ним течение, ориентированы с юго-запада на северо-восток. Справа от фронта ярко выражена циклоническая циркуляция вод. Внутренняя часть этого циклонического меандра представлена водами моря Уэдделла. Система течений этого региона препятствует проникновению вод моря Уэдделла в Тихий океан через пролив Брансфилда. Этот феномен, полученный по архивным данным, подтвержден нашими исследованиями в марте 2002 г. в ходе 7-й УАЕ. Показано, что основной геострофический поток, образуя справа от себя циклонический круговорот, направлен на северо-восток (рис. 8а). Одна его часть направляется в проливы между островами Ливингстон, Сноу и Смит, другая – в северную часть пролива Брансфилда.

Показано, что фронтальная структура в западной части пролива Брансфилда имеет более сложный характер, чем считалось ранее. Так, севернее острова Брабант наблюдается фронт, который формируют наиболее пресные в этом регионе и относительно холодные шельфовые воды, образующиеся в проливе Герлаха, и более теплые воды моря Беллингаузена. Фронт моря Уэдделла в верхнем 100-метровом слое образуется в результате взаимодействия относительно распресненных, с пониженным содержанием кислорода, фосфатов и кремния вод, поступающих из пролива Дрейка, и

холодных и соленых вод моря Уэдделла. Глубже 200 метров это фронтальный раздел формируется за счет поступления в пролив Циркумполярной глубинной водной массы, проникающей через узкий относительно глубокий (> 500 м) проход между островами Смит и Сноу (рис. 8 б, в).

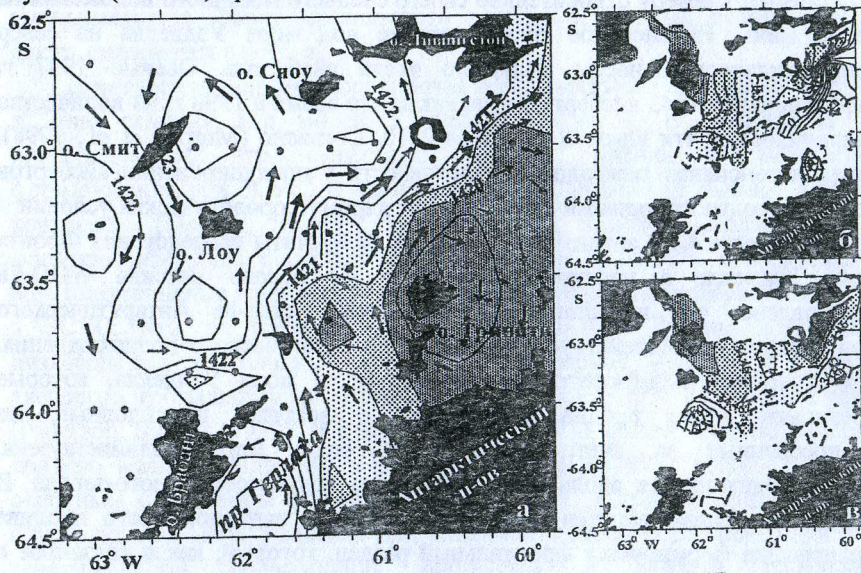


Рис. 8. Динамическая топография 5/200 дб (а), температура (б) и соленость (в) на горизонте 500 м в западной части пролива Брансфилда.

Поступающая при этом теплая и соленая вода (ЦГВ) распространяется на восток и на глубинах 200-500 м взаимодействует с глубинными водами пролива Брансфилда, образуя фронт. Этот фронт отличается от фронта поверхностного слоя противоположным по знаку градиентом солености. Циркумполярная глубинная водная масса выделяется в поле кислорода по его низким концентрациям (< 5.0 мл/л), при этом ЦГВ имеет более высокое содержание фосфатов и кремния, по сравнению с глубинными водами пролива Брансфилда. Перепады абсолютных значений температуры и солености через глубинный фронт составляют 0.8°C и 0.1‰.

ВЫВОДЫ

В диссертации на основе анализа современных массивов гидрологической и спутниковой информации исследована сезонная изменчивость циркуляции вод и фронтов в ЮА и получен ряд новых научных результатов:

1. Реакция верхнего слоя океана на сезонные вариации

крупномасштабного поля ветра проявляется в сезонной изменчивости системы Южный субтропический антициклонический круговорот – Южный тропический циклонический круговорот. В первой половине года, когда юго-восточный пассат ослаблен, наблюдается расширение зональных границ и увеличение площади ЮСАК, а площадь ЮТЦК уменьшается. Во второй половине года при усилении юго-восточного пассата и смещении западного переноса умеренных широт на север, площадь ЮСАК уменьшается, а ЮТЦК – увеличивается.

2. Установлено, что для Южного пассатного течения характерны максимальные внутригодовые изменения скорости. Годовая амплитуда скорости Северной ветви ЮПТ достигает 30 см/с, в его Центральной и Южной ветвях она уменьшается до 10 и 5 см/с. Для других течений она не превышает 5 см/с. Северная ветвь ЮПТ и Южное экваториальное противотечение достигают максимальной интенсивности во вторую половину года, а Центральная и Южная ветви ЮПТ – в первую. В центральной части океана для всех трех ветвей Южного Пассатного течения характерен годовой сигнал. На востоке региона сезонный цикл Северной и Центральной ветвей ЮПТ содержит полугодовую гармонику. Летом стрежни всех трех ветвей ЮПТ находятся в северном положении, а Фолклендское и Бразильское течения в зоне их схождения, Южно-Атлантическое течение и Северная ветвь Антарктического циркумполярного течения смещены на юг.

3. При исследовании влияния ветровых условий на интенсивность течений в тропической зоне ЮА установлено, что во внутригодовом цикле экстремумы скоростей ветра и Центральной и Южной ветвей ЮПТ находятся в противофазе. Сезонные вариации этих течений определяются реакцией океана на ветровые условия в других районах Атлантики. Сезонная изменчивость Южного экваториального противотечения и Северной ветви Южного пассатного течения в центральной части Тропической Атлантики обусловлена локальными ветрами. В годовом ходе скорости Южно-Атлантического течения преобладает годовая гармоника. В годовом ходе скорости АЦТ в северной части пролива Дрейка выявлена годовая гармоника, а на юге пролива – полугодовая. Северная и Центральная ветви АЦТ на западе океана изменяются с преобладающим годовым сигналом, а на востоке – полугодовым.

4. Впервые по данным альтиметрии показано, что западные и восточные течения в северных тропиках усиливаются почти в противофазе, тогда как их широтные смещения квазисинхронны. В южных тропиках интенсивность западных и восточных течений ближе к берегам Южной Америки изме-

няется асинхронно. Скорость Центральной ветви ЮПТ между 20° и 10° з.д. изменяется в фазе со скоростью Южного экваториального противотечения из-за запаздывания сезонного сигнала с запада на восток. Для течений тропической зоны Северного полушария характерно запаздывание сезонного сигнала с востока на запад в среднем на 2-3 месяца. В Южной Атлантике сезонный сигнал распространяется с запада на восток, при этом максимальное фазовое запаздывание до 6 месяцев наблюдается в АЦТ.

5. Установлено, что фронтальная система в тропиках асимметрична относительно экватора. Уточнено положение двух ветвей Северного субэкваториального фронта. Выделены Южные ветви Южного тропического и Южного субэкваториального фронтов, Фронт Северной ветви Южного Пассатного течения, которые ранее в литературе не были описаны.

6. Уточнены климатические признаки фронтов в Юго-Западном секторе Атлантики. Показано, что резкий градиент солености в субтропическом подповерхностном халинном максимуме отражает положение Южного субтропического фронта. Субантарктический фронт имеет собственные термохалинные признаки на разных участках. В проливе Дрейка он выделяется по положению изотермы 4°C на глубине 200 м, вдоль Патагонского шельфа по максимуму градиента температуры и солености над изобатами 500-700 м. Антарктический полярный фронт выделяется по положению подповерхностного минимума температуры на горизонте 200 м. Для АПФ типичны сезонные смещения на 1-2° широты, для САФ и ЮСБТФ они достигают 2-3°.

7. На основе гидрологических и спутниковых данных показано, что по величине МГТ наиболее интенсивными являются: Северный субэкваториальный, Южный тропический, Южный субтропический и Субантарктический фронты, в которых меридиональные градиенты могут достигать 1-2°C/100 км и 0.3‰/100 км. Установлено, что Северный Субэкваториальный и Южный тропический фронты, Южная ветвь Южного Субэкваториального фронта, Субантарктический фронт изменяются с преобладающим годовым периодом. В других фронтах, наряду с годовым, прослеживается полугодовой период. Существует фазовое запаздывание с запада на восток в наступлении максимума интенсивности ЮТФ, Южных ветвей ЮТФ и ЮСБЭФ. Сезонная изменчивость некоторых поверхностных и подповерхностных фронтов обусловлена разными механизмами. Для Северного Субэкваториального фронта на поверхности характерно влияние северо-восточного пассата, в подповерхностном слое – положение зоны сходимости пассатов, для Южной ветви ЮСБЭФ – интенсивность муссона. Для Фронта моря Скотия, Антарктического полярного, Субантарктического

и Южного субтропического фронтов отмечено чередование во времени их наибольшей обостренности, для ФМС и САФ это первая половина года, а для АПФ и ЮСБТФ – вторая.

8. Фронт моря Скотия, Антарктический полярный, Субантарктический и Южный субтропический фронты, Фронт Бразильского течения наиболее резко проявляются в полярных и умеренных широтах на западе Южной Атлантики. По мере продвижения на восток интенсивность этих фронтов ослабевает. В тропической зоне Фронт Северной ветви Южного пассатного течения, Южный тропический фронт и Южная ветвь Южного субэкваториального фронта наиболее интенсивны на востоке океана.

9. Максимальная сезонная изменчивость объемов водных масс наблюдается в районе крупномасштабных фронтов: Антарктического полярного, Субантарктического и Границы континентальных вод. На сезонные вариации площадей очагов формирования водных масс влияют особенности рельефа дна и вертикальная мощность фронтов. Связь между сезонной динамикой антициклонических круговоротов, фронтов и площадей поверхностных вод проявляется в противофазной сезонной изменчивости площадей основных субтропических водных масс и их периферийных модификаций – субтропических и субантарктических модовых водных масс.

10. Предложен механизм формирования водных масс Зоны слияния морей Уэдделла и Скотия в летний период. Эти водные массы образуются при опускании вод моря Уэдделла под влиянием конвергенции поверхностных течений в области локального антициклонического круговорота, который возникает под воздействием региональных особенностей поля ветра. Поверхностные воды этой зоны формируются в результате таяния льдов. В западной части пролива Брансфилда Фронт моря Уэдделла в поверхностном слое образуется в результате взаимодействия холодных и соленых вод моря Уэдделла с теплыми и распресненными водами моря Беллинсгаузена. На глубине более 200 м Фронт моря Уэдделла формируется при взаимодействии теплой и соленой Циркумполярной глубинной водной массы с холодными и менее солеными водами пролива Брансфилда.

Полученные результаты найдут практическое применение для навигационного обеспечения мореплавания; прогноза внутригодовой изменчивости биологических полей и повышения эффективности рыбопромыслового флота; при планировании исследований в Украинских антарктических экспедициях; при моделировании циркуляции и структуры вод; при создании курсов лекций по региональной океанографии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Артамонов Ю.В. Сезонная изменчивость положения Субантарктического фронта в юго-западной части Атлантики // Доповіді НАН України. - 2000. - № 10. - С. 115-120.
2. Артамонов Ю.В. Особенности гидрологических условий в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 года по материалам седьмой Украинской антарктической экспедиции // Доповіді НАН України. - 2003. - № 8. - С. 101-106.
3. Артамонов Ю.В. Циркуляция Южной Атлантики по результатам диагностического моделирования и натурным наблюдениям // Морской гидрофизический журнал. - 2003. - № 6. - С. 23-33.
4. Артамонов Ю.В. Исследование циркуляции вод Южной Атлантики по данным спутниковой альтиметрии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. - В. 12. - С. 301-306.
5. Артамонов Ю.В. Особенности гидрологической структуры Зоны слияния вод морей Уэдделла и Скотия летом южного полушария // Системы контроля окружающей среды. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. - С. 371-380.
6. Артамонов Ю.В. Сезонная динамика крупномасштабных круговоротов, гидрологических фронтов и поверхностных водных масс в Южной Атлантике // Системы контроля окружающей среды. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. - С. 211-213.
7. Artamonov Ju.V. Estimating of the seasonal variability of the temperature and heart content in the 200 m upper layer of the South Atlantic using the archives data base (WOCE-data 1900-1996 and World Ocean Database 1998) // Труды Первой международной антарктической конференции. - 2001. - Київ. - 2001. - Р. 16.
8. Artamonov Ju.V. Structure of the hydrophysical fields of the Weddell-Scotia confluence in summer of the South Hemisphere // Труды Первой международной антарктической конференции. - 2001. - Київ. - Р. 9.
9. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Полонский А.Б. Крупномасштабная структура и изменчивость океанографических полей Северной части Тропической Атлантики // Гидрофизика Тропической Атлантики. - К.: Наукова думка, 1993. - С. 7-34.
10. Океанографические исследования в Антарктике / Артамонов Ю.В.,

Булгаков Н.П., Джиганшин Г.Ф., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под ред. В.Н. Еремеева. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. - С. 427-436.

11. Polonsky A.B., Artamonov Yu.V. North Equatorial Countercurrent in the TropicaAtlantic: multijet structure and seasonal variability // German Jour. Hydr. - 1997. - V. 49. - N 4. - P. 476-494.

12. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Бибик В.А., Ломакин П.Д., Попов Ю.И., Украинский В.В. Результаты океанографических исследований Антарктического полярного и Субантарктического фронтов в западной части моря Скотия в апреле 1998 года по материалам второй Украинской антарктической экспедиции 1999 г. // Доповіді НАН України. - 1999. - № 5. - С. 129-133.

13. Булгаков М.П., Артамонов Ю.В., Бібік В.О., Грищенко В.Ф., Ломакин П.Д. Особливості льодових умов в районі Антарктичного півострова та моря Скотія восени 1998 року за даними другої Української антарктичної експедиції // Доповіді НАН України. - 2000. - № 1. - С. 107-110.

14. Булгаков М.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д. Циркуляция вод в районе північно-західного шельфа Антарктичного півострова та її вплив на розповсюдження криля // Доповіді НАН України. - 2001. - № 5. - С. 113-115.

15. Булгаков М.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д. Геоострофічні течії Антарктичного сектора Антарктики та їх мінливість // Доповіді НАН України. - 2001. - № 6. - С. 100-104.

16. Булгаков М.П., Ломакин П.Д., Артамонов Ю.В., Кондратьев С.І., Чепиженко О.І. Результати океанографічних досліджень у районі української антарктичної станції "Академік Вернадський" за даними П'ятої національної антарктичної експедиції // Доповіді НАН України. - 2001. - № 7. - С. 110-113.

17. Булгаков М.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д. Особенности структуры вод у Зоні злиття морів Скотія та Уедделла влітку південної півкулі // Доповіді НАН України. - 2002. - № 7. - С. 105-112.

18. Булгаков Н.П., Агафонов Е.А., Артамонов Ю.В., Кукушкин А.С. Связь распределений прозрачности и взвеси с элементами гидрологической структуры и динамики вод в поверхностном слое вод северо-восточной части Тропической Атлантики // Доповіді НАН України. - 2002. - № 12. - С. 81-87.

19. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Система крупномасштабных течений юго-западной части Атлантического океана и прилегающих акваторий Атлантического сектора Антарктики // Доповіді НАН України. - 2003. - № 10. - С. 127-130.

20. Булгаков Н.П., Агафонов Е.А., Артамонов Ю.В., Кукушкин А.С.,

Прохоренко Ю.А., Чепыженко А.И. Изменчивость распределения прозрачности в поверхностном слое Атлантического океана в связи с крупномасштабной циркуляцией вод // Доповіді НАН України. - 2004. - № 4. - С. 97-102.

21. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А., Артамонов А.Ю. Сезонная изменчивость термических фронтов в Юго-Западной части Атлантики по данным спутниковых наблюдений // Доповіді НАН України. - 2004. - № 7. - С. 97-102.

22. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д., Черемин В.Н. Акустические свойства поверхностных водных масс Тропической зоны Атлантического океана и их внутrigодовая изменчивость // Морской гидрофизический журнал. - 1991. - № 2. - С. 47-53.

23. Артамонов Ю.В., Баев С.А., Булгаков Н.П., Серебряков А.А. Структура вод Гвианского течения и Межпассатного противотечения в феврале-апреле 1990 г. // Морской гидрофизический журнал. - 1992. - № 5. - С. 43-49.

24. Артамонов Ю.В., Полонский А.Б. Синоптическая структура океанографических полей в северо-западной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1993. - № 3. - С. 40-54.

25. Артамонов Ю.В., Кубряков А.И., Куфтарков А.Ю. Гидрологические условия субдукции водных масс в восточной части Северной Атлантики (43-й рейс НИС "Академик Вернадский") // Морской гидрофизический журнал. - 1993. - № 4. - С. 57-70.

26. Булгаков Н.П., Украинский В.В., Попов Ю.И., Ломакин П.Д., Артамонов Ю.В. Структура и кинематика вод в районе Аргентинских островов осенью 1998 года // Морской гидрофизический журнал. - 1999. - № 5. - С. 41-50.

27. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Бибик В.А., Ломакин П.Д., Попов Ю.И., Украинский В.В. Гидрологические характеристики Субантарктического и Антарктического полярного фронтов в западной части моря Скотия в апреле 1998 г. // Морской гидрофизический журнал. - 2000. - № 1. - С. 56-65.

28. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Бибик В.А., Ломакин П.Д., Попов Ю.И., Украинский В.В. Особенности термохалинной структуры и кинематики вод в районе о-ва Коронейшн (архипелаг Южные Оркнейские острова) осенью 1998 г. // Морской гидрофизический журнал. - 2000. - № 3. - С. 32-38.

29. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Вертикальная термохалинная структура и климатические фронты Юго-Западной

Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 2000. - № 6. - С. 56-66.

30. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.В., Ломакин П.Д. Геострофическая циркуляция вод южной части Атлантического океана и ее сезонная изменчивость // Морской гидрофизический журнал. - 2002. - № 3. - С. 43-49.

31. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Внутrigодовая изменчивость геострофических зональных течений тропической зоны Южной Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 2002. - № 5. - С. 55-63.

32. Агафонов Е.А., Артамонов Ю.В., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Влияние гидрофизических факторов на распределения прозрачности и взвеси в поверхностном слое вод северо-восточной части Тропической Атлантики в зимний период // Морской гидрофизический журнал. - 2003. - № 4. - С. 69-79.

33. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Вертикальная термохалинная структура, водные массы и крупномасштабные фронты Юго-Западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики // Морской гидрофизический журнал. - 2004. - № 3. - С. 39-52.

34. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Сезонная изменчивость термохалинных характеристик и объемно-статистических параметров водных масс в проливе Дрейка // Морской гидрофизический журнал. - 2004. - № 6. - С. 62-73.

35. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А. Крупномасштабная структура термических фронтов восточной части Тропической Атлантики и их сезонная изменчивость // Морской гидрофизический журнал. - 2005. - № 2. - С. 46-59.

36. Артамонов Ю.В., Букатов А.Е., Соловей Н.М., Скрипалева Е.А. Исследование зависимости пространственной структуры и фазовых характеристик первой моды внутренних волн в Атлантическом океане от гидрологических условий // Морской гидрофизический журнал. - 2005. - № 4. - С. 3-10.

37. Артамонов Ю.В., Баев С.А., Булгаков Н.П., Полонский А.Б. Циркуляция Экваториально-Тропической Атлантики и меридиональный перенос тепла // ФАО. - 1991. - Т. 27. - № 10. - С. 107-119.

38. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Бибик В.А., Грищенко В.Ф., Ломакин П.Д., Попов Ю.И., Украинский В.В. Аномальные явления в Атлантике в феврале-мае 1998 г. // Океанология. - 2001. - Т. 41. - № 2. - С. 201-206.

39. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А., Артамонов А.Ю., Станичный С.В. Структура и сезонная изменчивость

крупномасштабных фронтов юго-западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики по гидрологическим и спутниковым данным // *Океанология*. - 2005. - Т. 45. - № 5. - С. 656-669.

40. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // *Исследования Земли из космоса*. - 2005. - № 4. - С. 62-75.

41. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.В., Ломакин П.Д. Система течений Южного субтропического антициклонического круговорота и ее внутригодовая изменчивость // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа*. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. - В. 3. - С. 96-105.

42. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Гидрологические условия формирования крупномасштабных фронтов в субтропиках и антарктическом секторе Южной Атлантики // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа*. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. - С. 80-88.

АНОТАЦІЯ

Артамонов Ю.В. Сезонна мінливість великомасштабної циркуляції вод і термохалінних фронтів Південної Атлантики. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора географічних наук за спеціальністю 11.00.08 – океанологія. – Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь, 2005.

У дисертаційній роботі на основі аналізу сучасних масивів гідрологічних і супутникових даних досліджені середній стан і сезонна мінливість циркуляції вод і великомасштабних фронтів у Південній Атлантиці (ПівДА). Досліджено їхній зв'язок з мінливістю поля вітру.

Показано, що реакція верхнього шару океану на сезонні варіації великомасштабного поля вітру виявляється в мінливості системи Південний субтропічний антициклонічний кругообіг (ПівдСАК) – Південний тропічний циклонічний кругообіг (ПівдТЦК). У першу половину року, коли південно-східний пасат ослаблений, спостерігається розширення зональних границь і збільшення площі ПівдСАК, а площа ПівдТЦК зменшується. За даними альтиметрії встановлене поширення сезонного сигналу в течіях ПівДА з заходу на схід, при цьому максимальне фазове запізнювання в 6 місяців спостерігається в Північній гілці Антарктичної циркумполярної течії.

Досліджені кліматичні fronti ПівДА в полях температури і солоності,

уточнені критерії їхнього виділення, закономірності сезонної мінливості. Встановлено, що фронтальна система Атлантики в тропіках асиметрична щодо екватора. Виділені раніше не описані в літературі Південні гілки Південних тропічного та субекваторіального фронтів, Фронт Північної гілки Південної пасатної течії. Встановлений зв'язок між сезонною динамікою антициклонічних кругообігів, фронтів і площ поверхневих вод, що виявляється в протифазній мінливості площ субтропічних водних мас і їх модових модифікацій. Проаналізовано структуру фронтів, характеристики геострофічної циркуляції, термохалінні характеристики водних мас у західній частині моря Скотія і протоці Брансфілда за результатами спостережень в Українських антарктичних експедиціях.

Ключові слова: Південна Атлантика, Антарктика, геострофічна циркуляція, термохалінні fronti, водні маси, сезонна мінливість.

АННОТАЦИЯ

Артамонов Ю.В. Сезонная изменчивость крупномасштабной циркуляции вод и термохалинных фронтов Южной Атлантики. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 11.00.08 – океанология. – Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, 2005.

Диссертация посвящена исследованию сезонной изменчивости циркуляции вод и фронтов в Южной Атлантике (ЮА) на основе современных фактических и климатических массивов данных, а также спутниковых данных по температуре на поверхности океана и альтиметрии.

Показано, что реакция верхнего слоя океана на сезонные вариации крупномасштабного поля ветра проявляется в сезонной изменчивости системы Южный субтропический антициклонический круговорот (ЮСАК) – Южный тропический циклонический круговорот (ЮТЦК). В первую половину года, когда юго-восточный пассат ослаблен, наблюдается расширение зональных границ и увеличение площади ЮСАК. При этом площадь ЮТЦК уменьшается. Во вторую половину года усиливается юго-восточный пассат, западный перенос умеренных широт смещается на север, площадь ЮСАК уменьшается, а ЮТЦК – увеличивается. Установлено, что Северная ветвь Южного пассатного течения (ЮПТ), Южное экваториальное противотечение наиболее усиливается во вторую половину года, тогда как Центральная и Южная ветви ЮПТ – в первую. В годовом ходе трех ветвей ЮПТ в центральной части океана преобладает годовой сигнал. На востоке

сезонный цикл ветвей ЮПТ содержит полугодовую гармонику. Южно-Атлантическое течение, ветви Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) на западе океана изменяются с годовым периодом, на востоке – полугодовым.

Оценено влияние ветровых условий, определяющих интенсивность различных течений. Для Центральной и Южной ветвей ЮПТ экстремумы скоростей ветра и течений во внутригодовом цикле находятся в противофазе. Сезонные вариации характеристик этих течений определяются реакцией океана на ветровые условия в других районах Атлантики. Сезонная изменчивость Южного экваториального противотечения, Северной ветви ЮПТ в центральной части тропиков обусловлена локальными ветрами. По данным альтиметрии впервые выявлено, что в тропиках, ближе к Южной Америке, интенсивность западных и восточных течений изменяется асинхронно. Установлено распространение сезонного сигнала с запада на восток, при этом максимальное запаздывание в 6 месяцев наблюдается в АЦТ.

Установлено, что фронтальная система в тропиках асимметрична относительно экватора. Выделены ранее не описанные Южные ветви Южного тропического и Южного субэкваториального фронтов, Фронт Северной ветви ЮПТ. Показано, что наиболее интенсивны ЮТФ, ЮСБТФ и САФ. Установлено фазовое запаздывание с запада на восток в наступлении максимума интенсивности ЮТФ, Южных ветвей ЮТФ и Южного субэкваториального фронта. Выявлено, что фронты полярных и умеренных широт более четко проявляются в западной части ЮА, в тропиках – на востоке океана.

Показано, что особенности рельефа дна и вертикальная мощность фронтов влияют на сезонные изменения очагов формирования водных масс. Связь между сезонной динамикой антициклонических круговоротов, фронтов и площадей поверхностных вод проявляется в противофазной изменчивости площадей основных субтропических водных масс и их периферийных модификаций – субтропических и субантарктических мидовых водных масс.

Предложен механизм формирования вод Зоны слияния морей Уэдделла и Скотия в летний период. Они образуются в результате опускания вод моря Уэдделла под влиянием конвергенции поверхностных течений в области антициклонического круговорота, формируемого под воздействием поля ветра. В проливе Брансфилда в поверхностном слое Фронт моря Уэдделла образуется в результате взаимодействия холодных и соленых вод моря Уэдделла с теплыми и распресненными водами моря Беллинсгаузена. На глубине более 200 метров ФМУ формируется в результате взаимодействия

теплой и соленой Циркумполярной глубинной водной массы с холодными и менее солеными водами пролива Брансфилда.

Ключевые слова: Южная Атлантика, Антарктика, геострофическая циркуляция, термохалинные фронты, водные массы, сезонная изменчивость.

SUMMARY

Artamonov Yu.V. The seasonal variability of the water large-scale circulation and thermohaline fronts in the Southern Atlantic. – Manuscript.

The thesis to claim the academic degree of doctor of geographical sciences on the speciality 11.00.08 – oceanology. – oceanology. – Marine Hydrophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sebastopol, 2005.

The thesis is devoted to investigate the mean state and seasonal variability of the water circulation and the large-scale fronts in the Southern Atlantic (SA), using the modern climatic hydrological array, archive data set and satellite observations. Its relation with variability of the wind field is investigated.

Shown, that the response of ocean upper layer on the seasonal variations of large-scale wind field displays in change of the system South subtropical anticyclonic gyre (SSbTAG) – South tropical cyclonic gyre (STCG). The weakening of south-east trade-wind in first half-year results in expansion of zonal boundaries of SSbTAG and extension of its area. The STCG area is diminished.

The seasonal cycle propagation in the SA currents from west to east is discovered, using satellite altimeter data. The maximal phase lag (6 months) is to be observed in the Antarctic Circumpolar current. The climatic temperature and salinity fronts are investigated. Its revealed criteria and seasonal variability regularities are refined. Discovered, that frontal system in the Tropical Atlantic is asymmetric relatively equator. The unknown earlier the South branch of the South Tropical front, the South branch of the South Subequatorial front, Front of North branch of the South Equatorial current are found and investigated.

The seasonal variability of the SA water masses is investigated. Shown, that the relationship between seasonal dynamic of the anticyclonic gyre, fronts and surface water masses areas are appeared as antiphase variability of areas subtropical water masses and their mode modifications. The fronts structure, geostrophic circulation characteristics and thermohaline characteristics of water masses in the western part of Scotia Sea and Bransfield strait are analyzed, using the observation's results, obtained during the Ukraine Antarctic expeditions.

Key words: Southern Atlantic, Antarctica, geostrophic circulation, thermohaline fronts, water masses, seasonal variability.