

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П.ШИРШОВА

на правах рукописи

ТЕРЕЩЕНКОВ Владимир Петрович

**Многолетняя изменчивость термохалинной  
структуры вод и потоков тепла и массы  
в субтропических широтах Северной Атлантики.**

11.00.08 - океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

МОСКВА 1997

Издательство АО "Диалог-МГУ". ЛР N 063999 от 04.04.95.  
Подписано к печати 21.04.97г.  
Усл.печ.л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ N 316.  
Тел. 939-38-90, 939-38-91. Факс 939-38-93.  
119899, Москва, Воробьевы Горы, МГУ

Работа выполнена в лаборатории Взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений Института океанологии им.П.П.Ширшова Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор **С.С.Лаппо**

Официальные оппоненты:

доктор географических наук,  
ведущий научный сотрудник **Б.Н.Филошкин**

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник **А.В.Нечволодов**

Ведущая организация:

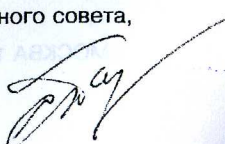
**Московский Государственный Университет им.М.В.Ломоносова**  
(г.Москва)

Защита диссертации состоится 3 июня 1997 г. в 14<sup>00</sup> час. на заседании специализированного совета К.002.86.02 в Институте океанологии им.П.П.Ширшова РАН, по адресу: 117851, Москва, Нахимовский пр-т.,36

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии им.П.П.Ширшова, РАН.

Автореферат разослан 25 апреля 1997 г.

Ученый секретарь специализированного совета,  
кандидат географических наук

  
С.Г.Панфилова

**Общая характеристика работы**

Актуальность проблемы. В последние годы проблема глобальных изменений климата и их предсказания приобрела не только академический, но и практический интерес. Причиной этого стало изменение роли, которую человек играет в климатической системе Земли. Сопоставление энергии, накапливаемой на Земле и расходуемой человеком, показывает, что человечество по этому важному показателю сравнялось с производительностью природных процессов, и это является одним из важнейших факторов современного этапа взаимодействия природы Земли и человеческого общества [Лаппо, Гулев, Рождественский, 1990]. Таким образом, в сбалансированной природной системе появился дополнительный активный компонент. В отличие от естественных природных факторов, в зависимости от которых климатическая система испытывает колебания около среднего положения, антропогенные факторы могут вызывать направленные изменения элементов среды [Будыко, 1984; Будыко, Израэль, 1984; Винников 1986; Кондратьев 1980]. Каковы же будут последствия этого явления? Ответ на этот вопрос может оказаться далеко не праздным. Поэтому абсолютно естественным и насущным оказывается стремление спрогнозировать все возможные сценарии развития событий и выбрать разумный вариант управления ситуацией. Таким образом, проблема исследования и предсказания изменений климата нашей планеты приобрела характер неотложного общечеловеческого социального заказа в адрес науки [Монин, 1982].

Основными элементами климатической системы Земли являются атмосфера, океан, криосфера (включая горные ледники, снежный покров и морской лед) и поверхность континентов (включая наземную биомассу, озера, реки и грунтовые воды). Внешними источниками энергии для климатической системы выступают потоки солнечного и геотермического тепла. Соотношение этих потоков  $1:3 \cdot 10^4$  в пользу инсоляции, что позволяет для большинства проблем теории климата пренебрегать вкладом геотермического потока тепла.

Общее количество солнечной энергии, приходящее на поверхность Земли, постоянно во времени и зонально неоднородно. Тепловой

54  
№           
Библиотека

баланс на верхней границе атмосферы в экваториальных и тропических широтах положителен, а высоких широтах отрицателен. При этих условиях состояние климатической системы Земли требует энергообмена между тропиками и полюсами. Эффективно этот процесс реализуется в океане и атмосфере. Однако в Мировом океане тепловое взаимодействие экватор-полюс происходит на фоне глобального меж океанского обмена (рис.1). Последний является следствием географических особенностей распределения океанов и материков и выражается в общем потоке поверхностных теплых вод из Тихого океана в высокие широты Северной Атлантики, где в результате взаимодействия с атмосферой эти воды охлаждаются, теряют свою плавучесть, погружаются в промежуточные и глубинные слои и распространяются в обратном направлении (Лаппо, 1984; Gordon, 1986; Broecker, 1991).

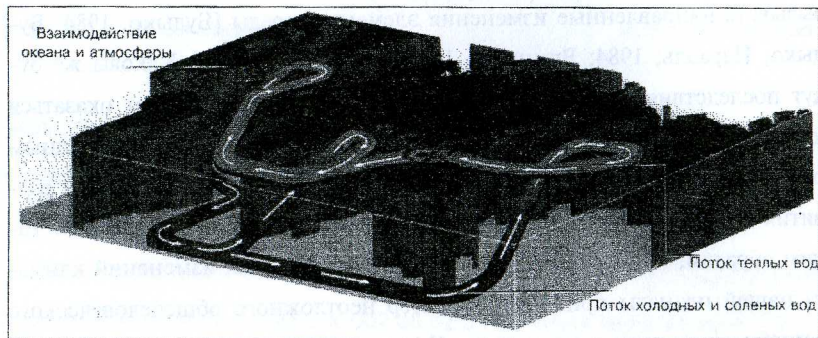


Рис. 1 Схема глобальной меж океанской термохалинной циркуляции.

Очевидно, что необходимым условием стабильности климата будут являться взаимосогласованные потоки тепла в океане и атмосфере, определяемые их глобальной циркуляцией. Принимая изложенную выше логику, можно утверждать, что долгопериодные колебания климата должны сопровождаться аномальным перераспределением тепла, и это перераспределение не может не проявляться в изменениях меридиональных потоков тепла (МПТ). Из-за малой теплоемкости воздуха первенство в поддержании аномальных условий на протяжении длительных периодов времени принадлежит океану, через прямые и обратные связи

воздействующему на атмосферу. Таким образом, зная об изменчивости океанского теплового переноса, можно получить дополнительную информацию об изменениях глобального климата.

Представляемая работа относится к исследованиям, направленным на изучение океана как одного из компонентов климатической системы Земли.

**Цель работы** - исследовать многолетнюю изменчивость характеристик водных масс и меридиональных потоков тепла и массы вод на трансатлантическом разрезе по 36°с.ш. Атлантического океана.

При этом решались следующие **основные задачи**:

- на основе анализа гидрологической структуры оценить изменчивость термохалинных свойств вод океана;
- определить структуру и количественно оценить временную динамику меридиональных потоков массы и тепла;
- установить и описать взаимосвязь между изменениями термохалинных свойств водных масс и интенсивностью их меридионального переноса;
- используя современные знания, разработать согласованную схему долгопериодной изменчивости вод Северной Атлантики.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- все результаты получены на основе анализа наиболее полного набора натуральных данных, собранных на трансатлантическом гидрологическом разрезе по 36°с.ш. вплоть до 1993г.;
- дано количественное описание сезонной изменчивости термохалинных свойств вод;
- впервые продемонстрирована значимая изменчивость свойств промежуточных и глубинных водных масс;
- впервые показана возможность нового пути распространения Лабрадорской водной масс (ЛВМ) от очага образования вдоль западного склона Срединно-атлантического хребта (САХ);

- оценена изменчивость меридиональных переносов отдельных водных масс и интенсивности глобальной меридиональной термохалинной циркуляции океана;
- предложена согласованная схема наблюдаемой изменчивости вод Северной Атлантики.

Основные результаты исследования получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Автор являлся начальником научной экспедиции на НИС "Профессор Мультановский" (1993г.), а также участвовал в других морских экспедициях, данные которых легли в основу выполненной работы.

**Фактический материал и методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использовались данные трех трансатлантических гидрологических разрезов выполненных по 36°с.ш. Атлантического океана: НИС "Чейн" в 1959г., НИС "Атлантис-II" в 1981г. и НИС "Профессор Мультановский" в 1993г. Данные включали наблюдения за температурой, соленостью, кислородом и биогенными элементами, охватывающие всю толщу вод от поверхности до дна океана. Кроме того, для исследования сезонной изменчивости привлекались наблюдения за температурой и соленостью верхнего 2000-метрового слоя воды, полученные на 70 повторяющихся разрезах по 36°с.ш. научно-исследовательскими судами Государственного океанографического института в период 1971-1984 гг. Методы исследования включали традиционные океанологические подходы: T-S анализ и изопикнический анализ вод. В работе также использовались методы анализа временных рядов. Расчеты потоков массы и тепла через зональный разрез осуществлялись по схеме, предложенной К.Брайеном (1964). Точность количественных оценок определялась на основании статистических методов и общей теории ошибок.

**Научная и практическая значимость** работы имеет два аспекта. В первую очередь, это - обогащение современных знаний о долгопериодной изменчивости вод океана, которые на настоящий момент, в силу целого ряда объективных причин, являются крайне разобщенными и неполными. Во-вторых, полученные в работе результаты, особенно в

части интегральных оценок переносов тепла и массы, послужат основой для настройки и проверки математических моделей глобальной циркуляции океана и динамики климатической системы Земли. Кроме того, выводы, полученные в данном исследовании, могут быть использованы для построения эффективной наблюдательной сети за изменениями состояния Мирового океана.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на международной конференции "Изменчивость климата Северной Атлантики" (Москва, 1992), совещании научного совета программы "Atlantic Climate Change Program" (Принстон, США, 1992), итоговой сессии ученого совета Государственного океанографического института (Москва, 1992), совещании рабочей группы Базового проекта 3 международной программы WOCE (Фуэнгерола, Испания, 1994), международном совещании "Atlantic Climate Change Experiment" (Атланта, США, 1995), международной конференции "Динамика океана и атмосферы" (Москва, 1995), международной конференции "Междекадная изменчивость Северной Атлантики" (Москва, 1996), 84 ежегодной конференции Международного совета по исследованию морей (Рейкьявик, Исландия, 1996).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ.

**Структура и объем** диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения. Основная часть содержит 134 страниц, 22 рисунков и 2 таблиц. Список использованной литературы состоит из 121 наименований, из которых 72 на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность проблемы, излагаются цели и задачи работы, показана научная новизна и практическое значение исследования. Рассматриваются современные представления о роли океана в климатической системе Земли. Вводится понятие глобальной меридиональной термохалинной циркуляции океана (Meridional Overturning Circulation), как фактора, определяющего климатическое состояние океана.

**В первой главе** проведен подробный анализ исходных данных, использованных в настоящей работе. Особое внимание, уделяемое этому вопросу, обусловлено целью диссертации. Очевидно, что исследование изменчивости водных масс предполагает априорное знание о точности определения рассматриваемых характеристик и возможных источниках ошибок в их измерениях или расчетах. Только в этом случае сравнение данных, полученных в различных условиях, становится уместным. Поскольку основные результаты работы вытекают из анализа полей температуры и солености морской воды, особое внимание уделено именно этим параметрам. Температура является одним из немногих напрямую определяемых параметров морской воды и точность ее определения всецело зависит от используемых приборов и их калибровки. Как было отмечено в разделе “Фактический материал и методы исследования”, в работе использовались данные трех съемок гидрологического разреза по 36° с.ш. Самая ранняя съемка была выполнена в 1959г., а последняя в 1993г. За это время инструментальный парк океанографической техники претерпел существенные изменения. На смену ртутным глубоководным опрокидывающимся термометрам, использованным в 1959г., пришли высокоточные платиновые термометры сопротивления, с помощью которых были проведены измерения температуры воды в 1981 и 1993гг. Соответственно, точность наблюдений за температурой воды составляла 0.02°С в 1959г. и 0.002°С в 1981 и 1993гг. Более деликатный вопрос возникает с точностью определения солености морской воды. Эта характеристика не измеряется непосредственно. Она рассчитывается в соответствии с уравнением для расчета солености по значениям электропроводности, температуры и давления, рекомендованного комиссией по океанологическим стандартам и таблицам ЮНЕСКО в 1978г. Тем не менее, зная точность определения всех исходных параметров, можно легко установить точность определения солености. Так, в 1959г. соленость определялась с точностью до 0.01‰, а в 1981 и 1993гг. до 0.002 и 0.005‰ соответственно. И все же главная опасность при сравнении данных различных съемок кроется в возможных источниках систематических ошибок в определении характеристик морской воды. Для соле-

ности таким источником может стать неверно установленный стандарт морской воды. Подробно данный вопрос был исследован Saunders (1986) и Mantyla (1994). Этими авторами был предложен подход для выявления систематических ошибок в определении солености для данных, полученных в Северной Атлантике. Суть метода состоит в сравнении значений солености, полученных на основе наблюдений в глубоководной котловине Северо-Восточной Атлантики, с предложенной ими стандартной T-S кривой. Устойчивость T-S соотношения для этого района океана основана на данных о концентрации фреонов, (Doney, Bullester, 1992) свидетельствующих о том, что периоды вентиляции глубинных вод превышают несколько десятилетий. Учитывая, что использованные в диссертационной работе разрезы пересекали глубоководную котловину Северо-Восточной Атлантики, мы использовали предложенный метод для оценки качества исходных данных.

Проведенный контроль качества показал хорошую сопоставимость данных 1993 и 1981 гг. со стандартными T-S соотношениями. Значения солености, полученные в ходе выполнения съемки 1959 г., оказались отличными от эталонных на 0.008 ‰. Тем не менее, в отсутствие сопутствующих гидрохимических наблюдений в 1959г., а значит, и невозможности проведения комплексного анализа глубинных вод Восточной Атлантики, этот результат нельзя рассматривать как свидетельство систематической ошибки в определении солености. Скорее этот результат служит предупреждением о необходимости осторожной интерпретации выводов, основанных на полученных в 1959г. данных о солености.

Далее в первой главе рассматривается структура водных масс на разрезе по 36° с.ш. Анализ характеристик водных масс проводился с использованием методов классического T-S анализа и анализа совместных распределений характеристик водных масс в параметрических координатах, где координатами помимо традиционных температуры и солености выступали концентрации биогенных элементов и кислорода. Для анализа использовались наблюдения, проведенные на разрезе в 1981 и 1993гг. Данные 1959г. остались вне рассмотрения по причине отсутствия информации о распределении биогенных элементов, полученных в этом

году. В результате проведенного анализа было установлено присутствие на разрезе (в слое глубже сезонного термоклина) следующих водных масс: Антарктической промежуточной (ААПВ), Средиземноморской (СВМ), Лабрадорской (ЛВМ), Северо-восточной глубинной (СВГВ), Северо-западной глубинной (СЗГВ) и Антарктической донной (ААДВ). Для каждой из перечисленных водных масс установлены участки разреза, характерные глубины и плотностные интервалы залегания. Также показано, что характеристики ядер всех водных масс испытывают временную изменчивость. Исключение из рассмотрения поверхностных и подповерхностных водных масс продиктовано задачей исследования межгодовой динамики. При эпизодических съемках разреза, не обеспечивающих корректную фильтрацию высокочастотных сигналов, естественно ограничиться рассмотрением лишь тех водных объектов, которые по своей природе не подвержены короткопериодным колебаниям. В терминах водных масс к таким объектам можно отнести лишь те воды, которые образуются в удаленных от места исследования районах и после образования оказываются вне прямого воздействия атмосферы, имеющего хорошо выраженные максимумы спектральной энергии на периодах кратных годовым. Выполнение этих условий обеспечивает естественную природную фильтрацию короткопериодных компонентов изменчивости водных масс, благодаря активным процессам диффузии и турбулентного перемешивания. Все это в полной мере применимо к рассмотренным в работе промежуточным и глубинным водным массам. Таким образом, обнаруженные на разрезе изменения характеристик водных масс можно рассматривать как проявление их межгодовой изменчивости, генерируемой в областях формирования. Это положение подтверждается в работе непосредственным анализом сезонной изменчивости на разрезе по 36°с.ш., проведенным на основе обработки данных 70 съемок верхнего 2000-метрового слоя океана, выполненных в период 1971-1984гг. Исследования показали, что временные колебания температуры и солености с годовым периодом хорошо прослеживаются лишь в верхнем 200-метровом слое. Доля общей дисперсии температуры, описываемая регулярным годовым ходом, составляет более 90% на поверх-

ности, а глубже 300м менее 5%. Для солености аналогичные оценки составляют 40% и 5% соответственно.

**Во второй главе** приводятся многочисленные свидетельства существования многолетней изменчивости вод океана. В частности, приводится факт разнонаправленных изменений свойств промежуточных вод на 48°с.ш. (Koltermann and Sy, 1994) и 24.5°с.ш. (Parilla *et al.*, 1994). Результаты повторных съемок разреза по 48°с.ш. указывают на современное интенсивное охлаждение и распреснение промежуточных вод, в то время как наблюдения, проведенные на 24.5°с.ш., говорят об обратном. Отсюда возникает естественный вопрос: “Следует ли рассматривать данное событие как разную реакцию субполярного и субтропического круговоротов на внешнее воздействие или это лишь следствие фазового запаздывания сигнала, распространяющегося из районов формирования промежуточных вод, а именно ЛВМ?”. Во многом ответить на этот вопрос могут исследования изменчивости термохалинной структуры вод на 36°с.ш.

Получение достоверных оценок изменчивости полей температуры и солености на разрезе подразумевает наличие однородных выборок данных, подвергаемых анализу. Для удовлетворения этого условия все наблюдения были приведены к единой пространственной сетке базового разреза, в качестве которого выбиралась съемка 1993г. Перемещение гидрологических станций в пространстве на линию базового разреза осуществлялось в соответствии с принципом сохранения потенциальной завихренности. Далее данные интерполировались на фиксированную сетку с пространственным разрешением 80 км по горизонтали и 34 стандартных уровня по вертикали. Выбор стандартных уровней давления основывался на стремлении добиться наилучшего соответствия со схемой отбора проб, реализованной в 1959г.

Уже простой анализ полей разностей гидрологических характеристик позволил выявить существенные изменения водных масс в промежуточных и глубинных слоях океана. Однако для определения статистической значимости обнаруженных изменений были рассмотрены зонально осредненные средние разности на изобарических уровнях, а так-

же средние разности, полученные для отдельных частей разреза. Разбиение разреза на участки проводилось с учетом особенностей термохалинной структуры, рассмотренной в 1 главе, и особенностей циркуляции (Барышевская, 1990). Всего было выделено 6 областей: западная пограничная (Гольфстрим), западная глубоководная, западного склона Срединно-Атлантического хребта (САХ), восточного склона САХ, восточная глубоководная и восточная пограничная. Расчеты продемонстрировали качественное подобие изменений в отдельных районах, согласующееся с тенденциями в поведении среднезональных величин разностей.

Анализ полей зонально-осредненных разностей показал, что изменения температуры и солёности на разрезе положительно коррелированы между собой во всей толще вод, что свидетельствует о наличии тенденции компенсации по плотности и консервативности плотностных характеристик водных масс. Отрицательная корреляция, отмеченная в отдельных слоях (на уровне 1000 дбар) для разностей между 1993 и 1981гг., скорее всего является следствием изменения мощности слоев, занимаемых отдельными водными массами. Это предположение подтверждается значимым изменением глубины залегания поверхности "нулевой скорости", которое обсуждается в 3 главе. Наиболее значительные изменения температуры и солёности, как в Восточном бассейне так и Западном, отмечены в слое 800-2200 дбар, который является слоем распространения промежуточных водных масс (рис.2). В частности, характеристики Антарктической промежуточной водной массы (АПВМ) определяют значения температуры и солёности в слое 700-1000 дбар, а характеристики Лабрадорской водной массы (ЛВМ) ответственны за слой 1500-2200 дбар. Сравнение данных 1993 и 1981гг. показывает, что за этот период произошло распреснение (0.02-0.03 ‰) и похолодание (0.1-0.2°C) вод. Аналогичные по знаку тенденции наблюдались и при сравнении данных 1993 и 1959гг., но при несколько меньших абсолютных значениях разниц. Похолодание (0.02-0.05°C) также отмечено в глубинных слоях, но при этом распреснение вод здесь практически незначимо (при сравнении 1993 и 1981гг.), за исключением придонных горизонтов, занимаемых Атлантической антарктической донной водной

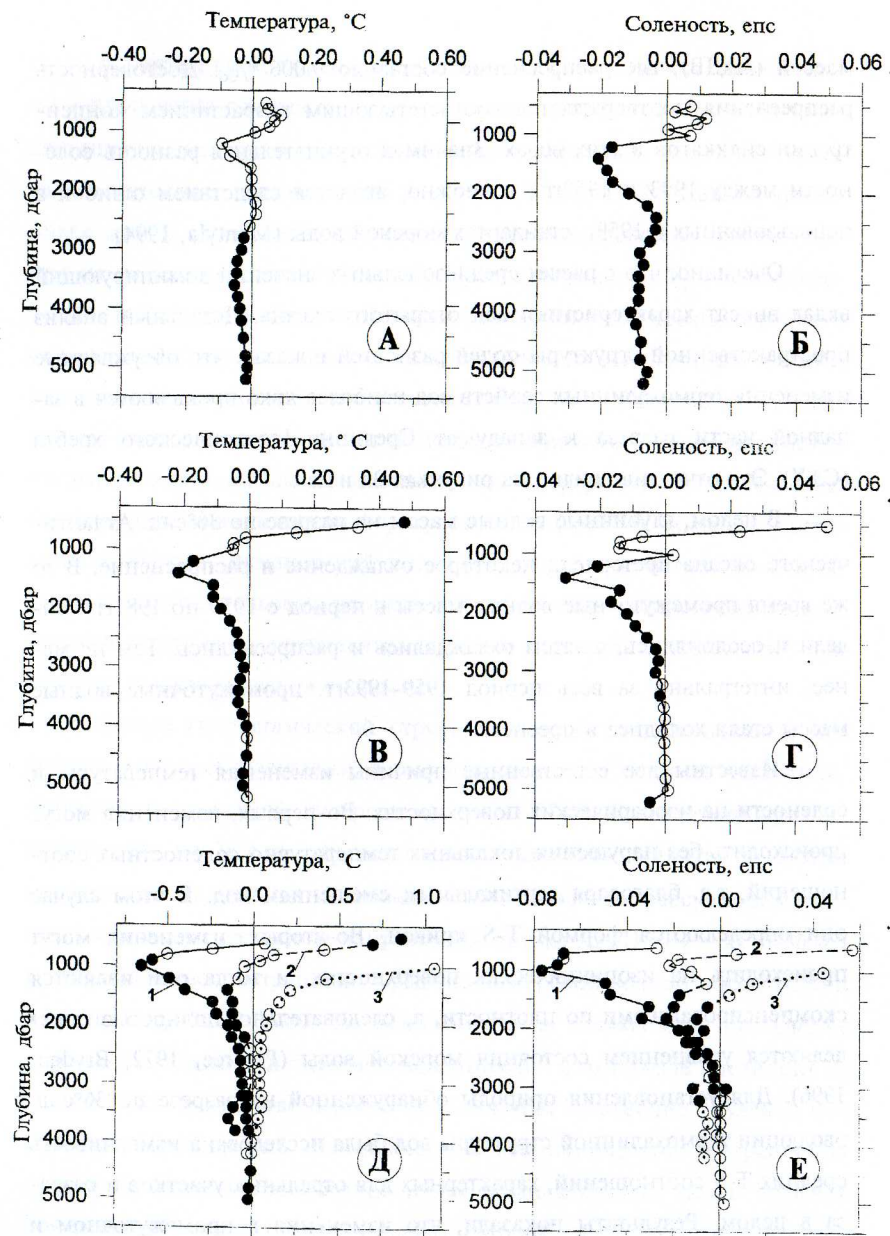


Рис.2 Зонально осредненные разности потенциальной температуры и солёности между съемками 1993 и 1959гг. (А,Б) и 1993 и 1981гг. (В,Г) для всего разреза и отдельных его частей (Д,Е) западного склона САХ (1), западной глубоководной (2) и западной пограничной (3). Закрашенные кружки соответствуют значениям имеющим 90% статистическую значимость по критерию Стьюдента.

массой (ААДВ), где распределение составило 0.006 ‰. Достоверность распределения подтверждается соответствующим возрастанием концентрации силикатов в этих водах. Значимая отрицательная разность солености между 1993 и 1959г., возможно, является следствием ошибок в использованных в 1959г. стандартах морской воды (Mantyla, 1994).

Очевидно, что в расчет среднезональных значений доминирующий вклад вносят характеристики вод открытого океана. Детальный анализ пространственной структуры полей разностей показал, что обсуждаемые изменения термохалинных свойств вод наиболее ярко проявляются в западной части разреза к западу от Срединно-Атлантического хребта (САХ). Это отчетливо видно на рисунках 2д и 2е.

В целом, глубинные водные массы на разрезе по 36°с.ш. Атлантического океана претерпели некоторое охлаждение и распределение. В то же время промежуточные водные массы в период с 1959 по 1981г. теплели и осолонялись, а затем охлаждались и распрежнялись. Тем не менее, интегрально за весь период 1959-1993гг. промежуточные водные массы стали холоднее и преснее.

Известны две естественные причины изменения температуры и солености на изобарических поверхностях. Во-первых, изменения могут происходить без нарушения локальных температурно-соленостных соотношений, т.е. благодаря вертикальным смещениям вод. В этом случае они определяются формой T-S кривой. Во-вторых, изменения могут происходить на изопикнических поверхностях, и тогда они являются скомпенсированными по плотности, а, следовательно, полностью определяются уравнением состояния морской воды (Pingree, 1972; Bryden, 1996). Для установления природы обнаруженной на разрезе по 36°с.ш. эволюции термохалинной структуры вод была исследована изменчивость средних T-S соотношений, характерных для отдельных участков и разреза в целом. Результаты показали, что изменения в промежуточном и придонном слоях обусловлены трансформацией характеристик водных масс, в частности, ЛВМ, СВМ и ААДВ. В глубинных слоях трансформация вод (СЗГВ, СВГВ) происходила на фоне их вертикальных смещений.

**В третьей главе** приводятся оценки меридиональных потоков массы и тепла через плоскость гидрологического разреза по 36°с.ш. В качестве инструмента для расчета потоков через зональный разрез использовалась методика, предложенная в работе (Bryden, 1962.) Данная постановка задачи основана на разложении меридиональной скорости течения на независимые составляющие:  $V_0$  - баротропную,  $V_g$  - геострофическую и  $V_e$  - экмановскую. Дополнительно вводится предположение о скомпенсированности интегральных расходов, обусловленных каждым из компонентов скорости, так что суммарный расход через всю площадь разреза равен нулю. Баротропный поток рассчитывался для восточной и открытой частей океана по соотношению Свердруп. Этот поток компенсировался равновеликим баротропным потоком в западной пограничной области. Экмановский поток в верхнем слое океана рассчитывался по тангенциальному напряжению ветра. Сбалансированность всех потоков достигалась правильным выбором "нулевой поверхности" при расчетах геострофической скорости.

Анализ гидрологической структуры вод на разрезе показал, что водные массы, образованные в высоких широтах Северной Атлантики, занимают плотностной интервал  $\sigma_2 = 36.85-37.09$ . Естественно предположить, что на 36°с.ш. эти воды предпочтительно движутся в южном направлении от районов их формирования. Такие же рассуждения приводят к выводу о северном направлении потока ААПВ ( $\sigma_2 = 36.10-36.40$ ) и зональном распространении Средиземноморской водной массы (СВ) в интервале  $\sigma_2 = 36.40-36.80$ . На основании этих заключений был сделан вывод о расположении "нулевой поверхности" в интервале плотности  $\sigma_2 = 36.70-36.85$ . В качестве первого приближения положение "нулевой поверхности" выбиралось совпадающим с изопикнической поверхностью  $\sigma_2 = 36.80$ . Затем итерационным путем устанавливалась такая "нулевая поверхность", расчеты относительно которой приравнивали дивергенцию геострофического потока на разрезе значению расхода воды в Беринговом проливе, равной (0.8 Св на юг). Отметим, что выбранная таким способом "нулевая поверхность" существенно менялась от съемки к съемке: 36.73 в 1959г., 36.85 в 1981г., 36.70 в 1993г.



Расчеты баротропного и экмановского потока проводились на основе данных о среднегодовом климатическом поле ветра (Hellerman and Rosenstein, 1983). Экмановский транспорт на 36°с.ш. равнялся 2 Св на юг. Средняя скорость  $V_e$  равнялась -1.0 см/сек в верхнем слое и 0.001 см/сек в глубоководной части разреза, с учетом протяженности разреза 5990 км и толщины экмановского слоя 35м. Баротропный поток, рассчитанный по соотношению Свердрупа, равнялся 20 Св. Граница западной пограничной области устанавливалась между станциями, где геострофический поток в верхнем 2000-метровом слое был направлен на север (Leaman *et al.*, 1989). Ширина западной пограничной области (Гольфстрима) менялась от съемки к съемке, но в среднем составляла 250 км. Баротропная скорость в области Гольфстрима равнялась 1.5-2.0 см/сек на север, в открытой части океана - 0.01 см/сек на юг.

На рис.3 представлен график зонально-осредненного потока воды на единицу глубины для трех съемок. Зонально-осредненный баротропный поток, хотя и не равнялся нулю (из-за разной глубины западной пограничной области и открытой части океана), тем не менее был крайне незначителен. Отсюда следует, что все отмеченные изменения интегрального потока происходили вследствие изменений термохалинной структуры вод. Глубина "нулевой" зонально-осредненной скорости ниже экмановского слоя изменялась от 1100м в 1959 и 1993гг. до 1700-2500м в 1981г. Кроме того, горизонт "нулевой" скорости, разделяющий потоки Северо-Атлантической глубинной воды и ААДВ, также заглубился на 800 м. В целом, потоки вод главного термоклина на север (100-1000м) и глубинных вод (3200-4500м) на юг были максимальными в 1981г., в то время как потоки южного направления промежуточных вод, верхней части глубинных вод (1200-3200м) и поток донных вод (глубже 4000м) на север были интенсифицированы в 1993г. Более того, в 1959 и 1993гг. наблюдалась трехслойная (северный-южный-северный) вертикальная структура потоков, а в 1981г. двухслойная (без значимого потока донных вод на север).

Для структуризации потоков плоскость разреза была разделена на три основные части: западную (включая Гольфстрим, склоновые и

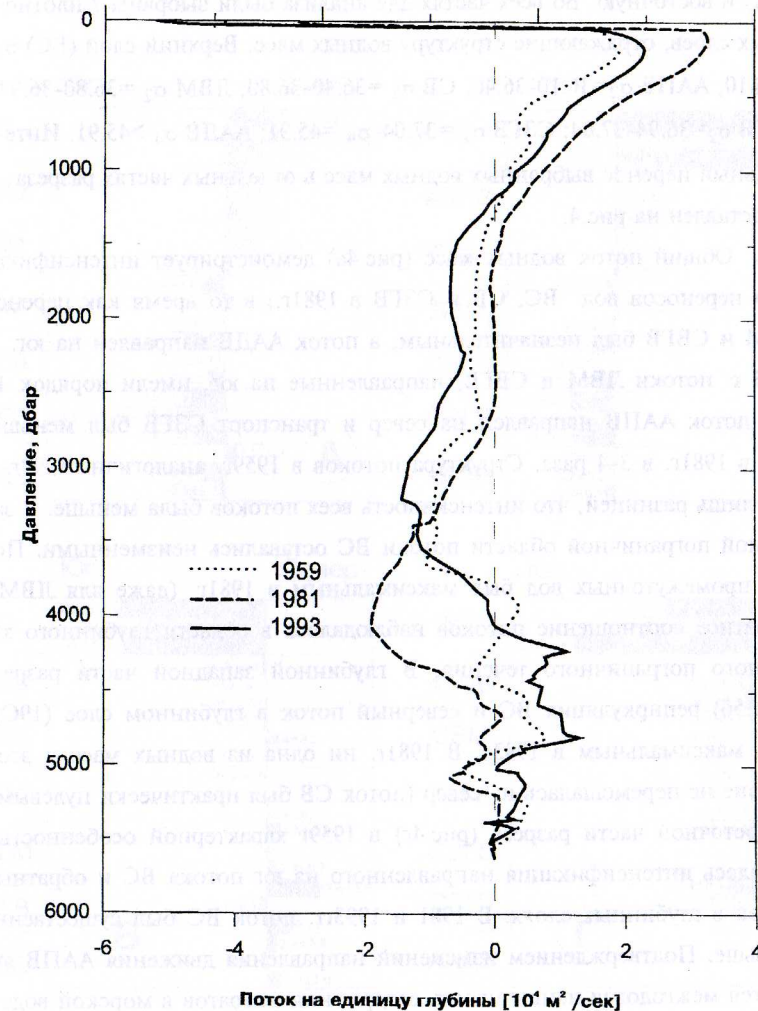


Рис.3 Зонально-осредненный поток воды на единицу глубины на разрезе по 36°с.ш.

шельфовые области), западную открытого океана (область к западу от САХ) и восточную. Во всех частях для анализа были выбраны 7 плотностных слоев, отражающие структуру водных масс. Верхний слой (ВС)  $\sigma_2 < 36.10$ ; ААПВ  $\sigma_2 = 36.10-36.40$ ; СВ  $\sigma_2 = 36.40-36.80$ ; ЛВМ  $\sigma_2 = 36.80-36.94$ ; СВГВ  $\sigma_2 = 36.94-37.04$ ; СЗГВ  $\sigma_2 = 37.04 \pm \sigma_4 = 45.91$ ; ААДВ  $\sigma_4 > 45.91$ . Интегральный перенос выбранных водных масс в отдельных частях разреза представлен на рис.4.

Общий поток водных масс (рис.4а) демонстрирует интенсификацию переносов вод ВС, СВ и СЗГВ в 1981г., в то время как перенос ЛВМ и СВГВ был незначительным, а поток ААДВ направлен на юг. В 1993 г. потоки ЛВМ и СВГВ, направленные на юг, имели порядок 10 Св, поток ААПВ направлен на север и транспорт СЗГВ был меньше, чем в 1981г. в 3-4 раза. Структура потоков в 1959г. аналогична 1993г. с той лишь разницей, что интенсивность всех потоков была меньше. В западной пограничной области потоки ВС оставались неизменными. Поток промежуточных вод был максимальным в 1981г. (даже для ЛВМ). Обратное соотношение потоков наблюдалось в области глубинного западного пограничного течения. В глубинной западной части разреза (рис.5б) рециркуляция ВС и северный поток в глубинном слое (19Св) были максимальными в 1993г. В 1981г. ни одна из водных масс в этом районе не перемещалась на север (поток СВ был практически нулевым). В восточной части разреза (рис.4г) в 1959г. характерной особенностью являлась интенсификация направленного на юг потока ВС и обратный поток в глубинных слоях. В 1981 и 1993гг. поток ВС был существенно меньше. Подтверждением изменений направления движения ААПВ является межгодовая изменчивость содержания нитратов в морской воде в восточной части разреза (Dobroliubov *et al.*, 1995).

Для расчета компонентов меридионального переноса тепла (МПТ) использовалась методика Вуан (1962) и Bennet (1978). Баротропный транспорт тепла рассчитывался как произведение Свердруповского потока массы воды на разницу осредненных по площади разреза потенциальных температур района Гольфстрима и открытой части океана. Экмановский поток тепла определялся с использованием разницы средней

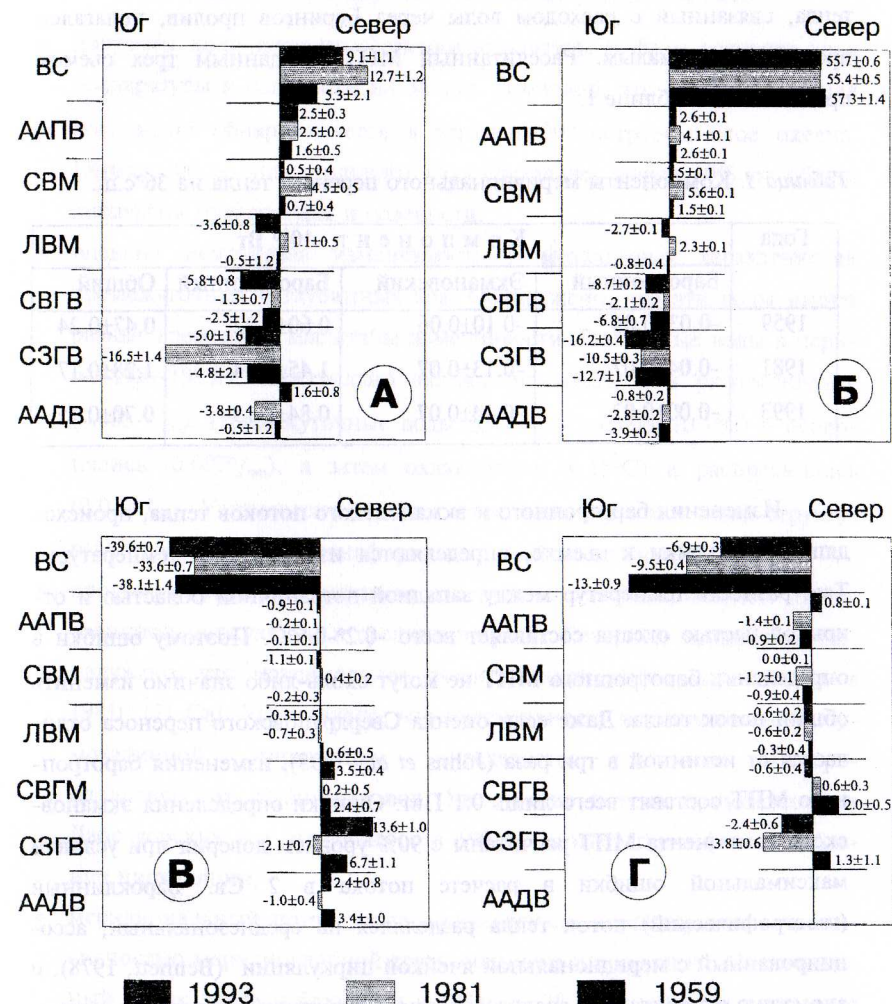


Рис.4 Перенос водных масс на 36°с.ш.(Св). Весь разрез в целом (А), западная пограничная область (Б), западная глубинная область (В) и восточная часть разреза (Г). Значения потоков даны в Св.

температуры верхнего 35-метрового слоя и средней температуры разреза. Таким образом, компоненты МПТ рассчитывались независимо, в предположении о скомпенсированности потоков массы через разрез. Поток тепла, связанный с расходом воды через Берингов пролив, полагался пренебрежимо малым. Рассчитанный МПТ по данным трех съемок представлен в таблице 1.

Таблица 1. Компоненты меридионального переноса тепла на 36°с.ш.

Года	Компонент, $10^{15}$ Вт			
	Баротропный	Экмановский	Бароклиный	Общий
1959	-0.03±0.04	-0.10±0.06	0.60±0.22	0.47±0.24
1981	-0.04±0.07	-0.13±0.07	1.45±0.14	1.28±0.17
1993	-0.00±0.02	-0.14±0.07	0.84±0.13	0.70±0.15

Изменения баротропного и экмановского потоков тепла, происходящие от съемки к съемке, определяются изменениями температуры. Так, разность температур между западной пограничной областью и открытой частью океана составляет всего  $-0.2^{\circ}$ - $0.6^{\circ}$ С. Поэтому ошибки в определении баротропного МПТ не могут сколь-либо значимо изменить общий поток тепла. Даже если оценка Свердруповского переноса отличается от истинной в три раза (Johns *et al.*, 1995), изменения баротропного МПТ составят всего лишь 0.1 ПВт. Ошибки определения экмановского компонента МПТ рассчитаны с 90% уровнем доверия при условии максимальной ошибки в расчете потока в 2 Св. Бароклиный (геострофический) поток тепла разделялся на среднезональный, ассоциированный с меридиональной ячейкой циркуляции (Bennett, 1978), и аномалию относительно среднезонального, отражающий перенос в горизонтальной плоскости океанского круговорота. Рассчитанные разницы между переносами объемов воды в меридиональной ячейке циркуляции обусловили существенное изменение бароклиного МПТ, который вырос с 0.5 ПВт в 1959г. до 1.3 ПВт в 1981г. Аналогичные результаты были получены Roemmich and Wunsch, 1985. Уменьшение МПТ в 1993г. также

в основном определяется ослаблением меридиональной циркуляционной ячейки.

В заключение сформулированы основные результаты работы:

- получены количественные оценки амплитуды и фазы годового хода температуры и солёности на 36°с.ш. Показано, что сезонный сигнал достоверно обнаруживается в верхнем 200-метровом слое океана. Глубже 200 м вклад годового хода составляет менее 10% от общей дисперсии температуры и солёности;
- оценена межгодовая изменчивость термохалинных характеристик промежуточных и глубинных вод. Обнаружено, что эти воды имеют разные временные масштабы изменчивости. Глубинные воды в период 1959-1993гг. интегрально охлаждались ( $0.02^{\circ}$ С) и распреснялись ( $0.008$  ‰). Промежуточные воды до 1981г. теплели ( $0.1^{\circ}$ С) и осоло-нялись ( $0.007$  ‰), а затем охлаждались ( $0.15^{\circ}$ С) и распреснялись ( $0.013$  ‰). Установлено, что все изменения термохалинной структуры вод обусловлены трансформацией свойств водных масс;
- продемонстрирована значимая изменчивость меридиональной термохалинной циркуляции в средних широтах Северной Атлантики. Обнаружено, что максимальное развитие циркуляции наблюдалось в 1981г. (21 Св). Установлено, что интенсивность меридиональной термохалинной циркуляции определяется потоком Северо-Атлантических глубинных вод. Увеличение потока промежуточных Лабрадорских вод, отмеченное в 1993г., соответствует фазе ослабления циркуляции;
- меридиональный поток тепла положительно коррелирован с интенсивностью меридиональной термохалинной циркуляции. Максимальный поток тепла наблюдался в 1981г. (1.28 ПВт) и почти в два раза превышал значения потока тепла установленные для съемок 1959 и 1993гг.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Мониторинг климатических изменений Мирового океана// Известия АН СССР, сер. ФАО, 1991, 27, №10, с.1043-1053 (совместно с Лаппо С.С. и Гулевым С.К.)
2. Heat and mass transport at 36°N in Atlantic - Workshop on Atlantic Ocean Climate Variability, Workshop report №84, IOC/UNESCO, p.13, (совместно с Андреевым А.О.)
3. Меридиональный перенос тепла через 36° с.ш. в Атлантике// Метеорологии и гидрология, 1993, №8, с.63-73, (совместно с Андреевым А.О.)
4. A transatlantic hydrographic section along 36°N. The distribution of properties// Annales Geophysicae, Suppl.II to v.12, Part II, 1994, p. C227, (совместно с А.В.Соковым и С.А.Добролюбовым).
5. 40-рейс научно-исследовательского судна "Профессор Мультиановский", выполненный по проекту "Циркуляция Мирового океана" (WOCE).// Океанология, 1994, т.34, №6, с.934-936, (совместно с Добролюбовым С.А. и Конновым В.А.)
6. Long period changes in the intermediate and deep water circulation in the North Atlantic// ICES, C.M.1994/C:10, pp.1-12, (совместно с Лаппо С.С., Добролюбовым С.А. и Соковым А.В.)
7. WHP Section A3 Across 36°N Aboard RV Professor Multanovskiy// International WOCE Newsletters, 1995, №19, pp.25-27, (совместно с Соковым А.В. и Добролюбовым С.А.)
8. Сравнительный анализ характеристик водных масс на трансатлантическом разрезе по 36° с.ш.// Океанология, 1995, т.35, №6, с.817-823, (совместно с Добролюбовым С.А. и Соковым А.В.)
9. Freshening and cooling of intermediate and deep water in the western North Atlantic during three last decades// Annales Geophysicae, 1995. Suppl. I to vol.13, Part I, p.C11, (совместно с Соковым А.В. и Добролюбовым С.А.)
10. Long-period changes in the intermediate and deep water circulation in the North Atlantic - The Abstracts. XXI IAPSO General Assembly, Honolulu,

Hawaii, 1995, p.50, (совместно с Соковым А.В. и Добролюбовым С.А.)

11. Decadal-scale variability of the North Atlantic Ocean// National Academy Press, Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales, 1996, pp.76-81, (совместно с Levitus S., J.Antonov, X.Zhou, H.Dooley, K.Selemenov).
12. Охлаждение и распределение промежуточных и глубинных вод в западной части Северной Атлантики с начала 1990-х годов// Доклады РАН, 1996, т.347, №4, с.548-551, (совместно с Лаппо С.С., Соковым А.В., Добролюбовым С.А.)
13. Mass and Heat Fluxes at 36°N in the Atlantic: Comparison of 1993, 1981 and 1959 Hydrographic Surveys // International WOCE Newsletter, 1996, № 22, pp.34-37, (совместно с Добролюбовым С.А. и Соковым А.В.)
14. Interdecadal variability of mass and heat flux at 36°N in the Atlantic ocean// Annales Geophysicae, 1996. Suppl. II to vol.14, Part II, p.C243, (совместно с Добролюбовым С.А. и Соковым А.В.)
15. Water mass transport and heat flux changes at 36°N in the Atlantic ocean// ICES, C.M. 1996/O:1, pp.1-17, (совместно с Добролюбовым С.А. и Соковым А.В.)

