

УДК 551.465(269.4)

Ю.В. Артамонов, П.Д. Ломакин, Е.А. Скрипалева

Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик Фронта моря Скотия по спутниковым измерениям температуры поверхности океана

Уточнены особенности пространственной структуры Фронта моря Скотия и рассмотрена изменчивость его характеристик на сезонном и межгодовом масштабах. Показано, что в климатическом сезонном цикле наблюдается обострение Фронта моря Скотия в теплое время года, когда увеличиваются контрасты температуры между холодными водами, образующимися в результате таяния льдов, и более теплыми, переносимыми Южной ветвью Антарктического Циркумполярного течения. Максимальные сезонные колебания интенсивности фронта отмечены в районе минимума внутригодовых колебаний границы дрейфующих льдов. Межгодовые вариации характеристик фронта проявляются в аномальном изменении его интенсивности широтных смещениях. Установлена значимая связь между межгодовыми аномалиями характеристик фронта и площадей теплых тропических вод в Тихом океане, обусловленными событиями Эль-Ниньо.

Введение

В Антарктическом секторе Атлантики существует граница между относительно теплыми водами, переносимыми Южной ветвью Антарктического Циркумполярного течения (ЮВ АЦТ), с одной стороны, и более холодными водами моря Уэдделла и прибрежными водами архипелагов Южных Оркнейских Южных Шетландских о-вов – с другой. На разных участках эта граница носит различные названия. В проливе Дрейка, над материковой окраиной Южных Шетландских о-вов, ее обычно называют Границей континентальных вод (ГКВ) [1]. К востоку от о. Элефант – Фронтом моря Скотия (ФМС) [1] или Вторично фронтальной зоной [2, 3]. В [4] этот фронтальный раздел получил наименование Фронта Южной ветви Антарктического Циркумполярного течения. Согласно [5 – 7], Фронт моря Скотия является северной границей Зоны слияния вод моря Уэдделла и Скотия (ЗСУС), отделяющей относительно теплые воды Антарктической зоны от более холодных, однородных по вертикали, вод ЗСУС. Южной граница ЗСУС – Фронт моря Уэдделла (ФМУ).

Несмотря на повышенный интерес к Фронту моря Скотия в силу его промышленного значения, сезонная изменчивость его характеристик изучена слабо. Это связано с тем, что более ранние работы [1 – 3, 6, 7] основывались либо на эпизодических гидрологических измерениях, либо на массивах гидрологических данных с крайне неравномерной обеспеченностью наблюдениями в течение года и почти полным отсутствием информации в холодный сезон. Появление спутниковых данных с хорошим пространственным временным разрешением существенно расширило возможности океанологов в плане изучения физических процессов в верхнем слое океана. В настоящее время увеличилось количество исследований на основе дистанционных измерений, описывающих поведение океанических фронтов [8 – 11]. Вместе с те

сезонный цикл Фронта моря Скотия рассматривался со значительной дискретностью по пространству (10° по долготе) [8, 11]. Межгодовая изменчивость характеристик ФМС практически не исследована.

В связи с этим цель настоящей работы – уточнить особенности структуры Фронта моря Скотия на поверхности океана и оценить изменчивость его характеристик на сезонном и межгодовом масштабах по современным спутниковым данным.

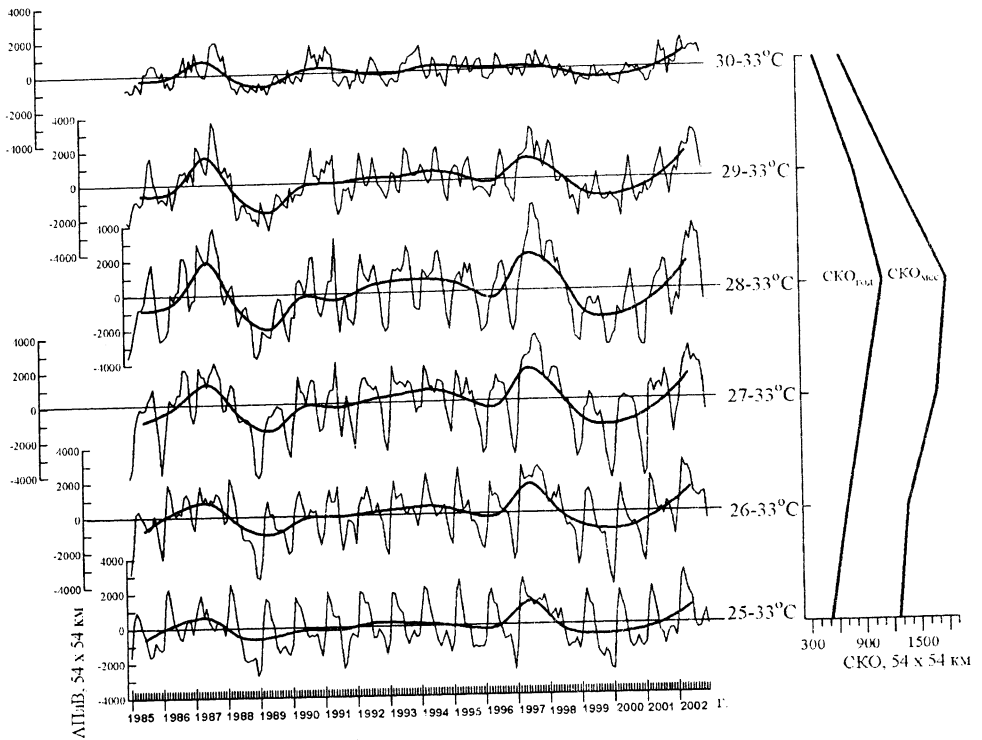
Материалы и методика

В работе использован массив спутниковых измерений температуры поверхности океана (ТПО) за период 1985 – 2001 гг. со среднемесячным осреднением в узлах сетки 54×54 км из архива *AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA*. Фронт моря Скотия имеет преобладающую зональную протяженность, поэтому для анализа его структуры были рассчитаны поля меридиональных горизонтальных градиентов (МГТ) ТПО. Положение фронта определялось по экстремумам МГТ на их меридиональных профилях с дискретностью 2° по долготе. Идентификация фронта проводилась по диапазону температуры, соответствующему данному экстремуму, его широтному положению и знаку меридионального градиента. Отрицательное значение МГТ во фронте показывает уменьшение значений температуры в направлении с севера на юг. Величины экстремумов МГТ в $^\circ\text{C}/54$ км далее по тексту приводятся в скобках.

Для анализа климатического сезонного цикла характеристик фронта поля МГТ осреднялись по месяцам за 17 лет. Предполагалось, что в результате использования среднемесячных климатических значений МГТ мезомасштабные шумы и синоптическая изменчивость отфильтровываются и практически не проявляются в анализируемых полях. Для подавления остаточного шума профили меридиональных градиентов были сглажены трехточечным фильтром $(0,25\text{МГТ}_{i-1} + 0,5\text{МГТ}_i + 0,25\text{МГТ}_{i+1})$.

Для оценки межгодовой изменчивости характеристик Фронта моря Скотия меридиональные градиенты ТПО были рассчитаны для каждого месяца каждого года (всего 204 месяца) вдоль меридианов $65, 50, 40$ и 30° з.д. Затем для 204 месяцев определялись характеристики фронта – величина экстремума МГТ, средняя температура и значение широты, на которой наблюдался фронт. Далее рассчитывались среднегодовые и среднемесячные аномалии этих характеристик относительно среднего за 204 месяца.

В работе также выполнена оценка связей между вариациями характеристик Фронта моря Скотия, индексом атмосферной циркуляции *SOI* (*South Oscillation Index*) и аномалиями площадей теплых тропических вод (АПТВ) в Тихом и Атлантическом океанах. В качестве показателя событий Эль-Ниньо анализировались изменения аномалий площадей теплых вод с температурой $28 - 33^\circ\text{C}$ в Тихом океане (рис. 1) и $27 - 32^\circ\text{C}$ – в Атлантическом, для которых характерны максимальные амплитуды межгодовых вариаций. В качестве условной единицы площади вод принималась площадь квадрата 54×54 км. Для аномалий площадей этих вод, индекса *SOI* и аномалий характеристик ФМС (величина МГТ, широтное положение и температура на оси фронта) рассчитывались кросскорреляционные функции с 95%-ным уровнем значимости.



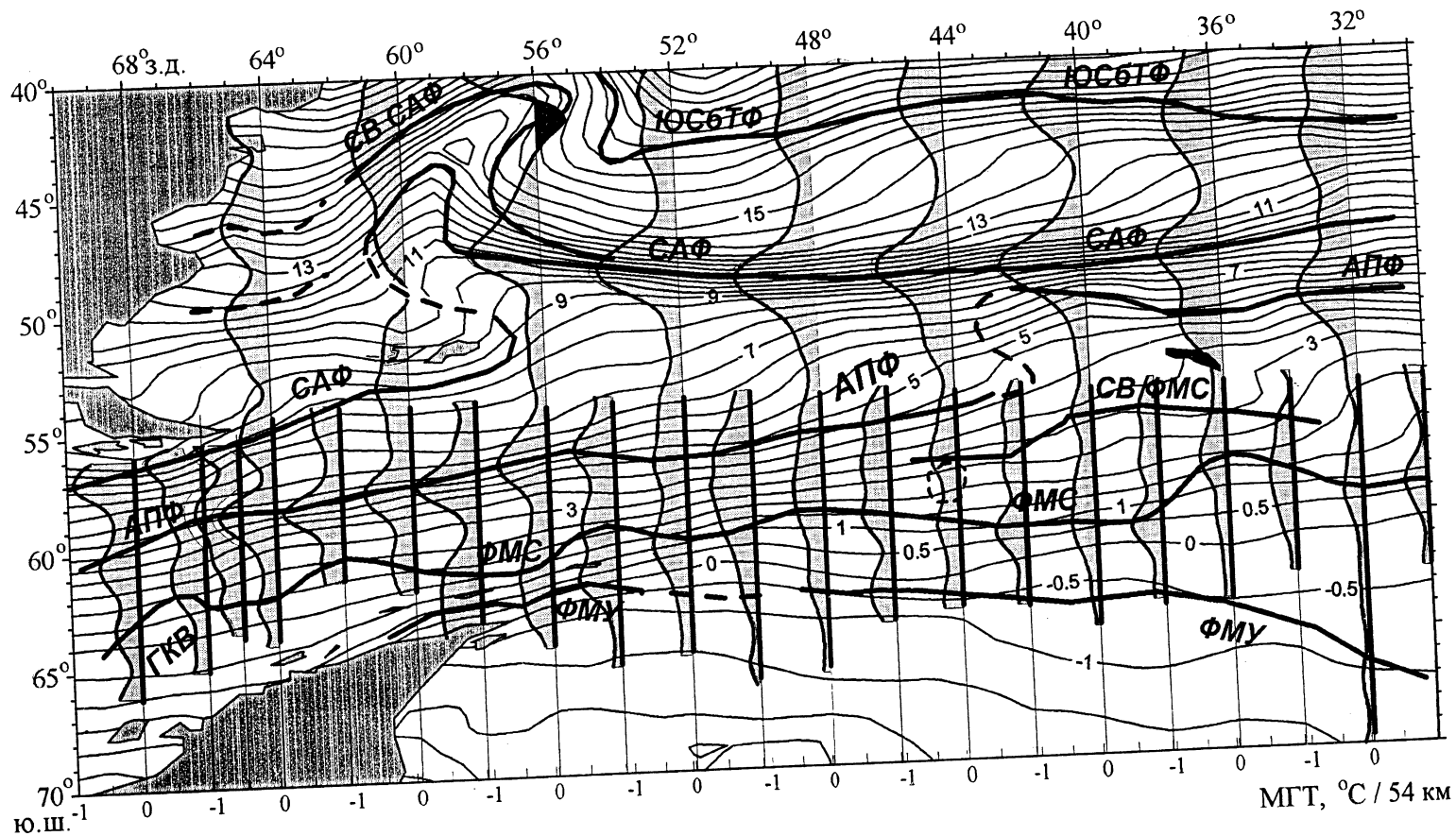
Р и с. 1. Межгодовой ход аномалий площадей теплых вод (АПТВ) с различными температурными диапазонами в тропической зоне Тихого океана (слева) и среднеквадратическое отклонение среднегодовых (СКО_{год}) и среднемесячных (СКО_{мес}) АПТВ (справа). Жирные линии слева – среднегодовые аномалии

Основные результаты

Положение Фронта моря Скотия в системе фронтов Юго-Западной Атлантики. По данным спутниковых измерений, система фронтов в умеренных и полярных широтах Юго-Западной Атлантики проявляется следующим образом (рис. 2). Южный Субтропический фронт (ЮСБТФ) прослеживается в виде устойчивого экстремума МГТ ($-0,4 \dots -0,8$) между 45 и 40° ю.ш.

Субантарктический фронт (САФ) проходит южнее Огненной Земли и, огибая Фолклендские о-ва, поворачивает на север. Затем он следует вдоль Патагонского свала и, разворачиваясь по циклонической траектории, далее в восточном направлении выделяется по экстремуму ($-0,8 \dots -1,4$) между 46 и 48° ю.ш. несколько севернее Фолклендского плато.

Антарктический Полярный фронт (АПФ) прослеживается в проливе Дрейка около 60° ю.ш. (МГТ $\sim -0,6 \dots -1,1$) и в море Скотия постепенно смещается на север. По гидрологическим данным, между 50 и 40° з.д. АПФ образует S-образный изгиб и в районе 40° з.д. подходит близко к САФ [1]. По спутниковым данным этот меандр фронта четко не прослеживается, при этом экстремум ($-0,35 \dots -0,5$), характеризующий присутствие АПФ, отмечается вплоть до 42° з.д.



Р и с. 2. Распределение температуры, ее меридиональных градиентов и положение крупномасштабных фронтов на поверхности океана в марте по данным спутниковых измерений

Граница континентальных вод (или западный участок ФМС) в проливе Дрейка расположена между 62 и 64° ю.ш. К востоку от пролива ФМС, меандрируя, смещается на север. Крайнего северного положения (57° ю.ш.) он достигает в районе 36° з.д. Фронт наиболее интенсивен ($-0,6$) в западной части моря Скотия между 58 и 52° з.д., а в проливе Дрейка и на востоке рассматриваемой акватории он несколько ослабевает ($-0,3 \dots -0,4$).

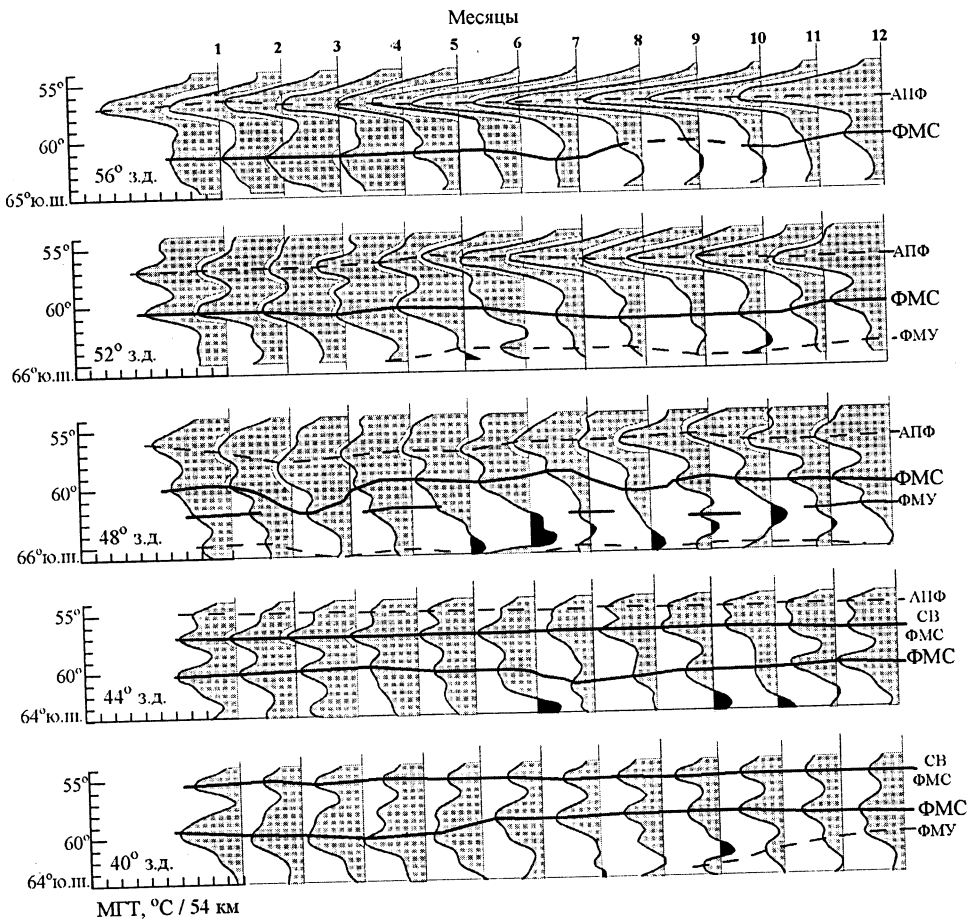
Между 44 и 34° з.д., севернее ФМС, наблюдается еще один фронт с промежуточными по отношению к АПФ и ФМС характеристиками. Формирование этого фронта связано с влиянием особенностей рельефа дна. Здесь, на южной границе шельфовой отмели о. Южная Георгия, между 55 и 56° ю.ш. наблюдается резкий перепад глубин, достигающий более 3000 м. В [8] этот фронт назван Северной ветвью ФМС (СВ ФМС).

К югу от ФМС выделяется еще один, более слабый экстремум МГТ ($-0,1 \dots -0,2$), который расположен близко к границе льдов. Обычно этот фронт называют Антарктической границей ледовитости [12] или Ледовым прикромочным фронтом [13], а в море Уэдделла – Фронтом моря Уэдделла [1].

Таким образом, Фронт моря Скотия менее интенсивен, чем Южный Субтропический и Субантарктический фронты. В проливе Дрейка и западной части моря Скотия его интенсивность также ниже, чем интенсивность Антарктического Полярного фронта. В центральной части моря Скотия, где АПФ ослабевает, интенсивность ФМС превышает интенсивность АПФ. Несмотря на пространственные изменения интенсивности, Фронт моря Скотия устойчиво прослеживается на всей акватории от пролива Дрейка до 30° з.д. Ближе к о. Южная Георгия, в силу особенностей рельефа дна, формируется Северная ветвь Фронта моря Скотия.

Сезонный цикл. Анализ пространственно-временного распределения МГТ на меридиональных выборках показывает, что соотношение интенсивности между ФМС и АПФ сохраняется в течение почти всего года. Исключение составляет меридиан 44° з.д., где интенсивность Фронта моря Скотия и его Северной ветви в течение года существенно выше, чем АПФ (рис. 3). В климатическом сезонном цикле ФМС четко прослеживается от месяца к месяцу на всех рассмотренных меридианах, а его интенсивность изменяется с преобладающим годовым периодом. В проливе Дрейка Граница континентальных вод, или западный участок Фронта моря Скотия, достигает максимальной интенсивности ($-0,35$) в марте-апреле (рис. 4), сезонные колебания составляют $\sim 0,2^{\circ}\text{C}/54$ км. Между 58 и 52° з.д., в западной части моря Скотия, ФМС усиливается в феврале-марте (МГТ $\sim -0,55$), при этом размах внутригодовых колебаний интенсивности фронта увеличивается до $0,5^{\circ}\text{C}/54$ км. Здесь же наблюдается увеличение амплитуды годовых колебаний температуры воды [14] и отмечаются наименьшие амплитуды сезонных смещений границы дрейфующих льдов [15]. Далее к востоку максимум обострения фронта (МГТ $\sim -0,35$) наступает в мае, а величина сезонных колебаний его интенсивности уменьшается до минимальных значений ($0,15^{\circ}\text{C}/54$ км) на 30° з.д. При этом амплитуда годовых колебаний температуры воды уменьшается, а сезонных колебаний границы плавучих льдов – увеличивается [14, 15].

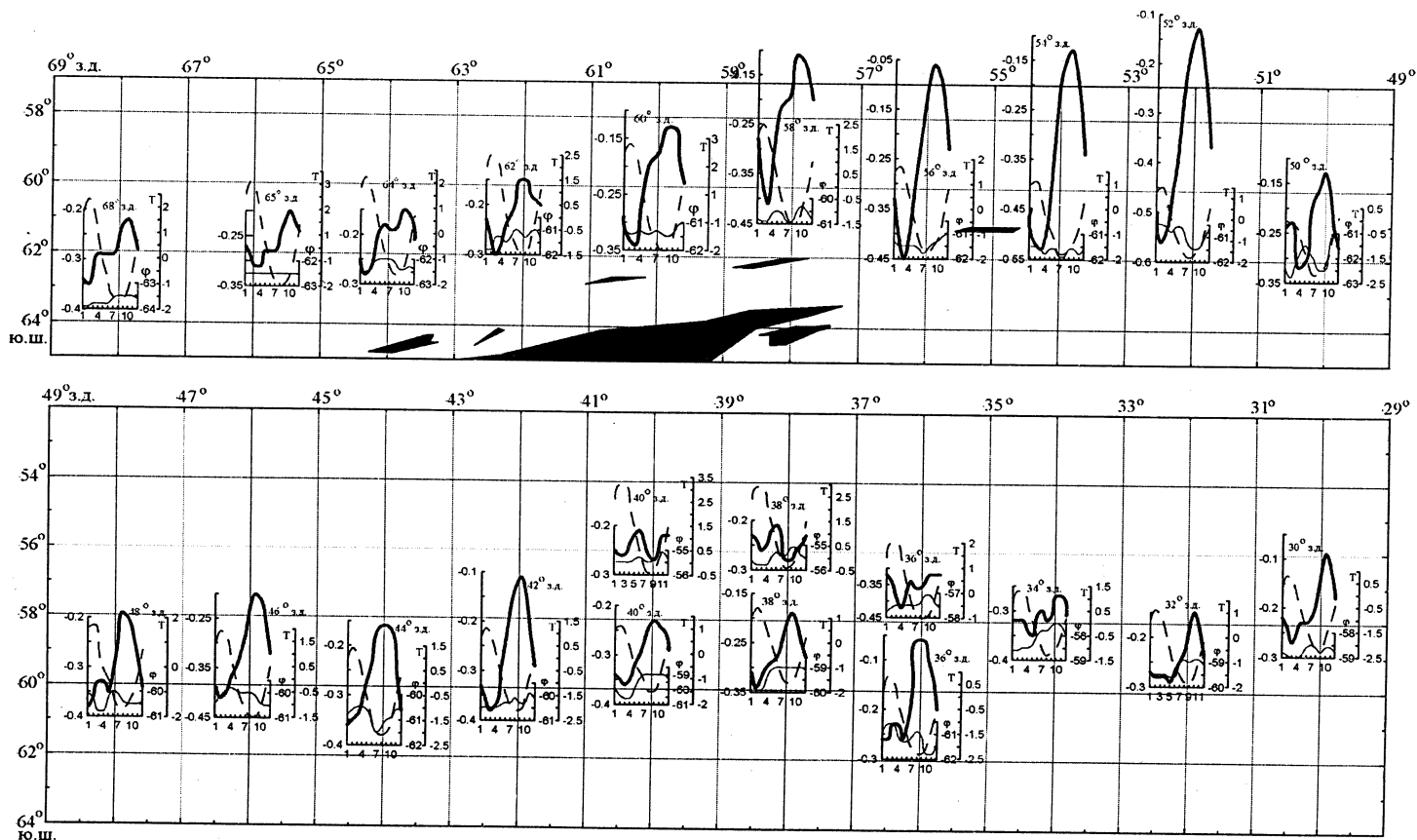
Внутригодовые изменения широтного положения фронта на всем его протяжении не превышают 100 км. Некоторое увеличение размаха сезонных смещений (до 150 км) отмечается к востоку от Южных Оркнейских о-вов (40° з.д.).



Р и с. 3. Внутригодовая изменчивость МГТ и положение фронтов

Температура (среднее значение между двумя величинами температуры, по которым рассчитан градиент), соответствующая экстремуму градиента во Фронте моря Скоттия, изменяется в сезонном цикле с годовым периодом. Ее максимум на всем протяжении фронта отмечается в феврале – марте, минимум – в августе – сентябре. Температурный диапазон в проливе Дрейка и западной части моря Скоттия составляет 2,5°C летом и – 1,5°C зимой, к востоку он понижается и на 30° з.д. равен 0,5°C летом и – 2,5°C зимой.

В сезонной изменчивости интенсивности Северной ветви ФМС преобладает полугодовой сигнал. Первый экстремум (– 0,22) прослеживается в марте, когда усиливается ФМС, второй (– 0,27) – в сентябре, когда наиболее развит АПФ. Широтные смещения фронта в течение года также не превышают 100 км. Температурный диапазон СВ ФМС изменяется от 3,5°C летом до – 0,5°C зимой.



Р и с. 4. Внутригодовой ход характеристик Фронта моря Скотия и его Северной ветви в сечениях меридианов, кратных двум градусам, в Юго-Западной Атлантике. На графиках: нижняя ось – месяцы; меридиональный градиент (левая ось) – жирные линии; температура Т – штриховые; положение ϕ – тонкие линии

Межгодовая изменчивость. Анализ межгодового хода индекса *SOI* и аномалий площадей теплых поверхностных вод Тихого и Атлантического океанов показал, что известные события Эль-Ниньо 1986 – 1988, 1994 – 1995 и 1997 – 1998 гг. оказали существенное влияние на изменчивость характеристик Фронта моря Скотия (величин МГТ, температуры и значений широты). Появление экстремумов аномалий площадей теплых вод в период Эль-Ниньо сопровождалось усилением или ослаблением фронта, изменением его температурного диапазона и широтного положения.

На рис. 5 представлен межгодовой ход аномалий площадей теплых вод в тропических зонах Тихого и Атлантического океанов и характеристик ГКВ (западный участок ФМС) в проливе Дрейка (65° з.д.). Появление положительных аномалий площадей теплых вод в тропиках, характеризовавших Эль-Ниньо 1986 – 1988 гг., сопровождалось заметным смещением фронта на юг, уменьшением его температуры и ослаблением интенсивности. Менее четко эти закономерности прослежены для Эль-Ниньо 1994 – 1995 и 1997 – 1998 гг.

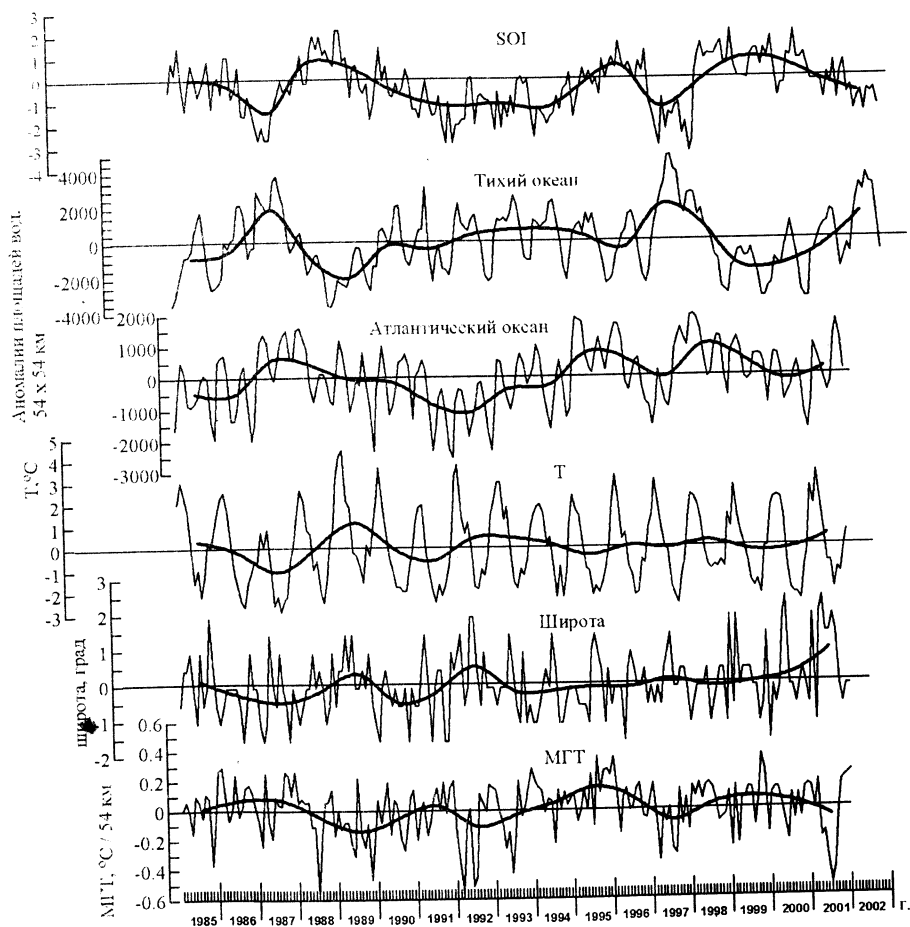
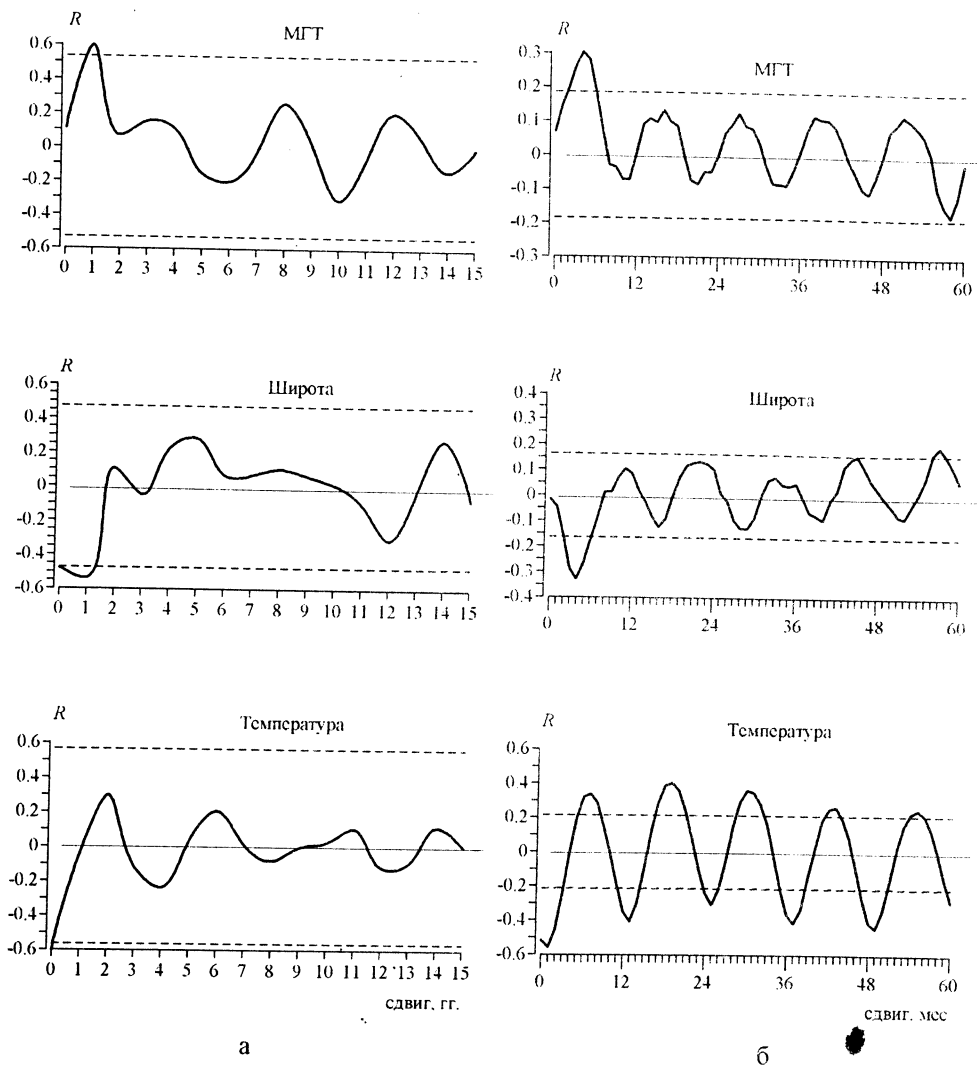


Рис. 5. Межгодовой ход индекса *SOI*, аномалий площадей теплых тропических вод Тихого и Атлантического океанов и характеристик ФМС на 65° з.д. Жирные линии – среднегодовые аномалии вышеуказанных характеристик

Анализ кросскорреляционных функций среднегодовых (рис. 6, *а*) и среднемесячных (рис. 6, *б*) аномалий площадей теплых тропических вод Тихого океана и характеристик фронта в проливе Дрейка показал, что максимальные значения коэффициентов корреляции между среднегодовыми аномалиями площадей вод и характеристик ФМС составили: для МГТ 0,6 при фазовом сдвиге в 1 год, для широтного положения фронта – 0,55 при сдвиге в 1 год, для температуры во фронте – 0,60 при отсутствии фазового сдвига.



Р и с. 6. Кросскорреляционные функции среднегодовых (*а*) и среднемесячных (*б*) аномалий площадей теплых тропических вод Тихого океана и характеристик ФМС на 65° з.д. Штриховые линии – границы 95%-ного доверительного интервала

Значимые связи между характеристиками ФМС и процессами в тропической зоне Тихого океана обусловлены общими закономерностями распространения температурных аномалий. В ряде работ (например обзор [16]) показано, что распространение сигнала Эль-Ниньо из тропической зоны Тихого

океана в умеренные и полярные широты проявляется в виде волн Россби, которые сопровождаются смещением аномалий теплых вод на юг. Попадая в Антарктическое Циркумполярное течение, эти аномалии следуют в восточном направлении и влияют на гидрологический режим в умеренных и полярных широтах Атлантики [16]. Процессы, происходящие в тропиках Атлантики, оказывают, вероятно, несущественное влияние в межгодовом масштабе на режим вод в полярных широтах. Проведенные нами оценки связи характеристик ФМС с поведением аномалий площадей теплых вод в тропической зоне Атлантики не выявили значимых зависимостей.

В Атлантике тихоокеанские температурные аномалии примерно к востоку от 50° з.д. направляются в сторону экватора и ослабевают. Распределение амплитуды годовой гармоники ТПО на поверхности океана служит дополнительным подтверждением того, что влияние процессов в Тихом океане на Атлантику наиболее выражено в западной части моря Скотия [14]. Этим можно объяснить полученное авторами ослабление связи между характеристиками ФМС и событиями Эль-Ниньо по мере продвижения на восток. Наиболее слабая связь для всех характеристик ФМС отмечается на 40° з.д.

Установлено также, что, несмотря на существование тесной связи между аномалиями площадей теплых вод в Тихом океане и индексом *SOI* с коэффициентом корреляции 0,80, реакция характеристик фронта на изменения этого индекса выражена более слабо, чем на изменения аномалий площадей теплых тихоокеанских вод.

Выводы

Показано, что в климатическом сезонном цикле Фронт моря Скотия усиливается в 3 – 4 раза в теплое время года, когда обостряются контрасты температуры между холодными водами, образующимися в результате таяния льдов, и более теплыми поверхностными водами, переносимыми Южной ветвью Антарктического Циркумполярного течения. Максимальные сезонные колебания интенсивности фронта обнаружены в районе минимума внутритроновых колебаний границы дрейфующих льдов.

Выявлены существенные межгодовые вариации характеристик фронта. Показано, что в периоды интенсивных Эль-Ниньо отмечаются аномальные усиление или ослабление фронта, существенные смещения его широтного положения и фазовое запаздывание наступления максимума его обостренности на несколько месяцев. Межгодовые вариации величины МГТ достигают 0,7°C/54 км, широтное положение фронта изменяется от года к году на 200 – 300 км, а температурный диапазон – на 2 – 3°C.

Установлена значимая связь между межгодовыми аномалиями характеристик фронта в проливе Дрейка и западной части моря Скотия и аномалиями площадей теплых тропических тихоокеанских вод. Реакция характеристик фронта на изменения индекса *SOI* выражена более слабо, чем на изменения аномалий площадей теплых тихоокеанских вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // Prog. Oceanogr. – 1991. – № 26. – P. 1 – 73.
2. Афанасьев Б.В., Масленников В.В. Океанологические условия летом 1982 г. в южной части моря Скотия – северной части моря Уэдделла. – М., 1983. – 38 с. – (Препринт / АН СССР. ВНИРО).
3. Богданов М.А., Орадовский С.Г., Солянкин Е.В., Хаццкий Н.В. О фронтальной зоне моря Скотия // Океанология. – 1969. – 9, вып. 6. – С. 966 – 974.
4. Hofmann E.E., Klinck J.M., Locarini R.A. et al. Structure of the Antarctic Circumpolar current in the south Atlantic with implications for biological transport // WG-EMM-97/67. – 1997. – № 5. – P. 6.
5. Gordon A.L., Georgi D.T., Taylor H.W. Antarctic Polar Front Zone in Western Scotia Sea, summer 1975 // J. Phys. Oceanogr. – 1977. – 7, № 3. – P. 309 – 328.
6. Бурков В.А. Зона соприкосновения вод морей Уэдделла и Скотия // Экосистемы пелагиали Атлантического сектора Антарктики. – М.: ИО РАН, 1995. – С. 7 – 14.
7. Артамонов Ю.В. Особенности гидрологической структуры Зоны слияния вод морей Уэдделла и Скотия летом Южного полушария // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. – С. 371 – 380.
8. 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.
9. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Франкиньюль М., Делиль Б. Исследование фронтов южной части Индийского океана с помощью спутниковых температурных данных // Там же. – 2002. – № 5. – С. 39 – 49.
10. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. и др. Фронты и мезомасштабная изменчивость в южной части Индийского океана по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // Океанология. – 2003. – 43, № 5. – С. 671 – 682.
11. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. и др. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов юго-западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики по гидрологическим и спутниковым данным // Там же. – 2005. – 45, № 5. – С. 656 – 669.
12. Кляусов А.В. О фронтальной зоне вблизи северной границы распространения морских льдов в Южном океане // Там же. – 1993. – 33, № 6. – С. 824 – 832.
13. Булгаков Н.П. Льды // Тихий океан. Гидрология Тихого океана. – М.: Наука, 1968. – С. 434–468.
14. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д. и др. Циркуляция, температура, соленность, ледовые условия юго-западной части Атлантического океана и прилегающих акваторий Антарктики. Атлас. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – 91 с.
15. Джиганишин Г.Ф. Сезонные и межгодовые вариации границы дрейфующих льдов в Атлантическом секторе Антарктики и проливе Дрейка // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 3. – С. 68 – 80.
16. Turner J. Review the El Niño – Southern Oscillation and Antarctica // Int. J. Climatol. – 2004. – № 24. – С. 1 – 31.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 21.07.06
После доработки 06.11.06

ABSTRACT Features of the spatial structure of the Sea Scotia front are specified and variability of its characteristics on seasonal and inter-annual scales is investigated. It is shown that in the course of a climatic seasonal cycle the Sea Scotia front is intensified in the warm season when the temperature contrasts between the cold water resulted from ice melting and the warmer water transported by the south branch of the Antarctic Circumpolar current, increase. The strongest seasonal fluctuations of the front intensity are observed in the region of minimum seasonal displacements of the drifting ice boundary. The inter-annual variations of the front characteristics are displayed in the anomalous change of its intensity and latitudinal position. Significant relation between the inter-annual anomalies of the characteristics of the front and those of the areas of warm tropical Pacific waters stipulated by El Niño events is revealed.