

Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалева

Крупномасштабная структура термических фронтов восточной части Тропической Атлантики и их сезонная изменчивость

На основе климатического массива гидрологических среднегодовых и среднемесячных данных по температуре и спутниковых наблюдений температуры поверхности океана уточняется среднегодовая структура температурных фронтов и исследуется их сезонная изменчивость для восточной части Тропической Атлантики на меридиональных разрезах вдоль 30, 20, 10° з.д., 0° и 10° в.д. Показано, что наибольшие интенсивность и сезонные вариации характерны для Северного Субэкваториального и Южного Тропического фронтов, которые изменяются с преобладающим годовым периодом. Выявлено запаздывание на два – три месяца в наступлении максимума интенсивности Южного Тропического и Южного Субэкваториального фронтов в направлении с запада на восток. Отмечены различные механизмы, определяющие сезонную изменчивость поверхностных и подповерхностных Северного и Южного Субэкваториальных фронтов. Выявлена хорошая сходимость особенностей сезонной изменчивости характеристик фронтов, полученных по гидрологическим и спутниковым данным.

Введение. Последние интенсивные исследования Тропической Атлантики относятся к 80-м – началу 90-х гг. Основные успехи достигнуты в изучении термохалинной структуры, циркуляции вод, меридионального переноса тепла, межгодовых вариаций гидрофизических характеристик в северной части региона [1 – 4]. Однако с позиции формирования климатических фронтов эти результаты практически не обсуждались и представления в этом вопросе сохранились на уровне 70-х – начала 80-х гг. [5 – 7]. Важным вкладом в исследование климатических фронтов явились работы, выполненные на базе массива гидрологических данных [8]. Использование этого массива позволило выявить наиболее интенсивные участки крупномасштабных фронтов, определить экстремальные средние сезонные значения градиентов в полях температуры, солёности и плотности [9 – 12].

В 1994 г. появилась новая, более обеспеченная версия климатического массива, в котором наряду со среднегодовыми и среднесезонными приведены данные, осредненные по месяцам [13]. На основе этой версии массива в работе [14] уточняется среднегодовая структура крупномасштабных фронтов в центральной части Атлантического океана и оценивается их связь с положением элементов крупномасштабной циркуляции вод. Показано, что на севере тропиков в зоне действия Северного Пассатного течения располагается Северный Тропический фронт (СТФ), южнее — Северный Субэкваториальный фронт (ССбЭФ), который соответствует Межпассатному противотечению (МП). На востоке региона развивается Северная ветвь МП и соответствующий ей фронт, которому дано наименование Северная ветвь СсбЭФ (СВ ССбЭФ) [14]. Между Межпассатным противотечением и течением Ломоносова (ТЛ) действуют Северная ветвь Южного Пассатного течения

© Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалева, 2005

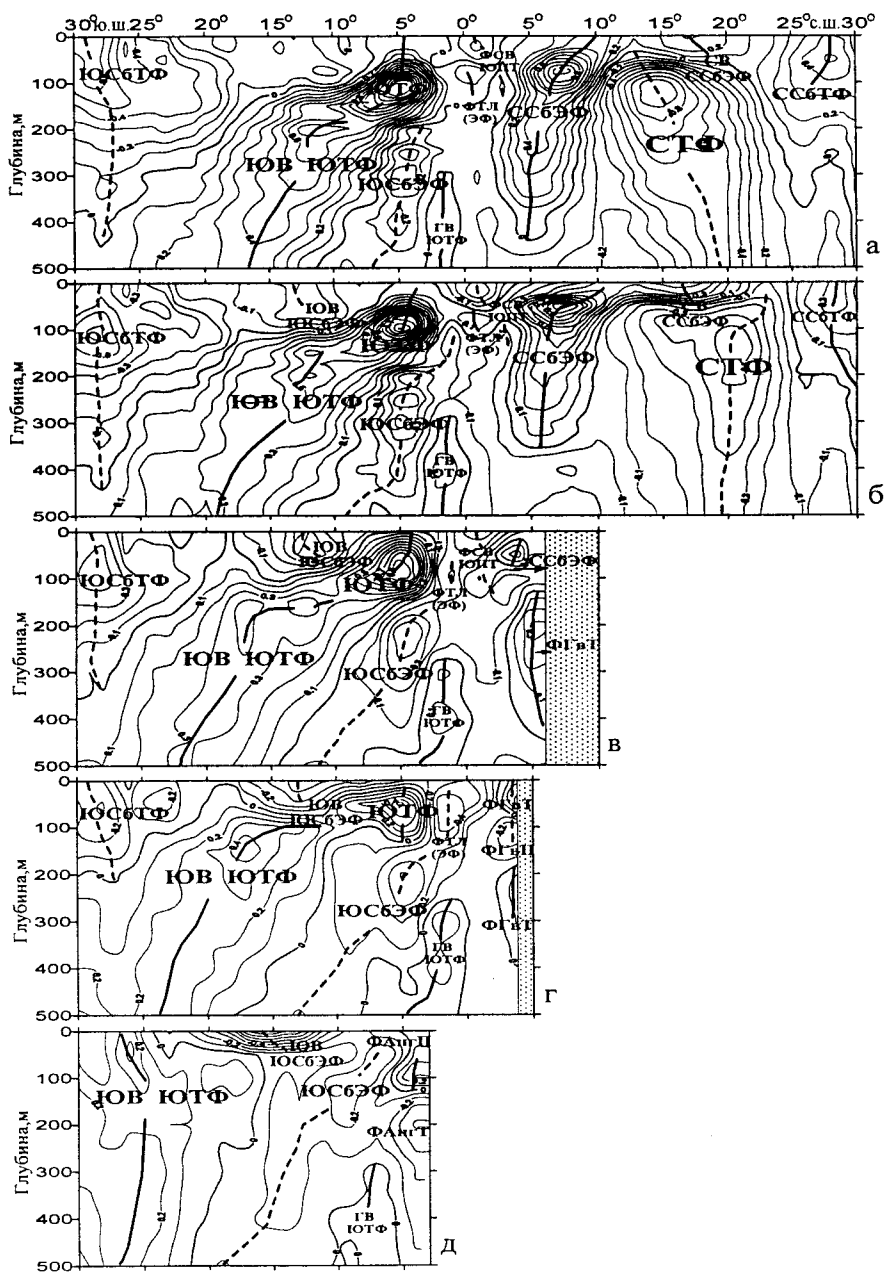
(ЮПТ) и фронт Северной ветви ЮПТ (ФСВ ЮПТ). Южнее ТЛ располагаются Центральная ветвь ЮПТ и Южный Тропический фронт (ЮТФ). Под Центральной ветвью ЮПТ действует восточное подтермоклинное течение, которому соответствует Южный Субэкваториальный фронт (ЮСБЭФ). Далее на юг располагаются Южное Экваториальное противотечение (ЮЭП) и Южная ветвь ЮСБЭФ (ЮВ ЮСБЭФ). Еще южнее прослеживаются Южная ветвь ЮПТ и Южная ветвь ЮТФ (ЮВ ЮТФ).

В силу интенсивной пространственной и сезонной изменчивости некоторые фронты в среднегодовом поле температуры в центральной части океана проявляются слабо. Вместе с тем известно, что климатические фронты в определенные сезоны интенсифицируются в пределах западного и восточного пограничных слоев [1, 3, 4, 6, 7, 9 – 12]. В данной работе на основе гидрологического массива [13] исследуется среднегодовая структура температурных фронтов восточной части Тропической Атлантики. Для уточнения сезонной изменчивости этих фронтов проводится совместный анализ гидрологических данных и спутниковых наблюдений температуры поверхности океана (ТПО).

Материалы и методика. В работе использован климатический массив среднегодовых и среднемесячных данных по температуре в узлах регулярной одноградусной сетки [13]. По этим данным рассчитаны поля горизонтальных меридиональных градиентов температуры (МГТ) на стандартных горизонтах, построены вертикальные разрезы среднегодовых МГТ вдоль меридианов 30, 20, 10° з.д., 0°, 10° в.д. По среднемесячным данным построены широтно-временные графики профилей МГТ на соответствующих меридианах для глубин 0, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400 и 500 м. В работе также использован ряд спутниковых измерений ТПО (1985 – 2001 гг.), приведенных в результате реанализа в узлы сетки с шагом 54×54 км. Среднемесячные значения ТПО для Атлантического океана взяты из архива *AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA*. Измерения температуры проводились пятиканальными радиометрами высокого разрешения на орбитальных спутниках *NOAA-7*, *-9*, *-11*, *-14*, *-16*. Эти данные были интерполированы в узлы одноградусной сетки, и затем по ним рассчитывались значения МГТ. По этим независимым данным также были построены профили МГТ для каждого месяца на поверхности океана на соответствующих разрезах.

Положение фронтальных разделов в поле ТПО выделялось по экстремуму МГТ. Идентификация фронтов проводилась по диапазону температуры, соответствующему данному экстремуму, и знаку меридионального градиента. Значения экстремумов МГТ (°C/60 миль) для климатических и спутниковых данных далее по тексту статьи приводятся в скобках.

Анализ результатов. На рис. 1 приведены меридиональные разрезы среднегодовых градиентов температуры вдоль 30, 20, 10° з.д., 0°, 10° в.д. от поверхности до глубины 500 м. В центральной части Тропической Атлантики (30° з.д.) на севере разреза около 27° с.ш. прослеживается зона положительных значений МГТ с максимумом (0,4) в слое 0 – 150 м, через которую проходит ось Северного Субтропического фронта (рис. 1, а). Южнее (17 – 18° с.ш.) в верхнем 50-метровом слое наблюдается зона положительных значений МГТ (0,3), связанная с Северной ветвью ССБЭФ. К востоку на 20° з.д. значения МГТ в СВ ССБЭФ увеличиваются до 0,5°C/60 миль (рис. 1, б).



Р и с. 1. Среднегодовые меридиональные градиенты температуры ($^{\circ}\text{C}/60$ миль) и положение фронтальных разделов в Тропической Атлантике на разрезах вдоль: а — 30° з.д., б — 20° з.д., в — 10° з.д., г — 0° , д — 10° в.д. (жирные линии — положение фронтов: сплошные — с положительными значениями МГТ, штриховые — с отрицательными; ЮТФ — Южный Тропический фронт, ЮВ ЮТФ — Южная ветвь ЮТФ, ГВ ЮТФ — Главная ветвь ЮТФ, ЮСБТФ — Южный Субтропический фронт, ЮСБЭФ — Южный Субэкваториальный фронт, ЮВ ЮСБЭФ — Южная ветвь ЮСБЭФ, ФСВ ЮПТ — Фронт Северной ветви Южного Пассатного течения, ФТЛ (ЭФ) — Фронт течения Ломоносова (Экваториальный фронт), СТФ — Северный Тропический фронт, ССБТФ — Северный Субтропический фронт, ССБЭФ — Северный Субэкваториальный фронт, СВ ССБЭФ — Северная ветвь ССБЭФ, ФГвТ — Фронт Гвинейского течения, ФГвП — Фронт Гвинейского противотечения, ФАнгТ — Фронт Ангольского течения, ФАнгП — Фронт Ангольского противотечения)

Под СВ ССБЭФ примерно на $14 - 15^\circ$ с.ш. (30° з.д.) на глубинах $100 - 200$ м располагается область максимальных отрицательных значений МГТ ($-0,9$), соответствующая Северному Тропическому фронту (рис. 1, а). С глубиной этот фронт ослабевает, а ось фронта смещается в северном направлении. Восточнее на 20° з.д. происходит ослабление МГТ ($-0,5$) в зоне СТФ, наклон оси практически исчезает и во всем 500-метровом слое фронт располагается около 20° с.ш. (рис. 1, б).

Между 5 и 10° с.ш. в слое $0 - 450$ м наблюдается область положительных значений (в ядре МГТ достигает $0,9^\circ\text{C}/60$ миль), которая характеризует присутствие здесь Северного Субэкваториального фронта. Между 30 и 20° з.д. ось фронта проходит в районах $7 - 8^\circ$ с.ш. в слое $75 - 125$ м и $10 - 12^\circ$ с.ш. на поверхности (рис. 1, а, б). На 10° з.д. ССБЭФ заметно ослабевает и прослеживается в виде экстремума положительных значений МГТ ($0,3$) в районе $3 - 5^\circ$ с.ш. на глубине $25 - 75$ м (рис. 1, в). В слое $150 - 400$ м вблизи материкового склона наблюдается другое ядро положительных значений МГТ ($0,3$). Известно, что, начиная примерно с 10° з.д., восточный перенос вдоль берега называют Гвинейским течением [15], поэтому мы рассматриваем это ядро как проявление подповерхностной части Фронта Гвинейского течения (ФГвТ). Восточнее на 0° (Гринвиче) (рис. 1, з) Фронт Гвинейского течения наблюдается в верхнем 75-метровом слое (МГТ $\sim 0,1$) и глубже 175 м (МГТ $\sim 0,1$). В слое $75 - 150$ м ФГвТ разделяется перемычкой отрицательных значений МГТ ($-0,3$), которая связана с Гвинейским противотечением или Фронтом Гвинейского противотечения (ФГвП).

Между 3° с.ш. и экватором (30° з.д.) в слое $0 - 100$ м отмечается зона отрицательных значений МГТ ($-0,2$), соответствующая фронту Северной ветви ЮПТ (рис. 1, а). К востоку этот фронт становится интенсивнее и МГТ достигают $-0,3^\circ\text{C}/60$ миль на 20° з.д. и $-0,4^\circ\text{C}/60$ миль на 10° з.д. (рис. 1, б, в). На 30° з.д. глубже 300 м под ФСВ ЮПТ находится слабый экстремум отрицательных значений МГТ ($-0,1$), который относится к глубинной части ФСВ ЮПТ. Восточнее он практически не прослеживается.

У экватора ($0 - 1^\circ$ с.ш.) на 30 и 20° з.д. в слое $75 - 175$ м проявляется ядро положительных значений МГТ ($0,1$), которое образуется на северной периферии конвергенции вод в глубинных слоях течения Ломоносова (рис. 1, а, б). В литературе эта зона повышенных значений МГТ не идентифицируется как климатический фронт, хотя обладает всеми его признаками. Она является границей между водами течения Ломоносова и центральной североатлантической водной массой. Этот фронт был назван нами Фронтом течения Ломоносова (ФТЛ). На 10° з.д. ФТЛ более четко проявляется на глубинах $25 - 125$ м (МГТ $\sim -0,1 \dots -0,2$) между экватором и 1° ю.ш., тогда как к северу от экватора ФТЛ практически размывается (рис. 1, в). На Гринвиче (рис. 1, з) наблюдается дальнейшее его усиление (МГТ $\sim -0,5$) и смещение к югу от экватора ($1 - 2^\circ$ ю.ш.).

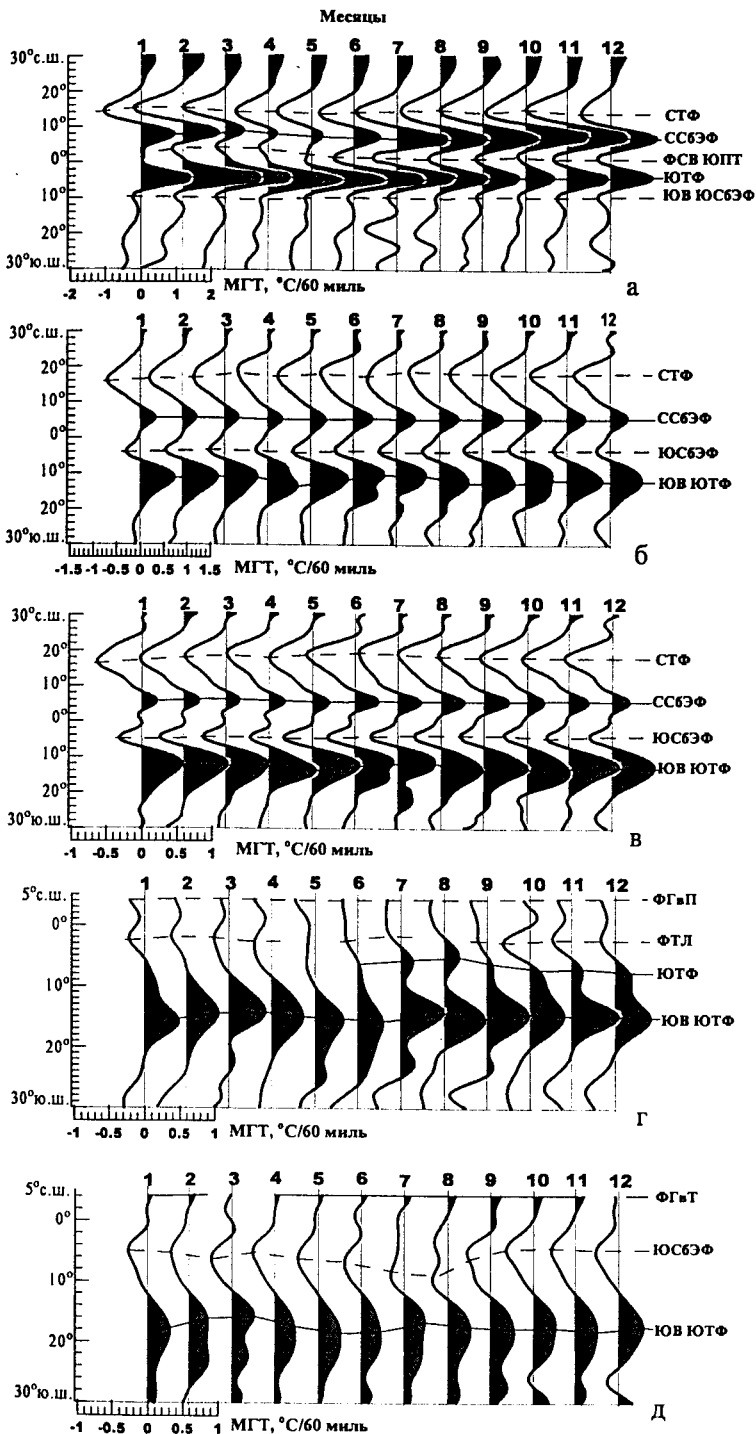
Следующий к югу экстремум отрицательных значений МГТ ($-0,3$) наблюдается в подповерхностном слое $250 - 450$ м в районе $3 - 4^\circ$ ю.ш. (30° з.д.). Согласно [14], этот экстремум МГТ соответствует Южному Субэкваториальному фронту (рис. 1, а). Он максимально интенсивен (МГТ $\sim -0,5$) на 20° з.д. (рис. 1, б). Далее к востоку фронт ослабевает, и на 10° в.д. градиенты в зоне ЮСБЭФ не превышают $-0,2^\circ\text{C}/60$ миль, при этом ось фронта поднимается ближе к поверхности в слой $100 - 200$ м (рис. 1, д).

Южнее ФСВ ЮПТ, ФТЛ и ЮСБЭФ располагается область положительных значений МГТ. На поверхности она находится между 2 и 7° ю.ш., с глубиной заметно расширяется и на горизонте 400 м занимает широкую полосу между 7 и 27° ю.ш. В пределах этой области наблюдаются два ядра (рис. 1, а – з). Верхнее ядро МГТ (1,5) прослеживается над ЮСБЭФ в районе 4 – 5° ю.ш. и характеризует проявление собственно Южного Тропического фронта. На 10° з.д. и Гринвиче отмечается ослабление МГТ в зоне ЮТФ до 0,9°С/60 миль и 0,4°С/60 миль соответственно. К востоку от Гринвича ЮТФ не прослеживается. Второе, более слабое ядро положительных значений МГТ (0,7) располагается на глубинах 200 – 250 м в районе 9 – 12° ю.ш. Этот фронт был назван Южной ветвью ЮТФ [14]. К востоку этот фронт также ослабевает, и на Гринвиче значения МГТ не превышают 0,3°С/60 миль, а ось этой ветви ЮТФ поднимается к поверхности почти на 100 м и расположена в слое 100 – 200 м. Необходимо отметить, что на разрезах по 30, 20 и 10° з.д. ЮТФ выходит на поверхность, тогда как на 0° его поверхностное проявление не наблюдается. Южная ветвь ЮТФ, наоборот, на 30 и 20° з.д. располагается в подповерхностном слое, а на 10° з.д. выходит на поверхность в районе 18° ю.ш., при этом полностью отделяясь от ЮТФ областью отрицательных значений МГТ, связанных с Южной ветвью ЮСБЭФ. Вначале Южная ветвь ЮСБЭФ проявляется на 20° з.д. виде экстремума МГТ (– 0,3) в поверхностном слое 0 – 50 м в районе 13° ю.ш. (рис. 1, б). По мере продвижения на восток ЮВ ЮСБЭФ становится более интенсивной.

Между экватором и ЮСБЭФ глубже 300 м наблюдается еще одно ядро положительных значений МГТ (0,2), которое в литературе ранее не обсуждалось. Так как экстремум располагается на широте, близкой к положению ЮТФ, в данной работе он назван Глубинной ветвью ЮТФ (ГВ ЮТФ). Она прослеживается на всех разрезах, вплоть до Африки, при этом интенсивность ГВ ЮТФ существенно не изменяется (МГТ ~ 0,1 – 0,2).

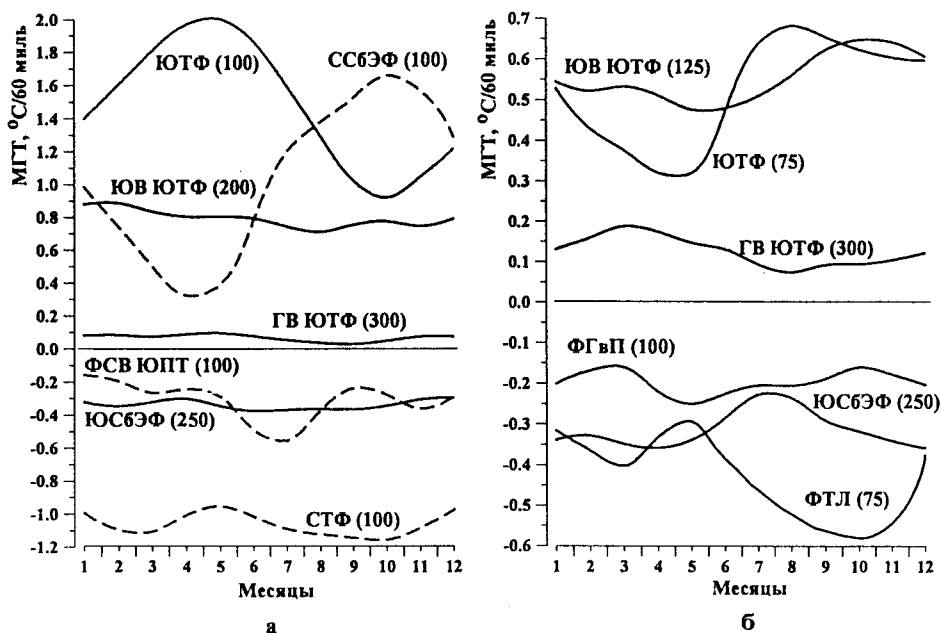
К югу от Южного Тропического фронта наблюдаются отрицательные значения МГТ. Они достигают максимума (– 0,6) в слое 0 – 100 м в районе 27 – 30° ю.ш. и характеризуют Южный Субтропический фронт.

На 10° в.д. (рис. 1, д) на разрезе, проходящем вблизи берегов Африки, среднегодовая структура поля МГТ существенно меняется. Северная часть разреза подходит к оконечности м. Лопес, и за счет резкого изменения направления береговой линии вдольбереговые фронты имеют хорошо выраженную зональную ориентацию. В верхнем 150-метровом слое у побережья отмечается область максимальных положительных значений МГТ (0,3) между 3 – 5° ю.ш., связанная с Ангольским противотечением или Фронтом Ангольского противотечения (ФАНП). Фронт Ангольского течения (ФАНТ) располагается на глубинах более 150 м, где наблюдается ядро отрицательных значений МГТ (– 0,4). Ось фронта расположена в слое 200 – 250 м. Отмечается максимальное увеличение МГТ (– 0,9) в зоне ЮВ ЮСБЭФ, ось которой расположена в слое 0 – 50 м в районе 15 – 16° ю.ш. ЮВ ЮТФ ослабевает (МГТ ~ 0,3) и поднимается к поверхности в слой 50 – 100 м, заметно смещаясь к югу до 25 – 27° ю.ш. Южный Субтропический фронт на этом разрезе не проявляется.



Р и с. 2. Распределение МГТ по широте и месяцам на различных горизонтах вдоль 30° з.д. (а — 100 м, б — 250 м, в — 300 м) и 0° (г — 100 м, д — 250 м) (сплошная линия — положение оси фронта с положительными значениями МГТ, штриховая — с отрицательными)

Рассмотрим внутригодовую изменчивость фронтальных разделов тропической зоны по гидрологическим данным. Северный Тропический фронт в течение всего года наиболее четко прослеживается на глубинах 100 – 300 м (рис. 2, а – в) и максимально интенсивен на горизонте 100 м. В сезонном ходе его интенсивности отмечаются два экстремума (рис. 3, а) – в октябре (– 1,2) и в феврале – марте (– 1,1). Восточнее (20° з.д.) СТФ ослабевает, но в сезонном ходе также отмечается полугодовой сигнал с максимумами в марте (– 0,65) и октябре (– 0,66).



Р и с. 3. Сезонный ход МГТ в пределах различных фронтов (штриховые линии — в Северном полушарии) вдоль 30° з.д. (а) и 0° (б) (в скобках в метрах указан горизонт наблюдений)

Северный Субэкваториальный фронт на разрезе по 30° з.д. в течение года наиболее интенсивен на глубине 100 м (рис. 2, а). В сезонном цикле его интенсивности наблюдается хорошо выраженный годовой сигнал с максимумом в октябре (1,74) (рис. 3, а). На поверхности ССБЭФ более четко проявляется в первую половину года в районе 10° с.ш. с максимумом в марте (0,54). Во второе полугодие наблюдается значительное ослабление ССБЭФ, при этом усиливается его Северная ветвь, которая наиболее интенсивна в августе (0,42). Восточнее (20° з.д.) ССБЭФ наиболее интенсивен в марте (0,92) не на глубине 100 м, а на поверхности. Его Северная ветвь наблюдается во вторую половину года с максимумом в сентябре (0,73). На горизонте 100 м ССБЭФ проявляется в течение всего года и наиболее четко выражен в ноябре (0,72). Таким образом, на поверхности интенсификация ССБЭФ наблюдается в период наибольшего влияния северо-восточного пассата (март) [1]. На глубине 100 м

сезонный цикл ССБЭФ находится в фазе с внутригодовой динамикой Межпассатного противотечения, т.е. обуславливается сезонным ходом интенсивности меридиональной неоднородности поля ветра [16]. Это свидетельствует о различных механизмах сезонной изменчивости ССБЭФ на поверхности и в подповерхностных слоях.

Сезонный цикл Фронта Гвинейского течения характеризуется следующими особенностями. На 10° з.д. интенсивность ФГвТ меняется с годовым сигналом. На поверхности он наблюдается с февраля по апрель с максимумом в марте (0,17). В другую часть года здесь формируется ФГвП. Основное ядро ФГвТ расположено в течение всего года в подповерхностном слое 250 – 300 м с максимумом интенсивности в августе (0,22). Восточнее (на Гринвиче) ФГвТ наиболее четко проявляется на поверхности. Сезонный ход его интенсивности содержит полугодовой сигнал с максимумами в марте (0,56) и августе (0,79). Глубинная часть ФГвТ значительно ослабевает (рис. 2, д). В подповерхностном слое на Гринвичском меридиане также проявляется ФГвП (рис. 2, з). Ядро его расположено на глубине 100 м с основным максимумом в мае (– 0,27) и вторым, более слабым максимумом в декабре (– 0,21). Таким образом, между сезонными изменениями ФГвТ и ФГвП наблюдается фазовая разница в несколько месяцев при сохранении в обоих случаях их полугодового сигнала. Формирование полугодового сигнала во внутригодовом ходе интенсивности фронтов связано с особенностями сезонного поля ветра. Основной (осенний) максимум интенсивности ФГвТ наступает практически в фазе с максимальным усилением ССБЭФ и юго-западного муссона. Весенний максимум наступает в фазе с усилением северо-восточного пассата.

Фронт Северной ветви ЮПТ на 30° з.д. наиболее четко выражен на горизонте 100 м (рис. 2, а) с максимумами МГТ в июле (– 0,67) и ноябре (– 0,42) (рис. 3, а). С продвижением на восток (20° з.д.) фронт усиливается на поверхности с максимумами в июне и ноябре (– 0,47), а в подповерхностном слое (50 – 100 м) размывается. На 10° з.д. ФСВ ЮПТ наиболее интенсивен также на поверхности, но его сезонный ход имеет годовой сигнал с максимумом в июле (– 0,76).

Фронт Течения Ломоносова имеет наиболее резко выраженный сезонный ход на Гринвиче на глубине 75 м. Основной экстремум (– 0,72) здесь наблюдается в октябре (рис. 3, б). Другой, более слабый экстремум отмечается в марте (– 0,40). Механизм формирования полугодовой гармоник в сезонном ходе интенсивности ФТЛ, как и в случае ФГвТ и ФГвП, — реакция океана на противофазное усиление юго-западного муссона и северо-восточного пассата.

Южный Тропический фронт наиболее четко прослеживается на горизонте 100 м. Сезонный ход интенсивности фронта имеет хорошо выраженный годовой сигнал с максимумами в мае (2,03) на 30° з.д., июне (1,8) на 20° з.д., июле (1,2) на 10° з.д. и августе (0,7) на 0° (рис. 3). Таким образом, время наступления максимума интенсивности фронта смещается на

месяц при продвижении от западных разрезов к Гринвичскому меридиану. Сезонный сигнал в Глубинной ветви ЮТФ выражен слабо.

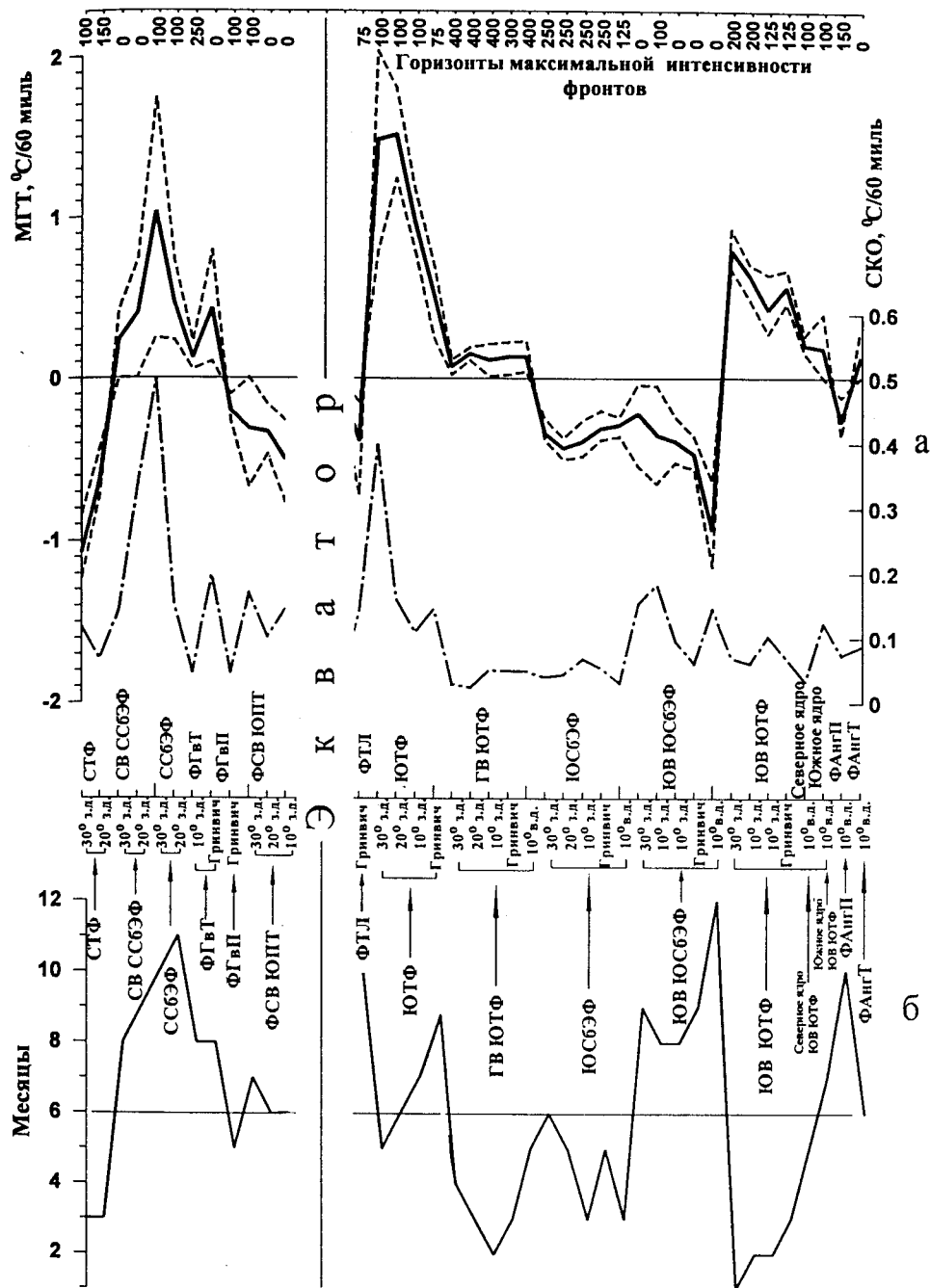
Южная ветвь ЮТФ на 30° и 20° з.д. наиболее интенсивна на горизонте 200 м. Сезонный ход интенсивности ЮВ ЮТФ содержит преимущественно годовой сигнал с максимумом в феврале (0,92) на 30° з.д. (рис. 3, а). К востоку сезонный ход интенсивности, при общем ослаблении фронта, имеет полугодовую составляющую с максимумами в феврале (0,64) и ноябре (0,48) на 10° з.д., в марте (0,55) и ноябре (0,65) на Гринвиче (рис. 3, б), апреле (0,22) и ноябре (0,26) на 10° в.д. Происхождение полугодового сигнала может быть связано с наличием интенсивного полугодового сигнала в поле ветра к югу от 30° ю.ш.

Южный Субэкваториальный фронт на 30° з.д. наиболее развит на горизонте 250 м. Здесь сезонный ход фронта незначителен (рис. 3, а). На 20° и 10° з.д. отмечается хорошо выраженный годовой сигнал, при этом фронт наиболее интенсивен соответственно в мае (– 0,50) и марте (– 0,48). Восточнее ЮСБЭФ поднимается ближе к поверхности до 200 м на Гринвиче и до 125 м на 10° в.д. и имеет максимумы интенсивности в апреле (– 0,36) и декабре (– 0,34) (рис. 3, б).

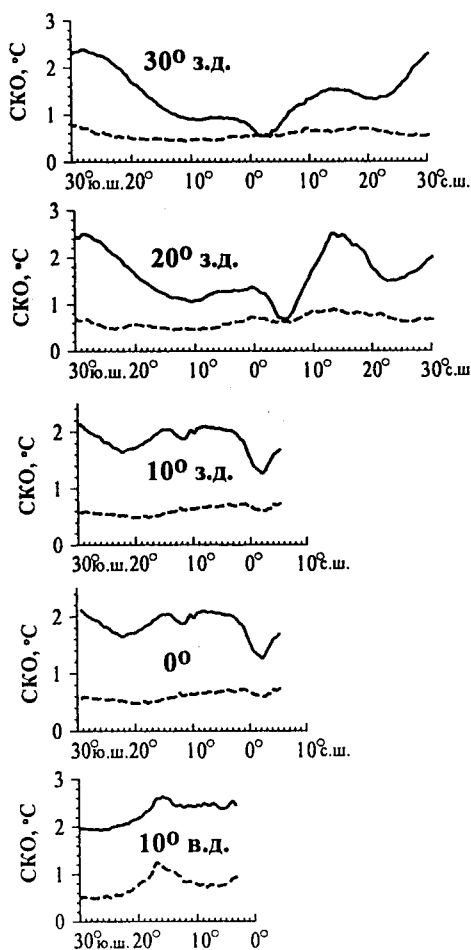
Южная ветвь ЮСБЭФ на 30° з.д. наиболее интенсивна на поверхности в сентябре (– 0,54). На 20° з.д. ЮВ ЮСБЭФ лучше проявляется на горизонте 100 м с максимумом (– 0,82) в августе. Восточнее этот фронт снова наиболее четко прослеживается на поверхности с максимумами в августе (– 0,51) на 10° з.д., сентябре (– 0,62) на Гринвиче и ноябре (– 1,16) на 10° в.д. Таким образом, восточнее 10° з.д. в зоне ЮВ ЮСБЭФ наблюдается распространение годового сигнала на восток. В сезонном ходе меридиональной компоненты скорости ветра, обусловленной юго-западным муссоном, также наблюдается тенденция к запаздыванию в наступлении максимума от центральной к восточной части экваториальной зоны [2].

Сезонный цикл ФАнгП характеризуется годовым сигналом с максимумом в июне (0,29). Фронт Ангольского течения наиболее интенсивен в слое 150 – 200 м. Интенсивность фронта изменяется с полугодовым периодом с максимумами в феврале (– 0,34) и ноябре (– 0,38).

Выполненный анализ показывает, что по величине МГТ наиболее интенсивными фронтами в восточной части Тропической Атлантики являются СТФ, ССБЭФ, СВ ССБЭФ, ЮТФ, ЮВ ЮСБЭФ и ЮВ ЮТФ (рис. 4, а). Основные максимумы среднеквадратичных отклонений (СКО), вызванных внутригодовыми колебаниями интенсивности фронтов, относятся к ССБЭФ и ЮТФ. Минимальная внутригодовая изменчивость наблюдается в пределах ФТЛ, ГВ ЮТФ, ЮСБЭФ. Максимально интенсифицируются в первой половине года СТФ, ГВ ЮТФ, ЮСБЭФ, ЮВ ЮТФ, в середине года — ЮТФ, а ССБЭФ, СВ ССБЭФ и ЮВ ЮСБЭФ — во второй половине года. Для ЮТФ, ЮВ ЮСБЭФ, ЮВ ЮТФ характерно запаздывание годового сигнала с запада на восток в несколько месяцев (рис. 4, б).



Р и с. 4. Максимальные (штриховая линия), минимальные (штриховая), среднегодовые (сплошная) значения МГТ, а также их СКО (штрихпунктирная) (а) и месяцы наибольшей интенсивности (б) температурных фронтов вдоль различных меридианов восточной части Тропической Атлантики на горизонтах (м) максимальной интенсивности

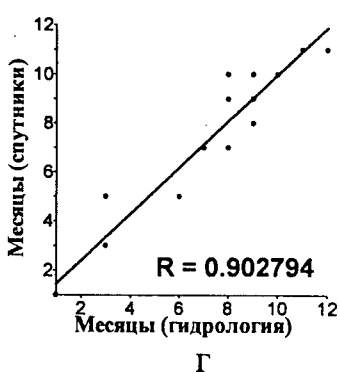
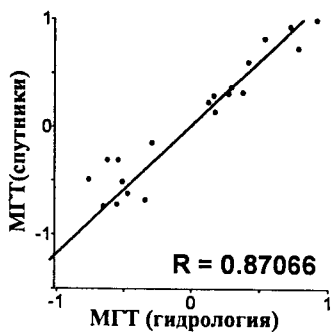
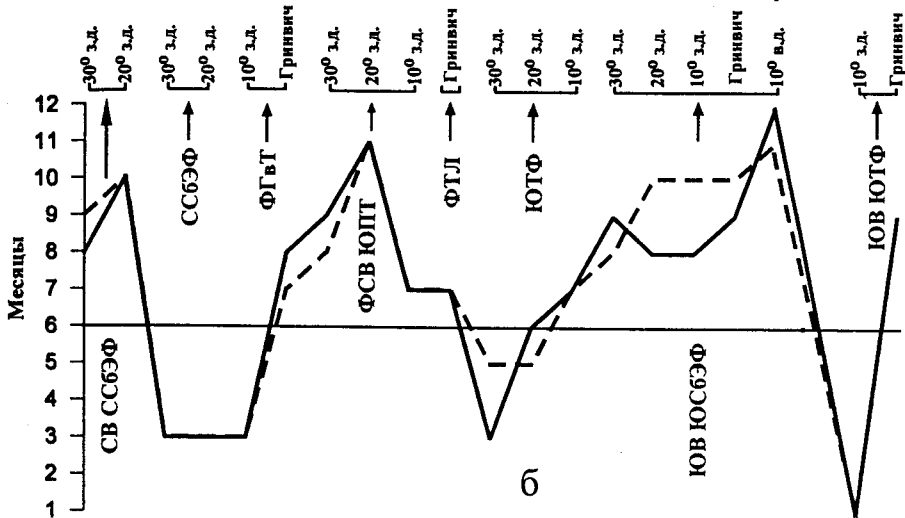
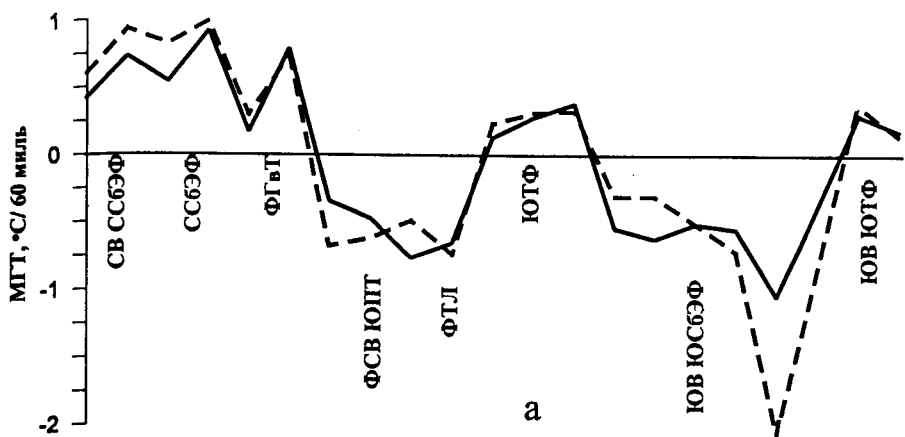


Р и с. 5. Изменение с широтой СКО внутри-годовых (сплошная линия) и межгодовых (штриховая) вариаций ТПО по спутниковым данным

Различия отмечаются в центральной части океана южнее 20° ю.ш., где количество гидрологической информации уменьшается и фронты определяются менее надежно. На рис. 6 представлены максимальные значения МГТ для различных фронтов и время наступления их максимальной интенсивности по гидрологическим и спутниковым данным 1998 г. Отмечается хорошее соответствие кривых. Наибольшее различие по величине МГТ наблюдается на востоке в зоне ЮСБЭФ. Вероятно, это связано с различиями в процедурах осреднения гидрологических и спутниковых данных, которые несущественны для открытой части океана и становятся заметными для акватории у Африканского побережья. В целом отмечается хорошая количественная связь между максимальными значениями МГТ различных фронтов, полученными по гидрологическим и спутниковым данным (коэффициент аппроксимации R поля точек прямой составляет 0,87 для значений МГТ и 0,90 для времени наступления максимальной интенсивности фронтов) (рис. 6, в, г).

Сравнение характеристик фронтов, рассчитанных по гидрологическим и спутниковым данным, показывает высокую качественную и количественную сходимость. Анализ широтно-временных графиков ТПО, построенных для сезонного и межгодового масштабов по данным спутниковых измерений, показывает, что большинство из вышеописанных фронтов устойчивы во времени и стабильно прослеживаются от года к году. Оценки величины СКО межгодовой и внутригодовой изменчивости поля температуры показали, что в восточной части Тропической Атлантики в районах фронтальных разделов значения СКО, характеризующие внутригодовую изменчивость, увеличиваются. При этом сезонный ход в 3 – 4 раза превышает межгодовые вариации (рис. 5). Как и в случае гидрологических данных, спутниковые наблюдения показывают максимальную внутригодовую изменчивость ТПО в зонах СВ ССБЭФ, ЮТФ, ЮВ ЮСБЭФ. Минимальная сезонная изменчивость наблюдается севернее экватора в области внутритропической зоны конвергенции и южнее Гвинейского течения.

Отмечается хорошее качественное совпадение положения и интенсивности экстремумов МГТ, полученных по двум типам данных. Раз-



Р и с. 6. Максимальные значения МГТ (а) и месяцы наибольшей интенсивности (б) для различных фронтов на поверхности океана по гидрологическим (сплошная линия) и спутниковым (штриховая) данным, а также графики связи между гидрологическими и спутниковыми данными (в, г)

Заключение. Расчеты характеристик температурных фронтов на основе гидрологических и спутниковых данных в восточной части Тропической Атлантики показали хорошую сходимость результатов. По величине меридионального градиента температуры наиболее интенсивными фронтами являются Северный Тропический, Северный Субэкваториальный, Южный Тропический. Наибольшие сезонные изменения характерны для Северного Субэкваториального и Южного Тропического фронтов. Северный Субэкваториальный, Южный Тропический фронты, Южная ветвь Южного Субэкваториального фронта изменяются с преобладающим годовым периодом. В сезонной изменчивости других фронтов наряду с годовым периодом прослеживается полугодовой сигнал. Показано, что наблюдается фазовое запаздывание в два – три месяца в наступлении максимума интенсивности для Южного Тропического фронта, для его Южной ветви, а также для Южной ветви Южного Субэкваториального фронта в направлении с запада на восток. Выявлено, что сезонная изменчивость некоторых поверхностных и подповерхностных фронтов обусловлена различными механизмами: Северного Субэкваториального фронта на поверхности — влиянием северо-восточного пассата, в подповерхностном слое — положением зоны сходимости пассатов; подповерхностного Южного Субэкваториального фронта — интенсивностью юго-восточного пассата, а Южной ветви Южного Субэкваториального фронта — юго-западного муссона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Ю.В., Полонский А.Б. Сезонная изменчивость гидрофизических характеристик Тропической Атлантики. Ч. 1. Материалы, методы обработки, уровень шумов, метеоусловия. Ч. 2. Течения, Т, S-характеристики // Исследования Тропической Атлантики. — Севастополь, МГИ АН УССР, 1989. — С. 7 – 60.
2. Бубнов В.А. Циркуляция вод экваториальной зоны Мирового океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 280 с.
3. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Полонский А.Б. Крупномасштабная структура и изменчивость океанографических полей северной части Тропической Атлантики // Гидрофизика Тропической Атлантики / Под ред. В.Н. Еремеева. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 7 – 34.
4. Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б. Сезонная изменчивость кинематической структуры и расходов течений в деятельном слое северо-западной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. — 1996. — № 6. — С. 39 – 55.
5. Булатов Р.П. Климатические и гидрологические характеристики Атлантического океана // Атлантический океан. — М.: Мысль, 1977. — С. 19 – 86.
6. Бурков В.А. Общая циркуляция Мирового океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 253 с.
7. Грузинов В.М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 272 с.
8. Levitus S., Oort A.H. Global analysis of oceanographic data // Bull. Amer. Met. Soc. — 1977. — 58, № 12. — P. 1170 – 1184.
9. Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А., Ярошеня Р.А. Климатическая фронтальная зона в градиентном поле плотности северной части Тропической Атлантики // Поверхностные и внутренние волны в океане. — Севастополь: МГИ АН УССР, 1987. — С. 46 – 58.
10. Булгаков Н.П., Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А. и др. Термохалинные характеристики крупномасштабных неоднородностей и фронтальных зон Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. — 1998. — № 1. — С. 26 – 37.
11. Булгаков Н.П., Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А. и др. Физико-гидрологические характеристики климатических фронтальных зон Тропической Атлантики // Там же. — 1998. — № 4. — С. 39 – 56.

12. Булгаков Н.П., Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А. и др. Климатические фронтальные зоны Тропической Атлантики. Физико-гидрологические характеристики. — Севастополь, 1999. — 67 с. — (Препринт / НАН Украины. МГИ).
13. Levitus S., Boyer P.T. World Ocean Atlas // U.S. CD-ROM Data Sets. — Washington, D.C.: Nat. Oceanogr. Data Cent., Ocean Clim. Lab., 1994.
14. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. и др. Крупномасштабные зональные фронты Атлантического океана в средних многолетних полях температуры и солености вдоль 30° з.д. // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. — С. 107 – 115.
15. Ханайченко Н.К. Система экваториальных противотечений в океане. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 176 с.
16. Hellerman S., Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the World Ocean with error estimate // J. Phys. Oceanogr. — 1983. — 13. — P. 1093 – 1104.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 10.11.03

ABSTRACT Annual average structure of the temperature fronts is specified and their seasonal variability for the East Tropical Atlantic on the meridian sections along 30, 20, 10°W, 0° and 10°E is investigated based on the climatic array of hydrological monthly and annual average temperature data and satellite observations of the sea surface temperature. It is shown that the highest intensity and seasonal variations are typical of the South Tropical and the North Subequatorial fronts whose predominant variation period is the annual one. It is revealed that the intensity maximums of the South Tropical and the South Subequatorial fronts occur 2 – 3 months later in the east than in the west. Various factors determining seasonal variability of the surface and sub-surface North and South Subequatorial fronts are noted. Good agreement between the peculiarities of seasonal variability of frontal characteristics obtained from hydrological and satellite data is revealed.