

Горизонтальная структура температурного поля верхнего слоя северо-западной части Тропической Атлантики

По данным наблюдений пространственной изменчивости температурного поля северо-западной части Тропической Атлантики, выполненных с разрешением $\Delta x \approx 2$ км по горизонтали и $\Delta z \approx 0,5$ м по вертикали, на полигоне размером 400×400 миль в приповерхностном слое зарегистрированы квазипериодические флуктуации температуры полусуточного периода. В сезонном термоклине выделены бароклинные внутренние волны с таким же периодом, генерируемые, по всей видимости, на северо-восточном шельфе Южной Америки и распространяющиеся на северо-восток. Вертикальная тонкая структура поля температуры имеет различную интенсивность на полигоне. Максимальные уровни дисперсий флуктуаций температуры зарегистрированы на границе между Межпассатным противотечением и Северным Пассатным течением.

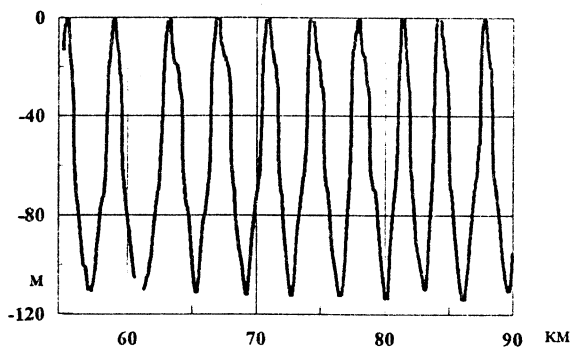
Формирование пространственных температурных неоднородностей разных масштабов в верхнем слое океана является важным фактором, влияющим на процессы взаимодействия атмосферы и океана, распространение взвеси и загрязняющих веществ, концентрацию фито- и зоопланктона.

Для изучения процессов формирования пространственной структуры полей верхнего слоя океана и получения достоверных статистических оценок горизонтальной изменчивости температурного поля необходимы натурные наблюдения, выполненные на полигонах достаточно большой площади с высоким пространственным разрешением. В работе описаны результаты наблюдений горизонтальных неоднородностей температурного поля в верхнем 110-метровом слое северо-западной части Тропической Атлантики, полученные при более высоком пространственном разрешении, чем обычно реализуемое разрешение при стандартных СТД-съемках гидрологическим зондом.

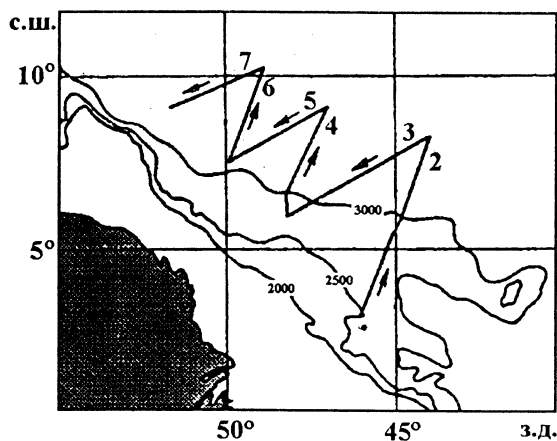
Структура термохалинных полей исследуемого района формируется в результате взаимодействия различных водных масс в системе основных течений Атлантики – Северного Пассатного (СПТ), Южного Пассатного (ЮПТ), Гвинейского течений и Межпассатного противотечения (МПТ) [1]. Взаимодействие водных масс сопровождается формированием значительной пространственной изменчивости полей температуры и солености, а также генерацией интенсивной тонкой вертикальной структуры, обусловленной двойной диффузией [2] и интрузионными процессами [3]. Для поверхностного слоя этого района характерна суточная изменчивость температуры с амплитудой $0,3 - 0,4^\circ\text{C}$. Экстремальные значения наблюдаются в 12 – 15 ч и 3 – 6 ч местного солнечного времени [1]. Результаты анализа данных автономных буйковых станций (АБС) показали, что в исследуемом районе хорошо выражены полусуточные колебания, связанные с главной лунной составляющей волн прилива (период 12,4 ч). Максимум плотности энергии этих движений наблюдается в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) и в слое скачка плотности [4]. Изучение внутренних волн с использованием АБС по специальной

методике [5] показало, что в сизигийную фазу прилива могут формироваться уединенные волны с амплитудой до 85 м, следующие с приливным полусуточным интервалом. В квадратуре высота внутреннего прилива составляла 5 – 7 м, и одиночные волны не наблюдались [6].

Данные о горизонтальной изменчивости температуры были получены сканирующим буксируемым комплексом «Галс-2» [7] при проведении исследований в Тропической Атлантике в 29-м рейсе НИС «Академик Вернадский» по программе «Разрезы». Измерения проводились на полигоне 400 × 400 миль в августе – сентябре 1984 г.



Р и с. 1. Фрагмент траектории движения буксируемого носителя при проведении измерений



Р и с. 2. Схема движения судна с буксируемым измерителем в северо-западной части Тропической Атлантики в августе–сентябре 1984 г.

также были исключены грубые ошибки измерений, объем которых составил менее 0,1%. Общее время выполнения полигона ~ 10 сут, общая протяженность всех галсов 2551 км.

Для анализа горизонтальной изменчивости температурного поля использованы ряды температуры на разных глубинах, осредненные по 5-метровым

Буксируемый комплекс обеспечивал измерения вертикальной структуры температуры при скорости судна 8 – 10 узлов с изменением траектории движения по команде оператора от поверхности до глубины 110 – 150 м. Фрагмент траектории движения носителя на одном из галсов показан на рис. 1. Буксировка на полигоне выполнялась на галсах протяженностью 250 – 500 км со средней дискретностью по горизонтали $\Delta x \approx 2$ км. Данные измерений на глубине 0 – 110 м через каждые 0,5 м были представлены в виде регулярных рядов температуры.

Схема галсов на полигоне показана на рис. 2. В период измерений по техническим причинам выполнялись кратковременные остановки судна, что было учтено при анализе данных. Из общего массива

слоям, а также ряды рассчитанных глубин изотерм. Средняя дискретность рядов Δx равна 2 км.

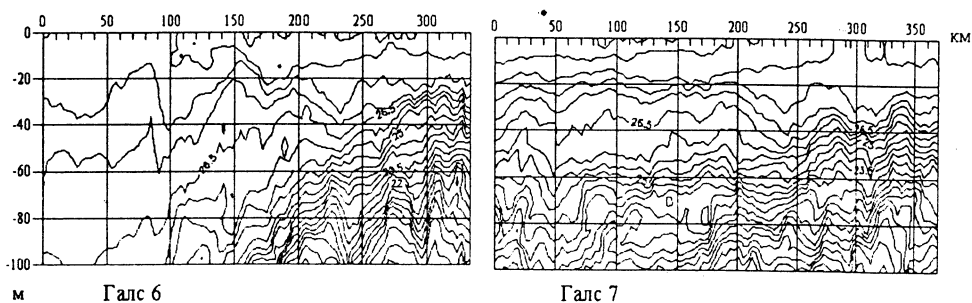
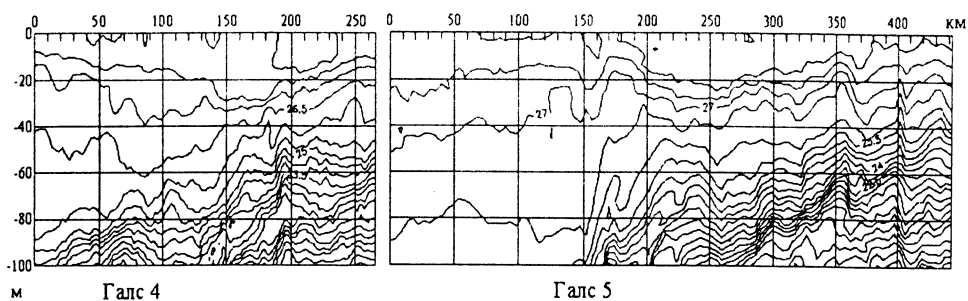
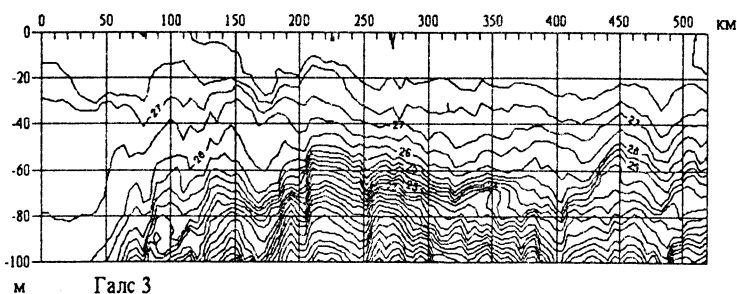
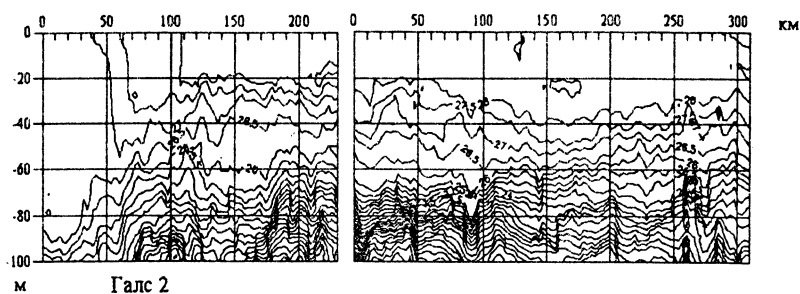
Методом максимальной энтропии, обеспечивающим хорошее разрешение при относительно коротких рядах наблюдений, рассчитаны одномерные пространственные спектры. Результаты расчетов использованы для получения пространственных характеристик колебаний температуры в сезонном термоклине. При выполнении измерений буксируемым прибором, движущимся с некоторой скоростью V , в волновом поле, регистрируется волна длиной, отличающейся от истинной на величину сдвига Доплера. Определяя величину этого сдвига для каждого из галсов по данным спектральных оценок и учитывая, что галсы пересекают волновое поле под различными углами относительно волнового вектора, можно определить направление внутренней волны и ее основные характеристики [8].

Данные наблюдений также могут быть использованы для описания пространственной изменчивости характеристик тонкой структуры поля температуры и определения ее взаимосвязи с физико-географическими условиями района, термохалинной структурой и динамикой вод. Для выделения тонкоструктурных особенностей из исходного профиля вычитался профиль, сглаженный полиномиальным фильтром [9]. Далее рассчитывались дисперсии флуктуаций температуры, спектральные плотности для вертикальных волновых чисел на выборочных зондированиях, а также коэффициент взаимной корреляции между последовательными профилями.

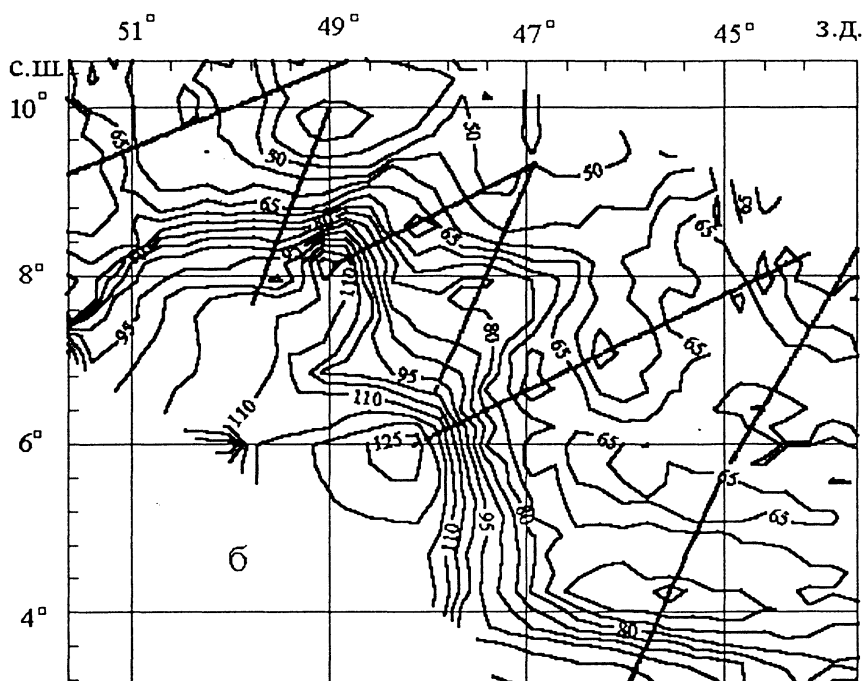
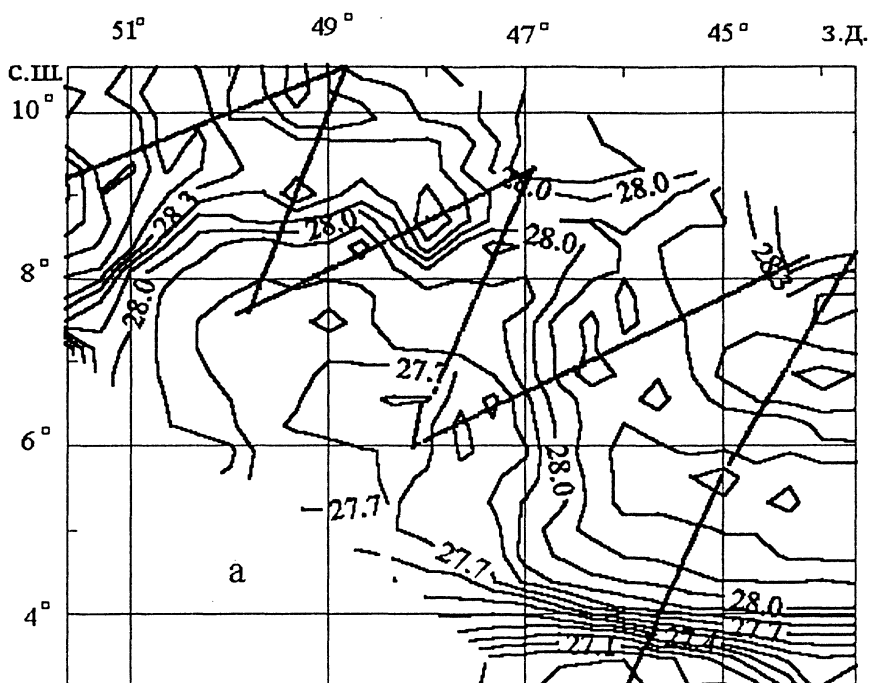
Вертикальная структура температурного поля, полученная при сканировании верхнего слоя буксируемым комплексом, показана на рис 3. Видно, что нижняя граница ВКС изменяет свое положение от 20 м в северной части разрезов до 120 м и более – в южной. Поле температуры ВКС горизонтально неоднородно, что хорошо показано на карте распределения температуры для слоя 5–10 м (рис. 4, а). Температура ВКС уменьшается с севера на юг, достигая разности более чем в $1,5^{\circ}\text{C}$. Этим подтверждается известный из наблюдений факт взаимодействия в исследуемом районе относительно теплых и соленых «северных» вод, поступающих на полигон по западной периферии Северного Тропического циклонического круговорота, с холодными и менее солеными «южными» водами Экваториального антициклонического круговорота [2].

Структура температурного поля в сезонном термоклине анализировалась по рядам изотермы 25°C . Топографию сезонного термоклина можно представить по карте распределения глубин указанной изотермы. Изопериметрии имеют наклон к юго-западному сектору полигона. Среднее значение тангенса угла наклона $3,5 \cdot 10^{-4}$. Необходимо подчеркнуть высокую согласованность крупномасштабной изменчивости полей температуры воды в приповерхностном слое (рис. 4, а) и топографии сезонного термоклина (рис. 4, б).

По-видимому, термическая структура верхнего слоя исследуемого района, полученная по данным измерений буксируемым комплексом «Галс-2», отражает известные черты крупномасштабной циркуляции водных масс, согласно [1, 10], а именно: перенос воды Межпассатным противотечением с северо-запада на юго-восток с характерной скоростью 0,8–1,2 м/с, меандрирование МПТ, а также формирование в центральной части полигона квазистационарного антициклонического вихря.



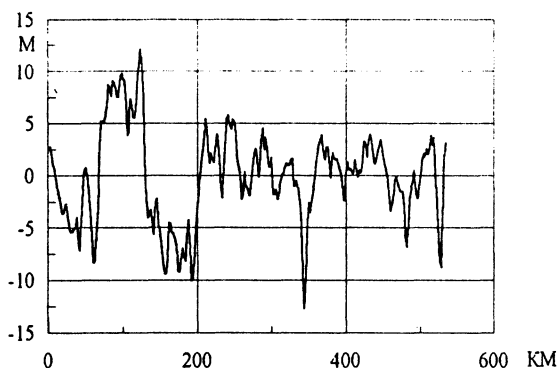
Р и с. 3. Вертикальная структура температурного поля в верхнем слое северо-западной части Тропической Атлантики



Р и с. 4. Распределение температуры в верхнем перемешанном слое на горизонте 5–10 м (а) и глубина залегания изотермы 25°C на полигоне (б)

Анализ данных измерений температуры в приповерхностном слое (на глубине 5 – 10 м) выявил наличие ее длиннопериодных флуктуаций. Временной масштаб этих флуктуаций $\tau = \lambda_i / v_i$ (λ_i – длина волны колебаний температуры на i -м галсе, v_i – скорость буксировки) равен ~ 12-часовому периоду. Причем дисперсия колебаний температуры в ВКС с полусуточным периодом составляет более 80% от общей дисперсии ряда. Суточная изменчивость температуры, вызванная циклическим солнечным прогревом верхнего слоя воды, при анализе не определена, поскольку длина волны изменения температуры для этого периода соизмерима с длиной галса и не выделяется из общего фона температурной изменчивости поля.

Для оценки взаимосвязи изменчивости температурного поля в приповерхностном слое и на более глубоких горизонтах (20 – 25, 45 – 50, 70 – 75, 90 – 95 м) определены коэффициенты взаимной корреляции. Оказалось, что изменение температуры в ВКС не связано с изменением температуры в сезонном термоклине (коэффициент взаимной корреляции $R \approx -0,21$, тогда как для горизонтов 70 – 75 и 90 – 95 м $R \approx 0,9$).



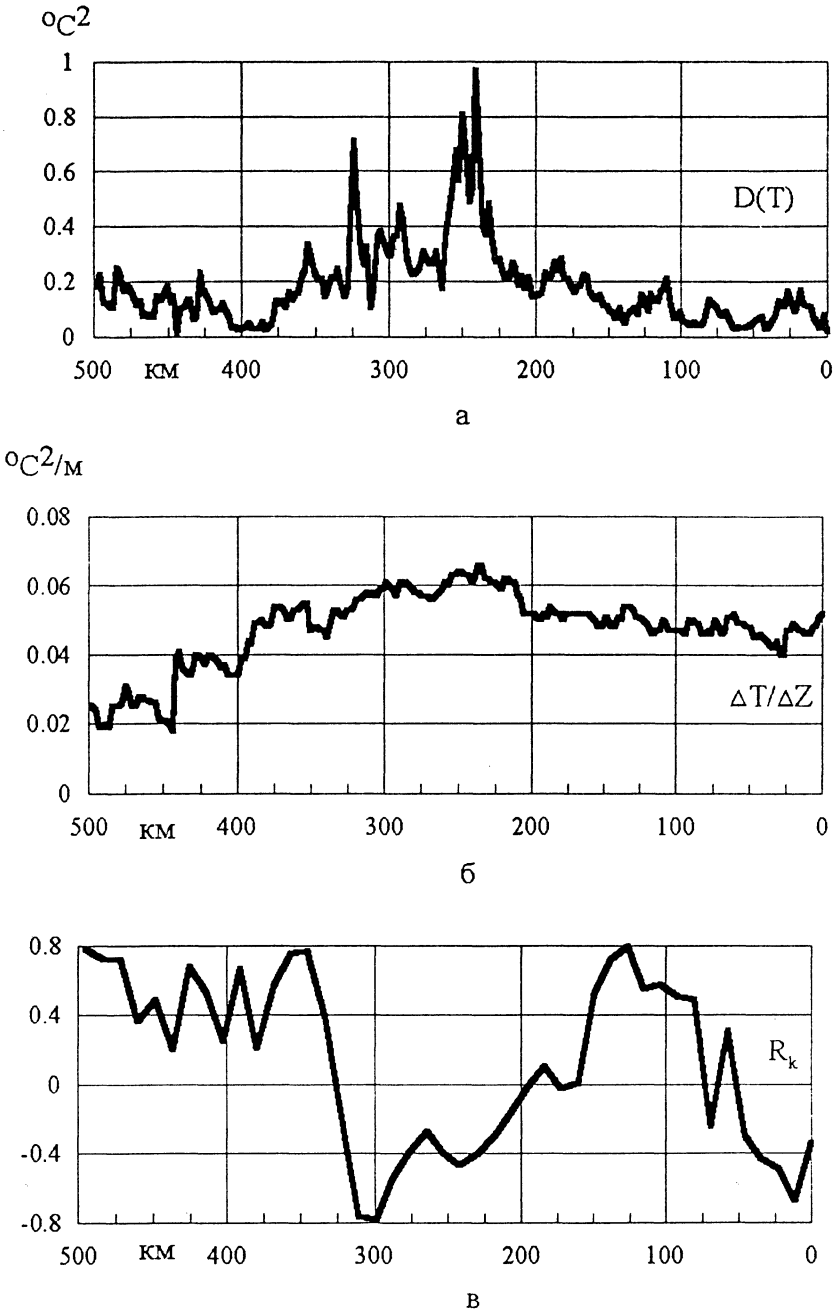
Р и с. 5. Колебания изотермы 25°C на галсе 2 после удаления тренда

Параметры квазипериодических колебаний глубины залегания изотермы 25°C на полигоне, выделенные после удаления тренда, оценивались по спектрам, полученным методом максимальной энтропии. По данным расчетов определено, что максимальная дисперсия колебаний изотермы вызвана бароклинной внутренней волной с периодом 12,4 ч и длиной 74,5 км, распространяющейся с юго-запада на северо-

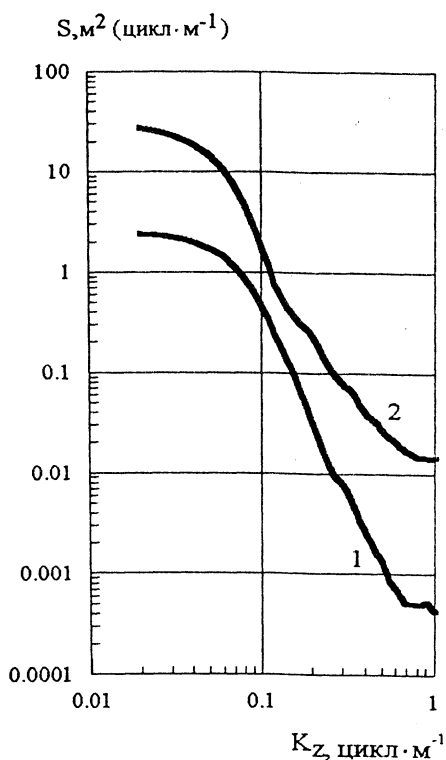
восток. При движении на северо-восток волна проходит область изменения глубины залегания сезонного термоклина (пикноклина), что, по-видимому, существенно влияет на ее амплитуду и форму. В области изменения глубины залегания термоклина амплитуда волны значительно возрастает, а далее, по мере распространения на мелком ($z = 20$ м) термоклине, волна становится подобной уединенной (рис. 5). Зарегистрированная амплитуда таких волн на полигоне более 10 м. Видимо, именно эти существенно нелинейные волны играют важную роль в турбулентном обмене через пикноклин [11].

Характеристики тонкой вертикальной структуры температуры определены по данным измерений квазивертикальных профилей на галсе 3 (рис. 6). Протяженность галса 519,3 км, для анализа использовались данные зондирования на глубине 0 – 110 м. Коэффициент взаимной корреляции меняется от +0,8 до –0,8 и отражает некоторую периодичность в смещении по вертикали тонкоструктурных профилей относительно друг друга. Средний масштаб пе-

риодического изменения коэффициента взаимной корреляции по горизонтали ~ 300 км. Весьма вероятно, что это может быть вызвано низкочастотным воздействием примерно суточного периода на вертикальную структуру.



Р и с. 6. Характеристики тонкой вертикальной структуры температурного поля на галсе 3:
а – дисперсии тонкоструктурных флуктуаций; *б* – среднее значение градиента температуры;
в – вариации коэффициента взаимной корреляции между последовательными зондированиями



Р и с. 7. Спектры по вертикальным волновым числам тонкоструктурных неоднородностей для зондирований в начале – 1 и середине – 2 галса 3

Спектральные плотности вертикальных температурных флуктуаций рассчитаны для выборочных зондирований, соответствующих разным уровням дисперсий вертикальных структур. Выбраны зоны с малыми значениями дисперсий в начале разреза и высокими – в его середине (рис. 6). Затем спектры выборочных профилей для каждого из участков осреднялись. Полученные спектры отличаются уровнем и формой (рис. 7). Менее интенсивная тонкая структура имеет осредненный спектр с наклоном $\alpha = -3,6$ для всего участка анализируемых волновых чисел, тогда как для областей с высоким уровнем тонкоструктурной дисперсии спектр изменяет наклон от $\alpha_1 = -3,6$ в области низких волновых чисел до $\alpha_2 = -2,1$ в коротковолновой области. Изменение наклона наблюдается в области волнового числа $0,18 \text{ цикл} \cdot \text{м}^{-1}$.

Данные измерений пространственной структуры температурного поля с относительно высоким разрешением достаточно хорошо отражают известные крупномасштабные особенности термохалинной структуры и динамики вод в исследуемом районе [10]. На полигоне (рис. 2) галсы пересекали систему Межпассатного противотечения и Северного Пассатного течения.

Распределение температуры в ВКС и топография сезонного термоклина свидетельствуют о меандрировании МПТ с амплитудой $\sim 110 \text{ км}$ и длиной волны $\sim 650 \text{ км}$.

Крупномасштабная циркуляция определяет значительный подъем сезонного термоклина (пикноклина) к поверхности (от 100 до 10 – 20 м) и существенный горизонтальный градиент температуры в ВКС. При измерениях температуры ВКС наблюдаются квазипериодические длинопериодные флуктуации, в сезонном термоклине хорошо выражены бароклинные колебания, проявляющиеся в смещениях изотерм. Смещения изотерм в сезонном термоклине вызваны внутренними волнами, генерируемыми на южноамериканском шельфе и распространяющимися в северо-восточном направлении. Эти данные подтверждаются наблюдениями внутренних волн, полученными в этом районе с использованием АБС [4].

При движении в направлении уменьшения глубины залегания пикноклина, выходящего к поверхности, внутренняя волна вначале растет по амплитуде, а затем становится нелинейной, искажает свою форму и далее распространяется как уединенная внутренняя волна, которая со временем может порождать локальные очаги перемешивания в стратифицированном пикноклине. Длина полусуточной волны, определенная по экспериментальным данным, равна 74,5 км.

Анализ тонкой температурной структуры показывает существование вертикальных неоднородностей, амплитуда и размеры которых изменяются в пространстве и зависят, по-видимому, от крупномасштабной термохалинной и динамической структуры. Сравнение ранее полученных данных изменчивости циркуляции водных масс в этом районе [10] с приведенными результатами показывает, что максимальные значения дисперсий приходятся на область максимального горизонтального сдвига между МПТ и СПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлыстов Н.З. Структура и динамика вод Тропической Атлантики. – Киев.: Наук. думка, 1976. – 163 с.
2. Моисеев Г.А. Ступенчатые структуры и вертикальное перемешивание в деятельном слое северо-западной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. – 1986. – №3. – С. 31 – 39.
3. Баев С.А., Иванов Л.И. Тонкая структура полей температуры и солёности в северо-западной части Тропической Атлантики // Там же. – 1988. – №4. – С. 51 – 54.
4. Иванов В.А., Иванов Л.И. Пространственные характеристики приливных колебаний в районе Гвинейской котловины // Там же. – 1987. – №4. – С. 50 – 53.
5. Кузнецов А.С., Павловский И.Б. О возможностях косвенного метода исследования внутренних волн // Там же. – 1988. – №6. – С. 57 – 60.
6. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. – С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. – 192 с.
7. Гайский В.А., Артемов Ю.Г., Блинков В.А. и др. // Автоматизированные системы с буксируемыми приборами в океанологических исследованиях. – Киев: Наук. думка, 1987. – 176 с.
8. Гайский В.А., Блинков В.А., Шугаев А.В. Определение характеристик поля внутренних волн буксируемым комплексом «Галс» // Ветровые, внутренние, приливные волны, волны цунами / Тезисы докладов 3-го съезда советских океанологов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – С. 59.
9. Бутырев В.И., Волков И. И., Гордеев Н.Д. и др. Статистические методы обработки информации в приложении к исследованию гидрофизических полей // Океанологические исследования. – 1990. – № 42. – С. 103 – 122.
10. Баев С.А., Булгаков Н.П., Иванов Л.И. и др. Циркуляция вод в районе формирования Межпассатного противотечения и ее изменчивость // Морской гидрофизический журнал. – 1987. – №4. – С. 54 – 58.
11. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. Интенсивные внутренние волны в Мировом океане // Океанология. – 2004. – 44, № 6. – С. 805 – 810.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 06.04.05
После доработки 13.06.05

ABSTRACT Based on the observations of spatial variability of the temperature field in the northwest Tropical Atlantic performed on the polygon 400 × 400 miles (horizontal resolution $\Delta x \approx 2$ km and vertical resolution $\Delta z \approx 0.5$ m), quasi-periodic temperature fluctuations of a semi-diurnal period are recorded in the near-surface layer. Baroclinic internal waves with the same period most likely generated on the South America northwest shelf and propagating to the north-east are observed in the seasonal thermocline. Vertical fine structure of the temperature field is of various intensities on the polygon. Maximum dispersion level of vertical temperature fluctuations is recorded on the boundary between the North Equatorial Countercurrent and the North Equatorial Current.