

Изменчивость вертикальной структуры течений в западной части Субтропической Атлантики и меридиональный перенос тепла

© 2015 А.Б. Полонский, С.Б. Крашенинникова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: apolonsky5@mail.ru, svetlanabk@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2014 г.

На основании инструментальных данных *WOCE* (1988 – 1993 гг.) и *RAPID* (2004 – 2006 гг.) проанализированы сезонная и синоптическая изменчивость вертикальной структуры течений в западной части Северного субтропического антициклонического круговорота (ССАК) и определен вклад этой изменчивости в формирование меридионального переноса тепла. Максимум годовой гармоник сезонного цикла наблюдается летом – осенью, минимум – зимой – весной. Выявлено наличие вторичных максимумов в конце весны и середине осени. На суперпозицию годовой и полугодовой гармоник приходится ~40% суммарной изменчивости поля течений. Синоптические флуктуации с периодами 3 – 30 и 51 – 135 сут обуславливают существенную часть (до 50 – 60%) изменчивости гидротермодинамических параметров в верхнем и промежуточном слоях. Доля изменчивости с периодом 31 – 50 сут не превышает 10% суммарной дисперсии. Влияние вихревых переносов синоптического масштаба на меридиональную термохалинную циркуляцию и связанный с ней меридиональный перенос тепла наиболее существенно в термоклине. Вклад синоптических вихрей в интегральный перенос тепла в западной части ССАК (в окрестности 26° с. ш.) с учетом сезонных вариаций, оцененный по инструментальным данным *RAPID*, составляет не более 5%.

Ключевые слова: сезонная и синоптическая изменчивость течений, меридиональный перенос тепла, инструментальные данные *RAPID*, *WOCE*, Субтропическая Атлантика.

Введение

Меридиональная циркуляция (МЦ) и меридиональный перенос тепла (МПТ) в океане играют важную роль в климатической системе. Океанический МПТ обуславливает 2/3 общего МПТ в системе океан – атмосфера в низких широтах, а его изменчивость определяет вариации параметров климатической системы с типичными периодами от 50 – 100 до 1000 лет [1, 2]. Океаническая МЦ складывается преимущественно из термохалинной циркуляции, обусловленной крупномасштабными градиентами плотности, ветрового переноса, сосредоточенного в главном термоклине, и дрейфовых течений, концентрирующихся в верхнем экмановском слое [1, 3, 4]. По мнению многих авторов, важную роль в формировании МЦ играют также вихри, которые обусловлены флуктуациями скорости и температуры на синоптическом масштабе [5 – 10]. Оценке вклада различных физических механизмов в интегральный океанический МПТ посвящено большое количество работ. В одних утверждается, что перенос тепла, связанный с синоптическими вихрями, принципиально важен в общем океаническом МПТ [11 – 13], в других его вклад оценивается как незначительный, хотя и признается наличие существенных региональных различий [14, 15].

Наиболее важными являются оценки МПТ, полученные при использовании длительных непрерывных рядов данных инструментальных наблюдений. В отличие от эпизодических судовых исследований долгосрочные наблюдения за зональной и меридиональной компонентами скорости течения, давлением и температурой на буйковых станциях на разных горизонтах позволяют надежно описать вертикальную структуру течений и достаточно точно оценить их временную изменчивость в выбранных районах океана. Полученные на основании этих данных оценки переносов массы и тепла лишены неопределенностей, присущих косвенным оценкам переносов с использованием, например, геострофических соотношений. Они особенно важны на значительных глубинах, где баротропная компонента переноса тепла одного порядка с бароклинной, а горизонтальные градиенты в поле плотности оцениваются с большой погрешностью [3, 5, 16, 17].

Самые длительные временные ряды прямых измерений течений в Субтропической Атлантике относятся к области восточнее о. Абако на Багамских о-вах (25 – 27° с. ш.). Этот район уникален по многим причинам:

- он находится вблизи максимума МПТ в Северной Атлантике [1];
- здесь выполнено наибольшее количество гидрологических разрезов [1, 3, 14];
- МПТ определяется здесь струйными Флоридским (ФТ) и Антильским (АТ) течениями, в остальной части бассейна перенос направлен противоположно [5, 13];
- на этих широтах выполнены наиболее долговременные непрерывные наблюдения за Флоридским течением [18 – 20].

Исследование изменчивости циркуляции и вихрей синоптического масштаба в Субтропической Атлантике с использованием данных долгосрочных инструментальных наблюдений за течениями – одна из главных задач многочисленных наблюдательных программ *MODE*, *POLYMODE*, *STACS*, *WATTS*, *ACCP*, *RAPID* и *WOCE* [3 – 10, 16, 21 – 26]. В указанных работах описаны природа и типичные пространственно-временные масштабы изменчивости вихревых образований, оценены вклады переносов тепла синоптического масштаба в суммарную изменчивость МПТ в северо-западной части ССАК. Выявлено значительное влияние переноса тепла вихрями в западном погранслое Субтропической Атлантики.

К сожалению, непрерывные инструментальные наблюдения не охватывают весь бассейн Субтропической Атлантики от берега до берега и от поверхности до дна, однако они позволяют надежно описать вертикальную структуру течений и ее изменчивость на синоптическом и внутригодовом масштабах в западной части ССАК. Это дает возможность уточнить вклад переносов тепла, обусловленных корреляциями скорости и температуры на сезонном, синоптическом и сезонно-синоптическом масштабах, в интегральный МПТ в районе, где синоптические вихри наиболее интенсивны. Такое уточнение и является целью настоящей работы.

Материалы и методика

Для оценки среднемесячных меридиональных переносов массы (тепла) в окрестности 26° с. ш. западной части Субтропической Атлантики использовались данные о меридиональной компоненте скорости течения (V), температуре (T) и давлении (P) с автономных буйковых станций с акустическими измерителями течений. Эти данные были получены в рамках программы *Rapid Climate Change Program (RAPID)* Британским океанографическим центром данных (*British Oceanographic Data Centre*) при поддержке Национального совета инвайроментальных исследований (*National Environmental Research Council*) по проектам *RAPIDMOC* (*National Oceanography Centre, Southampton*) 2004 – 2006 гг. и *МОСНА* (*Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science*) [27] 2004 г., а также в эксперименте *World Ocean Circulation Experiment (WOCE)* [28] 1988, 1990, 1992, 1993 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика использованных инструментальных данных

| Программа | Количество станций | h_{\max} , м | Год | Месяц по порядку |
|-----------------|--------------------|----------------|------------|------------------|
| <i>WOCE</i> | 3 | 455 | 1988 | 10-й |
| | 5 | 1497 | 1990 | 5 |
| | 5 | 5592 | 1992 | 2 |
| | 1 | 355 | 1993 | 9 |
| | 7 | 4923 | 1993 | 10 |
| <i>МОСНА</i> | 5 | 4853 | 2004 | 3 – 5 |
| | 5 | 4129 | 2004 | 7 – 9 |
| | 3 | 4111 | 2004 | 10 |
| <i>RAPIDMOC</i> | 2 | 4095 | 2004 | 10 – 12 |
| | 5 | 4853 | 2005 | 1 |
| | 5 | 3108 | 2005 | 2 – 5 |
| | 1 | 4000 | 2005, 2006 | 5 – 12, 1 – 3 |
| | 1 | 555 | 2005, 2006 | 5 – 12, 1 – 3 |
| | 1 | 4250 | 2005, 2006 | 5 – 12, 1 – 3 |

Дискретность данных, представленных Британским океанографическим центром, составляет 12 ч. Глубоководные данные меридиональной компоненты скорости течения сосредоточены в районе $75 - 75,8^\circ$ з. д. в слое 50 – 1400 м (за 1-й – 12-й мес) и до глубины ~ 5000 м (за 4-й и 5-й мес). Более широкая полоса охвачена данными наблюдений в области долгот $\sim 72 - 77^\circ$ з. д. в слое $\sim 100 - 1400$ м (за 2-й и 10-й мес). Наибольшая продолжительность рядов V и T по времени (до 712 сут) и наилучшая обеспеченность данными по глубине наблюдается в районе 26° с. ш., $75 - 75,8^\circ$ з. д. Пространственно-временное распределение данных V и T , которые используются при расчете переносов массы (тепла), приведено на рис. 1.

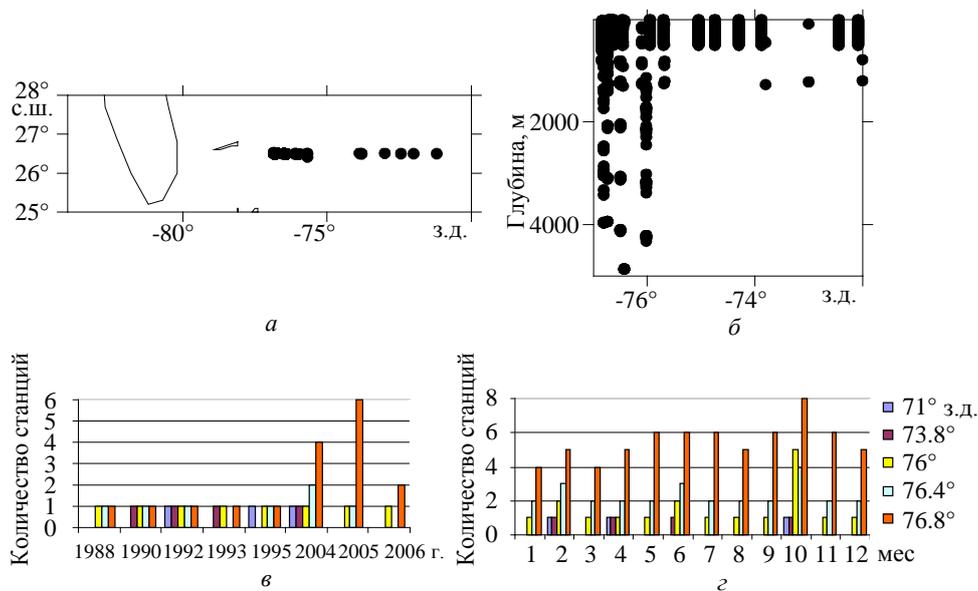


Рис. 1. Распределение меридиональной компоненты скорости и температуры по инструментальным данным *RAPID*, *WOCE* за 1988 – 2006 гг. по горизонтали (*а*), вертикали (*б*), годам (*в*) и месяцам (*г*)

Среднемесячные локальные меридиональные переносы массы (\bar{Q}) в области 26° с. ш., $72 - 77^\circ$ з. д. и $75 - 75,8^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики рассчитывались следующим образом:

$$\bar{Q} = \int_{h_1}^{h_2} \int_{L_1}^{L_2} (\bar{V}) dx dz, \quad (1)$$

где h_1 , h_2 – верхняя и нижняя границы потока; L_1 , L_2 – его западная и восточная границы; черта сверху означает осреднение по времени (за отдельные месяцы каждого года).

Расчет среднемесячных локальных меридиональных переносов тепла (\bar{H}) проводился по формуле

$$\bar{H} = C_p \bar{\rho} \int_{h_1}^{h_2} \int_{L_1}^{L_2} (\bar{V}T) dx dz, \quad (2)$$

где $C_p \bar{\rho} \approx 4,18 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{см}^3)$; C_p – удельная теплоемкость морской воды при постоянном давлении; ρ – плотность морской воды.

Путем гармонического разложения ряда среднемесячных значений \bar{Q} и \bar{H} были вычислены амплитуды годовой и полугодовой гармоник. При условии, что скорость и температура изменяются на сезонном и синоптическом масштабах, среднегодовой интегральный меридиональный перенос тепла может быть рассчитан по следующей формуле [7, 29]:

$$\bar{H} = C_p \bar{\rho} \int_0^h \int_{L_1}^{L_2} (\overline{VT} + \overline{V'T'} + \overline{V''T''} + \underbrace{\overline{V'T''} + \overline{V''T'}}_4) dx dz, \quad (3)$$

где h – глубина океана; слагаемые в правой части имеют следующий физический смысл: 1 – перенос тепла, обусловленный средней меридиональной циркуляцией; 2 – перенос тепла, связанный с корреляциями флуктуаций меридиональной компоненты скорости течений и температуры на сезонном масштабе (V' , T'); 3 – перенос тепла, связанный с корреляциями флуктуаций меридиональной компоненты скорости течений и температуры на синоптическом масштабе (V'' , T''); 4 – перенос тепла, связанный с корреляциями флуктуаций меридиональной компоненты скорости течений и температуры на сезонном и синоптическом масштабах. Долгосрочные инструментальные наблюдения по программе *RAPID* позволяют надежно оценить слагаемые 2, 3 и 4 уравнения (3).

При описании синоптических характеристик гидротермодинамических полей и оценке вклада их изменчивости в суммарную дисперсию использовались данные *RAPID*. Для этого непрерывные ряды V и T на каждом горизонте для каждой станции подвергались спектральному анализу. Причем оценки проводились начиная с глубины ~250 м. На глубинах менее 120 м спектры не анализировались, т. к. в области сезонного термоклина сказывается сильное влияние сезонных колебаний. Благодаря минимуму в спектре колебаний, который позволяет отделить синоптические пики от мезомасштабных, удалось надежно отфильтровать высокочастотные флуктуации с периодами менее 3 сут. По спектрам и периодограммам выделялись типичные периоды синоптической изменчивости гидротермодинамических параметров. Исходные ряды обрабатывались полосно-пропускающим прямоугольным фильтром для получения рядов V'' и T'' . Затем оценивался вклад, вносимый колебаниями скорости и температуры на выделенных синоптических масштабах, в суммарную дисперсию исходного ряда. Полученные флуктуации использовались далее для оценки переноса тепла синоптическими вихрями в районе 26° с. ш. Субтропической Атлантики. Для этого интегрировалось произведение V'' и T'' по глубине. Затем полученный интеграл умножался на расстояние от Америки до Африки (около $5,5 \cdot 10^6$ м) и таким образом находился искомый перенос тепла вихрями, оцененный «сверху» (т. к. интенсивность синоптических процессов в западной части ССАК существенно больше, чем в центральной и восточной). Далее оценивался вклад этого переноса в интегральный МПТ в окрестности 26° с. ш. Субтропической Атлантики, полученный ранее в работе [29]. Такая методика расчета переноса тепла вихрями подробно описана в [3, 16].

Так как большинство синоптических вихрей (~90%) сосредоточено в западной части Субтропической Атлантики (на остальную часть бассейна их приходится не более 10% [13, 26]), умножив интеграл $\int_H \overline{V''T''} dz$ на ширину

западного погранслоя ($\sim 0,5 \cdot 10^6$ м), найдем истинный перенос тепла синоптическими вихрями, приближенно совпадающий с оценками, полученными по гидрологическим данным [26, 29].

Результаты

Внутригодовая изменчивость меридиональных переносов массы (тепла) в Субтропической Атлантике. На основании данных *RAPID* и *WOCE* получены среднемесячные локальные переносы массы (тепла) для зимы (февраль) и осени (октябрь) в районе 26° с. ш., $72 - 77^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики. Анализ табл. 2 показывает, что основной тепломассоперенос северного направления в этой полосе долгот осуществляется в верхнем 800-метровом слое. Ниже происходит смена знака переноса. Описанная структура циркуляции подтверждается результатами работ [3, 5, 16, 17, 21, 24, 30, 31]. Действительно, в верхнем ~ 800 -метровом слое расположено направленное на север Антильское течение, ниже которого наблюдается Западное граничное глубинное течение (ЗГГТ) южного направления. Более детально структура течений в рассматриваемом регионе видна на рис. 2, который свидетельствует о наличии интенсивного подповерхностного течения с ядром, расположенным на глубине 400 м. Максимум скорости в ядре меняется от сезона к сезону в пределах $0,3 - 0,8$ м/с. В среднем за год расход АТ в поверхностном слое (выше отмеченного ядра) мал, поскольку течения здесь знакопеременны (меридиональная компонента скорости меняется в диапазоне $-30 \dots 30$ см/с). На глубине 1000 – 1200 м расположено ядро ЗГГТ южного направления, скорость течения в котором меняется на протяжении всего года в пределах $-10 \dots -30$ см/с. Исключением является ноябрь для станции, расположенной в районе 26° с. ш., $75,8^\circ$ з. д. (рис. 2), где ЗГГТ изменило свое направление на северное, однако уже в декабре оно вновь приобрело южную направленность.

Таблица 2. Среднемесячные переносы массы (Q) и тепла (H) в районе 26° с. ш., $72 - 77^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики

| Месяц по порядку | Годы | Слой, м | Q , Св | H , ПВт |
|------------------|------------|-------------|----------|-----------|
| 2-й | 1992 –2006 | 0 – 800 | 8,5 | 0,54 |
| | | 800 – 1000 | -3,2 | -0,11 |
| | | 0 – 1000 | 5,3 | 0,43 |
| | | 1000 – 1400 | -9,4 | -0,24 |
| 10-й | 1988 –2006 | 0 – 800 | 13,5 | 1,01 |
| | | 800 – 1000 | -1,3 | -0,04 |
| | | 0 – 1000 | 12,3 | 0,95 |
| | | 1000 – 1400 | -4,5 | -0,14 |

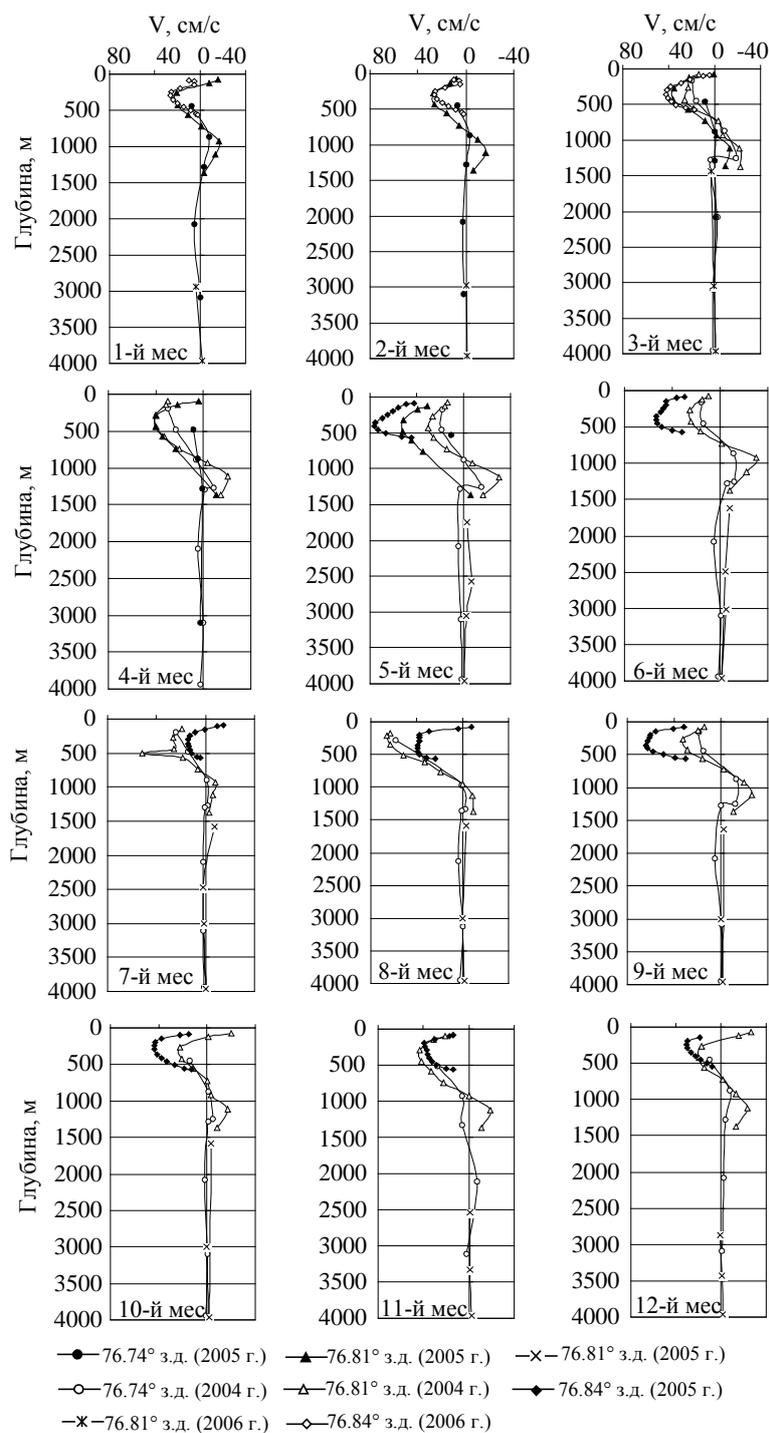


Рис. 2. Сезонная изменчивость вертикальных профилей меридиональной компоненты скорости на соседних станциях в районе 26° с. ш., 75 – 75,8° з. д. Субтропической Атлантики

Авторами настоящей работы получено, что локальный перенос массы (тепла) в верхнем 800-метровом слое в районе 26° с. ш., $72 - 77^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики в феврале и октябре составлял $8,5$ Св ($0,54$ ПВт) и $13,5$ Св ($1,01$ ПВт) соответственно (1 Св = 10^6 м³/с, 1 ПВт = 10^{15} Вт), т. е. его значения в этом слое зимой меньше, чем осенью, а в слое $1000 - 1400$ м – наоборот (табл. 2). Остальные месяцы недостаточно хорошо охвачены данными наблюдений, поэтому переносы для них не рассчитывались. Среднемноголетний перенос в верхнем 1000-метровом слое равен $\sim 8,8$ Св, что согласуется с результатами работ [5, 16, 17] с учетом погрешностей оценок (табл. 3).

Таблица 3. Среднемноголетние переносы массы (Q , Св) в районе 26° с. ш., $72 - 77^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики по данным разных работ

| Программы | Годы | Слои, м | | Работа |
|--------------------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|
| | | 0 – 1000 | 1000 – 5000 | |
| <i>STACS-8</i> | 1987, 1988 | $2,2 \pm 7,7$ | $-32,7 \pm 10,2$ | [5] |
| <i>STACS-10</i> | 1988 – 1990 | $7,0 \pm 8,5$ | $-27,5 \pm 17,2$ | [5] |
| <i>WATTS</i> | 1990 – 1992 | $5,3 \pm 9,9$ | $-22,8 \pm 22,4$ | [5] |
| <i>STACS</i> , <i>WATTS</i> | 1995 – 1997 | $5,0 \pm 3,0$ | $-25,0 \pm 23,0$ | [17] |
| <i>RAPID</i> | 2004, 2005 | 5,0 | -25,5 | [16] |
| <i>RAPID</i> , <i>WOCE</i> | 1988 – 2006 | 8,8 | – | Настоящая работа |

В настоящей работе расход ЗГГТ не оценивался из-за недостаточного количества данных в слоях ниже 1000 м. В [5, 16, 17] на основании модельных расчетов получены значения расхода ЗГГТ на глубине $800 - 4800$ м, которые меняются от $-22,8 \pm 22,4$ до $-32,7 \pm 10,2$ Св (табл. 3). Перенос ЗГГТ южного направления можно считать баротропным.

В указанном районе также не оценивался внутригодовой тепломассоперенос, т. к. это было сделано в работах [5, 22]. В [5] на основании данных буев (программы *STACS-8*, *STACS-10*, *WATTS*) во внутригодовом цикле локального переноса массы были выделены максимумы летом и зимой и минимумы – в середине весны и осени. В [22] показано, что перенос достигает максимального значения зимой, минимального – осенью, отмечается также наличие вторичного максимума летом и минимума – весной. В работе [5] эта особенность внутригодового цикла связывается с баротропным откликом на удаленное или локальное ветровое воздействие; показано также, что в изменчивости переносов на масштабах менее полугодового доминируют синоптические вихри, распространяющиеся на запад со скоростью 4 см/с. Соответствующий пространственно-временной масштаб характеризуется длиной волны 335 км и типичными периодами $70 - 100$ сут. В работе [16] это объясняется рециркуляцией вод в западной части ССАК и существованием локальных вихревых образований северо-восточнее о. Абако, что подтверждается исторически сложившейся концепцией о непостоянстве Антильского течения в верхнем 1000-метровом слое [30, 31].

На рис. 3 показана внутригодовая изменчивость локального переноса тепла (массы) в районе 26° с. ш., $75 - 75,8^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики в 800-метровом слое (т. е. в Антильском течении). Максимум годовой гармоника наблюдается летом – осенью, минимум — зимой – весной. Это подтверждается оценками, полученными в [17]. Следует отметить, что, помимо первичного максимума в августе, хорошо выделяются вторичные максимумы в мае и ноябре. Анализ отдельных профилей меридиональной компоненты скорости также подтверждает наличие отмеченных максимумов в конце весны и осени (рисунок не приводится). Внутригодовой цикл АТ очень хорошо согласуется с его описаниями в работах [10, 17, 30]. Отметим, что в среднемноголетнем сезонном цикле ФТ отсутствуют экстремумы в мае и ноябре. О том, что расходы Антильского и Флоридского течений не коррелируют между собой на внутригодовом масштабе, свидетельствуют также данные [17].

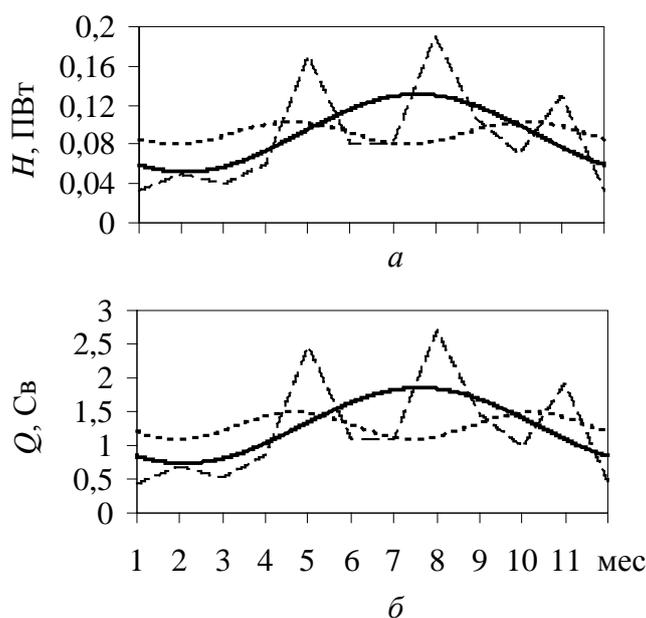


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость локального переноса тепла (*a*) и массы (*б*) в районе 26° с. ш., $75 - 75,8^\circ$ з. д. Субтропической Атлантики: сплошная линия – годовая гармоника, штриховая – исходный ряд, пунктир – полугодовая гармоника

Проведенный в настоящей работе дисперсионный анализ показал, что на годовую гармонику в изменчивости переносов массы (тепла) в районе 26° с. ш., $75 - 75,8^\circ$ з. д. приходится $\sim 30 - 40\%$ дисперсии исходного ряда, на полугодовую $\sim 5 - 10\%$. Таким образом, внутригодовой цикл меридионального теплопереноса в 2004 – 2006 гг. лишь на $\sim 40\%$ описывается суперпозицией годовой и полугодовой гармоник. В [18, 20] также показано, что вклад первых двух гармоник в суммарную дисперсию расхода ФТ в окрестности 27° с. ш. может быть меньше вклада, вносимого гармониками более высокого порядка. Из полученных результатов и опубликованных работ следует, что в районе

26° с. ш. вклад гармоник более существен, это свидетельствует о важной роли синоптических вихрей в региональной динамике [10, 17, 23, 25, 30].

Проведем анализ вихревых образований, обусловленных значительными флуктуациями меридиональной компоненты скорости и температуры на синоптических масштабах, в основном связанными с бароклинно-баротропной неустойчивостью системы течений в западной части Субтропической Атлантики [13, 16, 30] и с волнами Россби первой бароклинной моды, генерируемые движущимися синоптическими вихрями [26, 32 – 34].

Синоптическая изменчивость гидротермодинамических параметров и оценка вклада дисперсии, обусловленной этими флуктуациями, в суммарную дисперсию. Известно, что положение вихрей и их форма с течением времени изменяются. Поэтому буйковые станции в разное время могут находиться под воздействием различных частей вихревых образований и направления их движения. Это хорошо отражается на среднесуточных рядах меридиональной компоненты скорости течения и температуры (рис. 4). В среднем амплитуды синоптических вариаций V и T равны 10 – 20 см/с и 0,7 – 1°С в верхнем (~800 м) слое, 5 – 7 см/с и менее 0,5°С – в промежуточном (1000 – 2000 м) слое, 2 – 5 см/с и менее 0,2°С – в глубинном (2500 – 5000 м) слое. Из анализа рис. 4 видно, что максимумы и минимумы в фильтрованных рядах (период 51 – 135 сут) не всегда совпадают по глубине. Более или менее такое совпадение сохраняется в слое 730 – 1100 м.

Хорошо известно, что синоптические вихри в океане делятся на циклонические и антициклонические, которые характеризуются соответственно холодным и теплым ядром в центральной части и более теплыми и холодными водами по периферии вихря. Причем вихри фронтального происхождения располагаются справа (циклонические) и слева (антициклонические) от основного потока [35]. В среднем за год количество циклонических и антициклонических образований совпадает – по 5 вихрей каждого знака (рис. 4). Наиболее интенсивные циклонические вихри образуются летом (июнь, июль) и осенью (октябрь).

В табл. 4 приведены оценки вклада дисперсий, обусловленных изменчивостью гидротермодинамических параметров на синоптических масштабах, в суммарную дисперсию. Они показали, что флуктуации V'' и T'' с периодами 3 – 30 и 51 – 135 сут обуславливают существенную часть (до 50 – 60%) суммарной изменчивости в верхнем 800-метровом и промежуточном слоях. Подтверждением этого служат результаты работ [5, 30, 33], в которых найдены сходные характеристики бароклинно-неустойчивых волн, распространяющихся на запад.

В глубинном слое наибольший вклад (~80%) вносят колебания с периодом 3 – 30 сут. Анализ рядов скоростей течений, проведенный в [34], показал, что флуктуации с периодами ~50 и ~30 сут доминируют в изменчивости на всех трех анализируемых уровнях ЗГГТ (1500, 1800, 2100 м). Отметим, что на глубинах более 2500 м флуктуации T и V малы – на уровне погрешностей измерений.

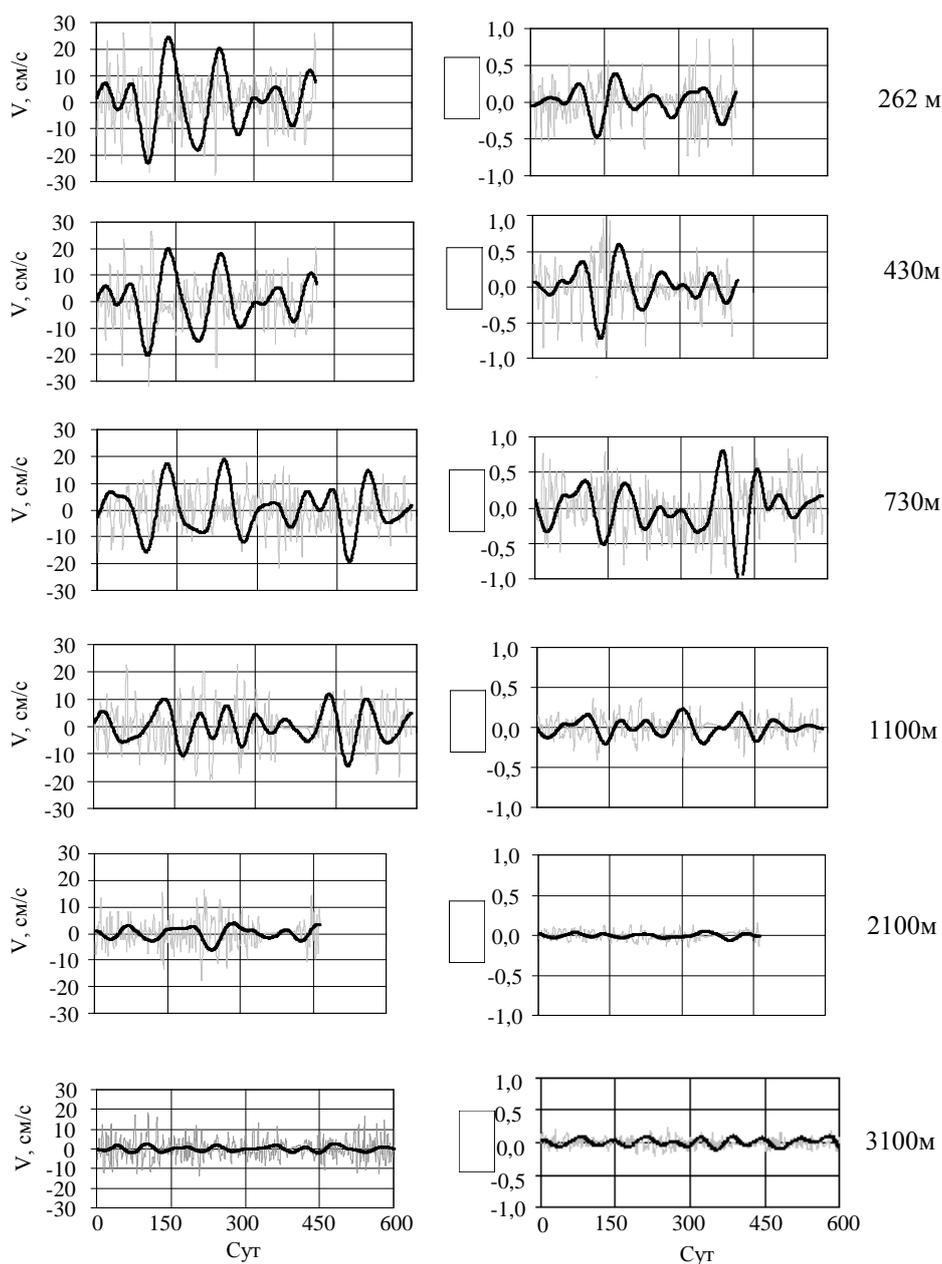


Рис. 4. Ряды гидротермодинамических параметров в районе 26° с. ш., $75,8^{\circ}$ з. д. Субтропической Атлантики (март 2004 – ноябрь 2005 г.) на разных горизонтах, обработанные полосно-пропускающим фильтром с периодами 3 – 30 сут (серые линии) и 51 – 135 сут (черные линии), после детрендрования исходного ряда

Таким образом, подтверждены результаты ранних работ [16, 17, 22], согласно которым влияние вихревых переносов синоптического масштаба на МЦ (и связанный с ней МПТ) наиболее существенно в термоклине (до глубин 1000 – 2000 м) западной части Субтропической Атлантики, т. к. именно здесь

наблюдаются максимальные вариации V и T на указанных масштабах. Вихревые переносы тепла ниже термоклина значительно слабее. На них приходится лишь ~5% среднего переноса тепла вихрями [22].

Таблица 4. Вклад дисперсии (%) на разных временных масштабах в суммарную дисперсию

| ° з. д. | Глубина, м | V'' | | | T'' | | |
|---------|------------|-------------|---------|-----------|-----------|---------|----------|
| | | Период, сут | | | | | |
| | | 3 – 30 | 31 – 50 | 51 – 135 | 3 – 30 | 31 – 50 | 51 – 135 |
| 75,74 | 250 | 25 | 5 | <u>35</u> | <u>30</u> | 4 | 19 |
| | 430 | 24 | 5 | <u>33</u> | <u>32</u> | 5 | 23 |
| | 730 | 19 | 7 | <u>35</u> | <u>30</u> | 2 | 20 |
| | 1100 | <u>34</u> | 11 | 15 | <u>22</u> | 9 | 17 |
| | 1370 | <u>34</u> | 10 | 11 | <u>22</u> | 13 | 18 |
| 75,81 | 2089 | <u>42</u> | 3 | 9 | <u>47</u> | 15 | 11 |
| | 3092 | <u>82</u> | 4 | 4 | <u>24</u> | 4 | 18 |
| | 3940 | <u>34</u> | 3 | 8 | <u>30</u> | 2 | 4 |

П р и м е ч а н и е. Подчеркнутые значения – наибольший вклад в суммарную изменчивость.

Перенос тепла синоптическими вихрями и его вклад в среднемноголетний МПТ. Интегральный перенос тепла синоптическими вихрями в Субтропической Атлантике с типичным периодом 3 – 30 сут, оцененный «сверху» в настоящей работе, равен 0,25 ПВт (табл. 5). Аналогичный порядок величины такого переноса был получен для 40° с. ш. (0,1 ПВт) и 15° с. ш. (–0,2 ПВт) в работе [11]. Следовательно, перенос тепла вихрями этого масштаба может достигать 10 – 20% интегрального МПТ (1,33 ПВт), оцененного по гидрологическим данным на зональных разрезах в работе [29]. Эта оценка, естественно, явно завышена, т. к. она определялась для максимального значения МПТ, проинтегрированного по глубине в западном погранслое, где интенсивность синоптических флуктуаций гидротермодинамических полей максимальна. На других станциях выявлены меньшие значения, причем знак ($V''T''$) может быть различен. По нашим данным, ($V''T''$) на большинстве станций не меняет знак в термоклине, однако он может изменяться в верхнем слое и под термоклином. В результате при интегрировании ($V''T''$) по всей ширине бассейна за все сезоны и по всему термоклину оценка переноса тепла вихрями и соответственно – его вклада в интегральный МПТ должна быть примерно на порядок меньше полученной оценки. Этот вывод подтверждают и результаты работ [14, 15], согласно которым по гидрологическим данным обсуждаемый вклад вихревых переносов составляет ~1%. В работе [13] показано, что этот перенос по инструментальным данным *RAPID* может изменяться в диапазоне –0,02 ... 0,22 ПВт.

Таблица 5. Перенос тепла синоптическими вихрями ($\overline{H''}$) и его вклад в интегральный МПТ (\overline{H}) в районе 26° с. ш. Субтропической Атлантики

| МПТ, ПВт | Оценка «сверху» вихревого МПТ от берега до берега | | Оценка вихревого МПТ в западном погранслое | |
|------------------------|---|----------|--|----------|
| | Период, сут | | | |
| | 3 – 30 | 31 – 135 | 3 – 30 | 31 – 135 |
| $\overline{H''}$, ПВт | 0,25 | 0,08 | 0,02 | 0,01 |
| \overline{H} , ПВт | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,33 |
| Вклад, % | 18,9 | 6,2 | 1,7 | 0,6 |

В настоящей работе получена оценка переноса тепла синоптическими вихрями отдельно для западной части Субтропической Атлантики. Она оказалась равной 0,02 ПВт. В работе [36] вихревой перенос, рассчитанный по вихреразрешающим моделям, близок к этому значению. Оценки переноса тепла в Субтропической Атлантике, полученные по данным измерителей течений в работах [22, 37, 38], составляют менее 0,05 ПВт.

Таким образом, вклад вихревых переносов тепла, оцененный по инструментальным данным *RAPID*, в средний интегральный МПТ мал и составляет ~1%, что полностью согласуется с результатами [13 – 15].

Перенос тепла, обусловленный сезонными флуктуациями V и T , на одной из станций (слагаемое 2 в (3)) по инструментальным данным *RAPID* составляет 0,03 ПВт. Его вклад в интегральный МПТ в окрестности 26° с. ш. равен ~3%, что согласуется с результатами работы [7]. В ней показано, что вклад корреляций сезонных флуктуаций температуры и скорости дрейфовых и градиентных течений в среднегодовой МПТ невелик и составляет не более 10% в Экваториально-Тропической Атлантике, а в Субтропической Атлантике ($\sim 26^\circ$ с. ш.) он значительно меньше.

Полученные по инструментальным данным *RAPID* оценки переноса тепла, обусловленные сезонно-синоптическими флуктуациями скорости и температуры (слагаемые 4 в (3)), показали, что при расчете интегрального переноса тепла ими можно пренебречь, т. к. их суммарный вклад составляет менее 0,1%.

Заключение

На основании имеющихся данных непрерывных инструментальных наблюдений *WOCE* (1988 – 1993 гг.) и *RAPID* (2004 – 2006 гг.) описана сезонная и синоптическая изменчивость вертикальной структуры течений в западной части Северного субтропического антициклонического круговорота.

Анализ внутрigoдового цикла локального меридионального переноса массы (тепла) в районе $\sim 26^\circ$ с. ш., $75 - 75,8^\circ$ з. д. показал, что максимум его годовой гармоник наблюдается летом – осенью, минимум — зимой – весной. Вместе с тем отмечено наличие вторичных максимумов в конце весны и середине осени. На изменчивость годовой и полугодовой гармоник внутрigo-

дового цикла локального меридионального тепломассопереноса приходится ~40% дисперсии исходного ряда.

Уточнены средние значения амплитуд синоптических вариаций V и T : для верхнего (~800 м) слоя они составляют 10 – 20 см/с и 0,7 – 1°C, для промежуточного (1000 – 2000 м) слоя 5 – 7 см/с и менее 0,5°C, для глубинного (2500 – 5000 м) слоя 2 – 5 см/с и менее 0,2°C.

Синоптические флуктуации с периодами 3 – 30 и 51 – 135 сут обуславливают до 50 – 60% суммарной изменчивости гидротермодинамических параметров в верхнем 2000-метровом слое. Вклад изменчивости на промежуточных частотах (31 – 50 сут) в суммарную дисперсию не превышает 10%.

Установлено, что основной вклад в перенос тепла в районе 26° с. ш. Субтропической Атлантики вносит квазистационарная меридиональная циркуляция (~95%). Приблизительно 5% интегрального МПТ связано с нестационарными эффектами. Вклад вихревых переносов тепла в западном погранслое Субтропической Атлантики может достигать 10% интегрального МПТ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (15-05-02019А) «Меридиональный перенос тепла в Тропической и Субтропической Атлантике: роль различных механизмов и низкочастотная изменчивость».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. – Киев: Наук. думка, 2008. – 184 с.
2. *Hastenrath S.* Heat budget of ocean // *J. Phys. Oceanogr.* – 1980. – 10, № 2. – P. 159 – 170.
3. *Bryden H.L., Johns W.E., Saunders P.M.* Deep Western Boundary Current east off Abaco: Mean structure and transport // *J. Mar. Res.* – 2005. – 53, № 1. – P. 35 – 57.
4. *Cunningham S.A., Kanzow T., Rayner D.* Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 25.5°N // *Science.* – 2007. – 317. – P. 935 – 938.
5. *Lee T.N., Johns W.E., Zantop R.J. et al.* Moored observations of Western Boundary Current variability and termohaline circulation at 26.5° N in the Subtropical North Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.* – 1996. – 26. – P. 962 – 983.
6. *Baehr J., Hirschi J., Beismann J.-O. et al.* Monitoring the meridional overturning circulation in the North Atlantic: A model-based array design study // *J. Mar. Res.* – 2004. – 62. – P. 283 – 312.
7. *Гидрофизика Тропической Атлантики.* – Киев: Наук. думка, 1993. – С. 35 – 48.
8. *Kanzow T., Cunningham S.A., Johns W.E. et al.* Seasonal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N // *J. Climate.* – 2010. – 23. – P. 5678 – 5698.
9. *Michael A., Scott A.* Surface flux variability over the North Pacific and North Atlantic oceans // *Ibid.* – 1997. – 10. – P. 2963 – 2978.
10. *Полонский А.Б.* Горизонтально-неоднородный деятельный слой океана и его моделирование. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1989. – 233 с.
11. *Jayne S.R., Marotzke J.* The oceanic eddy heat transport // *J. Phys. Oceanogr.* – 2002. – 32. – P. 3328 – 3345.
12. *Lozier M.S.* Deconstructing the Conveyor Belt // *Science.* – 2010. – 238. – P. 1507 – 1511.
13. *Johns W.E., Baringer M.O., Beal L.M. et al.* Continuous, array-based estimates of Atlantic ocean heat transport at 26.5°N // *J. Climate.* – 2011. – 24. – P. 2429 – 2449.
14. *Hall M.M., Bryden H.L.* Direct estimates and mechanisms of ocean heat transport // *Deep-Sea Res.* – 1982. – 29, № 3A. – P. 339 – 359.

15. *Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б.* Оценка океанического меридионального переноса тепла в Субтропической Атлантике // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 1. – С. 3 – 15.
16. *Johns W.E., Beal L.M., Baringer M.O. et al.* Variability of Shallow and Deep Western Boundary Currents off the Bahamas during 2004–05: Results from the 26° N RAPID–MOC array // J. Phys. Oceanogr. – 2008. – 38, № 4. – P. 605 – 622.
17. *Meinen C.S., Garzoli S.L., Johns W.E. et al.* Transport variability of the Deep Western Boundary Current and the Antilles Current off Abaco Island, Bahamas // Deep-Sea Res. – 2004. – P.I, 51, № 1. – P. 1397 – 1415.
18. *Meinen C.S., Baringer M.O., Garcia R.F.* Florida Current transport variability: An analysis of annual and longer period signals // Ibid. – 2010. – P.I, 57. – P. 835 – 846.
19. *Джиганишин Г.Ф., Крашенинникова С.Б., Полонский А.Б.* Низкочастотная изменчивость Флоридского течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – Вып. 19. – С. 415 – 422.
20. *Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме // Океанология. – 2013. – 53, № 4. – С. 454 – 462.
21. *Fu L.-L., Keffer T., Niller P.P. et al.* Observations of mesoscale variability in the western North Atlantic: A comparative study // J. Mar. Res. – 1982. – 40, № 3. – P. 809 – 849.
22. *Fillenbaum E.R., Lee T.N., Johns W.E. et al.* Meridional heat transport variability at 26.5°N in the North Atlantic // J. Phys. Oceanogr. – 1997. – 27. – P. 153 – 174.
23. *Freeland H.J., Rhines P.B., Rossby H.T.* Statistical observations of the trajectories of neutrally buoyant floats in the North Atlantic // J. Mar. Res. – 1975. – 33. – P. 383 – 404.
24. *Olson D.B., Schott F.A., Zantopp R.J. et al.* The mean circulation east of the Bahamas as determined from a recent measurement program and historical XBT data // J. Phys. Oceanogr. – 1984. – 14. – P. 1470 – 1487.
25. *Riser S.C., Rossby H.T.* Quasi-lagrangian structure and variability of the subtropical western North Atlantic circulation // J. Mar. Res. – 1983. – 41. – P. 127 – 162.
26. *Коротаев Г.К.* Теоретическое моделирование синоптической изменчивости океана. – Киев: Наук. думка, 1988. – 160 с.
27. *Metadata Report for L:\users\bodc\requests\rn88004\rn88004.*
28. *WOCE Global Data. Version 3.0 2002.* WOCE International Project Office // WOCE Report No.180/02. – Southampton, UK.
29. *Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б.* Меридиональный перенос тепла в Северной Атлантике и тенденции его изменений во второй половине XX века // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 1. – С. 45 – 59.
30. *Gunn J.T., Watt D.R.* On the currents and water masses north of the Antilles/Bahamas Arc // J. Mar. Res. – 1982. – 40. – P. 1 – 48.
31. *Wüst G.* Florida and Antillean strom. – Berlin U., Institut für Meereskunde, Veröff. N. F., A. Geogr.-naturwiss, Reihe, Heft 12. – 1924. – 48 p.
32. *Чепурин Г.А.* Влияние вертикального сдвига средних скоростей течений на характеристики синоптической изменчивости в океане // Дис. ... к-та физ.-мат. наук. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1985. – 122 с.
33. *Halliwel G.R., Peng J.J., Olson D.B.* Stability of the Sargasso Sea subtropical frontal zone // J. Phys. Oceanogr. – 1994. – 24. – P. 1166 – 1183.
34. *Fischer J., Schott F.A.* Seasonal transport variability of the Deep Western Boundary Current in the equatorial Atlantic // J. Geophys. Res. – 2012. – 102. – P. 27751 – 27769.
35. *Нелено Б.А., Булгаков Н.П., Тимченко И.Е. и др.* Синоптические вихри в океане. – Киев: Наук. думка, 1980. – 288 с.
36. *Stammer D.* On eddy characteristics, eddy transports, and mean flow properties // J. Phys. Oceanogr. – 1998. – 28. – P. 727 – 739.

37. *Leaman K.D., Molinari R.L., Vertes P.S.* Structure and variability of the Florida Current at 27°N: April 1982 – July 1984 // *Ibid.* – 1987. – 17. – P. 565 – 583.
38. *Wunsch C.* Where do ocean eddy heat fluxes matter? // *J. Geophys. Res.* – 1999. – 104. – P. 13235 – 13249.

Variability of current vertical structure in the western Subtropical Atlantic and meridional heat transport

A.B. Polonsky, S.B. Krasheninnikova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: apolonsky5@mail.ru, svetlanabk@mail.ru

Based on *WOCE* (1988 – 1993) and *RAPID* (2004 – 2006) instrumental data, seasonal and synoptic variability of the currents' vertical structure in the western part of the Northern subtropical anticyclonic gyre (NSAG) is analyzed and its contribution to formation of the meridional heat transport is defined. Maximum of the seasonal cycle annual harmonic is observed in summer – autumn and its minimum – in winter – spring. The secondary maximums are revealed in late spring and mid autumn. Approximately 40% of total variability of the currents' field falls on the superposition of annual and semiannual harmonics. Synoptic fluctuations with the periods 3 – 30 and 51 – 135 days condition a substantial portion (up to 50 – 60%) of hydrothermodynamic parameters' variability in the upper and intermediate layers. A portion of variability with the period 31 – 50 days does not exceed 10% of total variability. Influence of synoptic-scale vortex transports on the meridional thermohaline circulation and the associated meridional heat transport is most significant in the thermocline. With the seasonal variations taken into account, contribution of synoptic vortices to the integral heat transport in the western part of NSAG (in vicinity of 26° N) estimated by the *RAPID* instrumental data does not exceed 5%.

Keywords: seasonal and synoptic variability of currents', meridional heat transport, *RAPID* and *WOCE* instrumental data, Subtropical Atlantic.