DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-11-27 УДК 504.423

ВНУТРИГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ БЮДЖЕТА ТЕПЛА ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ ОКЕАНА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

А. Б. Полонский, П. А. Сухонос

Институт природно-технических систем,
Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28; *apolonsky5@mail.ru*, *pasukhonis@mail.ru*

Резюме. Проанализированы физические механизмы, обуславливающие внутригодовые изменения температуры верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) океана в Северной Атлантике по данным реанализа ORA-S3 за период 1959–2011 гг. Показано, что на рассматриваемом пространственном масштабе в целом важны все компоненты бюджета тепла ВКС. Вместе с тем, существуют ярко выраженные региональные особенности в формировании сезонного хода температуры ВКС. Внутригодовой бюджет тепла в ВКС в средних и высоких широтах обусловлен главным образом балансом локального изменения температуры ВКС, тепловых потоков на границе океан-атмосфера и горизонтального перемешивания (оцененного как остаточное слагаемое в уравнении баланса тепла). Подтверждено, что горизонтальная адвекция тепла вносит основной вклад во внутригодовую изменчивость температуры ВКС в окрестности интенсивных струйных течений. Сезонная изменчивость вертикальной адвекции тепла наиболее интенсивна в тропических широтах. Тепловые потоки на нижней границе ВКС в целом по акватории не оказывают значительного влияния на изменение температуры ВКС. Исключение составляют небольшие по площади области (например, в районе формирования североатлантической глубинной водной массы), где турбулентное вовлечение может обуславливать более трети изменений температуры ВКС. Отмечаются значительные внутригодовые флуктуации всех компонент бюджета тепла ВКС и зависимость баланса тепла в ВКС от масштаба пространственного осреднения.

Ключевые слова. Бюджет тепла, верхний слой океана, внутригодовая изменчивость, температура, верхний квазиоднородный слой, Северная Атлантика.

INTRA-ANNUAL VARIABILITY OF THE HEAT BUDGET OF THE UPPER MIXED OCEAN LAYER IN THE NORTH ATLANTIC

A. B. Polonsky, P. A. Sukhonos

Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenina st., Sevastopol, 299011, Russia; *apolonsky5@mail.ru, pasukhonis@mail.ru*

Summary. Physical mechanisms responsible for seasonal changes of the upper mixed layer (UML) temperature in the North Atlantic are analyzed using data of re-analysis ORA-S3 for the period 1959–2011. It is found that all components of

the UML heat budget are essential on the considered spatial scale. However, there are pronounced regional features in the formation of seasonal UML temperature variations. The intra-annual heat budget in the middle and high latitudes is jointly determined mainly by local UML temperature changes, heat fluxes at the ocean-atmosphere interface, and horizontal mixing (estimated as a residual term in the heat balance). More evidence is found of the dominant role of horizontal heat advection in variability of the intra-annual UML temperature in the vicinity of intense jet currents. Seasonal variations of vertical heat advection are highest in the tropics. Heat fluxes at the lower boundary of the UML do not significantly influence UML temperature variations over most of the basin with some exceptions. At some small areas (for example, in the vicinity of the North Atlantic deep water formation), the turbulent entrainment may explain more than one third of UML temperature variations. Significant seasonal fluctuations of the UML heat budget components and the dependence of UML heat balance on the scale of spatial averaging are noted.

Keywords. Heat budget, ocean upper layer, intra-annual variability, temperature, upper mixed layer, North Atlantic.

Введение

Океан играет ключевую роль в формировании и изменчивости климатической системы (см., например, (Bjerknes, 1964; Монин, 1982)). Эта роль далеко не ограничивается простейшим механизмом, связанным с большой теплоемкостью вод Мирового океана по сравнению с атмосферным воздухом. Хорошо известно, что океан является активной частью климатической системы и навязывает ей определенные пространственно-временные масштабы изменчивости за счет адвекции тепла, турбулентного перемешивания и других процессов, изменяющих температуру верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и характеристики теплообмена океана с атмосферой (Полонский, 2008). Внутригодовой ход характеристик ВКС вносит основной вклад в суммарную их изменчивость на большей части акватории Мирового океана. Доля сезонной изменчивости гидрофизических характеристик ВКС в их общей изменчивости существенно превышает 50 % на большей части акватории Северной Атлантики (Gill, Niiler, 1973). Поэтому уточнение параметров внутригодового хода гидрофизических характеристик ВКС и механизмов изменчивости ВКС на сезонном масштабе особенно актуально.

Анализ внутригодовых изменений баланса тепла, как для всего Северного полушария (Oort, von der Haar, 1976), так и для Северной Атлантики (Gill, Niiler, 1973), показал, что для крупномасштабных процессов (с типичными пространственными масштабами 500×500 км и более) в бюджете тепла верхних слоев океана доминируют локальные изменения температуры, определяемые потоками тепла на поверхности. При этом вклад адвекции тепла течениями и процессов горизонтального перемешивания в целом незначителен. Модельные исследования, проведенные в рамках моделей с низким пространственным разрешением (например, (Sarmiento, 1986; Jones, Leach, 1999)) подтверждают, что сезонные изменения баланса тепла в субтропическом и субполярном круговоротах практически полностью обусловлены по-

верхностными потоками тепла. В работе (Umoh, Thompson, 1994) показано, что внутригодовые вариации суммарных поверхностных потоков тепла в северо-западной части Северной Атлантики (40–48° с. ш. 55–68° з. д.) на 85% определяют локальные изменения температуры ВКС.

Более поздние исследования, выполненные с использованием данных с лучшим пространственным разрешением, показали важность и других механизмов, регулирующих сезонный ход температуры ВКС. Так авторы работы (Wells et al., 2009) сделали вывод о том, что адвекция тепла и горизонтальное перемешивание также вносят существенный вклад во внутригодовой бюджет тепла ВКС к северу от 20° с. ш. Анализ сезонных изменений теплозапаса ВКС в Исландском бассейне (50–60° с. ш., 15–25° з. д.), выполненный по данным буев Арго, показал, что они определяются не только флуктуациями тепловых потоков на поверхности океана, но и адвекцией и диффузией (de Boisséson et al., 2010). Результаты статьи (Dong, Kelly, 2004) подтверждают, что суммарные поверхностные потоки тепла в значительной степени обуславливают внутригодовые вариации бюджета тепла ВКС. Вместе с тем они указывают на то, что океаническая адвекция тепла играет важную роль в сезонных изменениях баланса тепла ВКС, особенно в области Гольфстрима.

Тропические широты играют особую роль в тепловом балансе на внутригодовом масштабе. Здесь отмечаются самые большие сезонные флуктуации океанического переноса тепла (Gill, Niiler, 1973; Oort, von der Haar, 1976). Причем, как показано в работе (Philander, Pacanowski, 1986), в летний сезон термоклин в тропических широтах заглубляется и накапливает тепло, которое затем зимой распространяется на север за счет адвекции. Авторы статьи (Sukhovey, Camara, 1995) подчеркивают важную роль внутригодовых вариаций термической адвекции в балансе тепла в тропической Атлантике. Вместе с тем авторами работы (Foltz et al., 2013) получено, что поверхностные тепловые потоки и вертикальное турбулентное перемешивание (оцененное как остаточное слагаемое в уравнении теплового баланса) в основном определяют сезонные изменения температуры ВКС в северо-восточной части тропической Атлантики.

Причины внутригодового цикла температуры поверхности океана (ТПО) в экваториальной Атлантике исследовались, как по данным наблюдений, так и с применением моделирования. В ряде работ показано, что интенсивный нагрев ВКС во внутригодовом цикле происходит за счет атмосферных потоков тепла. Вертикальная адвекция тепла и турбулентное вовлечение на нижней границе ВКС понижают ТПО. При этом вклад горизонтальной адвекции тепла в бюджет тепла ВКС на сезонном масштабе также значителен. Авторы работ (Hastenrath, 1977; Merle, 1980) показали, что горизонтальная и вертикальная адвекция тепла в верхнем слое океана необходимы, чтобы сбалансировать внутригодовой ход суммарных поверхностных потоков тепла в экваториальной части Атлантики. В статье (Molinari et al., 1985) указывается на важную роль процессов турбулентного перемешивания на нижней границе ВКС в наблюдаемой изменчивости температуры ВКС у экватора (в дополнение к зональной и меридиональной адвекции тепла). В работе (Weingartner,

Weisberg, 1991) показано, что сезонные изменения ТПО в экваториальной Атлантике наиболее тесно связаны с динамикой океана в те периоды, когда происходит крупномасштабное приспособление глубины залегания термоклина к сезонным изменениям касательного напряжения трения ветра — либо непосредственно за счет адвективных потоков тепла (весной и летом Северного полушария), либо косвенно через заглубление ВКС в горизонтально-неоднородном океане (в зимний период). Авторы статьи (Jouanno et al., 2011) утверждают, что прямая связь между заглублением термоклина и охлаждением ВКС отсутствует. По их мнению, охлаждение экваториального ВКС во внутригодовом цикле обусловлено сезонной изменчивостью поверхностных течений. Анализ внутригодовых флуктуаций бюджета тепла восточной части экваториальной Атлантики по данным буев Арго выявил существенную роль суммарных потоков тепла на поверхности и вертикального турбулентного перемешивания (оцененного как остаточное слагаемое в уравнении теплового баланса) (Wade et al., 2011). При этом авторы указывают на важную роль горизонтальной адвекции тепла в сезонных изменениях температуры ВКС и незначительность вклада турбулентного вовлечения.

Модельные исследования с невысоким пространственным разрешением (Xie, 1994; Li, Philander, 1997; DeWitt, Schneider, 1999) показали важность прямого локального термического отклика на экваторе на поверхностные тепловые потоки в установлении внутригодового цикла ТПО. Эксперименты с использованием вихреразрешающей модели общей циркуляции океана, проведенные авторами работы (Peter et al., 2006), показали, что горизонтальная адвекция тепла для относительно низкочастотных процессов (с периодами >35 суток) играет второстепенную роль в тепловом балансе ВКС на экваторе. Анализ данных прямых наблюдений, проведенный в работе (Foltz et al., 2003), выявил, что в балансе тепла в области экватора вклад скрытых потоков тепла уменьшается, а горизонтальной адвекции тепла и турбулентного вовлечения увеличивается. Вместе с тем, эти авторы отмечают, что внутригодовая изменчивость ТПО в основном обусловлена вариациями коротковолновой радиации. В тоже время, в статье (Yu et al., 2006) подчеркивается, что в полосе широт 0–10° с. ш. именно океанические процессы в основном вызывают внутригодовые изменения ТПО.

Таким образом, относительная важность составляющих теплового баланса ВКС на внутригодовом масштабе в разных регионах Северной Атлантики все ещё остается предметом широкой дискуссии. Причем вклад тех или иных компонент бюджета тепла зависит от масштаба пространственного осреднения. В настоящей работе с целью уточнения физических механизмов, определяющих внутригодовую изменчивость температуры ВКС в Северной Атлантике, проводится анализ уравнения теплового баланса ВКС по однородным и длительным массивам данных ре-анализов.

Данные и методика их обработки

В работе использованы среднемесячные данные о температуре верхнего слоя океана, зональной, меридиональной и вертикальной компонентах век-

тора течений и толщине ВКС за период 1959–2011 гг. из океанического реанализа *ORA-S*3 (Balmaseda et al., 2008). Для расчета толщины ВКС в модели реанализа применяется схема, основанная на полуэмпирической теории турбулентности. Суть используемой схемы заключается в вычислении числа Ричардсона по Pacanowski, Philander (1981). Толщина ВКС принимается равной глубине, на которой число Ричардсона достигает критического значения. Для случаев неустойчивой стратификации в модели применяется конвективное приспособление (Wolff et al., 1997). Кроме этого, в работе использованы данные о суммарных потоках тепла на поверхности океана по акватории Северной Атлантики, взятые из массива атмосферного реанализа *ERA*-40 (Uppala et al., 2005) за период с января 1959 г. по июнь 2002 г. и оперативного анализа по модели *ERA*-40 за период с июля 2002 г. по декабрь 2011 г. Потоки тепла из атмосферного реанализа и оперативного анализа *ERA*-40 используются в качестве граничных условий в модели океанического реанализа *ORA-S*3. Пространственное разрешение океанической модели составляет 1 × 1°, а в экваториальной зоне (±10° широты) — 0.3° в меридиональном направлении и 1° в зональном.

Уравнение теплового баланса ВКС в предположении о вертикальной однородности температуры в нем имеет следующий вид:

$$T_t + UT_x + VT_y + \frac{(WT)|_{-H}}{H} = \frac{Q_0}{\rho_0 C_P H} - \frac{Q_{-H}}{\rho_0 C_P H} + R. \qquad (1)$$

Здесь ρ_0 — плотность морской воды в ВКС, C_P — теплоемкость морской воды при постоянном давлении, H и T — толщина и температура ВКС. Ось x направлена на восток, ось y — на север, а ось z — вертикально вверх. Начало системы координат находится на невозмущенной поверхности океана.

В этом уравнении T_t представляет собой локальное изменение температуры ВКС; UT_x и VT_y — зональная и меридиональная адвекция тепла, соответственно; $(WT)_{-H}/H$ — вертикальная адвекция тепла. Средние в пределах перемешанного слоя скорости обозначаются как U и V (в зональном и меридиональном направлении, соответственно). T_x и T_y — зональный и меридиональный градиенты температуры ВКС. Первые два слагаемых в правой части уравнения характеризуют тепловые потоки на верхней (Q_0) и нижней (Q_{-H}) границах ВКС. Поток тепла на нижней границе ВКС Q_{-H} зависит от скорости заглубления ВКС, скачка температуры и скорости вертикальных движений у его основания и оценивается из обобщенного на случай горизонтально-неоднородного океана соотношения Крауса — Тернера (Моделирование и прогноз …, 1979):

$$Q_{-H} = \begin{cases} \rho_0 C_P \left(T_0 - T_{-H}\right) \cdot \left(\dfrac{DH}{Dt} + W_{-H}\right) & \text{при} \quad \left(\dfrac{DH}{Dt} + W_{-H}\right) < 0 \\ 0 \quad \text{при} \quad \left(\dfrac{DH}{Dt} + W_{-H}\right) \geq 0 \end{cases}. \qquad (2)$$

Здесь DH/Dt — скорость турбулентного вовлечения; (T_0 — T_{-H}) и W_{-H} — перепады температуры в слое скачка и вертикальная скорость у нижней границы ВКС. Скорость турбулентного вовлечения рассчитывалась по ежемесячным величинам глубины залегания нижней границы ВКС. Под величиной

перепада температуры в слое турбулентного вовлечения понималась разница между температурой воды на горизонтах, прилегающих к горизонту, совпадающему с глубиной залегания нижней границы ВКС. Здесь следует отметить, что при расчете величины перепада температуры в слое скачка возникает погрешность из-за различной толщины ВКС в разных районах Северной Атлантики и неравномерной дискретности сетки по вертикали. Однако оценка величины этой погрешности показала, что их влияние на результаты незначительно. Она не превышает погрешность расчета скорости вовлечения, возникающей вследствие грубости временного разрешения использованных данных, особенно в регионах с интенсивной зимней конвекцией. Вертикальная скорость в слое турбулентного вовлечения — это вертикальная скорость течений на горизонте, соответствующем нижней границе ВКС. В целом точность оценки потоков тепла на нижней границе ВКС невелика. Однако из-за незначительности вклада этого слагаемого в общий бюджет тепла ВКС на подавляющей части акватории Северной Атлантики (см. ниже) погрешность его оценки непринципиальна.

R представляет собой остаточное слагаемое, характеризующее горизонтальное турбулентное перемешивание, при условии замкнутости баланса тепла. Оно содержит в себе также погрешности расчетов, включая ошибку конечно-разностной аппроксимации. Последняя рассчитывалась апостериорно с помощью оценки остаточных членов ряда Тейлора в разложении поля температуры, определяющих погрешность использованной конечно-разностной аппроксимации, и оказалась порядка 10 %.

Все перечисленные слагаемые оценивались непосредственно по данным ре-анализов для каждого месяца за период 1959–2011 гг. Далее в каждом узле пространственной сетки рассчитывались средняя величина и её среднее квадратическое отклонение для каждого месяца года за весь исследуемый период. После этого определялся вклад каждого слагаемого в суммарный тепловой бюджет в срединные месяцы зимнего и летнего сезонов — январь и июль. Значимость коэффициента корреляции определялась по *t*-критерию Стьюдента.

Анализ результатов

Вклад внутригодового хода в общую изменчивость гидротермодинамических характеристик ВКС в Северной Атлантике

Анализ вклада внутригодового хода характеристик ВКС и тепловых потоков на верхней его границе в суммарную их изменчивость показал следующее. Общая изменчивость температуры ВКС в Северной Атлантике на масштабах от внутри-сезонного до меж-десятилетнего в основном обусловлена ее внутригодовым ходом (рис. 1а). В средних широтах вклад сезонного хода температуры ВКС в ее полное изменение превышает 90 %. Вместе с тем в полосе широт 0–10° с. ш. вклад внутригодового хода температуры ВКС в суммарную изменчивость температуры снижается до 35 % и меньше.

Максимальные вклады внутригодового хода скорости течений в ВКС в их суммарную изменчивость наблюдаются в тропической Атлантике (рис. 1б).

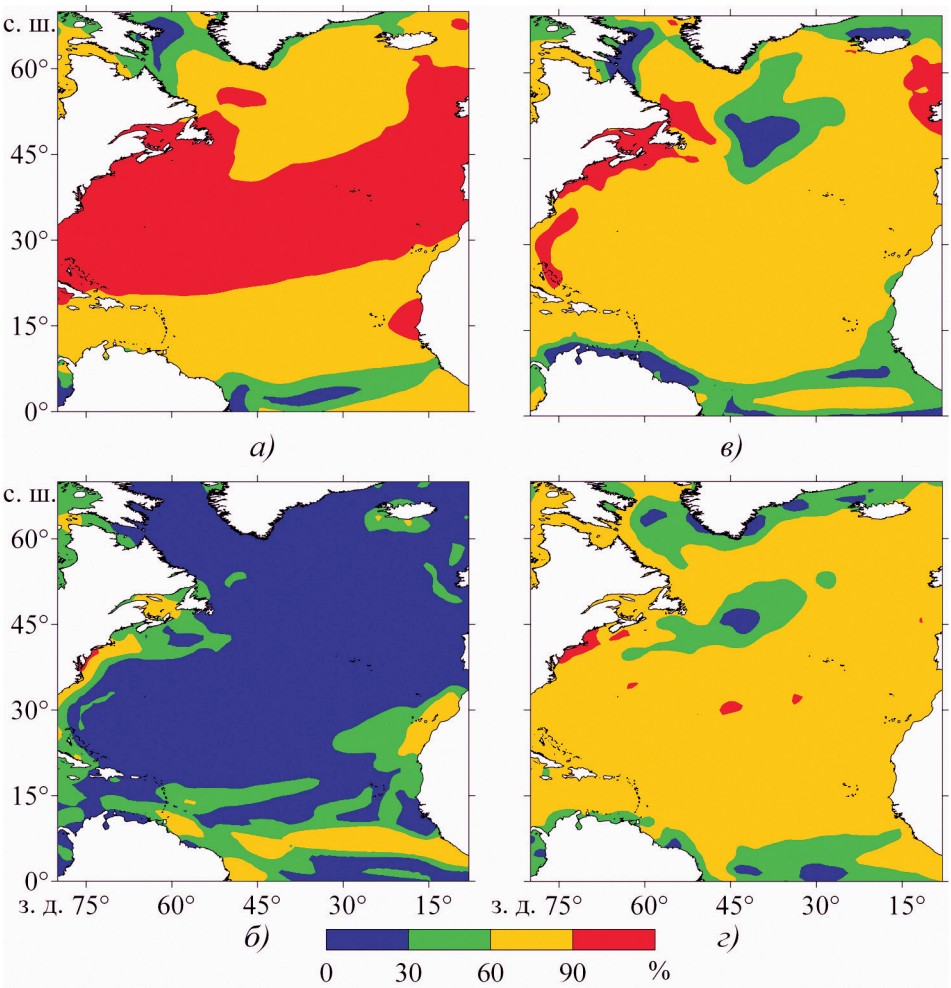

Рисунок 1. Вклад (в %) внутригодового хода в общую дисперсию температуры ВКС (а), скоростей течений (б), толщины ВКС (в) и тепловых потоков на границе океан—атмосфера (г) в Северной Атлантике за 1959–2011 гг.

Это является следствием суперпозиции высокоамплитудного внутригодового хода интенсивности пассатов и наличия муссонного эффекта. В зоне Межпассатного противотечения и Гвианского течения вклад внутригодового хода превышает 70 %, на что указывалось ранее в работе (Артамонов и др., 1993). Севернее 15º с. ш. вклад сезонного хода в общую изменчивость скорости течений ВКС уменьшается до 35 % и менее. Этот результат косвенно согласуется с выводом автора работы (Yang, 1996) о том, что обмен массой между субтропическим и субполярным круговоротами достигает максимума при изменениях вынуждающего поля ветра на межгодовых-десятилетних масштабах. Отметим вместе с тем, что в районе Гольфстрима и в области Канарского течения вклад внутригодовой изменчивости скорости течений ВКС в ее полную изменчивость может достигать 70 % (рис. 1б).

Вклад внутригодового хода в суммарную изменчивость толщины ВКС превышает 70 % на большей части акватории Северной Атлантики (рис. 1в).

В области Гольфстрима и Лабрадорского течения он достигает 90%. В тропических широтах, окрестности Гвианского течения и внутренней части субполярного круговорота доля сезонных флуктуаций толщины ВКС в общей ее изменчивости составляет менее 35%.

Внутригодовая изменчивость суммарных потоков тепла на границе океан-атмосфера обуславливает свыше 70% их общей изменчивости севернее 10° с. ш. (рис. 1г). В области Гольфстрима (до его отрыва от континентального склона) вклад сезонных вариаций тепловых потоков в общую изменчивость превышает 90%, а в области перехода Гольфстрима в Северо-Атлантическое течение этот вклад уменьшается до 35%. В центральной части экваториальной зоны и у побережья Гренландии вклад внутригодового хода тепловых потоков в их общую изменчивость также уменьшается до 35%.

Таким образом, подтверждается, что внутригодовой ход является наиболее ярко выраженным климатическим сигналом в ВКС. При этом севернее 10° с. ш. свыше 2/3 общей изменчивости потоков тепла на поверхности океана, температуры и толщины ВКС реализуется на внутригодовом масштабе. Сезонная изменчивость скорости течений ВКС ярко выражена лишь в тропических широтах, окрестности Гольфстрима и Канарского течения. Севернее 15º с. ш. в общей изменчивости скорости течений ВКС доминируют межгодовые изменения.

Рассмотрим далее, как основные компоненты бюджета тепла ВКС сбалансированы между собой на внутригодовом масштабе по акватории Северной Атлантики.

Оценка вкладов слагаемых во внутригодовой баланс тепла в ВКС

Рассмотрим вначале относительный вклад различных слагаемых в левой части уравнения (1).

На внутригодовом масштабе баланс тепла ВКС не является квазистационарным. Величина локального изменения температуры ВКС соизмерима с другими компонентами бюджета тепла ВКС. При этом она испытывает значительные внутригодовые флуктуации (рис. 2а, г). В январе вклад локального изменения температуры в полное изменение температуры ВКС севернее 20° с. ш. превышает 35%, а в зоне рециркуляции Гольфстрима, восточной части Северной Атлантики и внутренней части субполярного круговорота его вклад превышает 70%. Вместе с тем в июле вклад локального изменения температуры в полное изменение температуры ВКС превышает 35% севернее 30° с. ш. При этом на южной границе субтропического круговорота его вклад может достигать 90%, а в Лабрадорском течении — 70%.

По акватории Северной Атлантики горизонтальная адвекция тепла достигает наибольшей величины в Гольфстриме, Восточно-Гренландском и Лабрадорском течениях. Вклад горизонтальной адвекции в бюджет тепла ВКС на внутригодовом масштабе значителен в окрестности интенсивных струйных течений, на что ранее указывалось в работе (Dong, Kelly, 2004). При этом его величина испытывает значительные внутригодовые изменения, обусловленные сезонным ходом как интенсивности скорости течений, так

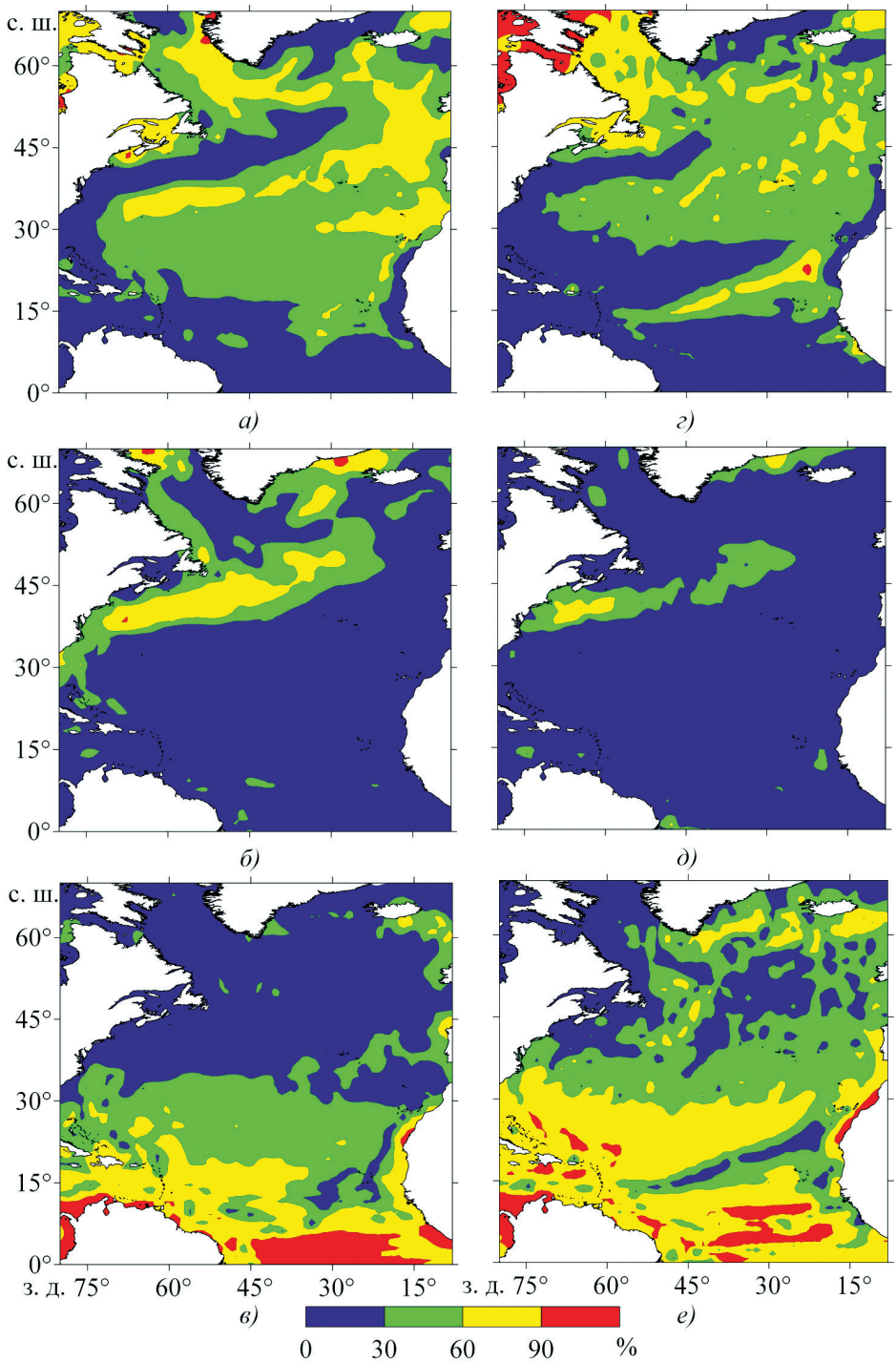

Рисунок 2. Относительный вклад (в %) составляющих левой части уравнения теплового баланса ВКС в общее изменение температуры ВКС по акватории Северной Атлантики: локального изменения температуры ВКС (а, г), горизонтальной (б, д) и вертикальной (в, е) адвекции тепла для января (а, б, в) и июля (г, д, е).

и горизонтальных градиентов температуры. В январе вклад горизонтальной адвекции тепла в полное изменение температуры ВКС достигает 90% в окрестности Гольфстрима и Восточно-Гренландского течения, а в Северо-Атлантическом и Лабрадорском течениях вклад этого слагаемого превышает 35% (рис. 2б). В июле же вклад горизонтальной адвекции тепла в полное изменение температуры ВКС в этих течениях меньше, по сравнению с январем, но превышает 70% в окрестности Гольфстрима и Восточно-Гренландского течения, а в Лабрадорском течении не достигает даже 35% (рис. 2д).

Вертикальная адвекция тепла вносит значительный вклад в баланс тепла ВКС на внутригодовом масштабе. В январе её вклад в полное изменение температуры ВКС в области экваториального и западно-африканского апвеллингов превышает 90%, а в области Гвианского течения достигает 70%. При этом севернее 35° с. ш. вклад вертикальной адвекции тепла составляет менее 35%, за исключением окрестности Португальского апвеллинга (рис. 2в). В июле вклад вертикальной адвекции тепла в полное изменение температуры ВКС составляет более 90% в окрестности западно-африканского апвеллинга и северной части Экваториальной Атлантики (5–10° с. ш.) и достигает 70% во внутренней части субтропического и субполярного круговоротов (рис. 2е). На остальной части акватории в целом её вклад в полное изменение температуры ВКС около 35%. При этом на южной границе субтропического круговорота вклад вертикальной адвекции тепла уменьшается до величин менее 35%.

Таким образом, на внутригодовом масштабе основной вклад в полное изменение температуры ВКС в средних и высоких широтах вносит локальное изменение температуры ВКС, в окрестности интенсивных струйных течений — горизонтальная адвекция, а в тропических широтах — вертикальная адвекция тепла. При этом отмечаются значительные изменения величин слагаемых баланса тепла ВКС от одного сезона к другому.

Перейдем к анализу внутригодовых изменений слагаемых баланса тепла ВКС в правой части уравнения (1).

Вклад суммарных поверхностных потоков тепла Q_0, нормированных на $\rho_0 C_P H$, в полное изменение температуры ВКС сильно флуктуирует на внутригодовом масштабе. В январе радиационный прогрев океана минимален и суммарный поток тепла направлен в атмосферу. Величина вклада этого слагаемого превышает 35% в районе Западно-африканского апвеллинга и системе Гольфстрим — Северо-Атлантическое течение, достигая 70% в окрестности Северо-Атлантического течения (рис. 3а). В июле вклад тепловых потоков Q_0, нормированных на $\rho_0 C_P H$, севернее 15° с. ш. превышает 35%, достигая 70% во внутренней области субтропического круговорота (рис. 3г).

Влияние тепловых потоков на нижней границе ВКС Q_{-H}, нормированных на $\rho_0 C_P H$, на полное изменение температуры ВКС в целом по акватории Северной Атлантики для рассматриваемых в настоящей работе пространственно-временных масштабов невелико по сравнению с другими процессами. Однако вклад турбулентного вовлечения может превышать 35% в области глубокой конвекции в море Лабрадор в январе и в центральной части тропической Атлантики в июле (рис. 3б, д).

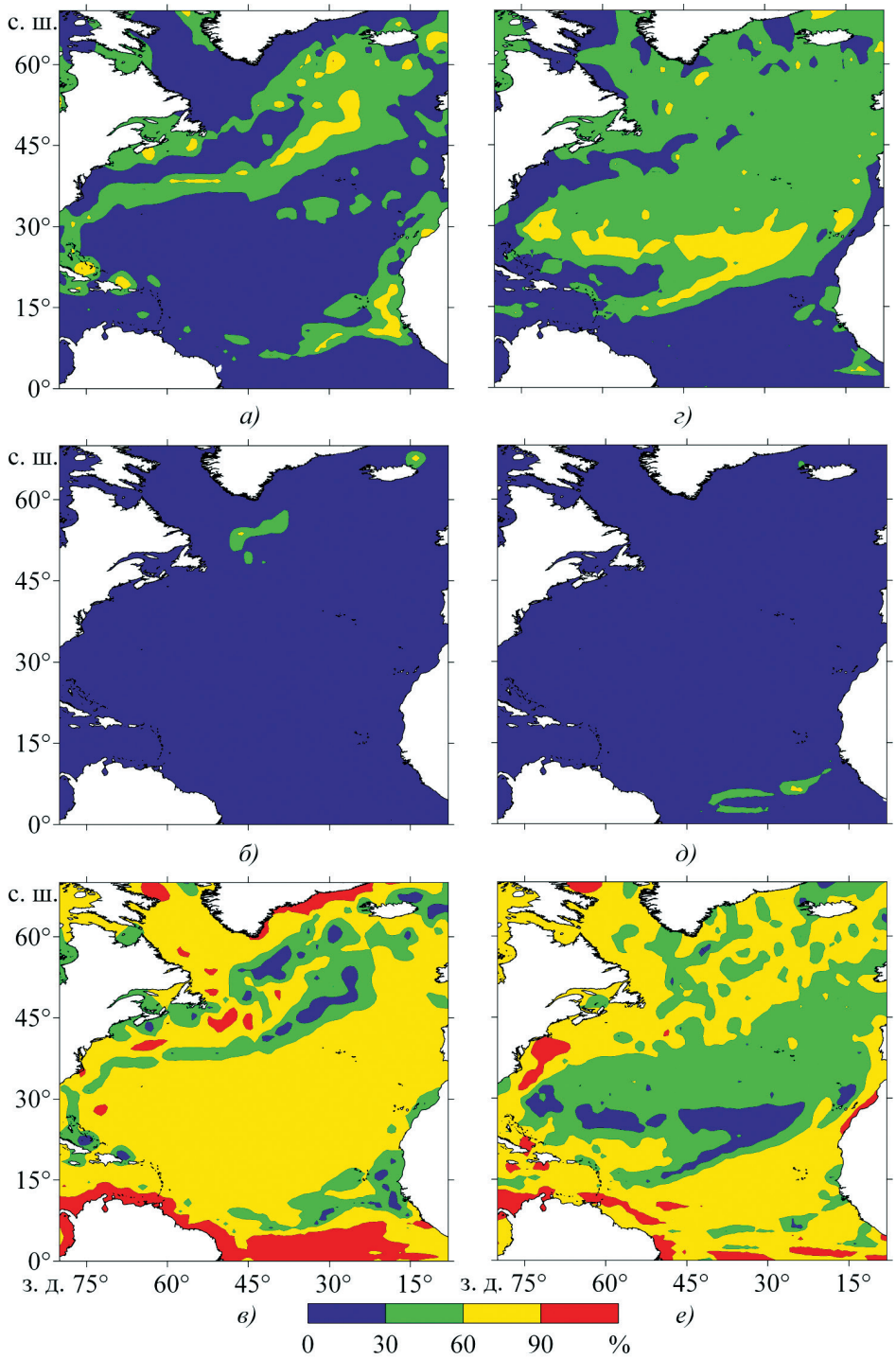

Рисунок 3. Относительный вклад (в %) составляющих правой части уравнения теплового баланса ВКС в общее изменение температуры ВКС по акватории Северной Атлантики: тепловых потоков на границе океан–атмосфера (а, г), тепловых потоков на нижней границе ВКС (б, д) и горизонтального перемешивания (в, е) для января (а, б, в) и июля (г, д, е)

Анализ вклада горизонтального перемешивания в полное изменение температуры ВКС показал, что он больше в январе, чем в июле. При этом в экваториальной зоне и области Гольфстрима вклад этого слагаемого в январе и июле превышает 90 %, а в области Восточно-Гренландского течения достигает 90 % только в январе (рис. 3в, е). Вклад горизонтального перемешивания составляет менее 35 % в окрестности Западно-Африканского апвеллинга и Северо-Атлантического течения в январе и в центральной части субтропического круговорота в июле, на что ранее указывалось в работе (Wells et al., 2009). При этом авторы отметили, что незначительный вклад горизонтального перемешивания в бюджет тепла в восточной части субтропической Атлантики обусловлен низкими величинами горизонтальных градиентов температуры в этой области.

Таким образом, на внутригодовом масштабе основной вклад в полное изменение температуры ВКС в средних и высоких широтах принадлежит тепловым потокам на границе океан-атмосфера и горизонтальному перемешиванию, а в окрестности струйных течений типа Гольфстрима, горизонтальной адвекции. Тепловые потоки на нижней границе ВКС в целом по акватории не оказывают значительного влияния на изменение температуры ВКС, но есть области, где турбулентное вовлечение может обуславливать более трети изменений температуры ВКС.

Внутригодовая изменчивость зонально-осредненных значений локального изменения температуры ВКС и тепловых потоков на поверхности

Анализ внутригодовых изменений зонально-осредненных компонент бюджета тепла ВКС в Северной Атлантике показал, что при таком масштабе пространственного осреднения локальное изменение температуры ВКС в основном балансируется суммарными потоками тепла на поверхности океана (напомним, что положительные величины тепловых потоков на поверхности океана, означают отток тепла в атмосферу). Внутригодовые флуктуации зонально-осредненных значений меридиональной адвекции тепла почти на всей акватории Северной Атлантики малы по величине и имеют знакопеременный характер. Зонально-осредненные величины вертикальной адвекции тепла высоки в области экватора, севернее их величина мала и знакопеременна.

На рис. 4а, б показан внутригодовой ход зонально-осредненных значений локального изменения температуры ВКС и суммарных потоков тепла на поверхности океана по акватории Северной Атлантики, а на рис. 4в меридиональное распределение величины коэффициентов корреляции между этими рядами. Отметим, что величины коэффициентов корреляции более 0.72 значимы на 99 % доверительном уровне, а 0.58 — на уровне 95 %.

Высокие отрицательные значения коэффициентов корреляции указывают на наличие прямой связи между этими компонентами бюджета тепла на всех широтах, кроме региона, расположенного севернее 65° с. ш., где важна меридиональная адвекция (см. рис. 2б, д), и экваториальной зоны, включая окрестность Межпассатного противотечения между 3–10° с. ш., где важ-

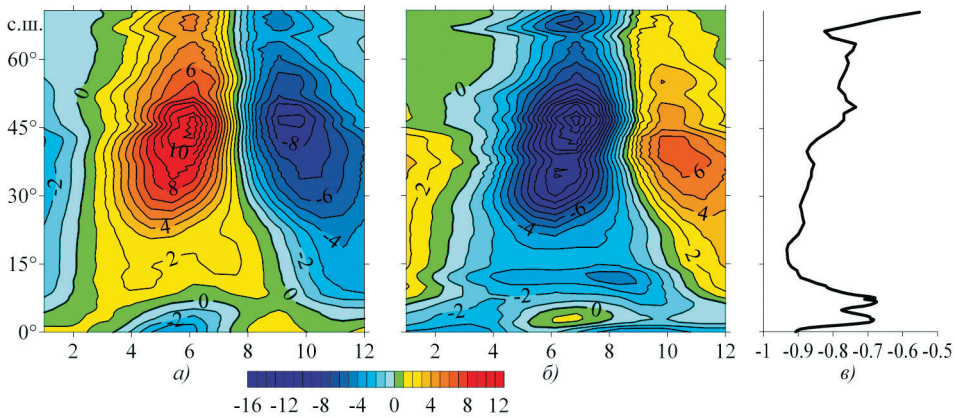

Рисунок 4. Внутригодовая изменчивость зонально-осредненных значений локального изменения температуры ВКС (а), тепловых потоков на границе океан—атмосфера (б) в Северной Атлантике (×10–7 °С/сек), а также коэффициенты корреляции между ними (в).

ны вертикальная адвекция (рис. 2в, е) и горизонтальная диффузия тепла (рис. 3в, е). Полученный результат не противоречит классическим представлениям о внутригодовых изменениях баланса тепла, справедливым для крупномасштабных процессов (Oort, von der Haar, 1976; Gill, Niiler 1973). Зонально-осредненные величины тепловых потоков согласуются с данными авторов работы (Jones, Leach, 1999), представленными в их статье на рис. 12. К северу от узкой экваториальной зоны хорошо выражено внутригодовое чередование областей с положительными и отрицательными величинами. При этом в летние месяцы отмечается интенсивный нагрев ВКС за счет притока тепла из атмосферы, а в зимние месяцы, наоборот, ВКС охлаждается за счет отдачи тепла в атмосферу.

Таким образом, внутригодовые изменения зонально-осредненных величин локального изменения температуры ВКС с достаточной степенью точности балансируются внутригодовыми флуктуациями тепловых потоков на поверхности океана. При уменьшении пространственных масштабов осреднения начинают разрешаться такие циркуляционные особенности, как стрежни интенсивных течений, где важны адвективные слагаемые и горизонтальное перемешивание, и области поднятия/опускания вод с большими величинами вертикальной адвекции. Это приводит к нарушению простого локального баланса между сезонными вариациями температуры ВКС и потоков тепла на границе раздела океана с атмосферой.

Заключение

Анализ относительной роли составляющих баланса тепла ВКС на внутригодовом масштабе по акватории Северной Атлантики позволяет заключить следующее.

В отличие от межгодового-десятилетнего масштаба, баланс тепла ВКС на анализируемом временном масштабе не является квазистационарным. Все компоненты бюджета тепла важны на внутригодовом масштабе. При этом

отмечаются значительные изменения величин слагаемых баланса тепла ВКС от зимы к лету. Вклад локального изменения температуры ВКС в ее полное изменение значителен в средних и высоких широтах. Горизонтальная адвекция тепла вносит существенный вклад в бюджет тепла в окрестности интенсивных струйных течений. Вертикальная адвекция тепла играет важную роль в балансе тепла в тропических широтах.

Основной вклад в полное изменение температуры ВКС в средних и высоких широтах вносят тепловые потоки на границе океан-атмосфера и горизонтальное перемешивание. В экваториальной зоне и области Гольфстрима горизонтальное перемешивание велико в течение всего года. Тепловые потоки на нижней границе ВКС в целом по акватории не вносят значительного вклада в изменение температуры ВКС, за исключением отдельных регионов (например, область глубокой конвекции в Северной Атлантике), где турбулентное вовлечение может обуславливать более трети изменений температуры ВКС.

На внутригодовом масштабе вертикальная адвекция тепла в экваториальной зоне и горизонтальная адвекция тепла в области Гольфстрима сбалансированы горизонтальным перемешиванием в течение всего года. Полное изменение температуры ВКС во внутренней части субтропического круговорота в январе в основном обусловлено локальным изменением температуры ВКС и горизонтальным перемешиванием, а в июле — вертикальной адвекцией тепла и тепловыми потоками на верхней границе ВКС. Во внутренней части субполярного круговорота полное изменение температуры ВКС в январе определяется локальным изменением температуры ВКС, которое в равной степени сбалансировано тепловыми потоками на верхней и нижней границах ВКС и горизонтальным перемешиванием. В июле здесь важны локальное изменение температуры и вертикальная адвекция тепла, которые сбалансированы поверхностными потоками тепла и горизонтальным перемешиванием.

Зонально-осредненные величины компонент бюджета тепла на внутригодовом масштабе в Северной Атлантике характеризуются доминированием локального изменения температуры ВКС, которое скомпенсировано тепловыми потоками на верхней его границе. Адвекция тепла и горизонтальная диффузия в целом вносят малый вклад в бюджет тепла на таком пространственном масштабе, за исключением экваториальной зоны.

Таким образом, влияние тех или иных процессов на баланс тепла ВКС в океане определяется масштабами пространственно-временного осреднения и региональными особенностями.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 15–05–02019).

Благодарность

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за доброжелательную и конструктивную критику первого варианта работы.

Список литературы

Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Полонский А.Б. 1993. Крупномасштабная структура и изменчивость океанографических полей северной части Тропической Атлантики. — В кн.: Гидрофизика Тропической Атлантики. — Киев, Наук. Думка, с. 7–34.

Моделирование и прогноз верхних слоев океана. 1979. / Под ред. Э.Б. Крауса. Пер. с англ./ Л.: Гидрометеоиздат, с. 175–208.

Монин А.С. 1982. Введение в теорию климата. — Л., Гидрометеоиздат, 247 с.

Полонский А.Б. 2008. Роль океана в изменениях климата. — Киев, Наукова думка, 184 с.

Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T. 2008. The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3. Mon. Wea. Rev., vol. 136, No 8, p. 3018–3034, doi: 10.1175/2008MWR2433.1.

Bjerknes J. 1964. Atlantic air–sea interaction. Advances in Geophysics, vol. 10, Academic Press, p.1–82.

de Boisséson E., Thierry V., Mercier H., Caniaux G. 2010. Mixed layer heat budget in the Iceland Basin from Argo. J. Geophys. Res., vol. 115, No C10055, doi: 10.1029/2010JC006283.

DeWitt D.G., Schneider E.K. 1999. The processes determining the annual cycle of equatorial sea surface temperature: A coupled general circulation model perspective. Mon. Wea. Rev., vol. 127, No 3, p. 381–395.

Dong S., Kelly K.A. 2004. Heat budget in the Gulf Stream region: The importance of heat storage and advection. J. Phys. Oceanogr., vol. 34, No 5, p. 1214–1231.

Foltz G.R., Grodsky S.A., Carton J.A., McPhaden M.J. 2003. Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), vol. 108, No C5, 3146, doi:10.1029/2002JC001584

Foltz G.R., Schmid C., Lumpkin R. 2013. Seasonal cycle of the mixed layer heat budget in the northeastern tropical Atlantic Ocean. J. Climate, vol. 26, No 20, p. 8169–8188.

Gill A.E., Niiler P.P. 1973. The theory of the seasonal variability in the ocean. Deep Sea Res. Oceanogr. Abstracts, vol. 20, No 2, p. 141–177.

Hastenrath S. 1977. Hemispheric asymmetry of oceanic heat budget in the equatorial Atlantic and eastern Pacific. Tellus, vol. 29, No 6, p. 523–529.

Jones I., Leach H. 1999. Isopycnic modeling of the North Atlantic heat budget. J. Geophys. Res., vol. 104, No C1, p. 1377–1392, doi: 10.1029/1998JC900043.

Jouanno J., Marin F., du Penhoat Y., Sheinbaum J., Molines J.-M. 2011. Seasonal heat balance in the upper 100 m of the equatorial Atlantic Ocean. J. Geophys. Res., vol. 116, No C09003, doi: 10.1029/2010JC006912.

Li T., Philander S. G.H. 1997. On the seasonal cycle of the equatorial Atlantic Ocean. J. Climate, vol. 10, No 4, p. 813–817.

Merle J. 1980. Seasonal heat budget in the equatorial Atlantic Ocean. J. Phys. Oceanogr., vol. 10, No 3, p. 464–469.

Molinari R. L., Festa J. F., Marmolejo E. 1985. Evolution of sea-surface temperature in the tropical Atlantic Ocean during FGGE, 1979: II. Oceanographic fields and heat balance of the mixed layer. J. Marine Res., vol. 43, No 1, p. 67–81.

Oort A. H., von der Haar T. H. 1976. On the observed annual cycle in the ocean-atmosphere heat balance over the Northern Hemisphere. J. Phys. Oceanogr., vol. 6, No 6, p. 781–800.

Pacanowski R. C., Philander S. G.H. 1981. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans. J. Phys. Oceanogr., vol. 11, No 11, p. 1443–1451.

Peter A. C., Le Hénaff M., du Penhoat Y., Menkes C. E., Marin F., Vialard J., Caniaux G., Lazar A. 2006. A model study of the seasonal mixed layer heat budget in the equatorial Atlantic. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), vol. 111, No C6, doi: 10.1029/2005JC003157.

Philander S. G.H., Pacanowski R. C. 1986. The mass and heat budget in a model of the tropical Atlantic Ocean. J. Geophys. Res., vol. 91, No C12, p. 14212–14220.

Sarmiento J. L. 1986. On the north and tropical Atlantic heat balance. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), vol. 91, No C10, p. 11677–11689.

Sukhovey V. F., Camara T. 1995. Thermal advection in the tropical Atlantic upper layer. Phys. Oceanogr., vol. 6, No 6, p. 399–410.

Umoh J. U., Thompson K. R. 1994. Surface heat flux, horizontal advection, and the seasonal evolution of water temperature on the Scotian Shelf. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), vol. 99, No C10, p. 20403–20416.

Uppala S. M., Kallberg P. W., Simmons A. J. et al. 2005. The ERA-40 reanalysis. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., vol. 131B, No 612 p. 2961–3012, doi: 10.1256/qj.04.176.

Wade M., Caniaux G., du Penhoat Y. 2011. Variability of the mixed layer heat budget in the eastern equatorial Atlantic during 2005–2007 as inferred using Argo floats. J. Geophys. Res., vol. 116, No C08006, doi: 10.1029/2010JC006683.

Weingartner T. J., Weisberg R. H. 1991. A description of the annual cycle in sea surface temperature and upper ocean heat in the equatorial Atlantic. J. Phys. Oceanogr., vol. 21, No 1, p. 83–96.

Wells N. C., Josey S. A., Hadfield R. E. 2009. Towards closure of regional heat budgets in the North Atlantic using Argo floats and surface flux datasets. Ocean Sci., vol. 5, No 2, p. 59–72, doi:10.5194/os-5–59–2009.

Wolff J.-O., Maier-Reimer E., Legutke S. 1997. The Hamburg Ocean Primitive Equation Model. Technical report, No. 13. Hamburg. German Climate Computer Center (DKRZ). 98 pp.

Xie S.-P. 1994. On the genesis of the equatorial annual cycle. J. Climate, vol. 7, No 12, p. 2008–2013.

Yang H. 1996. The subtropical/subpolar gyre exchange in the presence of annually migrating wind and a meandering jet: Water mass exchange. J. Phys. Oceanogr., vol. 26, No 1, p. 115–130.

Yu L., Jin X., Weller R. A. 2006. Role of net surface heat flux in seasonal variations of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean. J. Climate, vol. 19, No 23, p. 6153–6169.

Статья поступила в редакцию 03.09.2015. После переработки 21.12.2015