

МОНИТОРИНГ РАЙОНОВ С ВЫСОКИМ РЕСУРСНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ

УДК 551.465

С.Б.Крашенинникова, А.Б.Полонский

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

МЕРИДИОНАЛЬНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ И ПЕРЕНОС ТЕПЛА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

По данным контактных наблюдений, накопленных за последние ~ 65 лет для акватории Северной Атлантики, уточнено положение максимумов тепломассопереносов и выявлены особенности их изменчивости на сезонном, внутригодовом, синоптическом и междекадном масштабах.

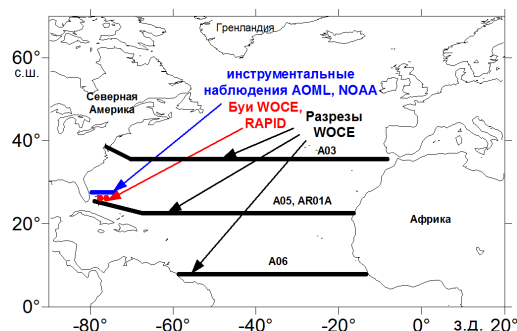
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *меридиональная циркуляция, переносы тепла, сезонная, синоптическая, междекадная изменчивость, Северная Атлантика*

Меридиональный перенос тепла (МПТ) океаническими течениями – один из главных механизмов, с помощью которого океан влияет на формирование глобальной климатической системы. За счет МПТ в океане происходит сглаживание термических контрастов между высокими и низкими широтами. Климатический МПТ в Атлантическом океане связан с глобальной термохалинной циркуляционной ячейкой, которая формируется за счет образования глубинных вод в Северной Атлантике вследствие термической конвекции, и компенсирующего переноса относительно теплых вод термоклина на север [1]. Полученные разными авторами оценки меридиональных переносов массы и тепла противоречивы, что связано с недостаточным количеством данных наблюдений и использованием разных методов их обработки.

Значительное увеличение количества данных наблюдений за последние десятилетия и применение единой методики прямых вычислений позволяет уточнить средние оценки меридиональных тепломассопереносов в Северной Атлантике, а также проанализировать их изменчивость на внутригодовом, синоптическом, межгодовом и междекадном масштабе. Это являлось основной задачей многочисленных международных программ и проектов (*РАЗРЕЗЫ, ПОЛИМОДЕ, WOCE, RAPID, STACS, WATTS*), что подтверждает актуальность проведения таких исследований.

Цель настоящей работы – выявление особенностей пространственно-временной изменчивости меридиональной циркуляции и переносов тепла в Северной Атлантике по данным контактных наблюдений

Методика расчета и материалы. В работе использовались высокоточные данные гидрологических наблюдений и данные о касательных напря-



Р и с . 1 . Местоположение данных контактных наблюдений.

жениях поля ветра (рис.1), ченные в период проведения эксперимента WOCE (World Ocean Circulation Experiment) за 1992 – 1998 гг. в окрестности стандартных разрезов A03 (вдоль 36° с.ш.), A05 и AR01A (вдоль 24,5° с.ш.), A06 (вдоль 7,5° с.ш.); данные акустических измерителей течений WOCE за 1988, 1990, 1992, 1993 гг. и RAPID (Rapid Climate Change Program) 2004 – 2006 гг.; средне-

месячные данные ре-анализа NCEP/NCAR о давлении в приводном слое и температуре поверхности океана за период 1948 – 2013 гг.; данные о глубоководной температуре и солёности WODB (World Ocean Data Base) за 1948 – 2008 гг.; данные ежесуточных расходов Флоридского течения за 1982 – 2008 гг., предоставленные в свободном доступе Атлантической океанографической и метеорологической лабораторией (AOML) при финансовой поддержке офиса климатических наблюдений NOAA. Для оценки среднесезонных значений интегрального меридионального переноса тепла (массы) и анализа их долгопериодных тенденций изменения в Северной Атлантике использовались все доступные прямые оценки, полученные по данным гидрологических зональных разрезов за период 1957 – 2004 гг. Подробное описание данных представлено в работах [2, 3].

Процедура обработки первичных данных включала контроль качества, линейную интерполяцию их в узлы регулярной сетки по долготе и глубине. Для нахождения среднемесячных, среднегодовых, среднесезонных значений меридиональных переносов массы (тепла) проводилось осреднение их значений за соответствующие периоды.

Методика расчета меридиональных переносов массы и тепла прямым методом, подробно описана в работах [4 – 6]. Согласно этой методике, квазистационарный среднегодовой МПТ в океане ($\bar{H}$) можно рассчитать как

$$\bar{H} = C_p \bar{\rho} \int_0^h \int_0^L \left(\overline{VT}_1 + \overline{VT}_2' + \overline{VT}_3'' + \overline{VT}_4'' + \overline{VT}_5' \right) dx dz \quad (1)$$

где h и L – глубина и ширина океана; V – меридиональная компонента скорости; T – температура воды; $C_p \bar{\rho} \approx 4,18 \text{ Дж/}(\text{град} \cdot \text{см}^3)$, C_p – удельная теплоемкость морской воды при постоянном давлении, ρ – плотность морской воды. Черта сверху означает осреднение по времени, V' и T' – сезонные вариации, V'' и T'' – синоптические вариации.

Таким образом, квазистационарный среднегодовой перенос тепла связан со среднегодовой меридиональной циркуляцией (слагаемое 1 в уравнении (1)), наличием корреляций скорости и температуры на сезонном (слагаемое 2) и синоптическом (слагаемое 3) масштабах, а также различными корреляциями между сезонными и синоптическими флюктуациями (слагаемые 4).

Для расчета квазистационарного среднегодового меридионального переноса тепла ($\bar{H}_{пр}$) по данным гидрологических зональных разрезов использовалась методика, подробно описанная в работе [2, 5 – 6], в предположении о стационарности меридиональной циркуляции. Полные дрейфовые потоки, оценивались по соотношениям Экмана. Бароклинные полные потоки рассчитывались путем интегрирования бароклинных скоростей течений, которые определялись по геострофическим соотношениям относительно нулевой поверхности 2000 м. В прибрежных частях разреза за нулевую поверхность принималось дно. Баротропный полный поток рассчитывался с применением закона сохранения массы. В стационарном случае он сводится к отсутствию интегрального переноса массы через круг широты.

В нестационарном случае необходимо знать не только сезонную изменчивость меридиональной циркуляции, но и синоптические флуктуации температуры и меридиональной компоненты скорости течений для различных сезонов и для всей толщи вод, или, по крайней мере, до нижней границы основного термоклина. Для того чтобы описать синоптические возмущения и оценить соответствующие им МПТ по данным гидрологических разрезов и инструментальным наблюдениям применялись методики, описанные в [6]. Причем оценивался не только интегральный МПТ синоптическими вихрями, но и соответствующий МПТ отдельно для западной, центральной и восточной частей разреза.

Результаты. Оценки интегрального МПТ, полученные в [2], на основе использования данных 4-х гидрологических разрезов WOCE свидетельствуют о том, что $\bar{H}_{пр}$ обусловлен главным образом квазистационарной меридиональной циркуляцией верхнего бароклинного слоя, структура которой достаточно устойчива. Вертикальная структура крупномасштабных течений в бароклинном слое характеризуется сменой знака между верхним 1500-метровым слоем и нижележащими слоями. Это подтверждает результат работы [7] о важной роли промежуточных слоев в меридиональном переносе массы в анализируемом районе Субтропической Атлантике.

На основании выполненных расчетов по вышеописанной методике получена следующая схема баланса массы и тепла на зональном гидрологическом разрезе WOCE, выполненном на 25° с.ш. в Субтропической Атлантике (рис.2). Как известно, дрейфовая компонента существенна в верхнем экмановском слое, бароклинная – в слое главного термоклина (0 – 2000 м), баротропная – распределена по всему разрезу от берега до берега и от поверхности до дна. Знак «+» характеризует перенос массы и тепла на север. В среднем интегральный перенос массы через разрез равен нулю. Перенос тепла, обусловленный квазистационарной меридиональной циркуляцией равен 1,26 ПВт.

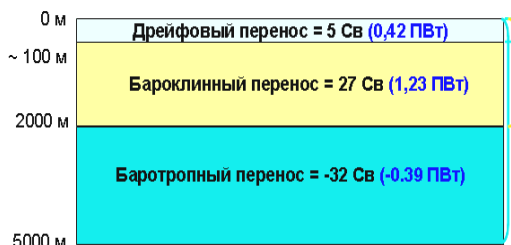


Рис. 2. Баланс массы и МПТ на зональном гидрологическом разрезе WOCE (A05) на 25° с.ш. Субтропической Атлантики.

В настоящей работе анализировались вклады переносов тепла в интегральный МПТ, связанные с нестационарными эффектами. Анализ изменчивости тепломассопереносов в Северной Атлантике на синоптическом масштабе выполнялся по двум типам данных наблюдений: зональных гидрологических разрезов *WOCE* и заякоренных буев с акустическими измерителями течений *RAPID*. На основании проведенных исследований было выявлено, что вклад переноса тепла, обусловленный квазистационарной меридиональной циркуляцией (слагаемое 1 в (1)) $\sim 95\%$, синоптическими вихрями (слагаемое 3 в (1)) $\sim 1\%$, корреляциями скорости и температуры на сезонном (слагаемое 2 в (1)) и сезонно-синоптическом масштабах (слагаемое 4 в (1)) не более 4% . Отметим, что этот результат относится к интегральному МПТ на $25 - 27^\circ$ с.ш. Субтропической Атлантики. По проведенным расчетам перенос тепла, обусловленный нестационарными эффектами равен здесь $0,06$ ПВт. Таким образом, полный интегральный меридиональный перенос тепла на 25° с.ш. Субтропической Атлантики, рассчитанный по формуле (1), равен $1,32$ ПВт. В западном погрансое вблизи Антильского и Флоридского течений вклад переноса тепла вихрями в интегральный МПТ может увеличиваться до $\sim 10\%$.

Выполненный обобщенный анализ оценок МПТ, полученных прямым методом на основании собственных расчетов по данным *WOCE*, и оценок других авторов в окрестности $7,5; 24,5; 26,5; 32; 36$ и 48° с.ш. по данным за $1957 - 2004$ гг. показал, что максимального значения ($1,38 \pm 0,19$ ПВт) суммарный МПТ достигает в Субтропической Атлантике в окрестности 30° с.ш. По балансовым оценкам квазистационарный МПТ достигает максимума в Тропической Атлантике. Однако различие МПТ в тропиках и субтропиках по данным этих расчетов не является статистически значимым [8]. Следовательно, можно считать, что квазистационарный МПТ характеризуется максимумом именно в Субтропической Атлантике.

Средне многолетний расход Флоридского течения (ФТ), рассчитанный по инструментальным данным *AOML* (*NOAA*) и среднегодовым оценкам разных авторов на 27° с.ш. Субтропической Атлантики за $1982 - 2008$ гг., оказался равным 31 ± 1 Св. Средне многолетний расход Гольфстрима, оцененный в [9] по данным *WODB* за $1950 - 2004$ гг., равен 96 Св. Таким образом, на долю Флоридского течения приходится $\sim 30\%$ расхода Гольфстрима. Остальные $\sim 70\%$ его расхода формируются за счет других факторов. Свердруповским переносом обусловлено $\sim 25\%$ среднего расхода Гольфстрима и $\sim 80\%$ среднего расхода ФТ, остальная часть обусловлена термохалинными факторами. Средне многолетний расход Антильского течения, оцененный в работе, оказался равным ~ 7 Св и может обуславливать до 10% расхода Гольфстрима.

На основании выполненных расчетов и анализа оценок МПТ других авторов, показано, что интегральные меридиональные переносы тепла подвержены достаточно интенсивной сезонной изменчивости. В конце лета в Субтропической Атлантике наблюдается максимум интегрального МПТ (около $1,9$ ПВт), в конце зимы – минимум (около $0,8$ ПВт), типичная амплитуда годового хода составляет $0,3 - 0,5$ ПВт.

Внутригодовой цикл течений северо-западной части Северного субтропического антициклонического круговорота описывается суперпозицией

годовой и полугодовой гармоник и в большей степени обусловлен действием ветра. В западном погранслое Субтропической Атлантики заметна роль синоптических вихрей. Несмотря на то, что в спектре низкочастотных колебаний расходов течений северо-западной части ССАК сезонная изменчивость является наиболее изученной, однако между оценками разных авторов имеются существенные противоречия. Эти различия обусловлены тем, что межгодовая изменчивость расхода Флоридского течения проявляется как в межгодовых вариациях текущих среднегодовых значений его расходов, так и в вариациях амплитуд годовой и полугодовой гармоник. Вероятно, изменение типичного внутригодового цикла расходов ФТ связано с очередной сменой знака Атлантической мультидекадной осцилляции [10].

Работа содержит обобщенную информацию об изменчивости интегральных меридиональных переносов массы (тепла) и их отдельных компонент в Северной Атлантике на межгодовом и междекадном масштабах.

Надежное выделение низкочастотных вариаций океанологических характеристик (включая МПТ) с типичными периодами от десяти до нескольких десятков лет – до сих пор трудноразрешимая проблема вследствие ограниченного количества данных наблюдений и высокого уровня шумов. Поэтому для исследования низкочастотной изменчивости МПТ в Субтропической Атлантике привлекались все оценки этого переноса, полученные по данным прямых наблюдений на гидрологических разрезах в полосе широт между $24 - 36^\circ$ с.ш. за период 1957 – 2004 гг., так как их средние значения здесь максимальны, и они относительно мало изменяются от одной широты к другой. Это позволило частично заполнить имеющиеся пробелы во временных рядах среднегодовых оценок МПТ и повысить достоверность выделения их низкочастотной изменчивости в этом регионе (рис.3, а).

Сравнительный анализ переносов массы в разных слоях [11], интегральных МПТ, полученных разными авторами по данным прямых наблюдений за 1957 – 2004 гг. [2], и дрейфовых тепломассопереносов, оцененных в настоящей работе по данным реанализа *NCEP/NCAR* за 1948 – 2013 гг., показал, что в Северной Атлантике эти переносы изменяются с периодом

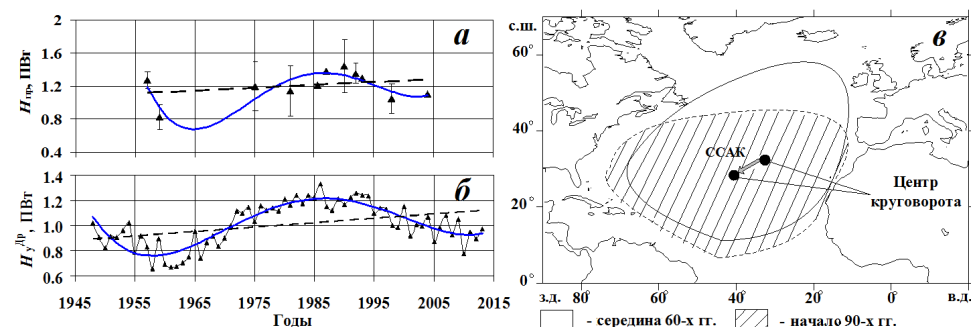


Рис. 3. Временной ход интегральных меридиональных переносов тепла по прямым оценкам в полосе широт $24 - 36^\circ$ с.ш. за 1957 – 2004 гг. (а), дрейфовых меридиональных переносов тепла на 10° с.ш., рассчитанных с использованием данных ре-анализа *NCEP/NCAR* за 1948 – 2013 гг. (б) в Северной Атлантике. Жирные кривые – полиномиальные тренды 4-го порядка; пунктиры – линейные тренды. Вертикальные тонкие линии – $(\pm \sigma)$. Схема смещения ССАК по [12, 13] (в).

~ 60 – 65 лет (рис.3, а, б). Усиление суммарных МПТ в Субтропической Атлантике, сопровождающееся интенсификацией ССАК и его смещением в юго-западном направлении, происходило с середины 60-х по 90-е гг. XX в. При этом ССАК увеличивался / уменьшался в зональном / меридиональном направлении (рис.3, в). В конце 90-х гг. происходило ослабление МПТ и соответственно – ослабление и смещение ССАК в северо-восточном направлении и изменение его формы: уменьшение / увеличение в зональном / меридиональном направлении.

Выводы. На основе использования данных контактных наблюдений за последние ~65 лет и систематизированных оценок интегральных меридиональных переносов массы (тепла) разных авторов уточнено положение максимума интегрального МПТ. Максимального значения ($1,38 \pm 0,19$ ПВт) интегральный МПТ достигает в Субтропической Атлантике.

Установлено, что основной вклад в перенос тепла на $25 - 27^\circ$ с.ш. в Субтропической Атлантике вносит квазистационарная меридиональная циркуляция (~ 95 %). Приблизительно 5 % интегрального МПТ связано с нестационарными эффектами. Вклад вихревых переносов тепла в западном погранслое может достигать в Субтропической Атлантике 10 % интегрального МПТ.

Выявлено, что максимум интегрального меридионального переноса тепла в Субтропической Атлантике наблюдается в конце лета (около 1,9 ПВт), минимум – весной (около 0,8 ПВт). Внутригодовой цикл Флоридского и Антильского течений описывается суперпозицией годовой и полугодовой гармоник и обусловлен в основном действием ветра.

Впервые по прямым оценкам интегральных меридиональных переносов массы и тепла и их отдельных компонент подтвержден типичный период междекадной изменчивости тепломассопереносов в Северной Атлантике, составляющий ~ 60 – 65 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б. Роль океана в изменениях климата.– Киев: Наукова думка, 2008.– 184 с.
2. Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б. Оценка океанического меридионального переноса тепла в Субтропической Атлантике // Морской гидрофизический журнал.– 2006.– № 1.– С.3-15.
3. Джиганшин Г.Ф., Крашенинникова С.Б., Полонский А.Б. Низкочастотная изменчивость расхода Флоридского течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.19.– С.415-421.
4. Bryden H.L., Hall M.M. Heat transport by currents across 25°N latitude in the Atlantic Ocean // Science.– 1980.– 207, № 4433.– P.884-886.
5. Коротаев Г.К. Формирование меридионального переноса тепла в Мировом океане / Теория динамических процессов в океане.– Севастополь, 1983.– С.5-15.
6. Полонский А.Б. Циркуляция вод Тропической Атлантики и меридиональный перенос тепла // Морской гидрофизический журнал.– 1985.– № 1.– С.58-62.
7. Talley L.D. Shallow, Intermediate, and Deep Overturning Components of the Global Heat Budget // J. Phys. Oceanogr.– 2003.– 33, № 3.– P.530-560.

8. Тимофеев Н.А., Юровский А.В. Радиационные, тепло- и водобалансовые режимы океанов. Климат и изменчивость.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.— 256 с.
9. Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б. Низкочастотная изменчивость расхода Гольф-стрима: описание и механизмы // Морской гидрофизический журнал.— 2009.— № 3.— С.30-49.
10. Knight J.R., Allan R.J., Folland C.K., et al A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate // Geophys. Res. Lett.— 2005.— 32, L20708, doi:10.1029/2005GL024233.
11. Крашенинникова С.Б. Низкочастотная изменчивость меридиональных переносов массы и тепла в Субтропической Атлантике // Системы контроля окружающей среды.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013.— вып.19.— С.166-169.
12. Полонский А.Б. Действительно ли наблюдается потепление промежуточных вод субтропического круговорота в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал.— 2000.— № 6.— С.76-81.
13. Bersch M., Yashayaev I., Koltermann K.P. Recent changes of the thermohaline circulation in the subpolar North Atlantic // Ocean Dyn.— 2007.— 57.— P.223-235.

Материал поступил в редакцию 19.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ За даними контактних спостережень, накопичених за останні ~ 65 років, уточнено положення максимумів тепломасоперенесень та виявлені особливості їх мінливості на сезонному, синоптичному і міждекадному масштабах.

ABSTRACT According situ observations accumulated over the past ~ 65 years the maxima positions of the heat and mass transport were clarified and the peculiarities of their variability on seasonal, synoptic and interdecadal scales were found.