УДК 551.465.553

НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МЕРИДИОНАЛЬНЫХ ПЕРЕНОСОВ ТЕПЛА В АТЛАНТИКЕ

С.Б. Крашенинникова, А.Б. Полонский

Институт природно-технических систем
г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: svetlanabk@mail.ru,
apolonsky5@mail.ru

В работе анализируется низкочастотная изменчивость меридиональных переносов тепла в Северной Атлантике, оцененных по различным типам данных. Подтвержден типичный период междекадной изменчивости меридиональных тепломассопереносов (~ 60 – 65 лет). Описаны изменения структуры Северного субтропического антициклонического круговорота в XX – XXI вв., связанные с Атлантической мультидекадной осцилляцией.

Введение. В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию изменчивости меридиональных переносов тепла (МПТ) в Северной Атлантике на масштабах от десятков до сотен лет [1]. Такие изменения приводят к выраженным климатическим аномалиям в Атлантико-Европейском регионе [2, 3]. Надежное выделение низкочастотных вариаций океанологических характеристик (включая МПТ) на указанных временных масштабах – до сих пор трудноразрешимая проблема вследствие ограниченного количества данных наблюдений и высокого уровня шумов.

Как известно, анализировать низкочастотную изменчивость МПТ можно по отдельным его компонентам, таким как дрейфовые меридиональные переносы (ДМП) или переносы тепла, обусловленные горизонтальной свердруповской циркуляцией. Первые вносят существенный вклад в интегральный МПТ в Экваториально – Тропической Атлантике, вторые – в Субтропической Атлантике [1]. Характеристики ДМП и свердруповских переносов известны намного лучше, чем интегральных МПТ, так как они рассчитываются по данным о поле ветра или приводного давления, которые изучены гораздо детальнее, чем океанологические поля. Для анализа этих тепломассопереносов в последнее время используются данные атмосферных реанализов, например *NCEP/NCAR, ERA* и др. [4]. Продолжительность данных этих реанализов составляет ~50–65 лет. Несмотря на достаточно хорошее качественное совпадение характеристик дрейфовых меридиональных тепломассопереносов, полученных разными авторами по данным реанализов, количественно их оценки могут существенно отличаться друг от друга. Это связано с выбором методики расчета касательных напряжений трения ветра, величиной коэффициента сопротивления, а также пространственно-временным сглаживанием используемых данных [1, 4].

Цель настоящей работы – уточнить оценку характеристик низкочастотной изменчивости меридиональных тепломассопереносов в Северной Атлантике на основе использования данных контактных наблюдений и реанализа, а также установить связь этих изменений с изменением структуры Северного субтропического антициклонического круговорота (ССАК).

Материалы и методики. В работе использовались среднемесячные данные о давлении в приводном слое и температуре поверхности океана реанализа *NCEP/NCAR* за 1948 – 2014 гг. Для оценки долгопериодных тенденций изменения интегрального МПТ в Северной Атлантике использовались все доступные прямые оценки, полученные по данным гидрологических зональных разрезов за период 1957 – 2004 гг. Подробное описание данных контактных наблюдений и реанализа, а также методики расчета интегральных меридиональных тепломассопереносов прямым методом и их отдельных компонент представлено в работе [1]. В качестве индекса Североатлантического колебания (САК) используется среднемесячная разность нормированных значений приземного давления между Понта-Делгада (Лиссабон, Гибралтар) и Рейкьявиком [5], осредненная за зимний период (декабрь-март), так как именно в зимний период САК наиболее интенсивно.

Результаты. Опубликовано несколько работ, в которых выделен типичный

масштаб междекадной изменчивости МПТ ~60 – 65 лет на основе результатов модельных расчетов и палеоданных [6 – 8]. Аналогичный период изменчивости интегральных МПТ был получен по данным наблюдений на зональных гидрологических разрезах в Субтропической Атлантике с использованием прямого метода в работе [1]. Эти колебания, по всей вероятности, представляют собой часть низкочастотного квазипериодического процесса в системе океан – атмосфера, называемого Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО). К сожалению, продолжительность рядов МПТ, рассчитанных прямым методом, ограничена, а полученные единичные оценки интегрального МПТ неравномерно распределены по времени. Поэтому в [1] привлекались все оценки меридионального переноса, полученные по данным прямых наблюдений на гидрологических разрезах в полосе широт между 24 – 36° с.ш. Субтропической Атлантики за период 1957 – 2004 гг. МПТ здесь максимальны и относительно мало изменяются в меридиональном направлении. Это позволило частично заполнить имеющиеся пробелы во временных рядах среднегодовых оценок МПТ и повысить достоверность выделения их низкочастотной изменчивости в этом регионе (рис. 1 *а*).

Сравнительный анализ переносов массы в разных слоях, полученных разными авторами по данным прямых наблюдений за 1957 – 2004 гг. [9] и дрейфовых тепломассопереносов, подтвердили, что в Северной Атлантике эти переносы изменяются с периодом ~ 60 – 65 лет (рис. 1, *б*). Увеличение переносов массы в северном направлении, хоть и незначительное, наблюдается в 60-х–90-х гг. в верхнем и глубинном слое [10]. С середины 90-х по настоящее время наблюдается их уменьшение. Об ослаблении меридиональной циркуляции в 2004 – 2012 гг. свидетельствуют результаты работ [10 – 12]. Это ослабление сопровождалось уменьшением теплосодержания Субтропической Атлантики [13]. Расчет переносов массы в [10] показывает, что даже без учета 2009 года средний перенос массы в 2008, 2010 и 2011 гг. стал меньше, чем в 2004, 2005, 2006 и 2007. Полученный результат значим на 95% доверительном уровне.

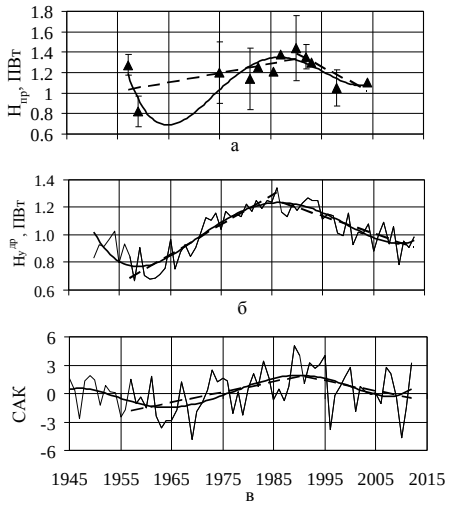
В 40-е гг. XX в. впервые высказано предположение, что в период интенсификации меридиональной циркуляции – ССАК сжимается [14]. В последующих работах [9, 15 – 17] также предполагалось, что усиление суммарных МПТ в Субтропической Атлантике с середины 60-х по 90-е гг. XX в., сопровождалось интенсификацией циркуляции в ССАК и смещением его центра в южном направлении. При этом ССАК сузился в меридиональном направлении. В конце 90-х гг. происходило уменьшение МПТ и соответственно – ослабление циркуляции ССАК и смещение его центра в северном направлении, а также увеличение размера круговорота в меридиональном направлении. Полученные нами результаты подтверждают описанную схему.

Из рис. 1 *в* видно, что в 90-е гг. происходила смена положительной тенденции индекса САК, характеризующей интенсификацию западных ветров, на отрицательную тенденцию. Это свидетельствует о том, что, начиная с 90-х гг. XX в. происходит ослабление западного переноса.

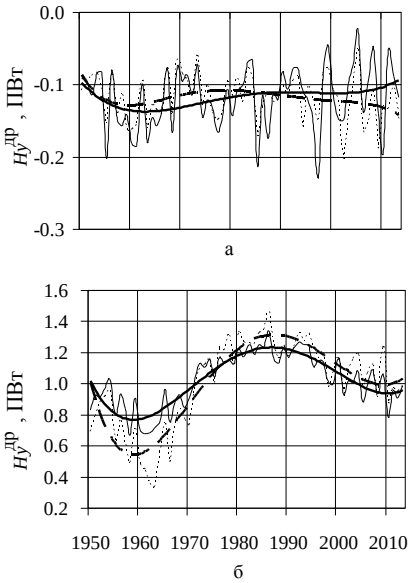
Анализ изменчивости дрейфовых переносов тепла на разных широтах Северной Атлантики (рис. 2 *а, б*), показал, что ДМП в 50-е – 70-е гг. имеют большие величины на 40° и 10° с.ш., чем на 35° и 7,5° с.ш. Северной Атлантики, а начиная с 70-х гг. по настоящее время наоборот. Этот результат свидетельствует о том, что система зональных ветров (западного переноса и северо-восточного пассата) в 50 – 70-е гг. занимала более северное положение, чем в 90-е гг. Причем ее северная и южная границы приблизились друг к другу за 60-е – 90-е гг. на ~1 – 2°. Усиление ДМП, характеризующее интенсивность западных ветров и северо-восточных пассатов в Северной Атлантике, опережает интегральный МПТ приблизительно на 5 лет (рис. 1 *а* и *б*). Это запаздывание определяется скоростью бароклинного приспособления ССАК к вариациям поля ветра Северной Атлантики.

Таким образом, приведенные оценки низкочастотной изменчивости интегральных переносов массы и тепла,

ДМП, а также индекса САК подтверждают результаты более ранних работ [9, 14 – 17], свидетельствующих об усилении западных ветров и северо-восточных пассатов в Северной Атлантике, сопровождающейся интенсификацией ССАК в 60 – 90 гг., его смещением в южном направлении и сжатием в меридиональном направлении. Начиная с 90-х гг. XX в., соответственно, наблюдаются противоположные тенденции.



Р и с. 1. Межгодовая изменчивость интегральных МПТ по прямым оценкам в полосе широт 24 – 36° с.ш. по [1] (*а*), дрейфовых меридиональных переносов тепла на 10° с.ш., рассчитанных по данным ре-анализа *NCEP/NCAR* (*б*) в Северной Атлантике, зимнего индекса Североатлантического колебания (*в*). Жирные кривые – полиномиальные тренды 4-го порядка; пунктиры – линейные тренды, соответствующие усилению / ослаблению, меридиональной циркуляции. Вертикальные тонкие линии – (± σ)



Р и с. 2. Межгодовая изменчивость ДМП тепла на 35° (сплошная), 40° с.ш. (пунктирная) (*а*), на 7,5° (сплошная), 10° с.ш. (пунктирная) (*б*) Северной Атлантики, рассчитанных по данным реанализа *NCEP/NCAR* за 1950 – 2014 гг. Жирные кривые – полиномиальные тренды 4-го порядка: сплошные – 35° и 7,5° с.ш., штриховые – 40° и 10° с.ш.

Заключение. На основе анализа прямых оценок меридиональных переносов массы и тепла и их отдельных компонент подтвержден ранее полученный с помощью модельных расчетов и палеоданных результат, что типичный период междекадной изменчивости МПТ в Северной Атлантике составляет ~ 60 – 65 лет. Эти колебания связаны с АМО. Усиление меридиональной циркуляции и

МПТ в Северной Атлантике в 60 – 90 –е гг. связано с интенсификацией САК, усилением западных ветров и северо-восточных пассатов, что сопровождается смещением ССАК в океане в южном направлении и его сужением в меридиональном направлении. Начиная с 90-х гг. происходит уменьшение индекса САК ослабление меридиональных тепломассопереносов в Северной Атлантике, и, соответственно, смещение ССАК на север и увеличение его размера в меридиональном направлении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 15-05-02019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б.* Пространственно-временная изменчивость меридиональных переносов тепла в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 6. – С. 24–41.
2. *Chu P.C.* Global upper ocean heat content and climate variability // Ocean Dynamics. – 2011. – V. 61, Issue 8. – P. 1189–1204.
3. *Anthony A., O'Brien J.J., Smith S.R.* Air temperature impacts over Eastern North America and Europe associated with low-frequency North Atlantic SST variability // Int. J. Clim. – 2009. – 29. – P.1–10.
4. *Josley S.A., Kent E.C., Taylor P.K.* Wind Stress Forcing of the Ocean in the SOC Climatology: Comparisons with the NCEP–NCAR, ECMWF, UWM/COADS, and Hellerman and Rosenstein Datasets // Phys. Oceanogr. – 2002. – 32. – P. 1993–2019.
5. *Hurrel J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // Science. – 1995. – V. 269, № 5224. – P. 676–679.
6. The need for a dynamical climate reanalysis / L. Bengtsson, P. Arkin, P. Berrisford, [et al.] // Bull. Am. Meteor. Soc. – 2007. – 88. – P.495–501.
7. The twentieth century reanalysis project / G.P. Compo, J.S. Whitaker, P.D. Sardeshmukh [et al.] // Quarterly J. Roy. Meteor. Soc. – 2011. – 137. – P. 1–28.
8. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century / N.A. Rayner, D.E. Parker, E.B. Horton, [et al.] // J. Geophys. Res. – 2003. – 108. – P. 4407–4426.
9. *Крашенинникова С.Б.* Низкочастотная изменчивость меридиональных переносов массы и тепла в Субтропической Атлантике // Системы контроля окружающей среды. – 2013. – Вып. 19 – С. 166–169.
10. Seasonal Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26,5° N / *T.Kanzow, S.A. Cunningham, W. E. Johns,[et al.]*// J. Clim. – 2010. – 23. – P. 5678–5698.
11. *McCarthy G., Frajka-Williams E., Johns W. E., et. al.* Observed interannual variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5° N // Geophys. Res. Lett. – 2012. – 39. L19609, doi:10.1029/2012GL052933.
12. *Smeed D.A., McCartney G.D., Cunningham S.A.* Observed decline of the Atlantic meridional overturning circulation 2004–2012 // Ocean Sci. – 2014. – 10. – P. 29–38.
13. *Cunningham S. A., Roberts C. D., Frajka-Williams E. et. al.* Atlantic Meridional Overturning Circulation slowdown cooled the subtropical ocean // Geophys. Res. Lett. – 2013. – 40 (23). – P. 6202–6207.
14. *Iselin C. O'D.*, Preliminary Report on Long-Period Variations in the Transport of the Gulf Stream System // Papers in Phys.l Oceanogr. and Meteorol. – 1940. – 8(I), – P.1 – 40.
15. *Полонский А.Б.* Действительно ли наблюдается потепление промежуточных вод субтропического круговорота в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 6. – С. 76–81.
16. *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.
17. *Curry R.G., McCartney M.S.* Ocean Gyre Circulation changes associated with the North Atlantic Oscillation // J. of Phys. Oceanogr. – 2001. – 31. – P. 3374–3400.