

## ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА АДВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

А.Б. Полонский, П.А. Сухонос

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: pasukhonis@mail.ru

Анализируется совместное влияние сезонных флуктуаций компонентов вектора течений и градиентов температуры на среднесезонный адвективный перенос тепла в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) Северной Атлантики по данным океанических ре-анализов ORA-S3, GFDL и GODAS за период 1980–2011 гг. Показано, что в некоторых районах Северной Атлантики компоненты вектора течений и градиенты температуры ВКС тесно коррелированы на сезонном масштабе. Ковариации сезонных пульсаций компонентов вектора течений и градиентов температуры ВКС вносят значительный вклад в средний многолетний адвективный перенос тепла в ВКС к югу от 10° с.ш. и во внутренней части субтропического круговорота.

**Ключевые слова:** верхний квазиоднородный слой, совместное влияние сезонных флуктуаций компонентов вектора течений и градиентов температуры, горизонтальная адвекция тепла, Северная Атлантика.

**Введение.** В настоящее время пространственно-временная изменчивость термической структуры океана в Северной Атлантике хорошо изучена. Характер этой изменчивости соотносится с различными климатическими индексами. Согласно работе [1], межгодовые-десятилетние колебания температуры поверхности океана (ТПО) во внетропических широтах обусловлены изменчивостью крупномасштабной структуры атмосферной циркуляции (Североатлантическое колебание), флуктуации ТПО межгодового масштаба в тропических широтах связаны с взаимодействием океана с атмосферой (Эль-Ниньо–Южное колебание), а междесятилетние вариации ТПО отражают эффект внутренних мод изменчивости термохалинной циркуляции океана (Атлантическая мультидекадная осцилляция). Однако выявленная в цитируемой работе статистическая связь не позволяет проанализировать физические механизмы, ответственные за формирование долгопериодных изменений ТПО. Выяснение относительной роли механизмов, формирующих бюджет тепла океана и его изменчивость, осуществляется с помощью анализа величины соответствующих членов уравнения теплового баланса. Так, на большей части Северной Атлантики межгодовые колебания ТПО обу-

словлены совместным влиянием переносов тепла в океане и локальных потоков тепла на поверхности океана, а в экваториальной зоне и окрестности интенсивных течений эти вариации формируются за счет внутренней динамики океана [2]. Анализ особенностей межгодовой изменчивости ТПО в Тропической Атлантике выявил важную роль динамики верхнего перемешанного слоя океана в эволюции поля ТПО, особенно в окрестности Внутритропической зоны конвергенции [3]. В ряде работ отмечается, что адвективные переносы тепла играют важную роль в межгодовых-десятилетних изменениях теплового состояния верхнего слоя океана (см. например, [4]). Однако при анализе бюджета тепла верхнего слоя океана, рассчитанного по среднегодовым полям, в адвективные слагаемые уравнения теплового баланса входят также ковариации сезонных флуктуаций компонентов вектора течений с градиентами температуры. Неучет указанных факторов может приводить к неточному описанию физических механизмов, влияющих на долгопериодное изменение температуры океана. В данной статье представлены результаты анализа совместного влияния сезонных флуктуаций компонентов вектора течений и градиентов температуры на многолетний адвективный перенос



тепла в ВКС Северной Атлантики по однородным и длительным данным океанических ре-анализов. Использование нескольких массивов данных ре-анализов позволит получить более достоверные выводы об особенностях взаимодействия градиентов температуры и скорости течений в верхнем слое Северной Атлантики.

**Данные и методика.** В работе использованы среднемесячные данные о температуре океана, зональной и меридиональной компонентах вектора течений и толщине ВКС из океанических ре-анализов ORA-S3 за период 1959 – 2011 гг., GFDL за период 1961 – 2015 гг. и GODAS за период 1980 – 2016 гг.

Океанический ре-анализ ORA-S3, основанный на синтезе Гамбургской модели океана HOPE (29 вертикальных уровней, одноградусная сетка со сгущением в экваториальной зоне) [5] и схемы трехмерной оптимальной интерполяции, позволяет усваивать данные о температуре и солёности, а также аномалии уровня поверхности моря [6]. Для вынуждения модели океана в ре-анализе ORA-S3 используются потоки тепла и импульса из массива атмосферного ре-анализа ERA-40 [7] 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.

Система усвоения данных в ре-анализе GFDL состоит из ансамбля фильтров Кальмана, применяемых ко второму поколению совместной климатической модели CM2.1 [8]. Океанический компонент этой модели имеет 50 вертикальных уровней (из которых 22 уровня 10-метровой толщины расположены в верхнем 220-метровом слое) и одноградусную сетку типа В со сгущением у экватора [9]. Атмосферный компонент модели имеет пространственное разрешение  $2,5^\circ \times 2^\circ$  и 24 уровня по вертикали. Система полностью совместна и позволяет одновременно усваивать данные наблюдений за характеристиками океана и атмосферы для дальнейшего построения ковариаций между компонентами модельных потоков. Причем наблюдаемые в океане профили температуры и солёности усваиваются ежедневно.

Океанический ре-анализ GODAS, основанный на квази-глобальной ( $75^\circ$  ю.ш.– $65^\circ$  с.ш.) конфигурации модели GFDL MOM.v3 (40 вертикальных уровней с 10-метровой дискретностью в верхнем 200-метровом слое, одноградусная сетка со сгущением в экваториальной зоне) [10] и схеме трехмерной вариационной ассимиляции данных, усваивает данные о температуре океана и синтетической солёности, которая рассчитывается для каждого профиля температуры с использованием локальной T-S климатологии [11]. Модель океана в ре-анализе GODAS вынуждается потоками импульса, тепла и влаги из атмосферного ре-анализа NCEP R2 [12].

Для расчета толщины ВКС в ре-анализе ORA-S3 применяется схема, основанная на полуэмпирической теории турбулентности. Суть используемой схемы заключается в вычислении числа Ричардсона по [13]. Толщина ВКС принимается равной глубине, на которой число Ричардсона достигает критического значения. В ре-анализе GFDL толщина ВКС соответствует глубине, на которой увеличение плотности по сравнению с плотностью на горизонте 10 м составляет  $0,03 \text{ кг/м}^3$ . В ре-анализе GODAS толщина ВКС определяется как глубина, на которой отклонение температуры от температуры на поверхности океана составляет менее  $0,8^\circ\text{C}$ .

Пространственная структура толщины ВКС по акватории Северной Атлантики характеризуется значительной пространственной неоднородностью (рис. 1). При этом величины толщины ВКС в январе по данным океанических ре-анализов ORA-S3, GFDL и GODAS в тропических широтах незначительно различаются между собой. Вместе с тем в высоких широтах Северной Атлантики величины толщины ВКС в январе по используемым данным сильно различаются. Средняя толщина ВКС в области глубокого конвективного перемешивания в море Лабрадор по данным ORA-S3 в январе составляет более  $2,5 \text{ км}$ , по данным GFDL составляет около  $700 \text{ м}$ , а по данным GODAS – более  $1 \text{ км}$ . Отметим высокое согласие величин толщины ВКС из массива ORA-S3 с натурными данными для Северной Атлантики [14].



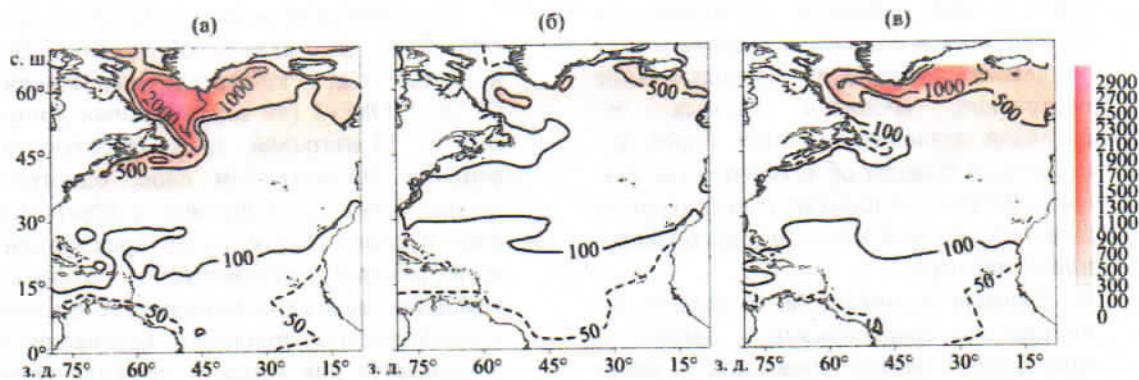


Рис. 1. Средняя толщина ВКС в январе по акватории Северной Атлантики за период 1980–2011 гг. по данным океанических ре-анализов: ORA-S3 (а), GFDL (б) и GODAS (в). Показаны изолинии 50 (пунктиром), 100, 500, 1000 и 2000 м

По данным из указанных массивов рассчитывались: зональные ( $U$ ) и меридиональные ( $V$ ) составляющие вектора скорости течений, зональные ( $T_x$ ) и меридиональные ( $T_y$ ) градиенты температуры, а также зональная ( $UT_x$ ), меридиональная ( $VT_y$ ) и суммарная горизонтальная ( $UT_x + VT_y$ ) адвекция тепла в пределах переменной по пространству и времени толщины ВКС для каждого месяца за весь доступный период.

Дальнейшее исследование проводится для временного периода 1980 – 2011 гг. – общего для всех используемых ре-анализов. Рассчитаны средние многолетние величины и средние квадратические отклонения (СКО) суммарной горизонтальной адвекции тепла и отдельных ее компонентов для каждого месяца и за весь период. Далее рассчитывались сезонные флуктуации компонентов вектора течений и градиентов температуры ВКС, как отклонения климатического годового хода указанных величин от их среднемноголетних значений в каждом узле пространственной сетки, и их ковариации между собой. После этого рассчитано соотношение ковариаций флуктуаций составляющих вектора течений и градиентов температуры ВКС на сезонном масштабе и среднего адвективного переноса тепла и определен вклад внутрисезонного хода полной горизонтальной адвекции тепла в её общую изменчивость.

**Анализ результатов.** Пространственное распределение средних многолетних величин компонентов вектора течений, градиентов температуры ВКС, суммарной горизонтальной адвекции

тепла и полей их СКО в Северной Атлантике достаточно хорошо согласуются по данным всех ре-анализов. Наибольшие величины рассматриваемых параметров отмечаются в области интенсивных течений, а максимальные – в окрестности Гольфстрима и Гвианского течения.

Как отмечено выше, связь между флуктуациями компонентов вектора течений и градиентов температуры ВКС на сезонном масштабе в некоторых регионах может оказывать значительное влияние на среднегодовую горизонтальную адвекцию тепла в ВКС. Анализ корреляционной связи между колебаниями компонентов вектора течений и градиентов температуры ВКС на сезонном масштабе в Северной Атлантике показал следующее. Величина коэффициента корреляции между сезонными флуктуациями зональной скорости течений  $U'$  и зонального градиента температуры ВКС  $T'_x$  превышает 0,8 в области между 20°–40° с.ш. и 20°–45° з.д. и в центральной части экваториальной зоны (рис. 2 а, б, в). Высокая отрицательная связь ( $<-0,8$ ) между этими характеристиками отмечается области между 12°–20° с.ш. и 20° – 55° з.д. и в западной части субтропического круговорота. Величины коэффициентов корреляции между сезонными вариациями меридиональной скорости течений  $V'$  и меридионального градиента температуры ВКС  $T'_y$  велики и положительны ( $>0,8$ ) во внутренней части субтропического и восточной части субполярного круговоротов, но велики по абсолютной величине и отрицательны



( $< -0,8$ ) в центральной части экваториальной зоны (рис. 2 г, д, е).

Таким образом, на значительной части акватории Северной Атлантики

между компонентами вектора течений и градиентами температуры ВКС существует тесная взаимосвязь на сезонном масштабе.

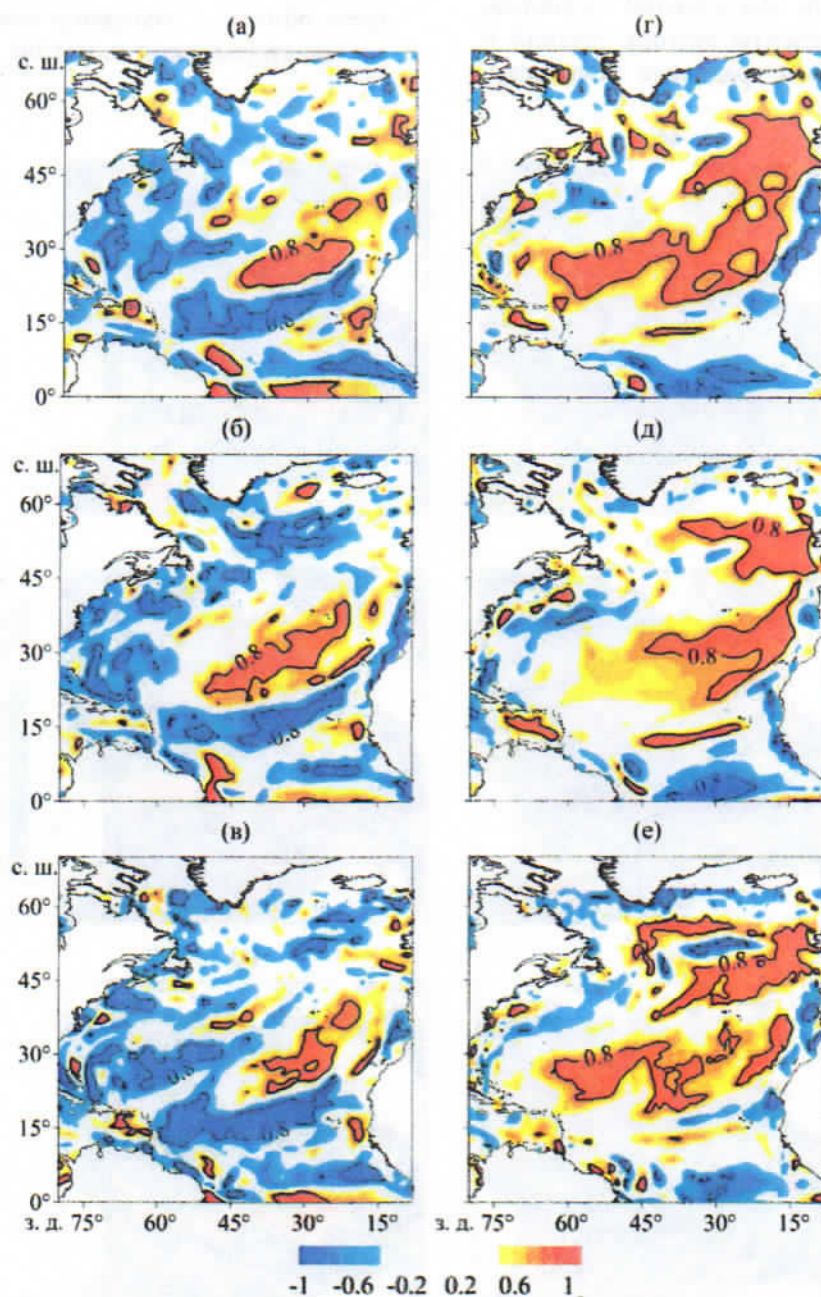


Рис. 2. Пространственные распределения величин коэффициентов корреляции между сезонными флуктуациями скорости зональных течений  $U'$  и зональных градиентов температуры ВКС  $T'_x$  (а, б, в) и скорости меридиональных течений  $V'$  и меридиональных градиентов температуры ВКС  $T'_y$  (г, д, е) в Северной Атлантике по данным ORA-S3 (а, г), GFDL (б, д) и GODAS (в, е). Показаны изолинии  $\pm 0,8$

Проанализируем далее, каково соотношение ковариаций между флуктуациями составляющих вектора течений и градиентов температуры ВКС на сезонном масштабе и среднего адвективного переноса тепла в ВКС на акватории Се-

верной Атлантики. Отношение ковариаций сезонных флуктуаций скорости зональных течений и зонального градиента температуры ВКС к среднему зональному переносу тепла ( $\overline{U'T'_x} / UT_x$ ) составляет более 0,8 в области между 25°–

35° с.ш. и 55°–70° з.д. восточной части Северной Атлантики и южнее 10° с.ш., за исключением области Гвианского течения (рис. 3 а, б, в). Отношение ковариаций сезонных флуктуаций меридиональной компоненты вектора течений и меридионального градиента температу-

ры ВКС к среднему меридиональному переносу тепла ( $\overline{V'T'_y}/VT'_y$ ) велико в центральной части субтропического круговорота и южнее 10° с.ш., за исключением области Гвианского течения и узкой экваториальной зоны (рис. 3 г, д, е).

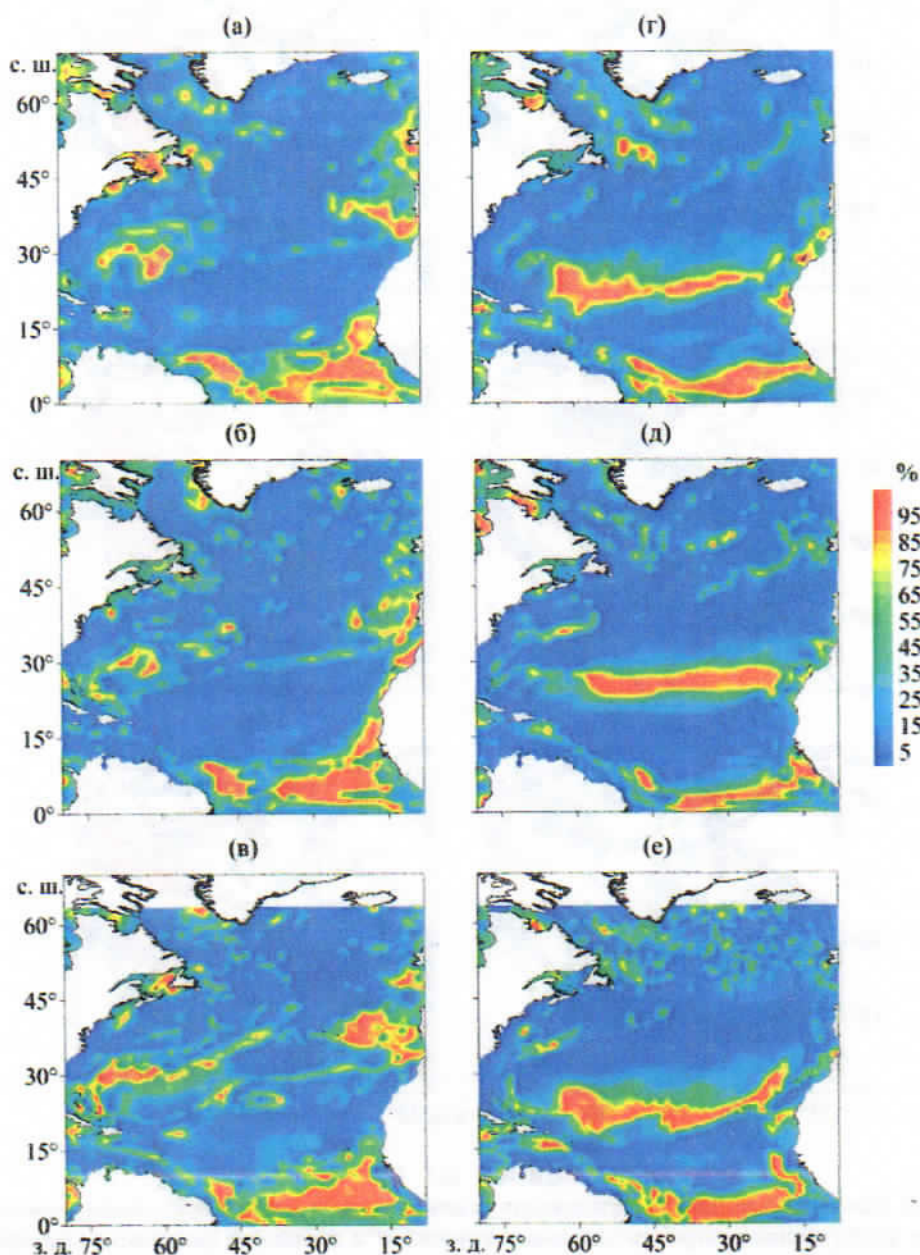


Рис. 3. Отношение (в %) ковариаций сезонных флуктуаций составляющих вектора течений и градиентов температуры ВКС к среднему зональному (а, б, в) и меридиональному (г, д, е) переносам тепла в Северной Атлантике за период 1980–2011 гг. по данным ORA-S3 (а, г), GFDL (б, д) и GODAS (в, е)

Таким образом, в тропических широтах Северной Атлантики ковариации сезонных флуктуаций компонентов вектора течений и градиентов температуры

ВКС отвечают за значительную часть среднего адвективного переноса тепла в ВКС.



Пространственное распределение относительных вкладов сезонного хода в общую изменчивость горизонтальной адвекции тепла ВКС по рассматриваемым данным демонстрирует некоторые общие черты. Высокие вклады внутригодового хода в суммарную изменчивость наблюдаются в Тропической Атлантике. Севернее 15° с.ш. вклад сезонного хода в общую изменчивость анализируемой характеристики падает до 30%. Вместе с тем в районе Гольфстрима и в области Канарского течения указанный вклад сезонного хода может превышать 60%. Отметим, что пространственное распределение вкладов сезонного хода в общую изменчивость горизонтальной адвекции тепла ВКС хорошо согласуется с соответствующим распределением вклада сезонного хода скорости течений ВКС в суммарную изменчивость.

Таким образом, основная доля изменчивости горизонтальной адвекции тепла ВКС в Северной Атлантике реализуется на межгодовом-десятилетнем масштабе. Исключение составляют окрестности интенсивных течений с ярко выраженным годовым ходом скорости течения и области к югу от 15° с.ш.

**Заключение.** В статье рассматривается характер совместного влияния внутригодовых колебаний компонентов вектора течений и градиентов температуры ВКС на средний многолетний адвективный перенос тепла и оценивается вклад годового хода горизонтальной адвекции тепла в её общую изменчивость в верхнем слое Северной Атлантики за период 1980–2011 гг. по данным океанических ре-анализов ORA-S3, GFDL и GODAS. Получены следующие результаты.

В некоторых регионах Северной Атлантики компоненты вектора течений и градиентов температуры ВКС тесно коррелированы на сезонном масштабе. Особенно сильно указанная связь проявляется в центральной части экваториальной зоны, во внутренней части субтропиче-

ского и восточной части субполярного круговоротов.

Оценка отношения ковариаций составляющих вектора течений и градиентов температуры ВКС на сезонном масштабе к величине средней многолетней адвекции тепла показала, что совместное влияние сезонных флуктуаций компонентов горизонтальной адвекции тепла не вносит значительный вклад в постоянный адвективный перенос тепла в верхнем слое океана на большей части Северной Атлантики. Исключение составляют области к югу от 10° с.ш. и внутренняя часть субтропического круговорота.

Основная доля изменчивости суммарной горизонтальной адвекции тепла в ВКС в Северной Атлантике реализуется на межгодовом-десятилетнем масштабе. Однако в окрестности интенсивных течений и в экваториальной зоне вклад сезонного хода скорости течений в суммарную изменчивость может быть также велик.

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-05-02019.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Deser C.* Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms / C. Deser, M.A. Alexander, S.-P. Xie [et al.] // *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2010. V. 2. P. 115–143, doi: 10.1146/annurev-marine-120408-151453
2. *Roberts C.D.* Surface flux and ocean heat transport convergence contributions to seasonal and interannual variations of ocean heat content / C.D. Roberts, M.D. Palmer, R.P. Allan [et al.] // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2017. V. 122. № 1. P. 726–744, doi: 10.1002/2016JC012278.
3. *Rugg A., Foltz G., Perez R.* Role of mixed layer dynamics in tropical North Atlantic interannual sea surface temperature variability // *J. Clim.* 2016. V. 29. № 22.



P. 8083–8101. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0867.1.

4. Полонский А.Б., Сухонос П.А. Оценка составляющих теплового баланса верхнего квазиоднородного слоя в Северной Атлантике // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 729–739.

5. Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T. The ECMWF ocean analysis system: ORA-S3 // Mon. Wea. Rev. 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034.

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

7. Uppala S.M. The ERA-40 reanalysis / S.M. Uppala, P.W. Kallberg, A.J. Simmons [et al.] // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2005. V. 131B. № 612. P. 2961–3012.

8. Chang Y.-S. An assessment of oceanic variability for 1960–2010 from the GFDL ensemble coupled data assimilation / Y.-S. Chang, S. Zhang, A. Rosati [et al.] // Clim. Dyn. 2013. V. 40. № 3-4. P. 775–803. doi: 10.1007/s00382-012-1412-2

9. Griffies S.M. A technical guide to MOM4. GFDL Ocean Group Technical report, No. 5. / S.M. Griffies, M.J. Harrison, R.C. Pacanowski [et al.] NOAA/ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2004. 342 p.

10. Behringer D.W., Xue Y. Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean // Proc. Eighth Symp. on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface. 2004.

11. Pacanowski R.C., Griffies S.M. MOM 3.0 manual. NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Rep., 1999. 680 p.

12. Kanamitsu M. NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) / M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen [et al.] // Bull. Amer. Met. Soc. 2002. V. 83. P. 1631–1643.

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

14. Кузнецов А.А. Верхний квазиоднородный слой Северной Атлантики. Обнинск, 1982. 82 с.

## INFLUENCE OF SEASONAL VARIATIONS OF THE FLOW AND TEMPERATURE FIELDS ON THE ADVECTIVE HEAT TRANSPORT IN THE UPPER LAYER OF THE NORTH ATLANTIC

A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

The nature of the joint effect of the seasonal fluctuations in the components of the current vector and ocean temperature gradients in the upper mixed layer (UML) on the average long-term advective heat transport from the oceanic reanalyzes data ORA-S3, GFDL and GODAS in the period 1980–2011 is considered. It is shown that in some regions of the North Atlantic the components of the current vector and the temperature gradients of the UML are closely correlated on a seasonal scale. The joint effect of seasonal fluctuations of the current vector components and temperature gradients in the UML makes a significant contribution on the average long-term advective heat transport in the North Atlantic UML in regions to the south of 10° N and in the inner part of the subtropical gyre.

**Keywords:** upper mixed layer, joint effect of seasonal fluctuations of the current velocity vector components and temperature gradients, horizontal advection of heat, North Atlantic.