

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТОЛЩИНЫ ВЕРХНЕГО ПЕРЕМЕШАННОГО СЛОЯ ОКЕАНА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПО ДАННЫМ ОКЕАНИЧЕСКИХ РЕ-АНАЛИЗОВ ORA-S3 И GFDL

А.Б. Полонский, П.А. Сухонос

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

E-mail: pasukhonis@mail.ru

Приводится анализ особенностей изменчивости температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в Северной Атлантике по данным океанических ре-анализов ORA-S3 и GFDL. Структура внутригодового хода температуры ВКС хорошо воспроизводится по данным обоих ре-анализов. Однако величины толщины ВКС по данным GFDL во все месяцы ниже, чем по данным ORA-S3. В целом по акватории амплитуда межгодовой изменчивости среднегодовой температуры ВКС больше по данным GFDL. Межгодовая изменчивость величин толщины ВКС в январе и площадь области интенсивной конвекции в море Лабрадор по данным ORA-S3 больше, чем по данным GFDL. Оба ре-анализа воспроизводят долгопериодный рост температуры ВКС в Северной Атлантике. При этом более интенсивное потепление ВКС отмечается по данным GFDL.

**Ключевые слова:** океанический ре-анализ, температура океана, толщина перемешанного слоя, Северная Атлантика.

**Введение.** Температура верхнего слоя океана представляет собой ключевой индикатор изменчивости климата в широком диапазоне временных масштабов. Например, естественные долгопериодные колебания в поле температуры поверхности океана в Северной Атлантике, называемые Атлантической мультидекадной осцилляцией, являются одним из главных климатических сигналов на масштабах от межгодового до десятилетнего, не связанных с Эль-Ниньо-Южным колебанием (см., например, [1]). Поэтому достоверная информация о характере изменчивости температуры верхнего слоя океана в Северной Атлантике принципиально важна для прогнозирования изменения климатических условий.

Одним из наиболее достоверных источников информации об изменчивости температуры верхнего слоя океана служат данные ре-анализов. Тем не менее, и они не свободны от ошибок, которые зависят от многих факторов, таких как неопределенность граничных условий на поверхности океана, неадекватность используемых моделей и схем усвоения данных, а также изменений системы наблюдений за температурой верхнего слоя океана. Наличие ряда океанических ре-анализов дает возможность оценить

неопределенности в оценке изменчивости температуры верхнего слоя океана.

Сравнение данных нескольких океанических ре-анализов показало, что ре-анализ ORA-S3 хорошо воспроизводит изменчивость температуры океана и теплосодержания верхнего слоя океана (0 – 700 м) в Северной Атлантике [2]. Отмечается также хорошее согласие результатов расчетов ORA-S3 с данными контактных наблюдений из Мирового банка океанографических данных для северо-западной части Северного субтропического антициклонического круговорота [3]. Сравнение данных океанического ре-анализа GFDL с данными наблюдений и других ре-анализов показало хорошее совпадение ряда климатических параметров и характеристик изменчивости системы океан-атмосфера [4]. Однако детальное сравнение характеристик верхнего слоя океана при этом не проводилось. Поэтому целью настоящей работы является анализ особенностей изменчивости температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в Северной Атлантике по данным океанических ре-анализов ORA-S3 и GFDL. Будут рассмотрены внутригодовая и межгодовая изменчивость температуры и толщины ВКС и долгопериодные изменения температуры ВКС на основе данных этих ре-анализов.



**Данные и методика.** В работе использованы среднемесячные данные о температуре океана и толщине ВКС из океанических ре-анализов ORA-S3 за период 1959 – 2011 гг. и GFDL за период 1961 – 2015 гг.

Океанический ре-анализ ORA-S3, основанный на синтезе Гамбургской модели HOPE (29 вертикальных уровней,  $1^\circ$  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 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 модели имеет 50 вертикальных уровней (из которых 22 уровня 10-ти метровой толщины расположены в верхнем 220-метровом слое) и  $1^\circ$  сетку V-типа со сгущением у экватора [9]. Атмосферный компонент модели имеет пространственное разрешение  $2.5^\circ \times 2^\circ$  и 25 уровней 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.

Для расчета толщины ВКС в моделях обоих ре-анализов применяется схема, основанная на полуэмпирической теории турбулентности. Суть используемой схемы заключается в вычислении числа Ричардсона по [10]. Толщина ВКС принимается равной глубине, на которой число Ричардсона достигает критического значения.

По данным из указанных массивов рассчитана средняя в пределах перемешанного слоя температура ВКС. При этом толщина ВКС переменна по време-

ни и пространству. Дальнейшее сравнение проводится для временного периода 1961 – 2011 гг., по которому есть данные по обоим ре-анализам. Рассчитаны средние многолетние величины и средние квадратические отклонения (СКО) температуры и толщины ВКС для каждого месяца и за весь период. Определен вклад внутригодового хода температуры и толщины ВКС в их общую изменчивость. Оценены величины коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры ВКС.

**Результаты.** Пространственное распределение среднесезонных величин температуры ВКС и их внутригодовая изменчивость в Северной Атлантике достаточно хорошо воспроизводятся по данным ре-анализов ORA-S3 и GFDL. Средняя температура ВКС по акватории Северной Атлантики варьирует в диапазоне от  $28^\circ\text{C}$  в экваториальной зоне до  $-2^\circ\text{C}$  в приполярных широтах. В области Гольфстрима отмечается наибольший горизонтальный температурный градиент. Хорошо выделяются области понижения температуры океана в области западноафриканского апвеллинга.

Пространственная структура толщины ВКС по акватории Северной Атлантики характеризуется значительной пространственной неоднородностью. При этом величины толщины ВКС по данным океанических ре-анализов ORA-S3 и GFDL существенно различаются между собой. Средняя толщина ВКС по данным ORA-S3 в районе Гвианского течения и зоне западноафриканского апвеллинга не превышает 50 м, а по данным GFDL – 25 м. Толщина ВКС в области глубокого конвективного перемешивания в море Лабрадор по данным ORA-S3 составляет более 1 км, а по данным GFDL – около 700 м. Отметим высокое согласие величин толщины ВКС из массива ORA-S3 с натурными данными для Северной Атлантики [11].

Таким образом, отмечается хорошее согласие пространственной структуры и величин поля температуры ВКС по данным обоих ре-анализов. Однако величины толщины ВКС в Северной Атлантике по данным GFDL во все месяцы года существенно меньше, чем по данным ORA-S3.



Общая изменчивость температуры ВКС в Северной Атлантике на масштабах от внутрисезонного до междесятилетнего в основном обусловлена ее внутрigoдовым ходом (рис. 1а, б). Причем по данным анализируемых ре-анализов в средних широтах вклад сезонного хода температуры ВКС в ее полное изменение превышает 90%, а в полосе широт 0 – 10° с. ш. указанный

вклад снижается до 35% и меньше. Вместе с тем севернее 60° с. ш. вклад внутрigoдового хода температуры ВКС в суммарную изменчивость температуры по данным ORA-S3 менее 70%, что согласуется с оценками, полученными по данным из массива ICOADS [12]. По данным GFDL величины указанного вклада в приполярных широтах, наоборот, более 90%.

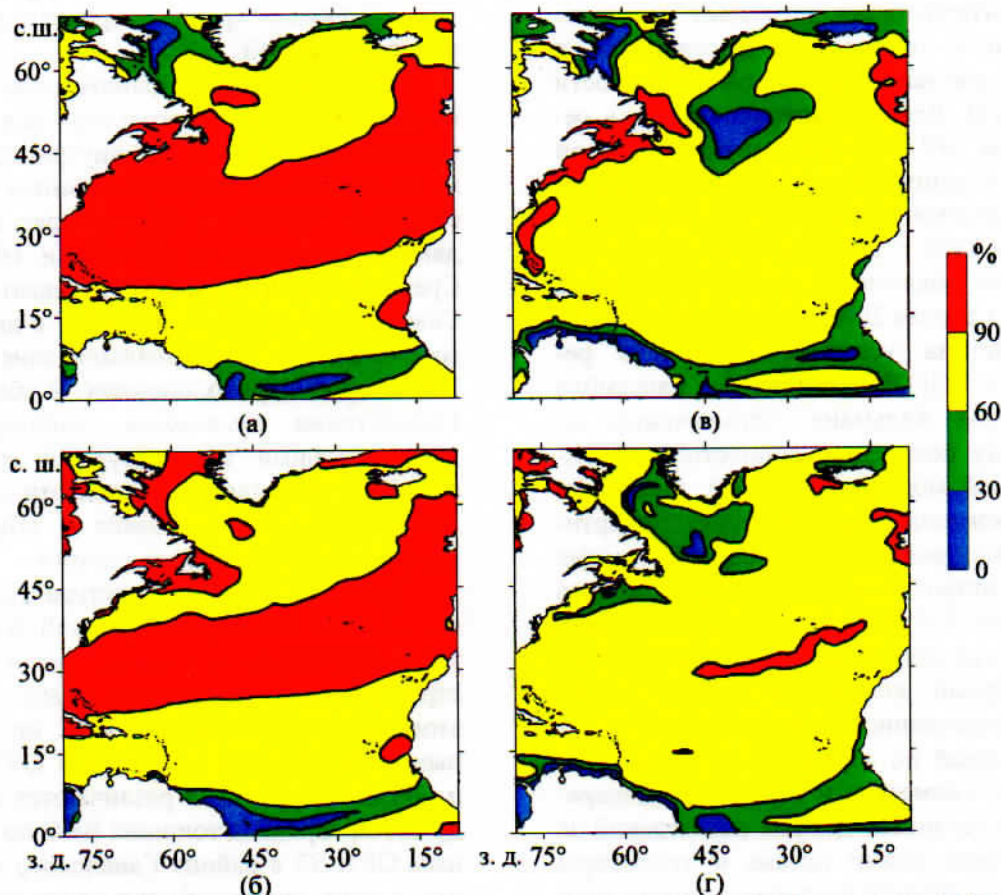


Рис. 1. Вклад (в %) сезонного хода в общую дисперсию температуры (а, б) и толщины ВКС (в, г) по данным океанических ре-анализов ORA-S3 (а, в) и GFDL (б, г) за период 1961 – 2011 гг.

По данным анализируемых ре-анализов вклад внутрigoдового хода толщины ВКС в суммарную изменчивость превышает 70% на большей части акватории Северной Атлантики (рис. 1в, г). Причем в тропических широтах, окрестности Гвианского течения и внутренней части субполярного круговорота указанный вклад составляет менее 35%, а на северо-востоке акватории – более 90%. Однако в области Гольфстрима и Лабрадорского течения доля сезонных флуктуаций толщины ВКС в общей ее изменчивости по данным ORA-S3 достигает 90%, а по данным GFDL – менее

70%. В центральной части акватории (в окрестности 30° с. ш.) дисперсия внутрigoдового хода толщины ВКС по данным GFDL описывает более 90% общей изменчивости.

Таким образом, величина вклада внутрigoдового хода в общую изменчивость температуры и толщины ВКС по данным океанических ре-анализов удовлетворительно согласуется на большей части акватории Северной Атлантики. Исключение составляют северные широты для температуры и область Гольфстрима для толщины ВКС.



Пространственная структура межгодовых изменений среднегодовой температуры ВКС по акватории Северной Атлантики приемлемо согласуется по анализируемым массивам данных (рис. 2а, б). Отмечаются высокие величины СКО межгодовых колебаний температуры ВКС в окрестности Гольфстрима и субполярном круговороте. По данным ORA-S3 максимальные величины СКО среднегодовой температуры ВКС расположены в области перехода Гольфстрима в Североатлантическое течение ( $>1^\circ\text{C}$ ), а

по данным GFDL – в окрестности Гольфстрима до его отрыва от континентального склона ( $>1,5^\circ\text{C}$ ). В тропических широтах изменчивость среднегодовых величин температуры ВКС в целом выше по данным GFDL, чем по данным ORA-S3. В окрестности западноафриканского апвеллинга величины СКО по данным GFDL достигают  $0,8^\circ\text{C}$ , а по данным ORA-S3 –  $0,5^\circ\text{C}$ . В окрестности Гвианского течения величины СКО по данным GFDL достигают  $0,6^\circ\text{C}$ , по данным ORA-S3 – менее  $0,5^\circ\text{C}$ .

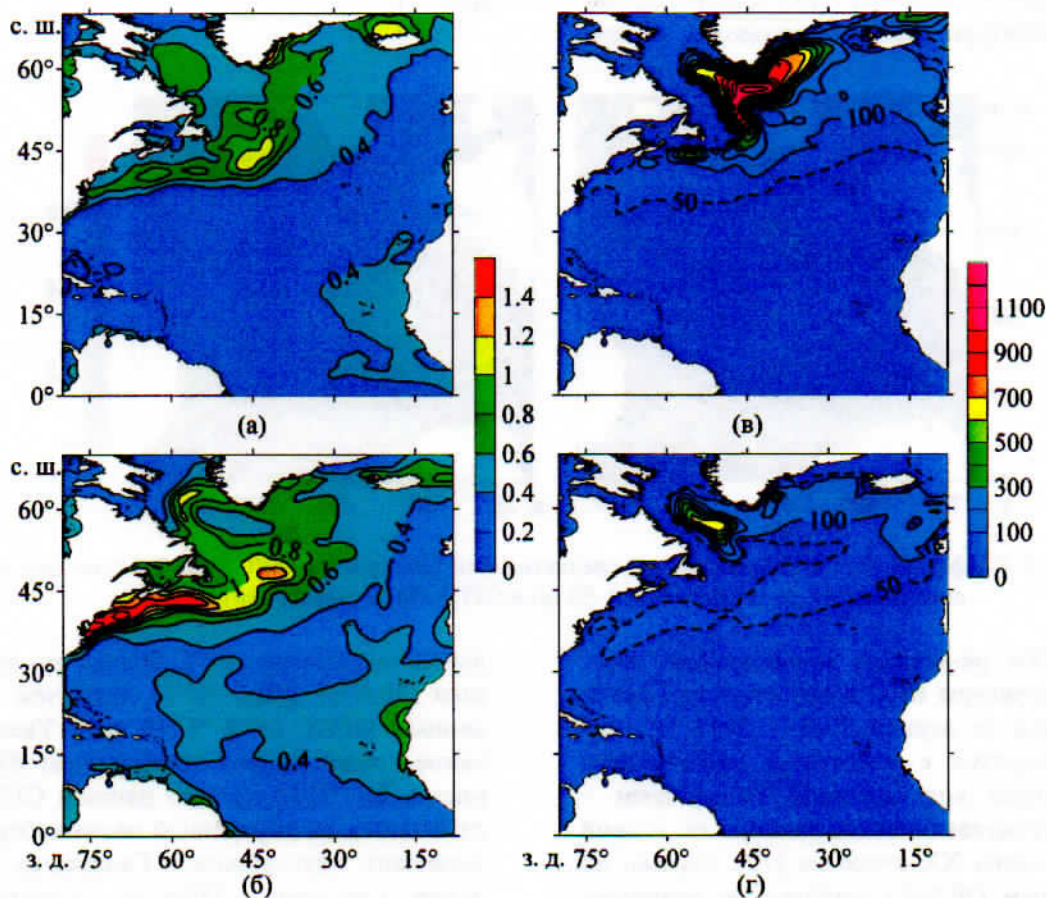


Рис. 2. СКО межгодовых изменений среднегодовой температуры ВКС,  $^\circ\text{C}$  (а, б) и толщины ВКС в январе (в, г) по данным океанических ре-анализов ORA-S3 (а, в) и GFDL (б, г) за период 1961 – 2011 гг. Изолинии на в, г проведены через 100 м, изолиния 50 м обозначена пунктиром

Межгодовая изменчивость толщины ВКС в целом по акватории в основном определяется изменчивостью зимней толщины ВКС. Межгодовые изменения толщины ВКС в январе различаются по анализируемым массивам данных (рис. 2в, г). Южнее  $35^\circ$  с. ш. и в западной части субполярного круговорота величины СКО межгодовых колебаний толщины ВКС в январе менее 50 м. В области перехода Гольфстрима в Североатлантичес-

ское течение величины СКО межгодовых изменений толщины ВКС в январе по данным ORA-S3 достигают 400 м, а по данным GFDL – менее 50 м. Область глубокого конвективного перемешивания в высоких широтах Северной Атлантики по данным ORA-S3 занимает практически всю внутреннюю часть субполярного круговорота. Величины СКО межгодовых изменений толщины ВКС в январе здесь по этим данным пре-



вышают 1000 м. По данным океанического ре-анализа GFDL область формирования Североатлантической глубинной водной массы находится в море Лабрадор с величинами СКО межгодовых изменений толщины ВКС в январе здесь около 700 м.

Таким образом, оба ре-анализа воспроизводят повышенную межгодовую изменчивость среднегодовой температуры ВКС в окрестности интенсивных течений и западноафриканского апвеллинга. Однако по данным GFDL отмечается завышение величин СКО среднегодовой температуры ВКС. Межгодовая измен-

чивость величин толщины ВКС в январе и площадь области интенсивной конвекции больше по данным ORA-S3, что указывает на недостаточное воспроизведение конвективных процессов в высоких широтах в ре-анализе GFDL.

Пространственное распределение величин коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры ВКС в Северной Атлантике по данным океанических ре-анализов ORA-S3 и GFDL характеризуется положительными величинами практически на всей акватории (рис. 3).

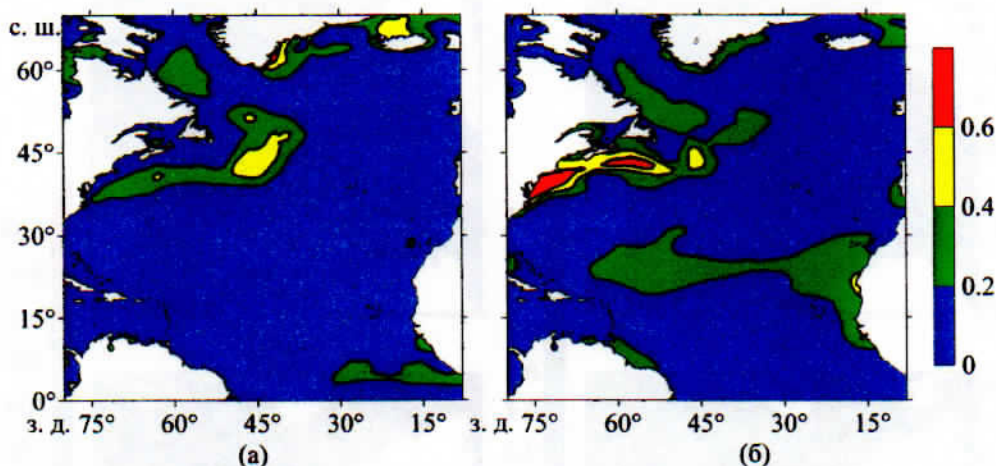


Рис. 3. Коэффициенты линейного тренда среднегодовой температуры ВКС ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) по данным океанических ре-анализов ORA-S3 (а) и GFDL (б) за период 1961 – 2011 гг.

Оба ре-анализа воспроизводят рост температуры ВКС в окрестности Гольфстрима за период 1961 – 2011 гг., что согласуется с известным увеличением переноса вод системой Гольфстрим – Североатлантическое течение со второй половины XX столетия [13]. Однако по данным ORA-S3 наибольшие величины коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры ВКС расположены в области перехода Гольфстрима в Североатлантическое течение ( $>0,4$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет), а по данным GFDL – в окрестности Гольфстрима до его отрыва от континентального склона ( $>0,6$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет). В окрестности Лабрадорского течения величины коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры ВКС совпадают по данным обоих ре-анализов. В окрестности Восточно-Гренландского течения величины коэффициентов линейных трендов среднего-

довой температуры ВКС больше по данным ORA-S3 ( $>0,6$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет), чем по данным GFDL ( $>0,2$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет). Увеличение среднегодовой температуры ВКС (около  $0,2$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет) по данным GFDL отмечается во внутренней части субтропического круговорота и Гвианском течении, а по данным ORA-S3 – в восточной части Тропической Атлантики.

Таким образом, океанические ре-анализы ORA-S3 и GFDL воспроизводят долгопериодный рост среднегодовой температуры ВКС в Северной Атлантике. При этом большая величина потепления ВКС отмечается по данным GFDL.

**Заключение.** Сопоставление особенностей изменчивости температуры и толщины ВКС в Северной Атлантике по данным океанических ре-анализов ORA-S3 и GFDL показало их приемлемое согласие для температуры на большей части акватории, кроме высоких широт.



При этом в ре-анализе GFDL отмечается недостаточное воспроизведение конвективных процессов в высоких широтах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б. Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 4. С. 69–79.
2. Kröger J. Impact of different ocean reanalyses on decadal climate prediction / J. Kröger, W.A. Müller, J.S. von Storch // Clim. Dyn. 2012. V. 39. № 3–4. P. 795–810.
3. Крашенинникова С.Б. Термические характеристики субтропической Атлантики по данным WODB и ORA-S3 / С.Б. Крашенинникова, П.А. Сухонос // Системы контроля окружающей среды. 2014. Вып. 20. С. 123–127.
4. 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.
5. Wolff J.-O. The Hamburg Ocean Primitive Equation Model. Technical report, No. 13. / J.-O. Wolff, E. Maier-Reimer, S. Legutke // Hamburg. German Climate Computer Center. 1997. 98 pp.
6. Balmaseda M.A. The ECMWF ocean analysis system: ORA-S3 / M.A. Balmaseda, A. Vidard, D.L.T. Anderson // Mon. Wea. Rev. 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034.
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. Zhang S. System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic studies / S. Zhang, M.J. Harrison, A. Rosati et al. // Mon. Wea. Rev. 2007. V. 135. № 10. P. 3541–3564.
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 pp.
10. Pacanowski R.C. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans / R.C. Pacanowski, S.G.H. Philander // J. Phys. Oceanogr. 1981. V. 11. № 11. P. 1443–1451.
11. Кузнецов А.А. Верхний квазигоризонтальный слой Северной Атлантики. Обнинск, 1982, с.82.
12. Yashayaev I.M. Climate of the seasonal cycle in the North Pacific and the North Atlantic oceans / I.M. Yashayaev, I.I. Zvereva // Int. J. Clim. 2001. V. 21. № 4. P. 401–417. DOI: 10.1002/joc.585.
13. Джиганин Г.Ф. Низкочастотная изменчивость расходов Гольфстрима: описание и механизмы / Г.Ф. Джиганин, А.Б. Полонский // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 3. С. 30–49.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIABILITY OF TEMPERATURE AND THICKNESS OF THE UPPER MIXED LAYER IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ACCORDING TO OCEAN RE-ANALYSIS ORA-S3 AND GFDL

A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos

Institute of natural and technical systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

The analysis of the variability of the temperature and the thickness of the upper mixed layer (UML) in the North Atlantic Ocean according to the ORA-S3 and GFDL ocean re-analysis data is performed. Structure of the intraannual temperature variation is well reproduced by both re-analyses. However the values of the UML thickness according to the GFDL data are lower than according to ORA-S3 data in all months. In all water area the interannual variability of the UML temperature is higher according to the GFDL data. The interannual variability of the UML thickness values in January and the area of intense convection in the Labrador Sea are higher according to ORA-S3 data than the GFDL data. Both re-analyses reproduce long-period increase in the UML temperature in the North Atlantic. The more intense warming is marked according to the GFDL data.

**Keywords:** ocean re-analysis, ocean temperature, the thickness of the upper mixed layer, the North Atlantic.