

ТРЕНДЫ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПО СПУТНИКОВЫМ И МОДЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

Т.В. Белоненко¹, д-р.геогр.наук, А.В. Колдунов¹, канд.геогр.наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

TRENDS OF LEVEL FLUCTUATIONS IN NORTHERN ATLANTICS BY SATELLITE AND MODEL DATA

T.V. Belonenko¹, Dr.Sc., A.V. Koldunov¹, Cand.Sc.

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Рассматриваются тренды стерических колебаний в Северной Атлантике за период 2003-2015 гг., которые оцениваются двумя независимыми методами. Первый метод базируется на комплексном использовании данных альтиметрических и гравиметрических измерений: используются данные AVISO и миссии GRACE. Второй метод опирается на интегральную оценку стерических колебаний по изменениям объема жидкости за счет изменения ее плотности: расчеты проводились по данным реанализов SODA, EN4 и ARMOR. Показано, что использование комбинации данных альтиметрии и GRACE дают завышенные значения стерических колебаний и их трендов. Это связано с тем, что наблюдения GRACE показывают изменения массы океана и, следовательно, изменения уровня моря в некоей относительной, а не геоцентрической системе отсчета, так как не учитываются эффект упругой деформации дна океана и соответствующее перераспределение объемов воды. Показано, что в Северной Атлантике наибольшее смещение этих оценок и ошибки в определении стерических колебаний и их трендов по первому методу характерно для областей, расположенных около Гренландии, и это обусловлено вкладом отрицательной трендовой составляющей в данных GRACE. При относительном удалении от берегов Гренландии трендовая составляющая в измерениях GRACE выражена незначительна, и тренды стерических колебаний, рассчитанные по методу, совместно использующему данные AVISO и GRACE, похожи на тренды изменчивости уровня по альтиметрическим данным. Тренды стерических колебаний уровня океана, рассчитанные по данным реанализов, показывают значительное сходство пространственного распределения их оценок друг с другом, а также с трендами изменения уровня океана по альтиметрическим данным.

We consider trends of steric fluctuations in the North Atlantic for the period 2003-2015, which are estimated by two independent methods. The first method relies on the integrated use of altimetric and gravimetric measurements. AVISO data and GRACE missions are used. The second method uses an integral estimation of steric oscillations for changes in the liquid volume due to a change in its density. Calculations were carried out according to reanalysis data of SODA, EN4, and ARMOR. We prove that a direct comparison of altimetry with GRACE data and estimates using their combination gives overestimated values of steric fluctuations and their trends. This is due to the fact, that GRACE observations show changes in the ocean mass and consequently sea level changes in some relative reference system rather than geocentric reference system, since the effect of elastic deformation of the ocean floor and the corresponding redistribution of water volumes are not taken into account. We demonstrate that in the North Atlantic the greatest shift in these estimates with errors in the determination of steric fluctuations is characteristic for regions near Greenland due to the contribution of the negative trend component in the GRACE data. However, the trend component in the GRACE measurements is negligible with a relative distance from the shores of Greenland, and the trends of steric oscillations calculated using the method combining AVISO and GRACE data are similar to the trends of altimetric data variability. Trends of steric level oscillations calculated from reanalysis data show a significant similarity in the spatial distribution as well as with trends of sea level variation calculated from altimetric data.

Методика оценки стерических колебаний с использованием комбинированных спутниковых альтиметрических и гравиметрических измерений изложена в работах [1-3]. Применение этого метода для акватории Баренцева моря представлено в работе [4], а для морей Лабрадор и Ирмингера в работе [5].

Уровень океана, связанный с массой высоты столба жидкости, изменения которой происходят из-за процессов взаимодействия океана и атмосферы, включая приток пресной воды, а также таяние льда, может быть получен при помощи гравиметрических измерений, осуществляемые со спутников GOCE или GRACE. Гравиметрические измерения характеризуют массу столба жидкости в морях и океанах, фиксируя изменение морской массы, а над континентальными районами они дают прямые оценки изменения запасов воды [1]. Альтиметрические измерения, представленные в виде абсолютной динамической топографии,

характеризуют интегральный уровень океана относительно геоида [6]. Стерические колебания оцениваются непосредственно по разности альтиметрических и гравиметрических данных.

В нашем исследовании выбирались районы, удаленные от Гренландии, близость к которой, как оказалось, существенно влияет на получаемые оценки [7]. Линейные тренды стерических колебаний Северной Атлантики мы сравниваем с трендами, рассчитанными независимым методом по данным реанализов SODA, EN4 и ARMOR. Для исследования выбран период 2003-2015, который обусловлен продолжительностью миссии GRACE.

Помимо данных спутниковой альтиметрии и гравиметрических данных GRACE Tellus с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ сетки и доступным на сайте JPL (Jet Propulsion Laboratory), в настоящем исследовании использовались данные реанализов: SODA (Simple Ocean Data Assimilation), EN4 и ARMOR.

Выводы:

- Комплексное использование данных альтиметрических и гравитационных измерений дает принципиальную возможность оценить непосредственно стерические колебания уровня в различных бассейнах. Однако существуют проблемы, связанные с тем, что наблюдения GRACE, показывающие изменения массы океана, характеризуют изменения уровня моря в относительной, а не геоцентрической системе отсчета [8, 9]. Поэтому прямое сравнение альтиметрии с данными GRACE может привести к смещению оценок, не учитывающих влияние упругой деформации дна океана и соответствующего перераспределения объемов воды. Это означает, что применение метода комплексного использования данных альтиметрических и гравиметрических измерений сильно ограничено в географическом плане.
- Наибольший эффект эти процессы имеют в Северном Ледовитом океане, где смещение оценок данных GRACE может достигать 1,3 мм/год, а за его пределами 0,4 мм / год [10]. Этот эффект оказывает непосредственное влияние и на расчеты по комбинированным спутниковым данным стерических колебаний уровня моря и их трендов в Северной Атлантике.
- В Северной Атлантике оценка стерических колебаний уровня на основе разности альтиметрических и гравиметрических измерений дает завышение стерических колебаний уровня моря в морях Лабрадор и Ирмингера, что обусловлено вкладом отрицательной трендовой составляющей в данных GRACE около Гренландии. При этом пространственные распределения значений стерических колебаний в Северной Атлантике, рассчитанные для августа 2010 г. по комбинированным спутниковым данным, имеют наибольшее сходство с оценками по интегральной формуле, сделанными по данным реанализов SODA и ARMOR, а наименьшее – с EN4.
- Изменения уровня океана, обусловленные массовыми силами (измерения GRACE), имеют отрицательные тренды в непосредственной близости к Гренландии. Здесь уровень океана уменьшается со скоростью, превышающей 10 мм/год, достигая рядом с Гренландией 30 мм/год. Наблюдается небольшой рост уровня до 5 мм/год в районах около полуостровов Лабрадор и Скандинавия, но в остальной части бассейна северной Атлантики тренды или незначительны, или вообще отсутствуют. Иное распределение характерно для трендов, рассчитанным по альтиметрическим данным. В бассейнах, прилегающих к Гренландии, тренды могут быть и положительными, и отрицательными: если в морях Ирмингера и Баффина, а также около Шпицбергена наблюдается незначительное понижение уровня со скоростью 6 мм/год, то в остальной части бассейна уровень растёт, и скорость роста достигает 10 мм/год на юго-западе бассейна.
- При относительном удалении от берегов Гренландии трендовая составляющая в данных GRACE выражена незначительно, и тренды стерических колебаний по пространственному распределению величин похожи на тренды изменения уровня океана, рассчитанные по альтиметрическим данным.
- В Северной Атлантике распределение значений тренда существенное неоднородно по пространству. В частности, в море Ирмингера и южнее Исландии тренды стерических колебаний отрицательны, а в море Лабрадор и на юго-западе рассматриваемого бассейна наблюдаются положительные тренды.
- Тренды стерических колебаний уровня океана, рассчитанные по данным реанализов SODA, EN4 и ARMOR за период 2003-2015 гг. по интегральной формуле изменения объема

жидкости за счет изменения ее плотности [11], показывают значительное сходство между собой в пространственном распределении их оценок. Указанное сходство характерно также и для пространственного распределения трендов изменения уровня океана, рассчитанных по альтиметрическим данным.

Литература

1. Chambers D.P. Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry // Journal of Geophysical Research/ 2006. 111 (C3). C03010. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC002914>.
2. Lombard A., García D., Ramillien G., Cazenave A., Biancale R., Lemoine J.M., Flechtner F., Schmidt R., Ishii M. Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data // Earth Planet Sci Lett. 254. 2007. 194–202.
3. García D., Ramillien G., Lombard A., Cazenave A. Steric Sea-level Variations Inferred from Combined Topex/Poseidon Altimetry and GRACE Gravimetry // Pure & Applied Geophysics. 2007. Vol. 164. Issue 4. P. 721-731.
4. Volkov D.L., Landerer F.W., Kirillov S.A. The genesis of sea level variability in the Barents Sea // Continental Shelf Res. 66. 2013. 92-104. doi:10.1016/j.csr.2013.07.007.
5. Белоненко Т.В., Федоров А.М. Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера. // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 56–69.
6. Fu L.L., Le Traon P.-Y. Satellite altimetry and ocean dynamics // Comptes Rendus Geosciences. Vol. 338. Issues 14-15. 2006. P. 1063-1076. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.015>.
7. Белоненко Т.В., Федоров А.М., Башмачников И.Л., Фукс В.Р. Тренды интенсивности течений в Лабрадорском море и море Ирмингера по спутниковым альтиметрическим данным. Исследование Земли из космоса, 2018, № 2, с. 3–12. DOI: 10.7868/S020596141802001X.
8. Kuo C.-Y., Shum C.K., Guo J.-y., Yi Y., Braun A., Fukumori I., Shibuya, K. Southern Ocean mass variation studies using GRACE and satellite altimetry // Earth, Planets and Space. 2008. 60(5). 477–485. <https://doi.org/10.1186/BF03352814>
9. Ray R.D., Luthcke S.B., van Dam T. Monthly crustal loading corrections for satellite altimetry // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2013. 30(5). 999–1005. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00152.1>.
10. Frederikse T., Riva R.E.M., King M.A. Ocean bottom deformation due to present-day mass redistribution and its impact on sea level observations // Geophysical Research Letters. 2017. 44. <https://doi.org/10.1002/2017GL075419>.
11. Han G., Chen N., Kuo C.Y., Shum C.K., Ma Z. Interannual and Decadal Sea Surface Height Variability Over the Northwest Atlantic Slope // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. DOI:10.1109/JSTARS.2016.2584778, 2016.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-17-00027.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 18-17-00027.