

Тренды уровня Северного Ледовитого океана

Е. Е. Лемешко*, Е. М. Лемешко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru

Поступила: 15.04.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

Арктика играет значительную роль в климатической системе Земли. Цель данной статьи – проанализировать особенности изменчивости уровня Северного Ледовитого океана и сопоставить ее с изменчивостью уровня Мирового океана. По данным альтиметрии за 1993–2018 гг. получена оценка тренда уровня Мирового океана 3.15 ± 0.20 мм/год при 68%-ном доверительном интервале. При этом следует отметить увеличение коэффициента линейного тренда на 0.8 мм/год за 2004–2015 гг. в сравнении с 1993–2004 гг. Данные спутника *GRACE* позволяют оценить баристатический уровень моря, обусловленный вариациями массы воды. Оценка линейного тренда баристатического уровня Мирового океана за 2002–2018 гг. составила 2.13 ± 0.12 мм/год при 68%-ном доверительном интервале, а тренда стерического уровня – 1.02 мм/год, что согласуется с оценками других авторов, полученными независимыми методами. На основании анализа спутниковых данных *GRACE* и донного мареографа сделан вывод о репрезентативном представлении баристатического уровня Северного Ледовитого океана спутниковыми данными. Рассчитаны линейные тренды баристатического уровня Северного Ледовитого океана за 2002–2015 гг. и сопоставлены с оценками линейного тренда уровня Мирового океана и его стерической компоненты, полученными на основе разных методов. Процессы изменчивости баристатического уровня в Норвежском, Баренцевом и арктических морях России имеют в основном сезонный и внутрисезонный характер. Вклад процессов межгодовой изменчивости в этих морях составляет менее 20–30 %; в Восточно-Сибирском, Чукотском морях и в море Бофорта вклад межгодовой изменчивости достигает 50 %. Процессы в районе Гренландии характеризуются преимущественно межгодовой изменчивостью, которая дает 70–90 % вклада в суммарную дисперсию баристатического уровня.

Ключевые слова: *GRACE*, альтиметрия, уровень, баристатический уровень, стерический уровень, тренды уровня, Северный Ледовитый океан.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60083.

Для цитирования: Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М. Тренды уровня Северного Ледовитого океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 28–40. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-28-40

© Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Arctic Ocean Level Trends

E. E. Lemeshko*, E. M. Lemeshko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru*

Submitted 15.04.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

The Arctic plays a significant role in the Earth's climate system and the purpose of this article is to analyze peculiarities of variability of the Arctic Ocean level and to compare it with that of the World Ocean level. According to altimetry data for the period of 1993–2018 an estimate of the World Ocean level trend of 3.15 ± 0.2 mm/year with a 68 % confidence interval was obtained. Whereas an increase in the linear trend of 0.8 mm / year for the period 2004–2015 should be noted in comparison with 1993–2004. Estimation of the linear trend of the World Ocean barystatic level is 2.13 ± 0.12 mm/year with a 68 % confidence interval for the period 2002–2018, and the steric level trend is 1.02 mm/year, which is consistent with estimates of other authors obtained by independent methods. The linear trends of the Arctic Ocean barystatic level are calculated for the period 2002–2015 and compared with estimates of the linear trend of the World Ocean level and its steric component. The processes of variability of the barystatic level in the Norwegian, Barents and Arctic seas of Russia are mainly seasonal and intra-seasonal in nature, the contribution of interannual variability is less than 20–30 %; in the East Siberian, Chukchi and Beaufort Seas, the contribution of interannual variability reaches 50 %; processes in the region of Greenland are characterized mainly by interannual variability, which makes 70–90 % of the contribution to the total variance of the barystatic level.

Keywords: GRACE, altimetry, level, barystatic level, steric level, level trends, Arctic Ocean.

Acknowledgements: the research is performed under project No. 18-05-60083 and funded by the RFBR.

For citation: Lemeshko, E.E. and Lemeshko, E.M., 2020. Arctic Ocean Level Trends. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 28–40. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-28-40 (in Russian).

Введение

Изменение уровня Мирового океана является важным индикатором изменчивости климатической системы Земли в силу интегрального характера формирования уровня моря. Необходимость в наблюдении за уровнем моря была исторически обусловлена хозяйственной деятельностью человека, в частности развитием мореплавания. Поскольку крупнейшие мегаполисы были основаны на морском побережье, то наиболее длинные ряды наблюдений за уровнем моря имеются в Амстердаме (с 1765 г.), а с конца XVIII века – в Бресте, Стокгольме, Кронштадте и других городах. В целом средний уровень Мирового океана вырос с 1880 по 2009 г. на 210 мм. При этом положительный линейный тренд с 1900 по 2009 г. составил 1.7 ± 0.2 мм/год, а с 1961 по 2009 г. подъем уровня ускорился до 1.9 ± 0.4 мм/год [1]. По другим оценкам, с 1861 по 2005 г. рост уровня моря составил 1.4 мм/год [2], а за весь XX век – 1.7 ± 0.2 мм/год (при 95%-ном доверительном интервале

(ДИ) [3]. Однако скорость изменения коэффициента линейного тренда (его ускорение) была положительной и с 1900 по 2009 г. составила 0.009 ± 0.004 мм/год² при 68%-ном ДИ [1].

С появлением спутниковой альтиметрии океана в 1992 г. точность оценок среднего уровня Мирового океана существенно увеличилась [4], а линейный тренд находится в пределах от 3.15 ± 0.20 до 3.3 ± 0.4 [3] мм/год (таблица, рис. 1). В 2002 г. в рамках проекта *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)* был запущен спутник, по данным которого стало возможным рассчитать массу воды в океане, атмосфере и ледниках, а также влагозапас суши [5]. Это позволило оценить баристатическую составляющую уровня Мирового океана. Ее тренд за 2002–2018 гг. находится в пределах от 2.1 ± 0.3 мм/год [5] до 2.13 ± 0.12 мм/год при 68%-ном ДИ (таблица, рис. 1).

Современные альтиметрические данные в основном покрывают область океана от 66° с. ш. до 66° ю. ш. Недостаток/отсутствие данных затрудняет изучение изменчивости уровня Северного Ледовитого океана (СЛО). Значительная часть СЛО к тому же постоянно занята ледовым покровом, что также ограничивает использование спутниковой информации о температуре поверхности моря и данных буев-профилемеров *Argo* и осложняет развитие наблюдательных систем в Арктическом бассейне [6]. Арктика играет значительную роль в климатической системе Земли, и анализ особенностей изменчивости уровня СЛО является целью данной статьи.

Подходы и методы

Для океана по измерениям аномалий гравитационного поля Земли спутником *GRACE* рассчитываются пространственные и временные вариации водных масс, которые затем преобразуются в поля придонного давления [7].

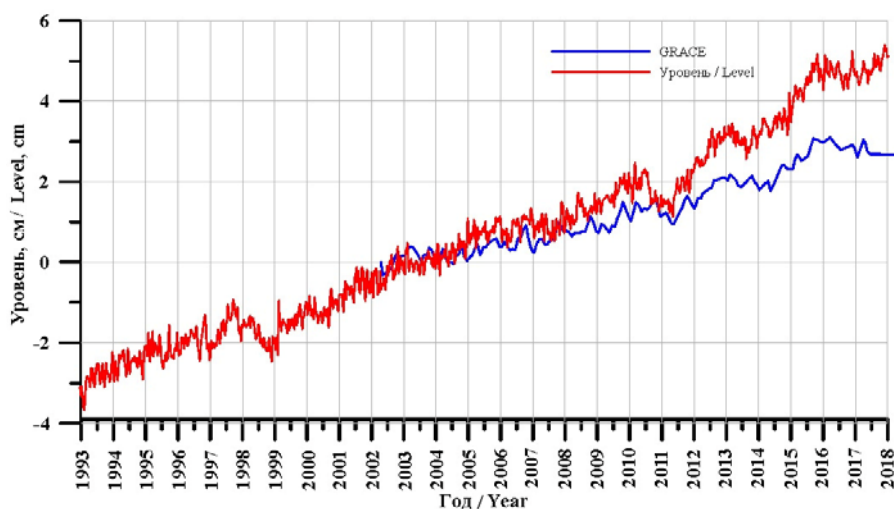


Рис. 1. Средний уровень Мирового океана по данным альтиметрии (красная линия) и средний баристатический уровень (сезонный ход исключен) по данным *GRACE* (синяя линия) (см)

Fig. 1. Global mean sea level according to altimetry data (red line) and mean barystatic level (seasonal variation is removed) according to *GRACE* data (blue line) (cm)

Оценки трендов уровня моря и его составляющих по данным разных авторов и настоящего исследования

Estimates of trends of sea level and its elements according to the data obtained by other authors and to the data considered in this paper

Параметр / Parameter	Оценка тренда, мм/год, согласно / Trend estimates, mm/year, according to	
	[1, 3, 5, 6]	авторской оценке / authors' estimate
Уровень Мирового океана, альтиметрия (сезонный сигнал отфильтрован), 1993–2018 гг. / Global sea level, altimetry (seasonal signal filtered), 1993–2018	3.00 ± 0.40 [1] 3.30 ± 0.40 [3] 3.35 ± 0.40 [6]	3.15 ± 0.20*
Уровень Мирового океана по данным ма-реографов за XX в. / Global sea level, bottom pressure recorder data, in the 20 th century	1.9 ± 0.4 [1] 1.7 ± 0.2 [3]	–
Баристатический уровень Мирового океана (сезонный сигнал отфильтрован), GRACE, 2002–2018 гг. / Global sea barystatic level (seasonal signal filtered), GRACE data, 2002–2018	1.60 ± 0.16 [3] 2.10 ± 0.30 [5]	2.13 ± 0.12*
Баристатический уровень Мирового океана (данные уровня моря минус термостерическая компонента уровня), 2002–2015 гг. / Global sea barystatic level (sea level data minus thermosteric level), 2002–2015	2.18 ± 0.30 [3] 2.10 ± 0.36 [5]	–

Примечание: * – рис. 1.

Note: * – Fig. 1

Интегрируя уравнение гидростатики от дна до поверхности океана ζ для придонного давления в океане p_b , получаем [8]

$$p_b = g \int_{-H}^{\zeta} \rho dz + p_a = g\rho_0\zeta + g \int_{-H}^0 \rho dz + p_a, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; $\rho(z)$ – вертикальное распределение плотности морской воды; p_a – атмосферное давление на уровне моря; ρ_0 – средняя плотность морской воды. Возвышение уровня свободной поверхности моря представим в виде $\zeta = \zeta' + \zeta^{ib}$, где ζ' – динамическая составляющая, связанная с воздействием ветра, давления и других факторов; ζ^{ib} – отклонение уровня моря, вызванное отличием локального атмосферного давления p_a от среднего давления по всему Мировому океану $\overline{p_a}$ (эффект обратного барометра):

$$\zeta^{ib} = \frac{1}{g\rho_0}(\overline{p_a} - p_a). \quad (2)$$

Подставляя формулу (2) в (1), получаем

$$p_b = g\rho_0\zeta' + g \int_{-H}^0 \rho dz + \overline{p_a}. \quad (3)$$

Для изучения динамики водных масс $\overline{p_a}$ обычно не учитывается. Как правило, эта величина используется в приложениях, когда сравнивается параметр p_b по данным *GRACE* с измерениями придонного давления мареографами; $\overline{p_a}$ оценивается по данным атмосферных реанализов [8, 9]. Изменение уровня моря в результате изменения массы океана называют баристатическим. Обозначим через ζ_{Bar} баристатический уровень моря, обусловленный вариациями массы океана в основном из-за изменения водного баланса океана, а через ζ_ρ – стерический уровень, обусловленный изменением плотности морской воды:

$$\zeta_{Bar} = \frac{p_b}{g \cdot \rho_0}; \quad \zeta_\rho = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-H}^0 \rho dz. \quad (4)$$

Тогда из приведенных выше обозначений (3) и (4) получаем

$$\zeta_{Bar} = \zeta' - \zeta_\rho. \quad (5)$$

Баристатический уровень моря равен динамическому уровню минус стерический уровень (5).

При обработке гравиметрической информации спутника *GRACE* данные о вариации силы тяжести пересчитываются в вариации массы океана и затем в придонное давление p_b согласно алгоритмам из работы [4]. Изменение баристатического уровня моря вследствие добавления или удаления массы воды называется эквивалентным слоем воды. Придонное давление пересчитывается в толщину эквивалентного слоя воды по формуле (4) для баристатического уровня ζ_{Bar} , при этом 1 мбар (1 гПа) p_b равен 1 см ζ_{Bar} . Для расчета ζ_{Bar} в формуле (4) средняя плотность морской воды ρ_0 обычно принимается равной 1028 кг/м³ согласно [4], поскольку ζ_{Bar} является баротропной компонентой уровня моря. Динамический уровень ζ' относительно геоида можно рассчитать по данным альтиметрии [10]. Стерический уровень, обусловленный изменениями плотности воды, рассчитывается по гидрологическим данным, получаемым в ходе *CTD*-зондирований и от буев-профиломеров *Argo* [3, 4, 7].

Результаты и обсуждения

По данным альтиметрии (<http://www.esa-sealevel-cci.org/products>) был рассчитан средний уровень ζ' (исключен эффект обратного барометра), а по данным *GRACE* (<https://podaac.jpl.nasa.gov/datasetlist?search=tellus>) – средний баристатический уровень ζ_{Bar} Мирового океана, из обоих рядов исключен сезонный ход (рис. 1). Полученная оценка линейного тренда уровня за 1993–2018 гг. составила 3.15 ± 0.20 мм/год при 68%-ном ДИ

(см. таблицу) и согласуется с оценками других авторов [3, 4], приведенными выше и в таблице. Следует отметить увеличение линейного тренда на 0.8 мм/год за 2004–2015 гг. в сравнении с 1993–2004 гг. (рис. 1). Оценка линейного тренда баристатического уровня за 2002–2018 гг. составила 2.13 ± 0.12 мм/год при 68%-ном ДИ (см. таблицу), а исходя из формулы (5), можно оценить/рассчитать положительный линейный тренд стерического уровня, который равен 1.02 мм/год. При оценке стерического уровня Мирового океана независимым методом на основе водного баланса и среднего по ансамблю стерических компонент уровня были получены очень близкие значения линейного тренда 1.14 ± 0.09 мм/год за 2004–2015 гг. [11], что в целом подтверждает наши оценки трендов.

Несмотря на неоднородность размещения мареографов и пропуски в данных, линейный тренд среднего уровня СЛО, по данным береговых мареографов, составляет 1.5 ± 0.3 мм/год в период 1950–2010 гг. для области $68\text{--}82^\circ$ с. ш. [12], что хорошо согласуется с оценкой за тот же период для среднего уровня Мирового океана (1.8 ± 0.3 мм/год) [1].

Данные альтиметрии пока еще недостаточно полно покрывают СЛО [6]. Тем не менее по данным спутников *ERS-1/2/Envisat* и *CryoSat-2* за 1996–2018 гг. были получены оценки тренда (без учета проблемных данных *ERS-1*) среднего уровня СЛО 2.22 ± 0.40 мм/год для 95%-ного ДИ [13], что меньше тренда для среднего уровня Мирового океана 3.0–3.3 мм/год (см. таблицу). Также в СЛО отмечено увеличение тренда после 2004 г., как и в Мировом океане.

Для СЛО нами были проанализированы данные о давлении по измерениям придонного мареографа (<https://doi.org/doi:10.18739/A2HQ3RX88>) за 2005–2014 гг. в точке с координатами 89.97° с. ш.; 33° з. д. (рис. 2), его положение обозначено на рис. 3 аббревиатурой МСП (мареограф Северного полюса). Для анализа использовалась информация мареографов после фильтрации приливных колебаний и удаления эффекта обратного барометра, затем было проведено осреднение по месяцам, а давление переведено в толщину эквивалентного слоя воды. Далее полученные аномалии среднемесячных значений придонного давления сопоставлялись с аномалиями значений придонного давления *GRACE* в узле сетки, ближайшем к расположению мареографа 89.5° с. ш.; 33.5° з. д. (см. рис. 2). Пропуски в данных *GRACE* были проинтерполированы по времени. Коэффициент корреляции между данными мареографа и *GRACE* составил 0.81, а среднеквадратичное отклонение между ними – 3.42 см при 95%-ном ДИ. Линейный тренд за 2005–2014 гг. составил 2.5 ± 1.2 мм/год для данных донного мареографа и 4.8 ± 0.9 мм/год для данных *GRACE*. Следует отметить, что аномалии баристатического уровня по данным *GRACE* превышали уровень по данным мареографа $\zeta_{Bar} > \zeta'$ в 2006, 2008, 2010 и 2013–2015 гг. (см. рис. 2). Тогда, согласно формуле (5), можно оценить тренд стерического уровня как отрицательный: -2.3 мм/год за тот же период. При низких значениях температуры воды вклад в изменение стерического уровня обусловлен в основном соленостью. Следовательно, в указанные периоды времени отмечается уменьшение солености из-за распреснения вод в области Северного полюса в районе расположения донного мареографа.

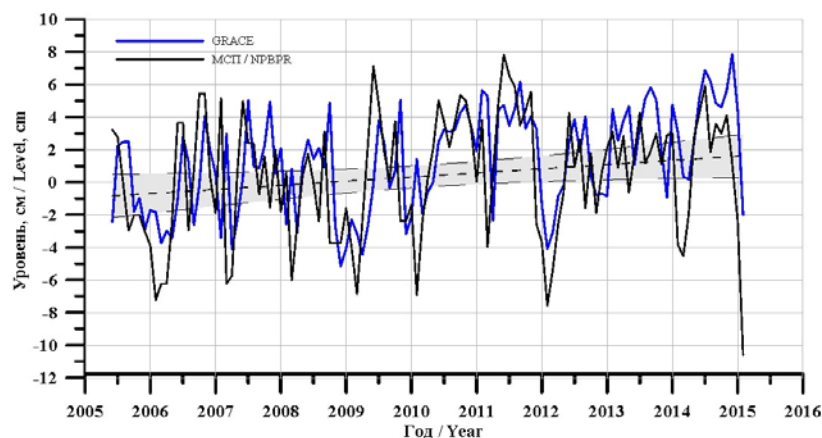


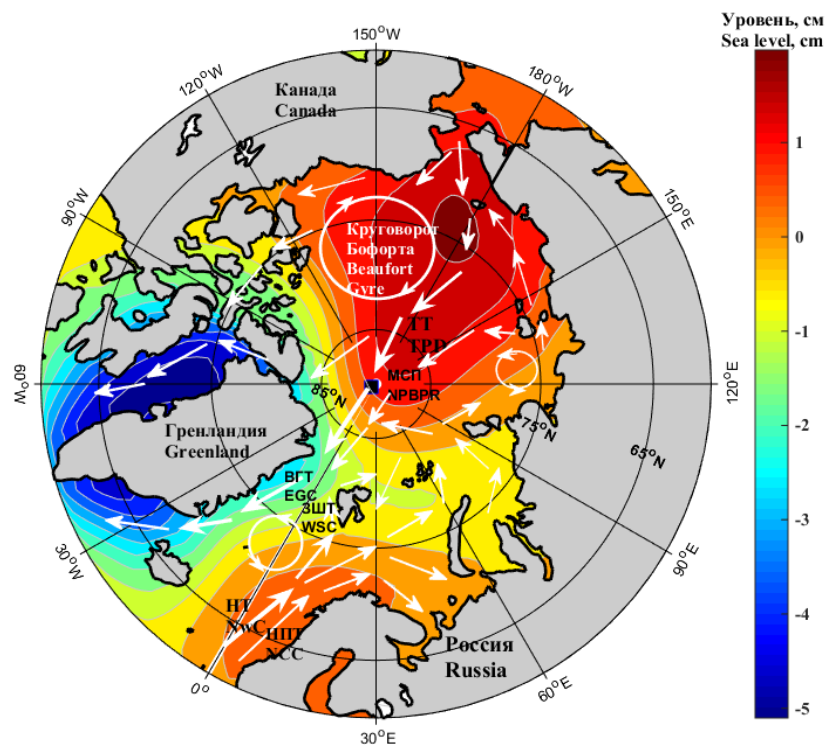
Рис. 2. Аномалии уровня моря по данным донного мареографа (черная линия), расположенного у Северного полюса (89.97° с. ш.; 33° з. д.) и в ближайшем к нему узле данных *GRACE* (синяя линия), (см). Линейный тренд (штриховая линия) и 95%-ные ДИ (серый фон)

Fig. 2. Sea level anomalies according to the data of bottom pressure recorder (black line) positioned near the North Pole (89.97° N; 33° W) and in the *GRACE* datanode nearest thereto (blue line) (cm). Linear trend (dashed line) and 95% confidence intervals (grey shaded area)

В целом из сопоставления графиков на рис. 2 следует, что данные *GRACE* хорошо описывают временную изменчивость уровня. Пространственная изменчивость баристатического уровня для СЛЮ приведена на рис. 3. Карта среднего за 2002–2015 гг. баристатического уровня СЛЮ согласуется с известной схемой течений (рис. 3). Положительные аномалии уровня до 0.5 см отмечаются у берегов Норвегии и связаны с адвекцией вод Северо-Атлантическим течением и далее Норвежским течением и Норвежским прибрежным течением (рис. 3), эта же область характеризуется среднеквадратичными отклонениями (СКО) уровня до 3–4 см. Вторая область положительных аномалий до 2 см находится в Восточно-Сибирском море и связана с водообменом через Берингов пролив и стоком сибирских рек (рис. 3), этой области соответствуют СКО 4–5 см.

Отрицательные аномалии баристатического уровня –2 ... –5 см расположены вокруг Гренландии и обусловлены таянием ее ледников и выносом распресненных вод Восточно-Гренландским и Лабрадорским течениями в Атлантику (рис. 3), значения СКО достигают 7–9 см.

Эти три области также четко выделяются и на карте коэффициентов линейного тренда для данных *GRACE* (рис. 4). В районе Норвегии отмечается положительный тренд (около 1 мм/год), в западной части Баренцева моря тренда нет, в восточной его части выделяется отрицательный тренд (около –2 мм/год), а в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском – положительный тренд (1–5 мм/год) (рис. 4). Вокруг Гренландии выделяется значительный отрицательный тренд –10 ... –20 мм/год (рис. 4). Чтобы понять, процессы каких временных масштабов вносят основной вклад в изменчивость уровня СЛЮ, были рассчитаны коэффициенты относительного вклада



Р и с . 3. Среднегодовое баристатическое положение Северного Ледовитого океана (см) по данным *GRACE* за 2002–2015 гг. МСП – положение мареографа Северного полюса (89.97° с. ш.; 33° з. д.); НТ – Норвежское течение, НПТ – Норвежское прибрежное течение, ЗШТ – Западно-Шпицбергенское течение, ВГТ – Восточно-Гренландское течение, ТТ – Трансарктическое течение

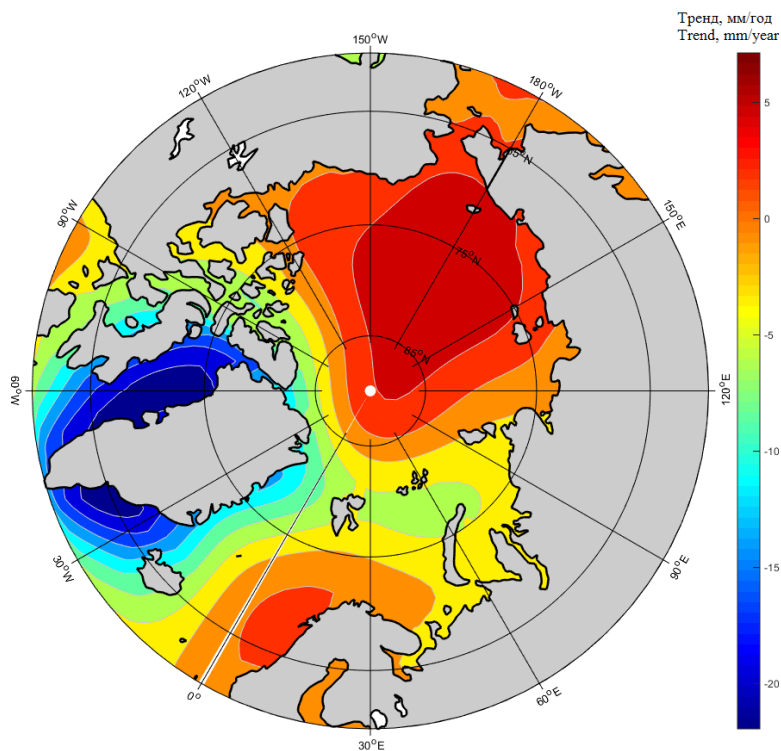
Fig. 3. Averaged long-term barystatic level of the Arctic ocean (cm) according to *GRACE* data for 2002–2015. NPBPR – North Polar bottom pressure recorder (89.97°N; 33.00°W); NwC – Norwegian Current; NCC – Norwegian Coastal Current; WSC – West Spitsbergen Current; EGC – East Greenland Current; TPD – Transpolar Drift

процесса Y в дисперсию исходного ряда X :

$$\sigma_{\%} = 100\% \cdot \left(1 - \frac{\sigma(X - Y)}{\sigma(X)}\right). \quad (6)$$

В качестве ряда Y использовался ряд X значений *GRACE* в каждом узле сетки после процедуры фильтрации методом скользящего среднего с окном 13 месяцев. Таким образом, ряд Y содержит сигнал межгодовой изменчивости уровня.

На рис. 5 представлена рассчитанная по формуле (6) карта процентного вклада межгодового сигнала баристатического уровня СЛЮ в дисперсию исходного поля по данным *GRACE* за 2002–2015 гг. Процессы изменчивости баристатического уровня в Норвежском, Баренцевом и арктических морях России имеют в основном сезонный и внутрисезонный характер, вклад



Р и с . 4. Коэффициенты линейного тренда баристатического уровня Северного Ледовитого океана (мм/год) по данным *GRACE* за 2002–2015 гг. (сезонный сигнал удален)

F i g . 4. Linear trend coefficient of the Arctic Ocean barostatic level (mm/yr) according to *GRACE* data for 2002–2015 (seasonal signals removed)

межгодовой изменчивости – менее 20–30 % (рис. 5). В Восточно-Сибирском, Чукотском морях и в море Бофорта вклад межгодовой изменчивости достигает 50 %, то есть достигает паритета с сезонными и внутрисезонными процессами (рис. 5). И только в районе Гренландии межгодовая изменчивость достигает 70–90 % вклада в суммарную дисперсию уровня (рис. 5).

Выводы

Использование данных спутника *GRACE* позволяет оценить изменчивость баристатической компоненты уровня моря, обусловленной вариациями массы воды. Сопоставление данных *GRACE* с данными альтиметрии об уровне моря позволяет рассчитать коэффициенты линейного тренда стерического уровня моря, которые хорошо согласуются с независимыми оценками тренда, полученными на основе данных гидрологических зондирований и буев-профиломеров *Argo*. В работе оценены коэффициенты трендов уровня Мирового океана и проведены их сопоставления с линейными трендами уровня моря по данным береговых измерителей. Также получены линейные тренды баристатической и стерической компонент уровня (см. таблицу).

Полученная оценка линейного тренда уровня Мирового океана за период 1993–2018 гг. составила 3.15 ± 0.20 мм/год при 68%-ном ДИ. При этом следует

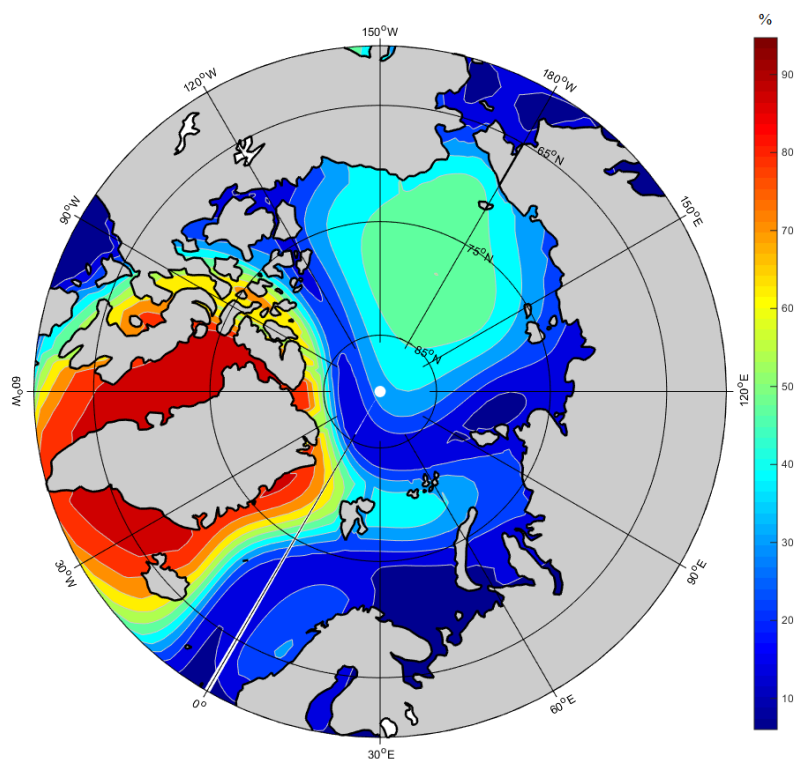


Рис. 5. Процентный вклад межгодового сигнала баристатического уровня Северного Ледовитого океана $\sigma\%$ (%) в дисперсию исходного поля по данным *GRACE* за 2002–2015 гг.

Fig. 5. Percent contribution of the interannual signal of the Arctic Ocean barystatic level $\sigma\%$ (%) to source field dispersion according to *GRACE* data for 2002–2015

отметить увеличение линейного тренда на 0.8 мм/год за 2004–2015 гг. в сравнении с 1993–2004 гг. Оценка линейного тренда баристатического уровня Мирового океана за 2002–2018 гг. составила 2.13 ± 0.12 мм/год при 68%-ном ДИ, а тренда стерического уровня – 1.02 мм/год, что согласуется с оценками других авторов, полученными независимыми методами.

Линейный тренд среднего уровня СЛО по данным альтиметрии составил 2.22 ± 0.40 мм/год для 95%-го ДИ, что меньше тренда среднего уровня Мирового океана, равного 3.0–3.3 мм/год. В СЛО также отмечено увеличение тренда после 2004 г., как и в Мировом океане.

Для СЛО данные *GRACE* сопоставлялись с данными донного мареографа за 2005–2014 гг. в точке с координатами 89.97° с. ш.; 33° з. д. Коэффициент корреляции составил 0.81, а среднеквадратичное отклонение между ними – 3.42 см при 95%-ном ДИ. За 2005–2014 гг. линейный тренд для данных донного мареографа составил 2.5 ± 1.2 мм/год и 4.8 ± 0.9 мм/год для данных *GRACE*, а для стерического уровня тренд был отрицательным (–2.3 мм/год). На основании этого сделан вывод об уменьшении солёности вследствие распреснения вод в области Северного полюса в районе расположения донного мареографа.

Для СЛО по данным *GRACE* положительные аномалии баристатического уровня выделены в районе Норвегии и в Восточно-Сибирском море, отрицательные – в районе Гренландии (см. рис. 3). Эти области согласуются со схемой течений в СЛО и районами поступления пресных вод от таяния ледников Гренландии и стока сибирских рек. В Норвежском море выделен положительный тренд около 1 мм/год, в западной части Баренцева моря тренд нулевой, а в восточной – слабый отрицательный (около –2 мм/год). В море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях выделяется положительный тренд 1–5 мм/год, а около Гренландии – значительный отрицательный тренд –10 ... –20 мм/год (см. рис. 4).

Процессы изменчивости баристатического уровня в Норвежском, Баренцевом и арктических морях России имеют в основном сезонный и внутрисезонный характер. Вклад межгодовой изменчивости составляет менее 20–30 %, при этом в Восточно-Сибирском, Чукотском морях и в море Бофорта вклад межгодовой изменчивости достигает 50 %. Процессы в районе Гренландии характеризуются в основном межгодовой изменчивостью, которая дает 70–90 % вклада в суммарную дисперсию баристатического уровня (рис. 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Church J. A., White N. J. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century // *Surveys in Geophysics*. 2011. Vol. 32, iss. 4–5. P. 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>
2. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Шевчук О. И. Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. СПб. : РГГМУ, 2007. № 4. С. 125–131.
3. Global ocean freshening, ocean mass increase and global mean sea level rise over 2005–2015 / W. Llovel [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number 17717. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54239-2>
4. Evaluation of the global mean sea level budget between 1993 and 2014 / D. P. Chambers [et al.] // *Surveys in Geophysics*. 2017. Vol. 38, iss. 1. P. 309–327. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9381-3>
5. Wiese D. N., Landerer F. W., Watkins M. M. Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution // *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52, iss. 9. P. 7490–7502. <https://doi.org/10.1002/2016WR019344>
6. Belokopytov V. N. Factors reducing efficiency of the operational oceanographic forecast systems in the Arctic basin // *Physical Oceanography*. 2017. Iss. 2. P. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>
7. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effect and their possible detection using GRACE // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. Vol. 103, iss. B12. P. 30205–30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>
8. Ponte R. M. A preliminary model study of the large-scale seasonal cycle in bottom pressure over the global ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C1. P. 1289–1300. <https://doi.org/10.1029/1998JC900028>
9. Remote sensing of bottom pressure from GRACE satellites / C. Peralta-Ferriz [et al.] // *US CLIVAR Variations*. 2017. Vol. 15, no. 2. P. 22–28.

10. Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration / M. Ablain [et al.] // *Earth System Science Data*. 2019. Vol. 11, iss. 3. P. 1189–1202. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1189-2019>
11. New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach / H. B. Dieng [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 8. P. 3744–3751. <https://doi.org/10.1002/2017GL073308>
12. Svendsen P. L., Andersen O. B., Nielsen A. A. Stable reconstruction of Arctic sea level for the 1950–2010 period // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 8. P. 5697–5710. <https://doi.org/10.1002/2016JC011685>
13. Arctic ocean sea level record from the complete radar altimetry era: 1991–2018 / S. K. Rose [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 14. 1672. <https://doi.org/10.3390/rs11141672>

Об авторах:

Лемешко Егор Евгеньевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7313-4819; ResearcherID: C-5691-2016; Scopus Author ID: 57205681264**, e.lemeshko@mhi-ras.ru

Лемешко Евгений Михайлович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физ.-мат. наук, **SPIN-код: 3836-5786; ResearcherID: S-7815-2018; Scopus Author ID: 6508300982**, evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Лемешко Егор Евгеньевич – обзор литературы по проблеме исследования, выборка данных по Арктике, разработка программного обеспечения и проведение расчетов, построение графиков, карт, качественный анализ результатов и их интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

Лемешко Евгений Михайлович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, выбор методов анализа данных и анализ полученных результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Church, J.A. and White, N.J., 2011. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, 32(4–5), pp. 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>
2. Malinin, V.N., Gordeeva, S.M. and Shevchuk, O.I., 2007. Variability of the Global Sea Level for the Past 140 Years. In: RSHU, 2007. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. Saint Petersburg: RSHU Publishers. No. 4, pp. 125–131 (in Russian).
3. Llovel, W., Purkey, S., Meyssignac, B., Blazquez, A., Kolodziejczyk, N. and Bamber, J., 2019. Global Ocean Freshening, Ocean Mass Increase and Global Mean Sea Level Rise over 2005–2015. *Scientific Reports*, 9, 17717. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54239-2>
4. Chambers, D.P., Cazenave, A., Champollion, N., Dieng, H., Llovel, W., Forsberg, R., von Schuckman, K. and Wada, Y., 2017. Evaluation of the Global Mean Sea Level Budget between 1993 and 2014. *Surveys in Geophysics*, 38(1), pp. 309–327. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9381-3>

5. Wiese, D.N., Landerer, F.W. and Watkins, M.M., 2016. Quantifying and Reducing Leakage Errors in the JPL RL05M GRACE Mascon Solution. *Water Resources Research*, 52(9), pp. 7490–7502. <https://doi.org/10.1002/2016WR019344>
6. Belokopytov, V.N., 2017. Factors Reducing Efficiency of the Operational Oceanographic Forecast Systems in the Arctic Basin. *Physical Oceanography*, (2), pp. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>
7. Wahr, J., Molenaar, M. and Bryan, F., 1998. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effect and their Possible Detection Using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), pp. 30205–30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>
8. Ponte, R.M., 1999. A Preliminary Model Study of the Large-Scale Seasonal Cycle in Bottom Pressure over the Global Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C1), pp. 1289–1300. <https://doi.org/10.1029/1998JC900028>
9. Peralta-Ferriz, C., Landerer, F.W., Chambers, D.P., Volkov, D. and Llovel, W., 2017. Remote Sensing of Bottom Pressure from GRACE Satellites. *US CLIVAR Variations*, 15(2), pp. 22–28.
10. Ablain, M., Meyssignac, B., Zawadzki, L., Jugier, R., Ribes, A., Spada, G., Benveniste, J., Cazenave, A. and Picot, N., 2019. Uncertainty in Satellite Estimates of Global Mean Sea-Level Changes, Trend and Acceleration. *Earth System Science Data*, 11(3), pp. 1189–1202. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1189-2019>
11. Dieng, H.B., Cazenave, A., Meyssignac, B. and Ablain, M., 2017. New Estimate of the Current Rate of Sea Level Rise from a Sea Level Budget Approach. *Geophysical Research Letters*, 44(8), pp. 3744–3751. <https://doi.org/10.1002/2017GL073308>
12. Svendsen, P.L., Andersen, O.B. and Nielsen, A.A., 2016. Stable Reconstruction of Arctic Sea Level for the 1950–2010 Period. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(8), pp. 5697–5710. <https://doi.org/10.1002/2016JC011685>
13. Rose, S.K., Andersen, O.B., Passaro, M., Ludwigsen, C.A. and Schwatke, C., 2019. Arctic Ocean Sea Level Record from the Complete Radar Altimetry Era: 1991–2018. *Remote Sensing*, 11(14), 1672. <https://doi.org/10.3390/rs11141672>

About the authors:

Egor E. Lemeshko, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 7313-4819**; **ResearcherID: C-5691-2016**; **Scopus Author ID: 57205681264**, e.lemeshko@mhi-ras.ru

Evgeny M. Lemeshko, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 3836-5786**, **ResearcherID: S-7815-2018**, **Scopus Author ID: 6508300982**, evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

Contribution of the authors:

Egor E. Lemeshko – literature review on the research problem, Arctic data selection, software development and computational analysis, chart and map construction, qualitative analysis of the results and their interpretation, conclusion drawing

Evgeny M. Lemeshko – general academic advising on the research, statement of the research objectives and tasks, analysis and interpretation of obtained results, study results discussion, conclusion drawing

The authors have read and approved the final manuscript.