

Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»  
ИКИ РАН, 16 - 20 ноября 2020 г., г.Москва

# ТРЕНДЫ УРОВНЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ



**Лемешко Е.Е.**

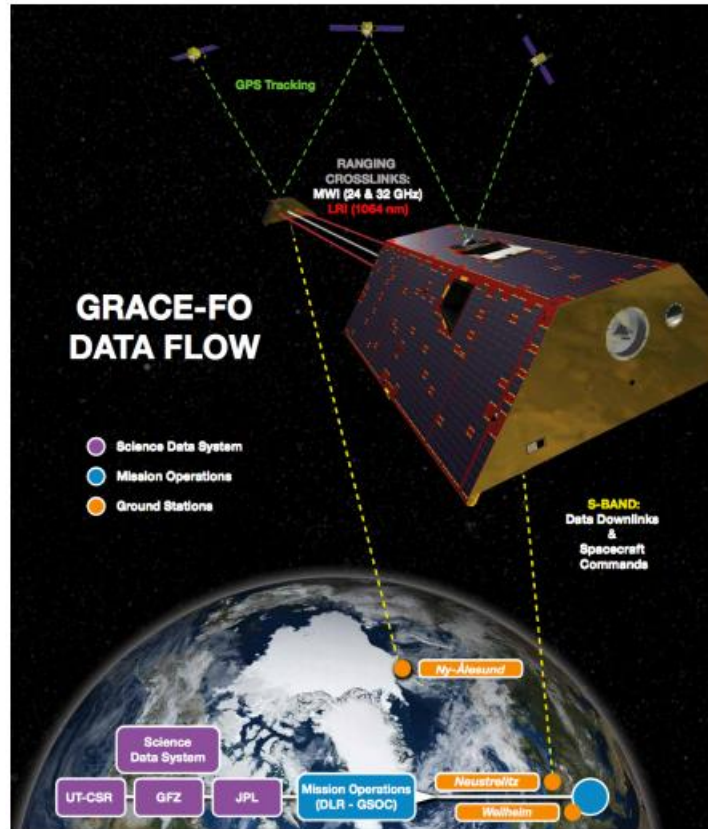
Морской гидрофизический институт, г.Севастополь  
[e.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:e.lemeshko@mhi-ras.ru)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90061

# Цель работы



- Арктика играет значительную роль в климатической системе Земли. Цель данной работы – проанализировать особенности изменчивости уровня Северного Ледовитого океана (СЛО) и сопоставить ее с изменчивостью уровня Мирового океана (МО).
- 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  $1.7 \pm 0.2$  мм/год, а с 1961 по 2009 г. подъем уровня ускорился до  $1.9 \pm 0.4$  мм/год. По другим оценкам, с 1861 по 2005 г. рост уровня моря составил 1.4 мм/год, а за весь XX век –  $1.7 \pm 0.2$  мм/год (при 95%-ном доверительном интервале (ДИ)). Однако, скорость изменения коэффициента линейного тренда (его ускорение) была положительной и с 1900 по 2009 г. составила  $0.009 \pm 0.004$  мм/год при 68%-ном ДИ.
- С появлением спутниковой альтиметрии океана в 1992 г. точность оценок среднего уровня МО существенно увеличилась, а линейный тренд находится в пределах от  $3.15 \pm 0.20$  до  $3.3 \pm 0.4$  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. Это позволило оценить баристатическую составляющую уровня МО. Ее тренд за 2002–2018 гг. находится в пределах от  $2.1 \pm 0.3$  мм/год до  $2.13 \pm 0.12$  мм/год при 68%-ном ДИ (таблица, рис. 1).
- Современные альтиметрические данные в основном покрывают область океана от  $82^\circ$  с.ш. до  $82^\circ$  ю.ш. Недостаток/отсутствие данных затрудняет изучение изменчивости уровня 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.



## GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)

Две платформы измеряют гравиметрический потенциал Земной системы: суша + криосфера + океан + атмосфера. После процесса обработки вариаций потенциала силы тяжести на выходе получают среднемесячные данные для океана в виде придонного давления, которое через уравнение гидростатики пересчитывают в толщину эквивалентного слоя воды.

Изменение глобального среднего уровня моря в результате изменения массы океана называют **баристатическим** ( $h_{\text{масс}}$ ).

Изменения уровня моря как глобально, так и локально, вызванные изменениями плотности воды, называются **стерическими** ( $h_{\text{стер}}$ ). В результате уровень определяется как:

$$\Delta h_{\text{альт}} = \Delta h_{\text{стер}} + \Delta h_{\text{масс}},$$

где  $\Delta h_{\text{стер}}$  рассчитывается по данным буёв АРГО (ARGO) и STD зондированиям до глубины 1500–2000 м, а параметр  $\Delta h_{\text{масс}}$  вычисляется с помощью данных спутника GRACE.

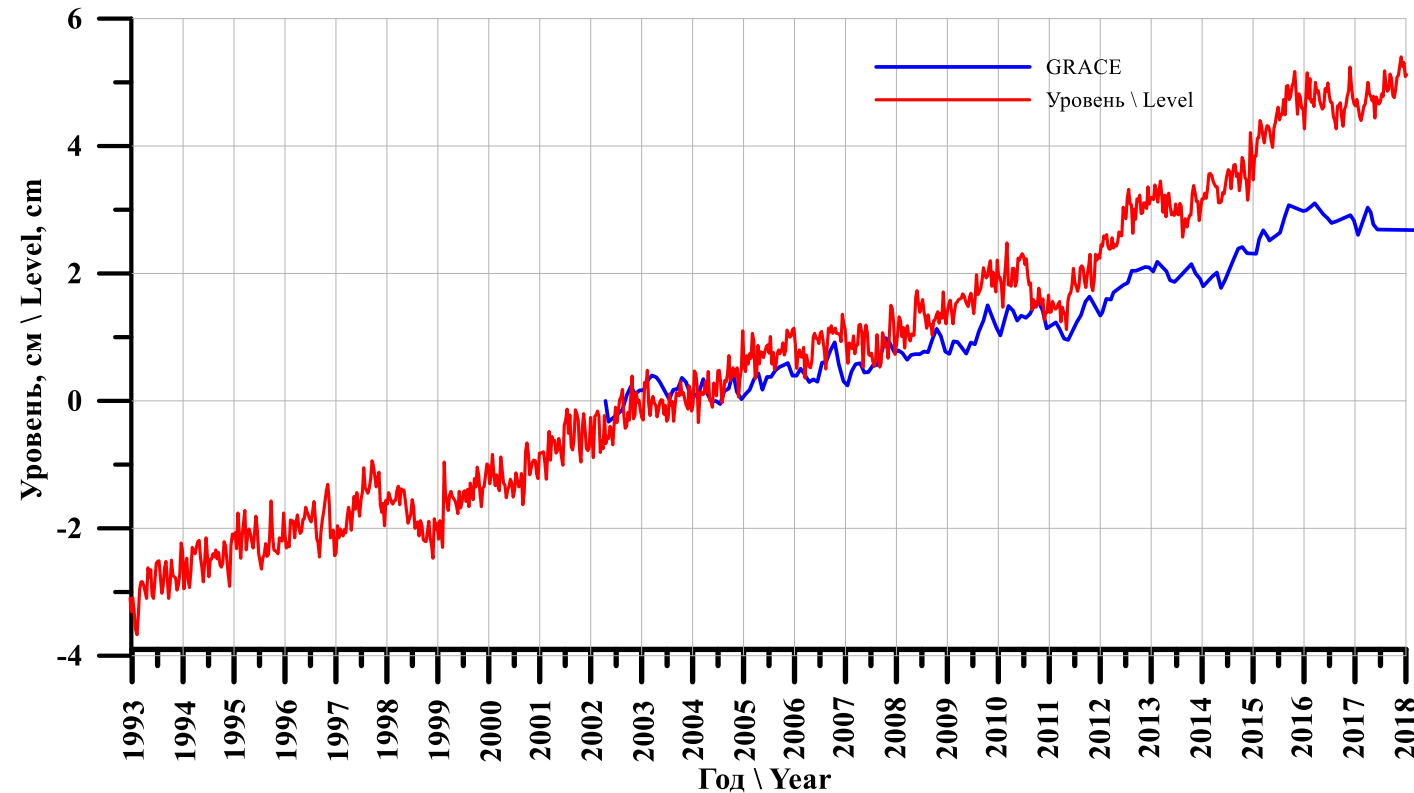


Рис. 1. Средний уровень Мирового океана по данным альтиметрии (красная линия) и средний баристатический уровень (сезонный ход исключен) по данным *GRACE* (синяя линия) [см]



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

№	Параметры	Оценки тренда, мм/год	
		Другие авторы	Данное исследование
1	Уровень Мирового океана, альтиметрия (сезонный сигнал отфильтрован), 1993-2018 гг.	3.0 ± 0.4 3.3 ± 0.4 3.35 ± 0.4	3.15 ± 0.2 (рис.1).
2	Уровень Мирового океана по данным мареографов в 20м веке.	1.9 ± 0.4 1.7 ± 0.2	-
3	Баристатический уровень Мирового океана (сезонный сигнал отфильтрован), GRACE, 2002-2018 гг.	1.6 ± 0.16 2.1 ± 0.3	2.13 ± 0.12 (рис.1).
4	Баристатический уровень Мирового океана (альтиметрия минус термостерический уровень), 2002-2015 гг.	2.18 ± 0.3 2.1 ± 0.36	-



- По данным альтиметрии (<http://www.esa-sealevel-cci.org/products>) рассчитан средний уровень (исключен эффект обратного барометра), а по данным *GRACE* (<https://podaac.jpl.nasa.gov/datasetlist?search=tellus>) – средний баристатический уровень МО, из обоих рядов исключен сезонный ход (рис. 1). Полученная оценка линейного тренда уровня за 1993–2018 гг. составила  $3.15 \pm 0.20$  мм/год при 68%-ном ДИ (см. таблицу) и согласуется с оценками других авторов. 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  $2.13 \pm 0.12$  мм/год при 68%-ном ДИ (см. таблицу), можно оценить/рассчитать положительный линейный тренд стерического уровня, который равен  $1.02$  мм/год. При оценке стерического уровня МО независимым методом на основе водного баланса и среднего по ансамблю стерических компонент уровня были получены очень близкие значения линейного тренда  $1.14 \pm 0.09$  мм/год за 2004–2015 гг., что в целом подтверждает оценки трендов.
- Несмотря на неоднородность размещения мареографов и пропуски в данных, линейный тренд среднего уровня СЛО, по данным береговых мареографов, составляет  $1.5 \pm 0.3$  мм/год в период 1950–2010 гг. для области  $68\text{--}82^\circ$  с.ш., что хорошо согласуется с оценкой за тот же период для среднего уровня МО ( $1.8 \pm 0.3$  мм/год).
- Данные альтиметрии пока еще недостаточно полно покрывают СЛО. 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  $2.22 \pm 0.40$  мм/год для 95%-ного ДИ, что меньше тренда для среднего уровня МО  $3.0\text{--}3.3$  мм/год (см. таблицу). Также в СЛО отмечено увеличение тренда после 2004 г., как и в МО.



- Для СЛО 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  $2.5 \pm 1.2$  мм/год для данных донного мареографа и  $4.8 \pm 0.9$  мм/год для данных GRACE.
- Аномалии баристатического уровня по данным GRACE превышали уровень по данным мареографа в 2006, 2008, 2010 и 2013–2015 гг.
- Сопоставив графики на рис. 2 отмечаем, что данные GRACE хорошо описывают временную изменчивость уровня.

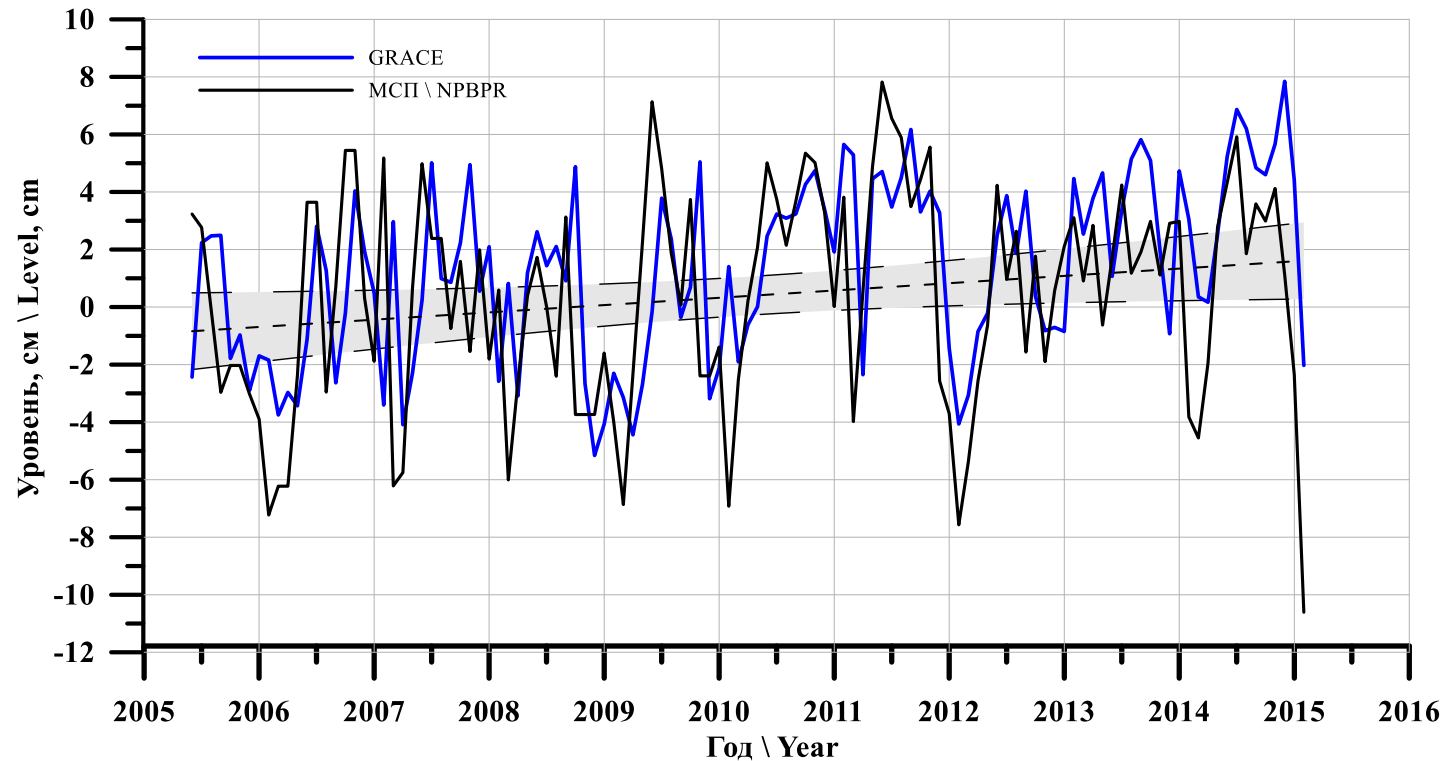


Рис. 2. Аномалии уровня моря по данным донного мареографа (черная линия), расположенного у Северного полюса ( $89.97^\circ$  с. ш.;  $33^\circ$  з. д.) и в ближайшем к нему узле данных GRACE (синяя линия), (см). Линейный тренд (штриховая линия) и 95%-ные ДИ (серый фон)





- Пространственная изменчивость баристатического уровня для СЛО приведена на рис. 3.
- Карта среднего за 2002–2015 гг. баристатического уровня СЛО 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  $-2 \dots -5$  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.

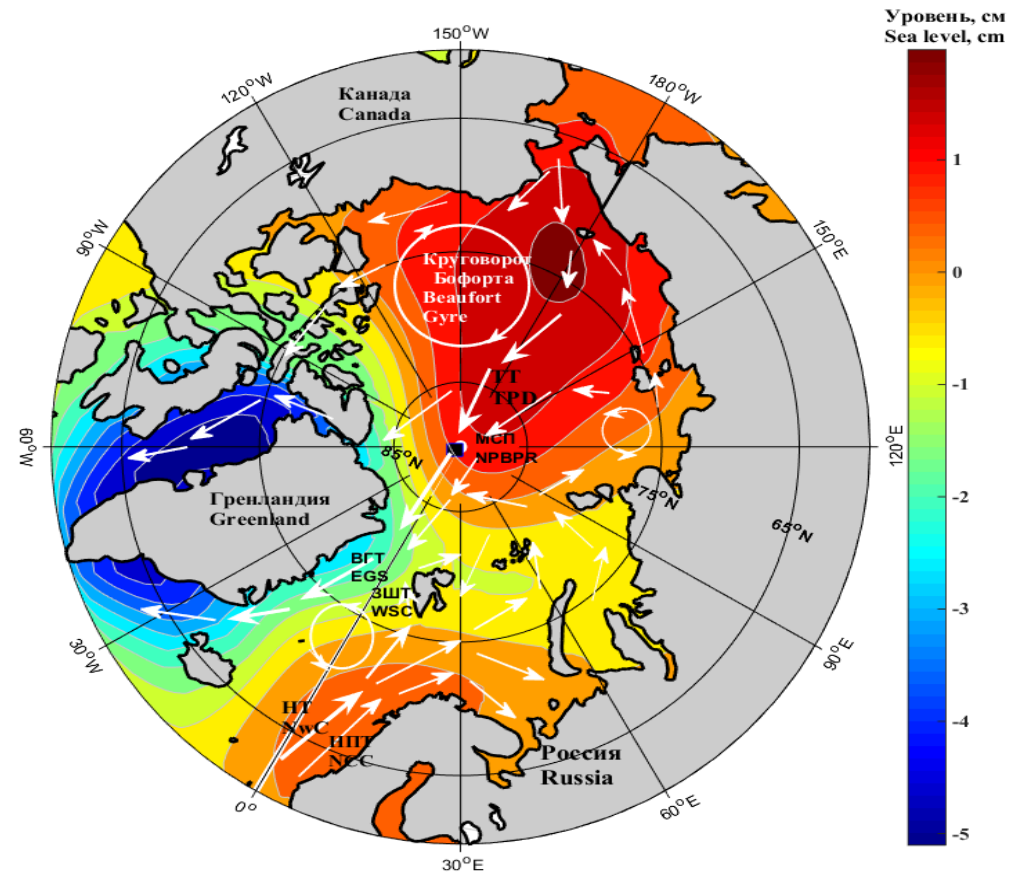


Рис. 3. Среднегодовой баристатический уровень Северного Ледовитого океана (см) по данным *GRACE* за 2002–2015 гг.

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



- На карте коэффициентов линейного тренда для данных GRACE также четко выделяются три области (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 СЛО, были рассчитаны коэффициенты относительного вклада процесса  $Y$  в дисперсию исходного ряда  $X$  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 карта процентного вклада межгодового сигнала баристатического уровня СЛО 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 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).

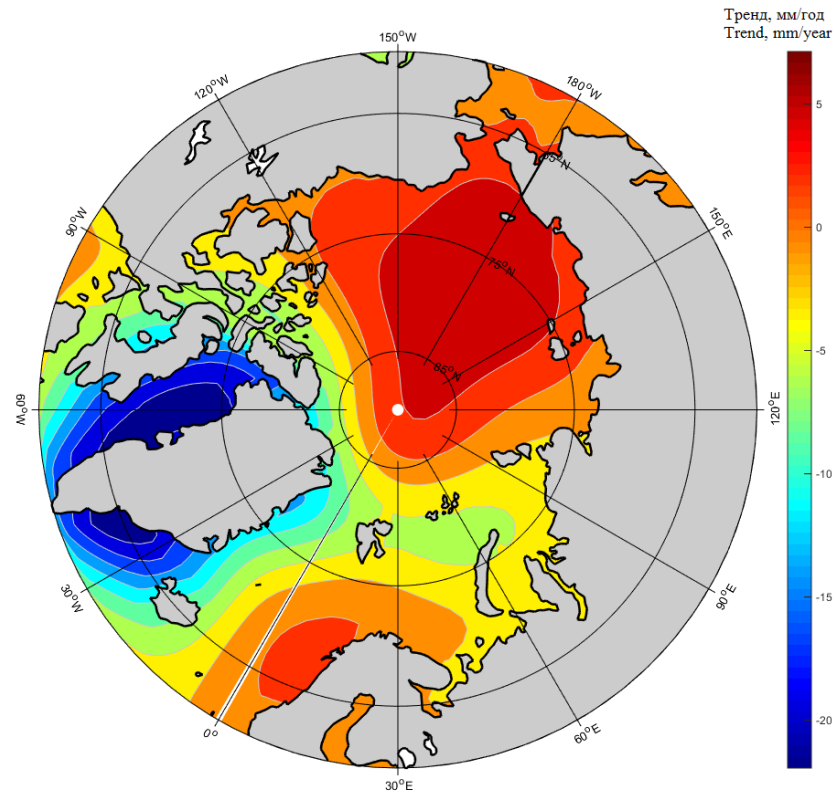


Рис. 4. Коэффициенты линейного тренда баристатического уровня Северного Ледовитого океана (мм/год) по данным *GRACE* за 2002–2015 гг. (сезонный сигнал удален)

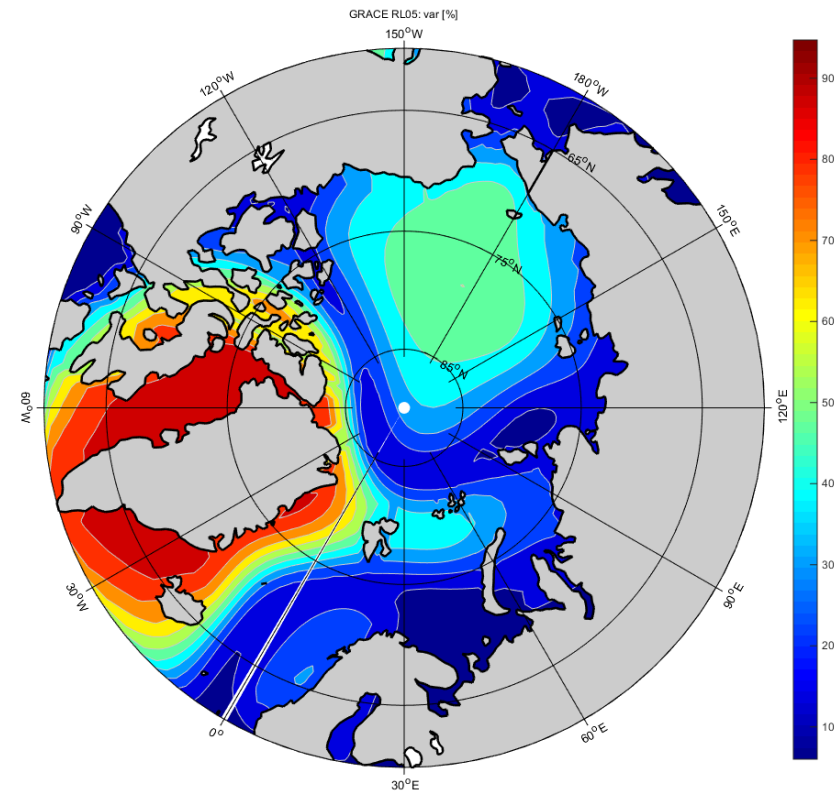


Рис. 5. Процентный вклад межгодового сигнала баристатического уровня Северного Ледовитого океана  $\sigma_{\%}$  (%) в дисперсию исходного поля по данным *GRACE* за 2002–2015 гг.



- В работе оценены коэффициенты трендов уровня Мирового океана и проведены их сопоставления с линейными трендами уровня моря по данным береговых измерителей. Получены линейные тренды баристатической и стерической компонент уровня (см. таблицу).
- Полученная оценка линейного тренда уровня Мирового океана за период 1993–2018 гг. составила  $3.15 \pm 0.20$  мм/год при 68%-ном ДИ. При этом следует 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  $2.13 \pm 0.12$  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  $2.22 \pm 0.40$  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  $89.97^\circ$  с. ш.;  $33^\circ$  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  $2.5 \pm 1.2$  мм/год и  $4.8 \pm 0.9$  мм/год для данных *GRACE*, а для стерического уровня тренд был отрицательным ( $-2.3$  мм/год).



- 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).

***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90061 "Современные изменения режимов циркуляции атмосферы, уровня и водных масс Северного Ледовитого океана как показатели климатических изменений в Арктике".***