

УДК 551.461.22:[629.783:528.8](265.5)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Р.М. Алоярлов, А.М. Федоров, Т.В. Белоненко

Санкт-Петербургский государственный университет, romaaloyarov@mail.ru

Для северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг. исследованы изменения уровня по альтиметрическим и гравиметрическим данным, а также стерические колебания уровня, рассчитанные по данным комбинированных спутниковых измерений. На основе этих данных проанализирована межгодовая и сезонная изменчивость уровня океана. Получены оценки трендов, которые свидетельствуют об устойчивом повышении уровня океана в рассматриваемом бассейне. Показано, что для акватории северо-западной части Тихого океана эти изменения гораздо более выражены, чем для всего бассейна северной части Тихого океана. В частности, здесь стерические колебания возрастают со скоростью 3,7 мм/год, в то время как на остальной акватории бассейна — со скоростью 1,4 мм/год.

Ключевые слова: уровень океана, стерические колебания, тренд, Тихий океан, СЗТО, спутниковая альтиметрия, GRACE, гравиметрические данные.

STERIC LEVEL OSCILLATION IN THE NORTHWESTERN PART OF THE PACIFIC: SATELLITE DATA ANALYSIS

R.M. Aloiarov, A.M. Fedorov, T.V. Belonenko

St. Petersburg State University

For the North Pacific for the period 2003–2016 sea level oscillations from altimetry and gravimetric data, as well as steric level fluctuations calculated from the combined altimetry and GRACE data were investigated. On the basis of these data, the annual and seasonal variability of the sea level are analyzed. Estimates of trends have been obtained that indicate a steady rise in the sea level in the basin under consideration. It is shown that for the northwestern Pacific, these changes are much more pronounced than for the entire basin of the northern part of the Pacific Ocean. In particular, here steric fluctuations increase at a rate of 3.7 mm / year, while in the rest of the basin's water area — at a rate of 1.4 mm / year.

Keywords: sea level, steric level oscillation, linear trend, North Pacific, altimetry, GRACE, gravimetric data.

Введение

Уровень Мирового океана является одним из важнейших индикаторов, определяющих состояние глобального климата [13]. Изменения уровня обусловлены как гидродинамическими процессами, так и взаимодействием с атмосферой. Исходя из оценок на основе альтиметрических данных, приведенных в работе Nerem et al. [16], уровень Мирового океана повышался с 1993 по 2017 г. со скоростью

$3,4 \pm 0,4$ мм/год. На уровенную поверхность в общем случае действует множество различных факторов, различающихся по своей природе. Эти факторы можно объединить в три группы: гидрометеорологические процессы, геолого-динамические процессы, космогеофизические силы [9]. В современных условиях влиянием последних двух групп можно пренебречь вследствие их малости [8, 10]. Таким образом, определяющим фактором для изменений уровня океана является воздействие гидрометеорологических процессов, оказывающих влияние на объемные изменения уровня, среди которых определяющими являются стерические колебания.

История исследований стерических колебаний тесно связана с развитием приборов и методов, позволяющих рассчитывать влияние плотностной изменчивости на уровень моря. Самые первые работы были основаны на данных, полученных *in situ*, но ограниченность по пространству и времени не позволяла изучать стерические эффекты в более крупных пространственно-временных масштабах. Лейтмотивом в современных работах является использование альтиметрических данных, позволяющих анализировать межгодовую и сезонную изменчивость колебаний уровня благодаря широким возможностям дистанционного зондирования.

В работе [1] использовался гидродинамический подход к расчету уровня моря на основе уравнения состояния EOS-80. Полученные результаты показали, что в зависимости от выбранной методики для одного и того же выбранного района расчет стерических колебаний может существенно различаться. Chambers [12] впервые продемонстрировал совместное использование для решения данной задачи данных гравиметрических спутников GRACE и массивов альтиметрических данных. Немного позднее была опубликована работа Lombard et al. [15], в которой была произведена оценка изменений стерического уровня моря на основе комбинированных данных GRACE и Jason-1. Эта работа подтверждает хорошую связь между интерпретируемыми спутниковыми данными и значениями, полученными *in situ*. Была рассмотрена сезонная и межгодовая изменчивость стерических колебаний для периода август 2002 г. — апрель 2006 г. Было выявлено, что тенденция к росту стерических колебаний составляет $1,9 \pm 0,2$ мм/год, однако авторы выявили некоторое несоответствие оценок по спутниковым и гидродинамическим данным, сославшись на малый на то время массив гравиметрии GRACE.

В работе Purkey et al. [18] был проведен анализ изменения уровня Мирового океана за период 1993—2013 гг.: по отдельным районам были составлены графики хода уровня. Авторы пришли к выводу, что наиболее значимое повышение уровня наблюдается в индийско-атлантическом секторе Южного океана, в южной Атлантике и в северной части Тихого океана. Как было аргументировано в работе [18], повышение уровня связано в первую очередь со стерическими колебаниями уровня, происходящими на фоне глобального потепления, но также авторы отмечают влияние изменения водного баланса системы океан — суша. В упомянутой работе подчеркивается важность вклада нижележащих океанских вод (их стерические колебания) на изменение уровня моря. Проанализировав данные спутников GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) за период 2003—2013 гг., ученые выявили для северной части Тихого океана повышение уровня со скоростью $1,5$ мм/год.

В работе Fu et al. [14] отмечается, что в глобальном масштабе за 2006—2018 гг. уровень океана повышается со скоростью 3,3 мм/год, причем вклад уровня, обусловленный массовыми силами, составляет 2,0 мм/год, а вклад компонента, содержащего информацию о вкладе стерических колебаний, —1,3 мм/год. Данные, по которым производились расчеты, были получены с дрейфующих буев-измерителей ARGO; кроме того, использовалась информация, полученная со спутников TOPEX/Poseidon и GRACE.

Целью настоящей работы является исследование стерических колебаний в северной части Тихого океана, включающей северо-западную часть Тихого океана (СЗТО), на основе комплексного использования спутниковых альтиметрических и гравиметрических измерений. Указанная цель достигается путем решения следующих задач: исследование сезонной и межгодовой изменчивости изменений уровня по альтиметрическим данным, по гравиметрическим данным и на основе их разности; оценка трендов стерических колебаний уровня для северной части Тихого океана и отдельно для СЗТО.

Описание данных

Альтиметрические данные, используемые в работе, представляют собой мультиспутниковый продукт архива AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>). Данные массива абсолютной динамической топографии имеют суточную дискретность и доступны за период 1993—2017 гг., значения высоты поверхности моря над геоидом представлены на четвертьградусной сетке.

Гравиметрические данные GRACE TELLUS (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-ocean/>) были получены с сайта лаборатории JPL NASA. В используемых данных содержались пробелы, обусловленные различными техническими причинами. Массив данных имеет временные рамки, связанные с продолжительностью миссии спутников GRACE: обрабатывались данные за 2003—2016 гг.

Методы и результаты

Стерические колебания уровня океана происходят из-за вертикального расширения или сжатия морской воды, которые связаны с изменением плотности воды ρ или удельного объема α без изменения массы воды. Существуют различные подходы к оценке стерических колебаний уровня [1, 11]. В предположении несжимаемости воды колебания удельного объема, характеризующие стерические колебания, постепенно затухают с глубиной, охватывая всю толщу; они обусловлены, главным образом, изменчивостью температуры и в меньшей степени солёности деятельного слоя океана.

Методика оценки стерических колебаний с использованием комбинации данных спутниковых альтиметрических и гравиметрических измерений изложена в работах Chambers [12], Lombard et al. [15]. Применение данного подхода к акватории Баренцева моря показано также в работе [19], где рассматриваются различные аспекты оценки стерических колебаний на основе данной методики.

Суть метода можно описать следующим выражением:

$$УМ = УМ_{м.} + УМ_{ст.},$$

где УМ — аномалии уровня моря, измеренного относительно геоида (альтиметрические измерения); $УМ_{м.}$ — аномалии уровня моря, которые определяются изменением массы столба жидкости (гравиметрические измерения); $УМ_{ст.}$ — аномалии уровня моря, обусловленные вкладом стерических колебаний. Таким образом, стерические колебания уровня моря — это разность аномалий уровня моря по данным альтиметрических и гравиметрических измерений:

$$УМ_{ст.} = УМ - УМ_{м.}$$

На первом этапе необходимо синхронизировать по времени и пространству два массива: альтиметрические и гравиметрические данные. Поскольку альтиметрические данные имеют меньшую дискретность по пространству и времени, эти данные путем пространственного и временного осреднения были приведены к дискретности массива GRACE — к одноградусной сетке и месячной дискретности. Поскольку массив данных GRACE имеет временные рамки 2003—2016 гг., анализ стерических колебаний на основе комбинированных спутниковых данных проводился только для этого периода.

На втором этапе анализировалась сезонная и межгодовая изменчивость рассматриваемых полей, оценивались тренды, проводились расчеты стерических колебаний и их пространственное картирование. Для оценки трендов использовался метод наименьших квадратов.

На рис. 1 представлена *сезонная изменчивость* УМ — аномалий уровня моря, рассчитанных по альтиметрическим данным. Карты аномалии уровня позволяют четко различать изменения в сезонном ходе. Обнаружено, что в экваториальной и тропической зонах имеют место обширные почти параллельно расположенные области положительных аномалий уровня, которые особенно хорошо видны весной и осенью. В осенне-зимний период в зоне 10—20° с.ш. отмечается отрицательная аномалия уровня. Минимальное значение, которое достигается осенью, составляет –13,8 см. Отрицательные значения уровня распределены почти по всей акватории. Летом и весной в этих же широтах аномалия меняет знак на противоположный, достигая максимального значения в весенний период. Значение максимума составляет 13,6 см.

Вдоль экватора (0—10° с.ш.) распределение аномалии уровня имеет противоположный характер. Летом и осенью аномалия уровня положительная, и максимум, равный 10,6 см, достигается осенью; зимой и весной аномалия уровня отрицательная, минимальное значение наблюдается весной и составляет –10,8 см.

Общие распределения УМ весной и осенью почти повторяют друг друга, но с противоположными знаками. Так, среднее значение уровня по всей акватории весной равно –1,8 см, а в осенний период составляет 2 см. Из рисунка видно, что максимальные значения сосредоточены в северо-западной части океана. Координаты весеннего минимума (–20,9 см) составляют 35° с.ш., 144° в.д. Осенний максимум, равный 21,6 см, находится в точке с координатами 36° с.ш., 140° в.д.

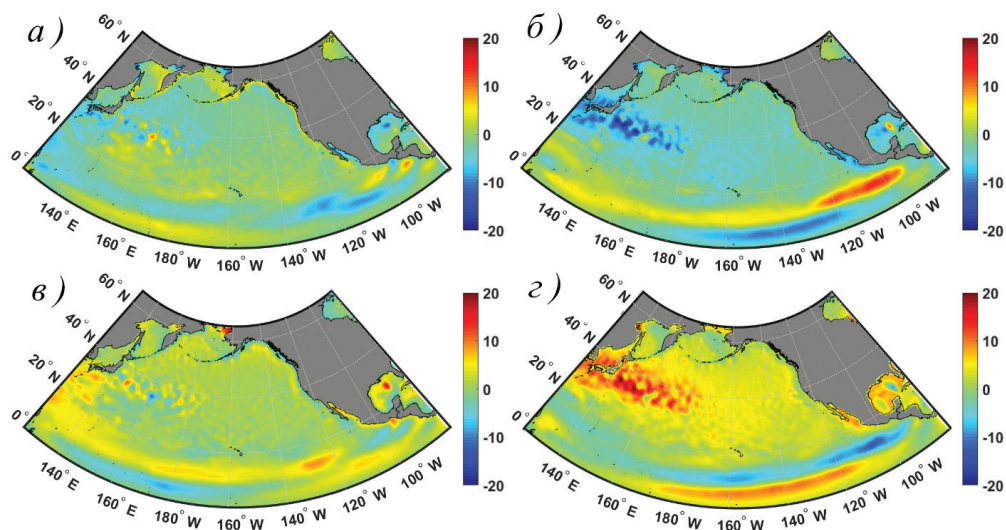


Рис. 1. Сезонная изменчивость уровня моря (см) в северной части Тихого океана по альтиметрическим данным за 2003—2016 гг.

а — зима, *б* — весна, *в* — лето, *з* — осень.

В целом выделяется СЗТО (30 — 42° с.ш. и 130 — 180° в.д.), особенно весной и осенью.

Таким образом, в сезонной изменчивости аномалий УМ по альтиметрическим осредненным данным можно отметить район СЗТО, где в весенний период наблюдается область с максимальными по модулю отрицательными аномалиями уровня, а осенью, наоборот, — с максимальными положительными аномалиями.

На рис. 2 представлена *межгодовая изменчивость среднегодовых значений УМ* по альтиметрическим данным, осредненных по всей акватории северной части Тихого океана. Диапазон изменчивости значений составляет от –1,7 до 3,3 см. Период с 2003 по 2008 г. можно назвать квазистационарным, после чего в 2009 г. максимальное значение составило 0,3 см — этот экстремум ярко выделяется на ходе кривой. Заметим, что максимумы температуры в 2009 г. также отмечаются на графиках Niño4 annual SST, но в особенности на графике аномалий Niño4 SON SST, где для расчетов данного индекса были использованы значения температуры поверхности воды за три осенних месяца [16]. В следующем, 2010 г. произошло снижение уровня до значений квазистационарного периода 2003—2008 гг. Однако с 2011 г. наметилась тенденция к повышению УМ. Тренд (уровень значимости равен 0,05 по критерию Стьюдента) составляет 3,1 мм/год.

Проанализируем *сезонную изменчивость УМ_м* (по данным гравиметрических измерений). Из рис. 3, на котором представлены карты сезонного хода, видно, что зимой выделяется область понижения уровня (3—50° с.ш., 155° в.д. — 170° з.д.). В центре этой области значения уровня составляют –3,7 см. В то же время в области тропических широт прослеживается обширная зона с положительными

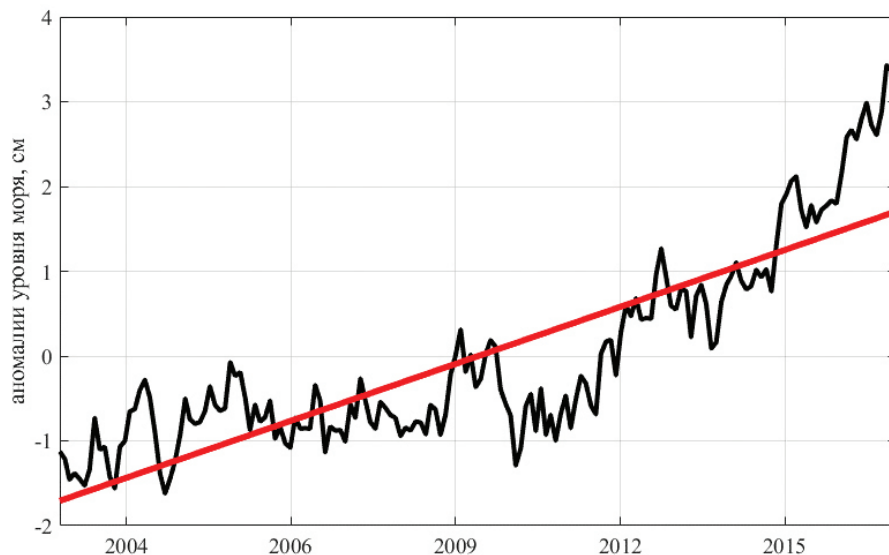


Рис. 2. Межгодовая изменчивость УМ — аномалии уровня моря по альтиметрическим данным в северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг. Тренд (прямая) составляет 3,1 мм/год.

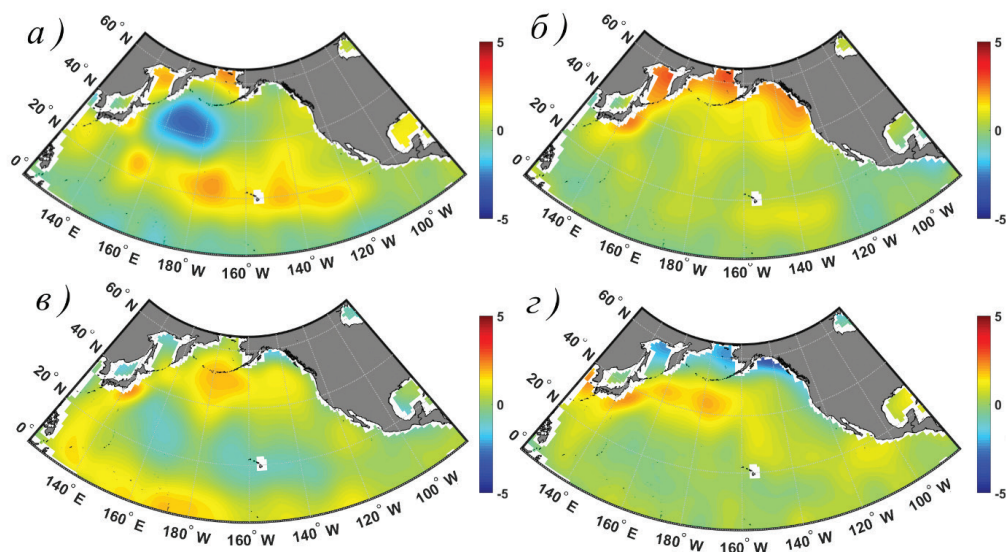


Рис. 3. Сезонная изменчивость уровня моря (см) в северной части Тихого океана по данным гравиметрических измерений за 2003—2016 гг.

а — зима, *б* — весна, *в* — лето, *г* — осень.

значениями уровня ($18\text{--}30^\circ$ с.ш., 140° в.д. — 125° з.д.). Выделяется также область с относительно высокими значениями $УМ_m$ ($18\text{--}30^\circ$ с.ш., $160\text{--}180^\circ$ з.д.), где максимум равен 2,2 см. В шельфовых областях преобладают положительные значения уровня. В целом во всей акватории северной части Тихого океана за исключением выделенных областей значения $УМ_m$ близки к нулю. Такая картина прослеживается на картах для всех сезонов.

Проанализируем указанные особенности в распределении значений $УМ_m$ более детально. Из рисунка видно, что весной появляется область положительной аномалии уровня вдоль побережья Евразии и Северной Америки севернее 35° с.ш. Максимальное значение составляет 2,9 см. Летом, как и зимой, можно наблюдать биполярное распределение аномалии уровня в открытой части океана. Область с положительными значениями ограничена координатами $40\text{--}60^\circ$ с.ш., 170° в.д. — 160° з.д., и максимум в ней составляет 1,8 см. Однако абсолютный максимум для всего бассейна отмечается в СЗТО (координаты примерно 36° с.ш., 144° в.д.) и равен 2,2 см. Можно выделить также вытянутую область ($15\text{--}30^\circ$ с.ш., 140° в.д. — 130° з.д.) с отрицательными значениями $УМ_m$, в которой минимальное значение составляет $-1,3$ см. Отметим, что осенью вдоль континентов севернее параллели 50° с.ш. отмечались отрицательные значения $УМ_m$. Минимум наблюдается в Аляскинском заливе и равен $-3,1$ см, а в СЗТО образуется квазистационарная область положительной аномалии с максимумом 2,3 см.

Таким образом, в целом анализ сезонной изменчивости уровня по данным гравиметрических измерений приводит к выводу о том, что распределение массы морской воды и, соответственно, значений $УМ_m$ существенно зависит от сезона.

На рис. 4 представлена *межгодовая изменчивость среднегодовых значений $УМ_m$* в северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг. Из рисунка видно, что здесь также наблюдается непрерывное повышение уровня в указанный период. Диапазон изменчивости $УМ_m$ составляет от $-1,7$ до 2,2 см. В отличие от $УМ$ здесь не наблюдается промежутков квазистационарности. Линия тренда имеет выраженную положительную тенденцию. Скорость повышения $УМ_m$ составляет 1,7 мм/год (уровень значимости 0,05 по критерию Стьюдента), что составляет 54,8 % значения тренда $УМ$ для северной части Тихого океана.

Далее на основе комбинации спутниковых данных были построены карты *сезонной изменчивости $УМ_{cm}$* — стерических колебаний уровня для северной части Тихого океана (рис. 5). Из рисунка видно, что в тропической и экваториальных зонах северной части Тихого океана наблюдаются обширные (почти параллельно расположенные) области положительных аномалий $УМ_{ct}$, которые особенно хорошо видны весной и осенью. Осенью и зимой в зоне $10\text{--}20^\circ$ с.ш. наблюдаются отрицательные значения характеристики, которые распределяются в широтном направлении. Минимум значений достигается осенью и составляет -15 см. Летом и весной в этой же широтной зоне значения $УМ_{ct}$ меняют знак и становятся положительными, весной достигая максимума, равного 13,7 см. При этом вдоль экватора ($0\text{--}10^\circ$ с.ш.) распределение аномалии приобретает противоположный описанному выше характер, то есть осенью и зимой наблюдается положительная

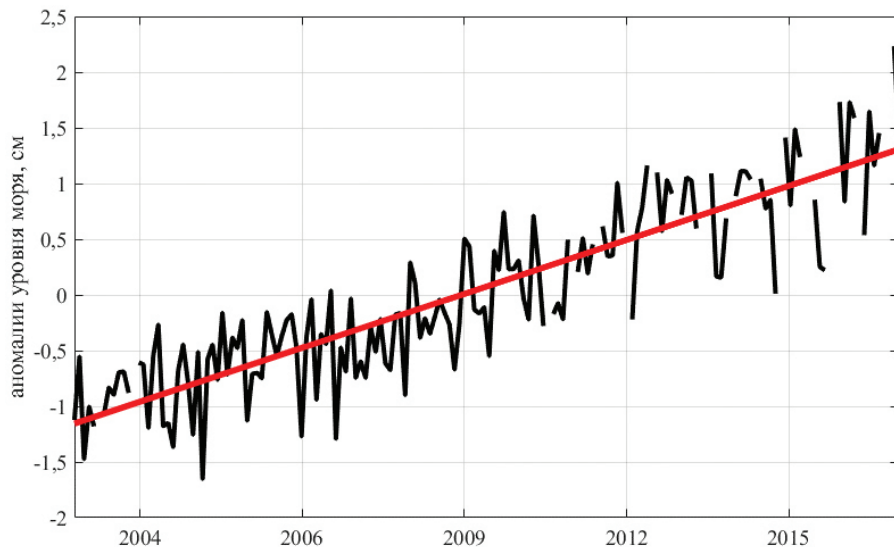


Рис. 4. Межгодовая изменчивость УМ_м в северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг.

Тренд (прямая) составляет 1,7 мм/год.

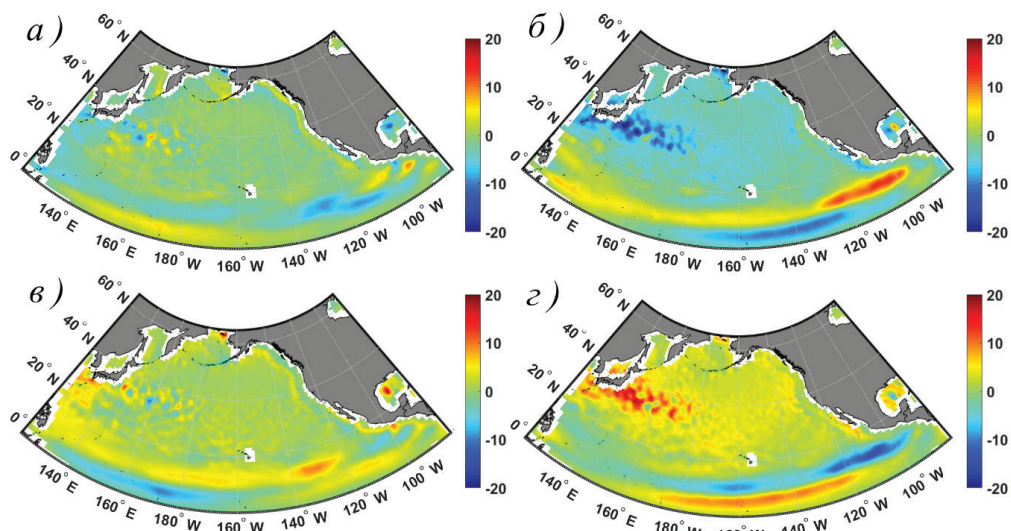


Рис. 5. Сезонная изменчивость УМ_{ст} (см) в северной части Тихого океана за 2003—2016 гг.

а — зима, б — весна, в — лето, г — осень.

аномалия с максимумом осенью, равным 10,7 см, а весной и летом — отрицательная аномалия с минимумом весной, равным –15 см.

Общие распределения $УМ_{ст}$ весной и осенью повторяют друг друга, но с противоположными знаками. Так, среднее значение уровня по всей акватории весной составляет –2,2 см, а осенью 1,7 см. Стоит отметить, что экстремумы вновь сосредоточены преимущественно в СЗТО и характерны для весны и осени. Координаты весеннего минимума, равного –24,9 см, составляют 35° с.ш., 144° в.д. Осенний максимум составляет 18,9 см и находится в точке 34° с.ш., 149° в.д.

Можно заметить, что карты сезонного хода $УМ_{ст}$ (см. рис. 5) напоминают карты $УМ$ (см. рис. 1), построенные по альтиметрическим данным, что не удивительно, так как $УМ_{ст}$ определяются в большей степени изменениями $УМ$, чем изменениями $УМ_{м}$. Если сравнить диапазон их изменения, то можно увидеть, что значения аномалий $УМ$ (от –20 до 20 см) в четыре раза больше значений $УМ_{м}$ (от –5 до 5 см), поэтому именно $УМ$ дает основной вклад в дисперсию $УМ_{ст}$.

Перейдем теперь к рассмотрению *межгодовой изменчивости среднегодовых значений $УМ_{ст}$* . Из рис. 6 видно, что диапазон изменчивости значений составляет от –1,9 до 3,2 см. Так же как и в случае $УМ$, здесь можно определить промежуток квазистационарности, который приходится на период с 2003 по 2009 г. В 2010 г. произошло некоторое уменьшение значений $УМ_{ст}$, после чего до 2016 г. наблюдалась тенденция к возрастанию. Максимум $УМ_{ст}$ приходится на 2016 г. и

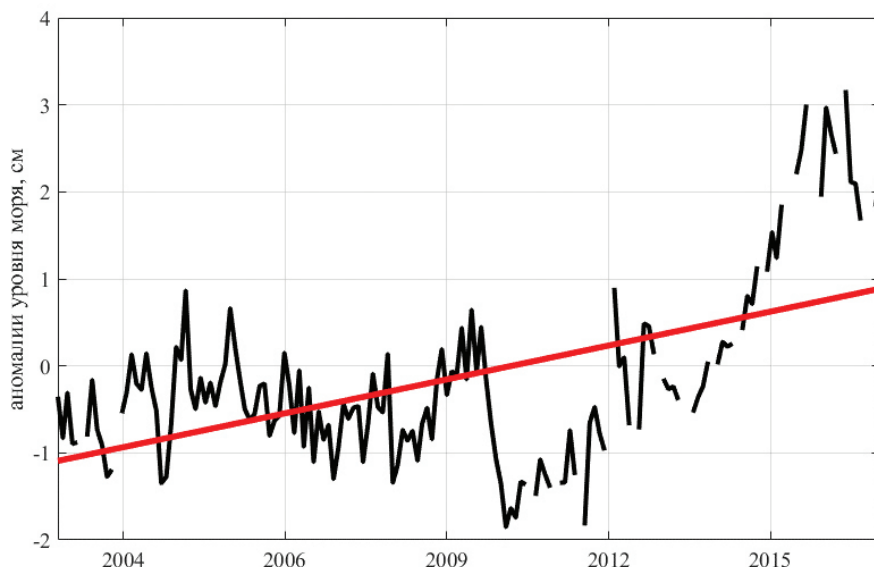


Рис. 6. Межгодовая изменчивость стерических колебаний уровня моря в северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг.

Тренд (прямая) составляет 1,4 мм/год.

составляет 3,2 см. По полученному ряду также была построена линия тренда, которая отображает повышение уровня стерических колебаний. Было определено значение тренда $УМ_{ст}$ — оно равно 1,4 мм/год (уровень значимости 0,05 по критерию Стьюдента) и составляет 45,2 % значения тренда $УМ$ в северной части Тихого океана.

Для дальнейшего анализа для северной части Тихого океана при помощи регрессионной модели первого порядка с использованием метода наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты тренда $УМ_{ст}$ в каждой точке одноградусной сетки за период 2003—2016 гг. (рис. 7). При расчете всех значений трендов, продемонстрированных в работе, мы удаляли из данных сезонный ход исследуемых характеристик путем вычитания среднегодового значения из каждого месяца.

На рис. 7 можно выделить два обширных района с положительными значениями коэффициента линейного тренда $УМ_{ст}$: восточную часть акватории тропических и экваториальных вод ($0—20^{\circ}$ с.ш., $100—140^{\circ}$ з.д.) и СЗТО ($33—42^{\circ}$ с.ш., $140—180^{\circ}$ в.д.). В первом из этих районов максимальное значение тренда $УМ_{ст}$ составляет 9,20 мм/год, в то время как среднее по району значение равняется 5,20 мм/год. В СЗТО максимум составляет 2,48 см/год, а среднее значение тренда $УМ_{ст}$ равняется 4,6 мм/год, т.е. ниже, чем в первом из выделенных районов. Зона с отрицательным значением тренда $УМ_{стер.}$ наблюдается в западной части акватории ($5—32^{\circ}$ с.ш., $120—160^{\circ}$ в.д.). В остальной части бассейна наблюдаются значения тренда $УМ_{ст}$, близкие к нулю.

На рис. 8 представлены карты линейного тренда $УМ_{ст}$ для уровней значимости 0,05 и 0,1 по критерию Стьюдента. Значимость тренда $УМ_{ст}$ позволяет определить существенность вклада в изменчивость стерических колебаний. Из рисунка видно, что при уровне значимости, равном 0,05, три основные области, которые были описаны выше, остаются со значимым линейным трендом. Однако для СЗТО большая площадь вычисленного тренда уменьшилась. Почти все значения,

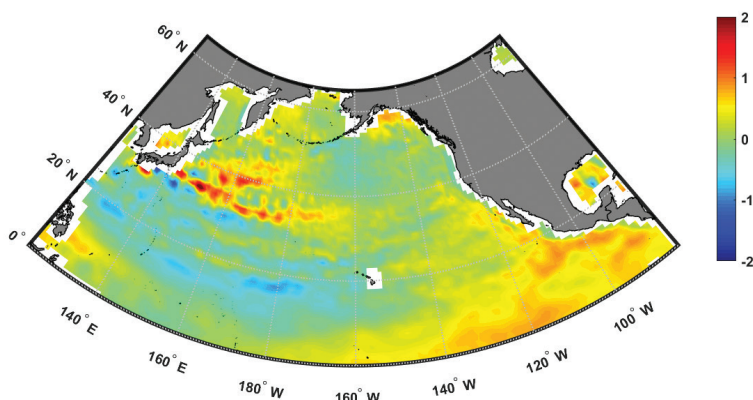


Рис. 7. Пространственное распределение тренда стерических колебаний (см/год) в северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг.

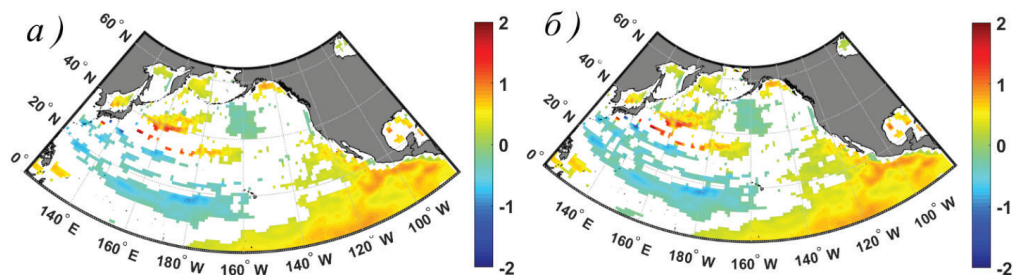


Рис. 8. Пространственное распределение тренда стерических колебаний (см/год) в северной части Тихого океана за период 2003—2016 гг. с учетом критерия Стьюдента.

a — уровень значимости 0,05; *б* — уровень значимости 0,1.

близкие к нулю, для акватории стали статистически незначимыми. Из рис. 8 хорошо видно, что при уровне значимости тренда 0,1 площадь значимых трендов увеличилась. Также здесь можно выделить три основных района: два с положительными значениями тренда $УМ_{ст}$ (СЗТО и восточная часть тропических и экваториальных вод) и один район ($5—32^{\circ}$ с.ш., $120—160^{\circ}$ в.д.) с отрицательными значениями тренда. Максимальные значения коэффициента линейного тренда $УМ_{ст}$ при уровне значимости 0,1 отмечаются в СЗТО.

Рассмотрим отдельно район СЗТО, который является одним из самых интересных в динамическом отношении районов Мирового океана: для него характерна значительная изменчивость параметров океанологических полей во всем диапазоне пространственно-временных масштабов. Это район взаимодействия течений Куроисио и Ойяисио, где субарктический фронт разделяется на южную и северную ветви. В меридиональном направлении он охватывает значительную часть межфронтальной зоны Куроисио — Субарктическое течение (продолжение Куроисио — северо-восточная ветвь Куроисио).

На рис. 9 представлена *сезонная изменчивость $УМ_{см}$ для СЗТО*. Как и на всей акватории Тихого океана, весной в СЗТО преобладают отрицательные аномалии уровня, а осенью, наоборот, положительные, что вполне согласуется с термическим расширением/сжатием воды в результате сезонного хода температуры. Сравнение рис. 9 с рис. 1 и 5, на которых рассмотрены характеристики для всей северной части Тихого океана, показывает, что именно СЗТО характеризуется экстремальными изменениями уровня, что подтверждает наши оценки, полученные ранее другими методами [1—5].

Рисунок 10 демонстрирует межгодовую изменчивость *среднегодовых значений $УМ$, $УМ_{м}$ и $УМ_{ст}$ в СЗТО*. Сравнив этот рисунок с рис. 2, 4 и 6, можно заметить, что в СЗТО значения этих характеристик больше, чем в целом на акватории Тихого океана. Так, в СЗТО диапазон изменчивости $УМ$ составляет от -10 до 8 см, значения $УМ_{м}$ изменяются от -5 до $5,8$ см, а значения $УМ_{ст}$ — от -8 до $4,6$ см. Заметим, что в СЗТО диапазоны изменчивости для $УМ$ и $УМ_{м}$ превышают

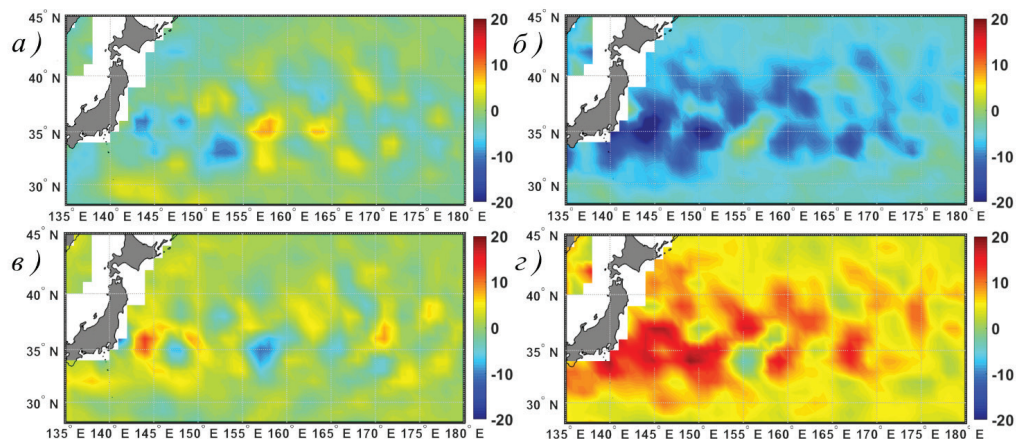


Рис. 9. Сезонная изменчивость $UM_{ст}$ (см) в СЗТО за 2003—2016 гг.

а — зима, *б* — весна, *в* — лето, *з* — осень.

аналогичные значения для всей северной части Тихого океана почти в три раза, а для $UM_{ст}$ — более чем в два раза.

Рассмотрим временной ход каждой кривой отдельно. Для УМ (см. рис. 10 *а*) можно заметить устойчивую тенденцию к повышению в период с 2006 по 2013 г. В 2014 г. произошло небольшое уменьшение годового максимума, но затем до конца изучаемого периода снова наблюдалось повышение уровня. Тренд (уровень значимости 0,05) составляет 7,3 мм/год, что в 2,3 раза больше, чем для всей северной части Тихого океана.

На рис. 10 *б* представлена межгодовая изменчивость уровня UM_M в СЗТО. Стоит отметить, что по конфигурации эта кривая схожа с кривой, построенной для всей северной части Тихого океана. Значение тренда равно 3,1 мм/год (уровень значимости 0,05) и составляет 42,5% тренда УМ для СЗТО, это что на 12,3% ниже аналогичных значений для всего Тихого океана.

Межгодовая изменчивость $UM_{ст}$ для СЗТО представлена на рис. 10 *в*. Временную шкалу мы разбили на два периода. В первый период (2003—2008 гг.) максимум приходится на 2003 г. и составляет 3 см. Минимум расположен между 2006 и 2007 г., и его значение равно –8 см. Во второй период (2009—2016 гг.) максимум, равный 4,6 см, наблюдался в 2011 г., а минимум, равный –0,4 см, между 2014 и 2015 г. В целом отмечается увеличение значений $UM_{ст}$. Это подтверждает тренд 3,7 мм/год (уровень значимости 0,05), что составляет 50,7% тренда УМ для СЗТО, а само значение тренда более чем в два раза больше, чем значение для всей северной части Тихого океана (1,7 мм/год). Тем не менее в СЗТО вклад $UM_{ст}$ в УМ на 5,5% больше, чем в северной части Тихого океана, что очевидно, обусловлено, прежде всего, тем, что изменения $UM_{ст}$ в большей степени определяются изменениями УМ, что было показано ранее на основе сравнения значения этих характеристик.

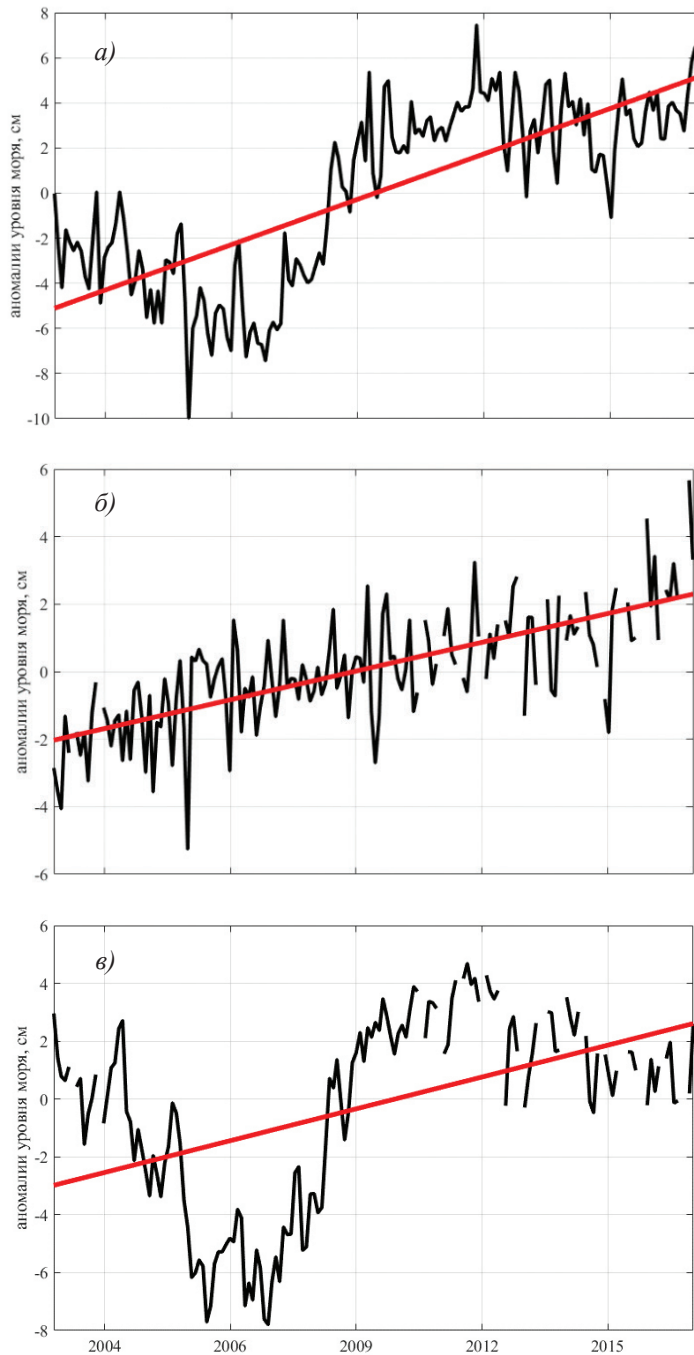


Рис. 10. Межгодовая изменчивость уровня моря УМ (*a*), $УМ_m$ (*б*) и $УМ_{ст}$ (*в*) и тренд (прямая) в СЗТО за период 2003—2016 гг.

Обсуждение

В работе Nerem et al. [16] на основе альтиметрических данных за период с 1993 по 2017 г. было получено повышение уровня УМ для всего Мирового океана, равное $3,4 \pm 0,4$ мм/год. Наши оценки скорости повышения УМ за период 2003—2016 гг. составляют 3,1 мм/год (для СЗТО 7,3 мм/год).

В работе Purkey et al. [18] по данным GRACE за 2003—2013 гг. для северной части Тихого океана было выявлено повышение уровня $УМ_m$ со скоростью 1,5 мм/год. Наши оценки для более продолжительного периода (2003—2016 гг.) составляют 1,7 мм/год (для СЗТО 3,1 мм/год).

Стерические колебания, оцениваемые в работе Lombard et al. [15], в которой была произведена оценка изменений $УМ_{ст}$ для периода с августа 2002 г. по апрель 2006 г. на основе комбинированных данных GRACE и Jason-1, показала скорость роста $1,9 \pm 0,2$ мм/год. Наши оценки, полученные подобным методом для существенно более длительного периода (2003—2016 гг.) и с использованием мультиспутникового альтиметрического продукта, учитывающего измерения Jason-1, показывают для $УМ_{стер.}$ скорость роста 1,4 мм/год (для СЗТО 3,7 мм/год).

Результаты работы Fu et al. [14], полученные по данным Topex/Poseidon, GRACE и ARGO, демонстрируют глобальное повышение УМ в период 2006—2018 гг., значение которого составляет 3,3 мм/год; также в работе были оценены $УМ_m$ (2,0 мм/год) и $УМ_{ст}$ (1,3 мм/год).

Таким образом, оценки авторов настоящей работы не только не противоречат предшествующим результатам других ученых, но и позволяют их уточнить.

Выводы

В ходе работы были получены следующие результаты.

- Для северной части Тихого океана для периода 2003—2016 гг. рассчитаны и картированы оценки стерических колебаний уровня $УМ_{ст}$, а также колебаний УМ, рассчитанных по альтиметрическим данным, и $УМ_m$, рассчитанных по гравиметрическим данным.

- В северной части Тихого океана сезонная изменчивость осредненных по площади значений составляет: УМ от $-1,8$ до $2,0$ см; $УМ_m$ от $-3,7$ до $2,2$ см, $УМ_{ст}$ от $-2,2$ до $1,7$ см.

- В северной части Тихого океана диапазон изменчивости среднегодовых значений составляет: УМ от $-1,7$ до $3,3$ см; $УМ_m$ от $-1,7$ до $2,2$ см, $УМ_{ст}$ от $-1,9$ до $3,2$ см.

- Сезонная изменчивость стерических колебаний уровня заключается в следующем: весной преобладают максимальные по модулю отрицательные аномалии, а осенью, наоборот, — максимальные положительные аномалии. В северной части Тихого океана экстремальные значения варьируют: УМ от -20 до 20 см; $УМ_m$ от -5 до 5 см, $УМ_{ст}$ от $-24,9$ до $18,9$ см.

- Показано, что в северной части Тихого океана в период 2003—2016 гг. все три характеристики уровня (УМ, $УМ_m$ и $УМ_{ст}$) имеют устойчивую тенденцию

к росту, причем УМ возрастает со скоростью 3,1 мм/год, $УМ_m$ — со скоростью 1,7 мм/год и $УМ_{ст}$ — со скоростью 1,4 мм/год.

- В СЗТО все характеристики УМ, $УМ_m$ и $УМ_c$ превышают соответствующие значения, рассчитанные в целом по Тихому океану. Так, в СЗТО диапазон изменчивости УМ составляет от –10 до 8 см, $УМ_m$ — от –5 до 5,8 см, а $УМ_{ст}$ — от –8 до 4,6 см. Заметим, что в случае УМ и $УМ_m$ указанные значения в СЗТО в три раза превышают аналогичные значения для всей северной части Тихого океана, а в случае $УМ_{ст}$ — более чем в два раза.

- Для СЗТО повышение УМ составило 7,3 мм/год, повышение $УМ_m$ — 3,1 мм/год и повышение $УМ_{ст}$ — 3,7 мм/год, что соответственно в 2,3; 1,9 и 2,6 раза больше, чем для всего северотихоокеанского бассейна.

- Общие распределения $УМ_{ст}$ весной и осенью повторяют друг друга, но с противоположными знаками. Так, среднее значение уровня по всей акватории весной равно –2,2 см, а осенью составляет 1,7 см. Стоит отметить, что экстремумы сосредоточены преимущественно в СЗТО и характерны для весны и осени. Весенний минимум расположен в точке 35° с.ш., 144° в.д. и равняется –24,9 см. Осенний максимум находится в точке 34° с.ш., 149° в.д. и составляет 18,9 см.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00034.

Список литературы

1. Белоненко Т.В., Колдунов А.В. Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2006. Вып. 3. С. 81—88.
2. Белоненко Т.В., Колдунов А.В. Стерические изменения уровня в северо-западной части Тихого океана при различных климатических сценариях // Известия РГО. 2009. Т. 141, № 1. С. 29—33.
3. Белоненко Т.В., Колдунов А.В. Взаимосвязь колебаний уровня и температуры воды в северо-западной части Тихого океана // Известия ТИНРО. 2005. Т. 140. С. 273—280.
4. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О. Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана. СПб: СММО-ПРЕСС, 2009. 309 с.
5. Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Колдунов В.В., Май Р.И., Рубченя А.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р. Атлас изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана. СПб: СММО-ПРЕСС, 2011. 304 с.
6. Бурков В.А. Общая циркуляция вод Тихого океана. М.: Наука, 1972. 195 с.
7. Гидрология Тихого океана. Т. 2 / Под ред. А.Д. Добровольского. М: изд-во Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1968. 524 с.
8. Клиге Р.К. Изменения глобального водообмена. М.: Наука, 1985. 247 с.
9. Малинин В.Н. Изменения уровня Мирового океана и климата // Ученые записки РГГМУ. 2015. Вып. 41. С. 100—115.
10. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб: РГГМУ, 2012. 260 с.
11. Провоторов П.П. Стерические колебания уровня моря // В сб.: Колебания уровня в морях. СПб, 2003. С. 129—138.
12. Chambers D.P. Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry // J. Geophys. Res. 2006. 111 (C3). C03010.
13. Church J.A., White N.J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century // Surv. Geophys. 2011. DOI 10.1007/s10712-011-9119-1.
14. Fu L.L., Roemmich D. Monitoring global sea level change from spaceborne and in situ observing systems // The Bridge. 2018. Т. 48, No. 3. С. 54—63.

15. 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.* 2007. 254. P. 194—202.
16. In-Hong Park et al. Attribution of the 2015 record high sea surface temperatures over the central equatorial Pacific and tropical Indian Ocean // *Environ. Res. Lett.* 2017. 12. 044024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa678f>.
17. Nerem R.S., Chambers D.P., Choe C., Mitchum G.T. Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions // *Marine Geodesy.* 2010. V. 33. No. S1. P. 435-446.
18. Purkey S.G., Johnson G.C., Chambers D.P. Relative contributions of ocean mass and deep steric changes to sea level rise between 1993 and 2013 // *J. Geophys. Res.* 2014. 119. P. 7509—7522.
19. Volkov D.L., Landerer F.W., Kirillov S.A. The genesis of sea level variability in the Barents Sea // *Continental Shelf Res.* 2013. 66, 92-104, doi:10.1016/j.csr.2013.07.007.