

Оценка изменчивости стерического уровня Черного моря: новые подходы и перспективы использования спутниковой информации

В. П. Новицкая *, Е. М. Лемешко, В. Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: victory.novitskaya@mhi-ras.ru

Аннотация

На основе спутниковых альтиметрических и гравиметрических данных реконструирован временной ряд стерических колебаний уровня, осредненных по акватории Черного моря за 2002–2016 гг. Стерические колебания уровня моря рассчитывались как разница между общим уровнем, измеряемым альтиметрами, и манометрической (баристатической) составляющей, определяемой по гравиметрическим измерениям *GRACE*. Получено хорошее соответствие реконструированной стерической компоненты уровня моря оценкам, полученным по архивным гидрологическим данным и данным буев Арго. Максимумы размаха сезонного хода стерической составляющей уровня отмечаются в районах с максимальными сезонными вертикальными смещениями основного пикноклина. Получены оценки сезонного цикла стерического уровня с размахом колебаний до 12 см, минимум отмечается в зимний период (март), максимум – в летний период (август). Кроме того, выявлено хорошее соответствие сезонного хода манометрической компоненты уровня и пресноводного баланса Черного моря, рассчитанного по климатическим гидрометеорологическим данным. Оценка коэффициента линейного тренда реконструированных стерических колебаний составила -0.6 ± 0.2 см/год. Это свидетельствует о том, что, несмотря на положительный тренд температуры воды в основном пикноклине и распределение поверхностного слоя, вклад современного роста солёности во всех слоях моря в изменения плотности воды в Черном море в целом преобладает.

Ключевые слова: Черное море, стерический уровень, манометрический уровень, водный баланс, альтиметрия, гравиметрия, *GRACE*, климат

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам FNNN-2021-0005, FNNN-2021-0002. Авторы благодарят *GSFC* за предоставление данных *GRACE RL06* и Службу мониторинга морской среды *CooperNICUS* за данные альтиметрии.

Для цитирования: Новицкая В. П., Лемешко Е. М., Белокопытов В. Н. Оценка изменчивости стерического уровня Черного моря: новые подходы и перспективы использования спутниковой информации // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 6–21. EDN YVYHC.

© Новицкая В. П., Лемешко Е. М., Белокопытов В. Н., 2023



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

Assessment of the Black Sea Steric Level Variability: New Approaches and Prospects for the Use of Satellite Information

V. P. Novitskaya*, E. M. Lemeshko, V. N. Belokopytov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: victory.novitskaya@mhi-ras.ru*

Abstract

Based on satellite altimetry and gravimetric data, the time series of steric level oscillations averaged over the Black Sea for 2002–2016 is reconstructed. The steric sea level oscillations were calculated as the difference between the total sea level measured by altimeters and the manometric (barystatic) component determined from gravimetric measurements GRACE. A good agreement was obtained between the steric component of the sea level and the estimates obtained from archival hydrological data and Argo floats. The maxima of the range of the seasonal variation of the steric component of the level are noted in the areas with maximum seasonal vertical displacements of the main pycnocline. Estimates of the steric level seasonal cycle were obtained, the range of oscillations was up to 12 cm. The minimum is reached in the winter period (March), and the maximum – in the summer period (August). It is noted that the seasonal cycle of the manometric component of the sea level is in good agreement with the seasonal cycle of the freshwater balance of the Black Sea constructed according to climatic hydrometeorological data. The estimate of the linear trend of the reconstructed steric oscillations is -0.6 ± 0.2 cm/year. This indicates that, despite the positive trend in water temperature in the main pycnocline and desalination of the surface layer, the contribution of the modern increase in salinity in all layers of the sea to the changes in water density in the Black Sea generally predominates.

Keywords: Black Sea, steric level, manometric level, water balance, altimetry, gravimetry, GRACE, climate

Acknowledgements: The work was performed under state assignment on topics no. FNNN-2021-0005, FNNN-2021-0002. The authors gratefully acknowledge the GSFC for providing the GRACE RL06 mascon data and Copernicus Marine Environment Monitoring Service for altimetry data.

For citation: Novitskaya, V.P., Lemeshko, E.M. and Belokopytov, V.N., 2023. Assessment of the Black Sea Steric Level Variability: New Approaches and Prospects for the Use of Satellite Information. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 6–21.

Введение

Современный уровень развития дистанционных методов зондирования Земли позволяет проводить непрерывный мониторинг уровня океанов и морей, в том числе и его стерической составляющей, которая характеризует интегральные изменения содержания тепла и солей во всей толще вод.

Стерические колебания уровня моря $H_{\text{стер}}$ обусловлены изменениями плотности морской воды, если масса единичного столба воды не меняется. Манометрические изменения уровня моря $H_{\text{ман}}$ обусловлены изменением массы единичного столба воды в предположении, что плотность морской воды

остаётся неизменной [1, 2]. Стерическая и манометрическая компоненты в сумме дают результирующий уровень моря [3]:

$$H = H_{\text{стер}} + H_{\text{ман}}. \quad (1)$$

Результирующий уровень моря определяется с помощью уровенных или альтиметрических измерений. Для манометрической компоненты используются спутниковые гравиметрические измерения, полученные в рамках проекта *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)*. Стерическую компоненту можно оценить непосредственно по гидрологическим профилям или на основе спутниковых данных по соотношению (1).

В морях, имеющих ограниченное сообщение с Мировым океаном, таких как Черное море, региональные особенности климатической изменчивости и их связь с глобальными изменениями наиболее выражены. Самые низкие значения многолетних колебаний стерического уровня Черного моря (до -6 см), оцененные по архивным гидрологическим данным, отмечаются в центральной части бассейна. У берегов стерическая составляющая уровня возрастает, максимум приходится на юго-восток моря ($6-7$ см). Наибольший сезонный размах стерических колебаний уровня характерен для центрального (до 20 см) и юго-восточного (до 16 см) районов, наименьшие значения размаха отмечаются в центре восточной части Черного моря [4]. Вклад температурной составляющей в стерические колебания уровня моря является преобладающим, достигая максимума в прибрежных районах (до 90%) [4].

Пространственно-временная изменчивость стерических колебаний уровня Черного моря непосредственно связана со спецификой термохалинной структуры вод бассейна, характеризующейся пониженной соленостью и резкой халинной стратификацией. В поверхностном слое моря $0-50$ м более значимый вклад в изменения плотности вносит температура воды. С увеличением глубины, в слое $50-300$ м, пространственный вклад солености в плотность воды сопоставим с вкладом пространственной изменчивости температуры.

Отличительной чертой гидрологической структуры Черного моря, влияющей на вертикальную стратификацию вод, является наличие холодного промежуточного слоя (ХПС), расположенного на глубинах $50-100$ м. В слое между ядром и нижней границей ХПС происходит компенсация термостерической и халостерической составляющих плотности морской воды. Максимум корреляции этих характеристик достигается на глубине 250 м [5]. По гидрологическим данным буев Арго, в период до 2010 г. аномалии солености в ХПС были достаточно нерегулярными. В ХПС также наблюдались значительные вариации температуры. После 2010 г. отмечается слабое обновление вод ХПС и почти полное исчезновение слоя после 2014 г. [5].

Существуют различные оценки изменений термохалинных характеристик Черного моря на масштабах межгодовой и десятилетней изменчивости. Так, по данным ретроспективного анализа [6], в слое $0-100$ м выявлен многолетний отрицательный тренд температуры воды, а в слое глубже 200 м – положительный тренд. В $1951-1995$ гг. соленость в верхнем слое $0-50$ м

снижалась, а в более глубоких слоях росла, что усиливало плотностную стратификацию вод.

Согласно [7], десятилетняя изменчивость температуры и солености в верхнем слое моря 0–50 м имеет квазипериодический характер, при этом в зимний и летний сезоны колебания температуры различаются по амплитудно-фазовым характеристикам. Как и в работе [6], выделяется отрицательный линейный тренд солености в слое 0–50 м, что согласуется с положительным трендом баланса пресных вод в Черном море. В слое 75–300 м в последние десятилетия происходил рост солености и температуры в среднем со скоростью 0.05 ЕПС/10 лет и 0.02 °С/10 лет. Смена знака трендов междесятилетней изменчивости солености происходит в верхней части пикноклина между горизонтами 50 и 75 м. С 2010 г. рост солености наблюдается и в поверхностном слое, что объясняется уменьшением баланса пресных вод Азово-Черноморского бассейна.

В работе [8] по результатам численного моделирования было выделено три характерных периода: 1960–1970, 1970–1995 и 1995–2015 гг., отличающиеся разными режимами циркуляции: ослаблением (1-й период) и усилением интенсивности циклонической циркуляции (2-й и 3-й периоды). В слое постоянного пикноклина отмечается рост температуры и солености, что согласуется с результатами [6, 7].

Цель работы состоит в оценке сезонной и межгодовой изменчивости термохалинной структуры Черного моря с использованием в качестве индикатора стерической компоненты уровня. Новизна заключается в использовании для этих целей стерического уровня, реконструированного по данным спутниковой альтиметрии и гравиметрии об уровне Черного моря, и валидации полученных оценок на основе независимых расчетов по гидрологическим данным.

Данные наблюдений

В работе использовались следующие данные:

- архив многолетних гидрологических данных Морского гидрофизического института (URL: <http://bod-mhi.ru/ru/index.shtml>) за длительный период 1923–2015 гг. [9];
- архив гидрологических зондирований данных буев Argo за 2006–2015 гг., предоставленный *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* (URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00033>);
- среднемесячные значения гравиметрических измерений *GRACE Release 06, GSFC v1.0*, сетка 1° × 1° (URL: <https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons>) за 2002–2016 гг.;
- среднемесячные значения аномалий уровня моря по альтиметрическим данным *CMEMS*, сетка 0.125° × 0.125°, идентификатор продукта *SEALEVEL_BS_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_04*.

Методы исследования

При расчете значений стерического уровня моря по профилям плотности морской воды использовался реанализ термохалинных полей Черного моря [9]. Термостерическая H_T и халостерическая H_S составляющие стерического уровня моря $H_{\text{стер}}$ рассчитывались следующим образом:

$$H_{\text{стер}} = H_T + H_S,$$
$$H_T = - \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z) T'(z) dz, \quad H_S = \int_{z_1}^{z_2} \beta(z) S'(z) dz, \quad (2)$$
$$T'(z) = T(z) - \bar{T}, \quad S'(z) = S(z) - \bar{S},$$
$$\alpha(z) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial T}, \quad \beta(z) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial S},$$

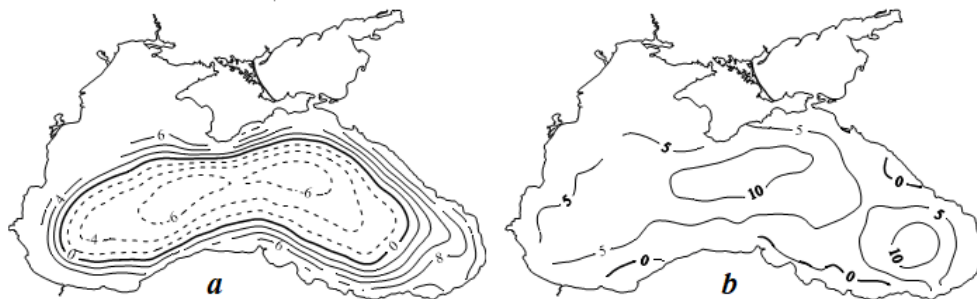
где $H_{\text{стер}}$ – стерический уровень; H_T – термостерическая компонента уровня; H_S – халостерическая компонента уровня; а в качестве \bar{T} , \bar{S} принимаются климатические средние значения температуры и солёности воды Черного моря. Коэффициент термического расширения α и коэффициент солёностного сжатия β рассчитывались на основе программного пакета *Gibbs Seawater Oceanographic Toolbox TEOS-10* (URL: <http://www.teos-10.org/>) с использованием полиномиального выражения как функции абсолютной солёности, консервативной температуры и давления [10]. Поскольку α и β не меняют знак в широком диапазоне температур, солёности и давления, то при повышении температуры из-за термического расширения H_T растёт, а при увеличении солёности халостерическая компонента стерического уровня H_S уменьшается из-за солёностного сжатия.

Результаты

С использованием архива многолетних гидрологических данных (URL: <http://bod-mhi.ru/ru/index.shtml>) за 1923–2015 гг. [9] и формулы (2) были рассчитаны стерический уровень и его термостерическая и халостерическая компоненты.

Карта среднегодовых значений стерического уровня Черного моря представлена на рис. 1, *a*. Стерический уровень максимален на периферии моря, где преобладают менее солёные и в основном более теплые воды. Перепад стерического уровня между периферией и центральной частью моря составляет около 15 см. Пространственное распределение в течение года качественно не меняется, перепад уровня уменьшается от зимы к лету.

Для глубоководной части моря разница значений стерического уровня между максимумом в августе и минимумом в марте может служить простой оценкой его сезонной изменчивости. При приближении к материковому склону эта разница уменьшается и даже меняет знак (рис. 1, *b*). Это связано не столько с уменьшением амплитуды сезонного цикла, сколько с изменениями его фазы, что обусловлено особенностями гидрофизических процессов в прибрежной зоне.



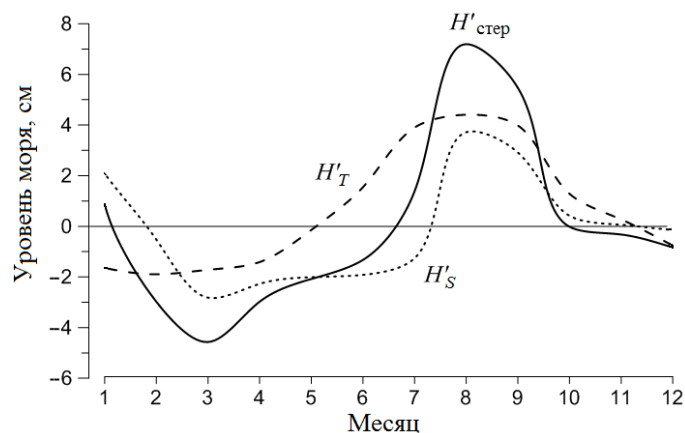
Р и с . 1 . Среднегодовые значения (см) стерического уровня Черного моря $H'_{\text{стер}}$ (отклонения от среднего по бассейну) в слое 0–300 м (а); разница значений стерического уровня в августе и марте $\Delta H'_{\text{стер}}$ (см) в слое 0–300 м (б)

F i g . 1 . Average value (cm) of the steric level of the Black sea $H'_{\text{стер}}$ (deviations from the basin mean) in the 0–300 m layer (а); the difference values of the steric level in August and March, $\Delta H'_{\text{стер}}$ (cm) in the 0–300 m layer (б)

Сезонные колебания термостерической и халостерической составляющих уровня, которые непосредственно отражают изменения общего тепло- и солезапаса слоя, в глубоководной части моря почти синхронны (рис. 2). Это обеспечивает на большей части акватории моря устойчивый сезонный ход стерического уровня, соответствующий среднему сезонному циклу T, S -соотношений в верхнем слое 0–50 м (рис. 3, а). С июля по октябрь стерический уровень положительный, в августе он достигает максимума 7 см. При этом вклад термостерической компоненты в сезонную изменчивость в этот период превышает вклад халостерической составляющей. В январе $H_{\text{стер}}$ также положительный, но уже с преобладанием вклада халостерической составляющей (рис. 2). Стерическая составляющая становится отрицательной с февраля по июнь, достигая минимума (–4.5 см) в марте, с февраля по май преобладает вклад халостерической компоненты (рис. 2).

Сопоставление среднегодовых значений стерического уровня моря (отклонения от среднего по бассейну) в слое 0–50 м (рис. 3, а) и в слое 50–300 м (рис. 3, б) показывает, что пространственная структура распределения среднееголетних значений в этих слоях имеет качественное соответствие, несмотря на положительные и отрицательные десятилетние тренды температуры и солёности в верхнем слое [6–8].

В прибрежной зоне соотношение фаз сезонного хода H_T и H_S может иметь значительные региональные различия, что зависит от двух основных факторов. Первый из них – пространственно-временная неоднородность речного стока и атмосферных осадков, которая влияет на сезонный цикл стерического уровня в верхнем слое моря (рис. 3, с). В западную часть моря впадают реки Днепр, Южный Буг, Днестр, Дунай, в целом дающие более 80 % стока речных вод в Черное море. Поступление азовоморских вод с пониженной солёностью через Керченский пролив также является фактором распределения поверхностных вод в центральной и западной частях моря.



Р и с . 2. Сезонный ход среднемесячных аномалий (см) стерического уровня моря $H'_{стер}$, термо-стерической H'_T и хало-стерической H'_S составляющих в центральной части Черного моря (отклонения от средних значений за год)

F i g . 2. The seasonal cycle of the average monthly anomalies (cm) of the steric sea level $H'_{стер}$, thermo-steric H'_T and halo-steric H'_S components in the central part of the Black Sea (deviations from the average values for the year)

В совокупности это проявляется в увеличении стерического уровня более чем на 5 см в западной части моря (рис. 3, *c*). Вторым фактор – общая циркуляция моря, воздействующая через вертикальные движения на термохалинную структуру вод в слое основного пикноклина. Максимумы разницы значений стерического уровня, достигающие 6 см, приходятся на центры циклонических круговоротов и Батумского антициклона (рис. 3, *d*).

Результаты расчетов стерических колебаний уровня моря позволяют косвенно оценивать водный баланс бассейна как разницу между результирующим и стерическим уровнями. На рис. 4 представлена такая оценка на основе данных о стерическом уровне в центральной части моря и измерениях уровня моря на береговых гидрометеорологических станциях (осредненные значения от Севастополя до Батуми). Оценка составляющей уровня моря за счет прихода/расхода воды $H_{вб}$ качественно соответствует традиционным оценкам водного баланса для Черного моря [11]: максимум наступает в мае – июне, минимум – в сентябре – октябре. Следует отметить, что сравнение уровня моря, измеренного в береговой зоне, со стерическим уровнем в глубоководной части моря не совсем корректно. Как упоминалось выше, стерические колебания на периферии моря имеют свои региональные особенности, поэтому более перспективным представляется использование в качестве результирующего уровня моря альтиметрических данных, осредненных по всему бассейну [12].

Традиционно измерения уровня моря проводятся на береговых уровнях постах, неравномерно распределенных вдоль побережья Черного моря.

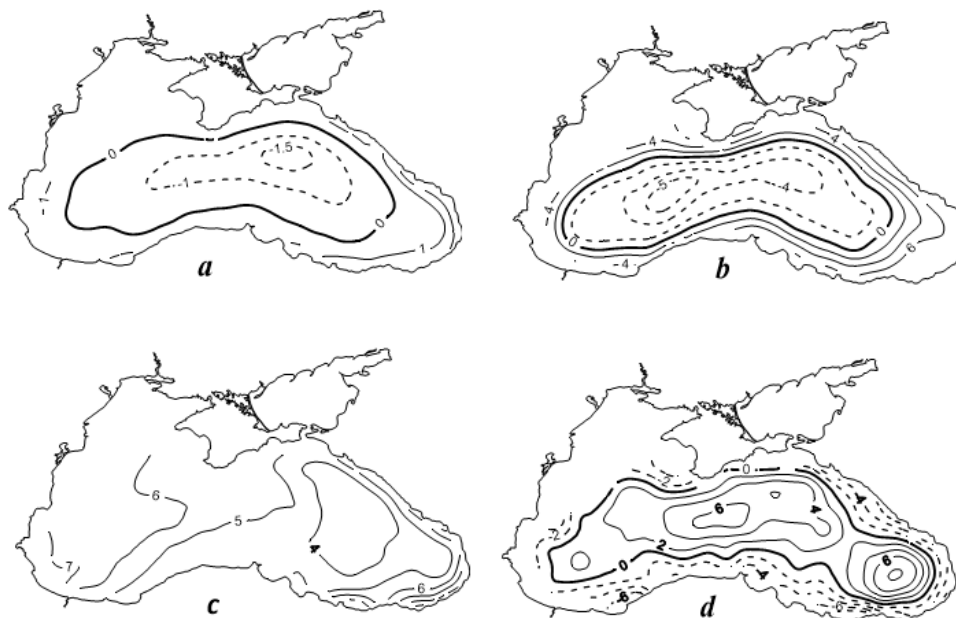


Рис. 3. Среднегодовые значения (см) стерического уровня моря (отклонения от среднего по бассейну) в слое 0–50 м (*a*) и в слое 50–300 м (*b*); размах сезонного хода (см) стерического уровня моря как разница значений в августе и марте для слоя 0–50 м (*c*) и слоя 50–300 м (*d*)

Fig. 3. Averaged annual values (cm) of the steric sea level (deviations from the basin average) in the 0–50 m layer (*a*) and in the 50–300 m layer (*b*); the seasonal variation (cm) of steric sea level as the difference in values in August and March for the 0–50 m layer (*c*) and the 50–300 m layer (*d*)

Для исследования изменчивости уровня моря по всей акватории бассейна в настоящее время используются данные спутниковых альтиметров. С января 1993 г. по май 2017 г. по альтиметрическим данным наблюдалось повышение уровня Черного моря со средней скоростью 2.5 ± 0.5 мм/год [12] на фоне достаточно сильной межгодовой изменчивости. Кроме того, с запуском спутника в рамках проекта *GRACE* в 2002 г. появилась возможность оценивать вклад манометрической компоненты уровня моря $H_{\text{ман}}$ [12]. Данные *GRACE* достаточно хорошо согласуются с данными об изменчивости водных масс океана и могут быть использованы для оценки пресноводного баланса Черного моря и реконструкции стерического уровня Черного моря на основе соотношения (1). Для расчета стерических колебаний уровня Черного моря на основе соотношения (1) и оценок их сезонной и межгодовой изменчивости использовались данные спутниковой альтиметрии H и данные *GRACE* $RL06$ $H_{\text{ман}}$ за 2002–2016 гг. [3, 13]. В результате был рассчитан сезонный ход реконструированного по спутниковым данным стерического уровня моря $H_{\text{стер}}$, который достаточно хорошо соответствует сезонному ходу стерического уровня Черного моря $H'_{\text{стер}}$, рассчитанному по архивным гидрологическим данным (рис. 5).

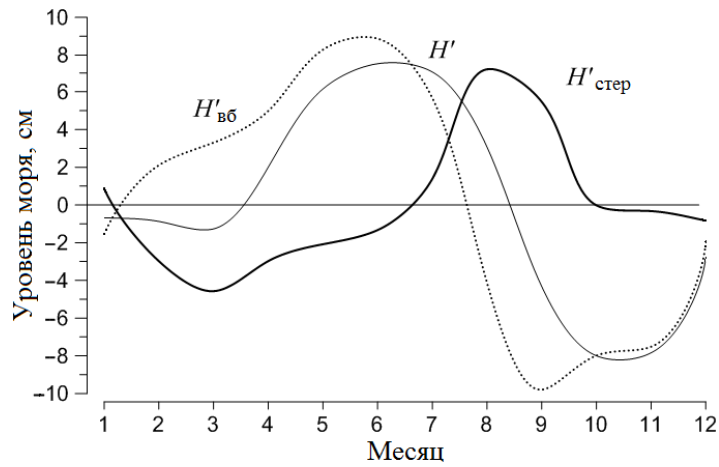


Рис. 4. Сезонный ход среднемесячных значений стерического уровня моря $H'_{стер}$, уровня моря по данным измерений на береговых станциях H' и компоненты уровня моря за счет водного баланса $H'_{вб}$ как разницы H' и $H'_{стер}$

Fig. 4. Seasonal variations of the values of the steric sea level $H'_{стер}$, and sea level according to the measurements at coastal stations H' and sea level component due to the water balance $H'_{вб}$ as difference between H' and $H'_{стер}$

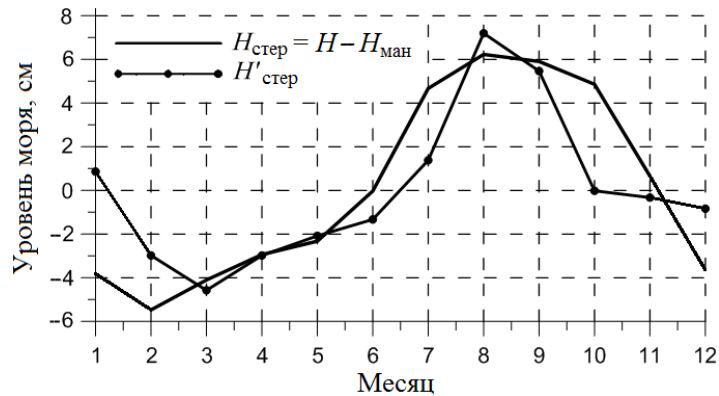
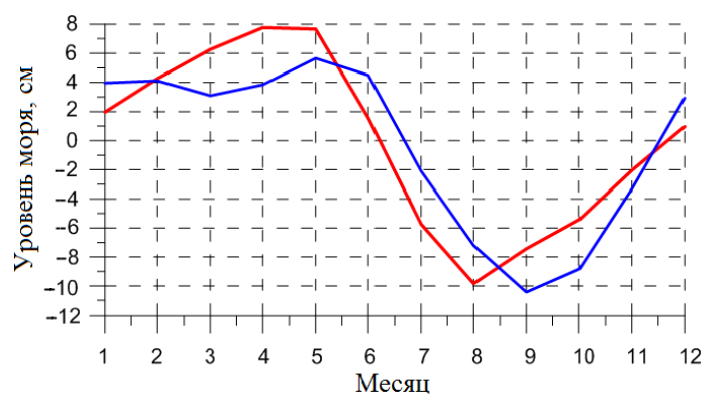


Рис. 5. Сезонный ход среднемесячных значений стерического уровня моря $H'_{стер}$ по данным гидрологических наблюдений и стерического уровня моря по данным альтиметрии H и GRACE $H_{ман}$ как оценки $H_{стер} = H - H_{ман}$

Fig. 5. The seasonal cycle of the monthly average values of the steric sea level $H'_{стер}$ according to hydrological observations and the steric sea level according to the altimetry data H and GRACE $H_{ман}$ as estimates of the $H_{стер} = H - H_{ман}$

График реконструированного стерического уровня имеет более сглаженную форму в период с июня по ноябрь, максимум в августе совпадает по времени с максимумом стерического уровня $H'_{стер}$ по данным гидрологических наблюдений, а минимум в сезонном ходе наступает на месяц раньше $H'_{стер}$ – в феврале (рис. 5). Сезонный ход манометрического уровня по данным *GRACE*, осредненного по всей акватории моря, дает более адекватные оценки воднобалансовой компоненты уровня моря в сравнении с предварительной оценкой $H_{вб}$ по береговым данным (см. рис. 4 и 6). График $H_{вб}$ имеет максимум в июне, на месяц позже, чем $H_{ман}$, а минимум – в сентябре, что совпадает с $H_{ман}$, значения их амплитуд при этом близки (см. рис. 4 и 6). Максимумы сезонного хода обоих графиков на рис. 6 совпадают в апреле – мае, а минимум для пресноводного баланса по климатическим данным приходится на август [11], а для манометрического уровня $H_{ман}$ – на сентябрь (на месяц позже) (рис. 6). Это связано, по-видимому, с тем, что сезонный ход $H_{ман}$ по данным *GRACE* был осреднен за 2002–2016 гг. и фактически относится к другому климатическому периоду. Кроме того, различия в фазе и амплитуде сезонного хода $H_{ман}$ и пресноводного баланса обусловлены тем, что на вариации водного баланса моря влияет не только его пресноводный баланс (реки, осадки, испарение), но и водообмен через проливы (рис. 6).

Уровень моря по данным альтиметрии H и манометрическая компонента уровня моря $H_{ман}$ по данным *GRACE RL06 GSFC*, осредненные по акватории Черного моря, характеризуются значительной межгодовой изменчивостью (рис. 7). Максимумы и минимумы колебаний уровня и его манометрической компоненты совпадают по фазе, а разница их амплитуд дает стерическую компоненту уровня моря (рис. 7, 8).



Р и с . 6 . Сезонный ход среднемесячных значений пресноводного баланса (ПВБ) Черного моря по климатическим данным [11] (красная линия) и манометрического уровня $H_{ман}$ (*GRACE RL06 GSFC* 2003–2016 гг.) (синяя линия)

Fig. 6. Seasonal cycle of monthly average values of the Black Sea freshwater balance according to climate data [11] (red line) and manometric level $H_{ман}$ (*GRACE RL06 GSFC* 2003–2016) (blue line)



Р и с . 7. Средний уровень Черного моря по данным альтиметрии H и манометрическая компонента уровня моря $H_{\text{ман}}$ по данным *GRACE RL06 GFSC*

Fig . 7. Average level of the Black Sea according to altimetry data H and manometric component of sea level $H_{\text{ман}}$ from *GRACE RL06 GFSC* data

Выделяется несколько периодов с различными режимами изменчивости среднего уровня моря: 2004–2006 и 2012–2013 гг. с выраженным сезонным циклом с амплитудой до 15 см; 2007–2009 гг. – с отсутствием летнего максимума уровня в 2007 г. и малыми амплитудами до 10 см; 2010–2011 гг. – с максимальными амплитудами до 25 см; 2012–2013 и 2014–2015 гг. – с минимальными за весь период 2003–2018 гг. амплитудами (менее 10 см) (рис. 7). Совпадение максимумов уровня моря и манометрической компоненты по амплитуде и фазе в 2010 и 2011 гг. указывает на то, что в эти годы основной вклад в уровень моря обеспечивался воднобалансовой составляющей (рис. 7). Авторы работы [14] Д. Л. Волков и Ф. В. Ландерер также пришли к выводу, что максимумы уровня моря и манометрической компоненты в 2010 и 2011 гг. обусловлены максимумом влагосодержания в дренажном бассейне Черного моря, что привело к увеличению суммарного речного стока.

На основе соотношения (1) с использованием осредненных по акватории бассейна значений уровня моря по данным альтиметрии H и манометрической компоненты уровня моря $H_{\text{ман}}$ по данным *GRACE RL06 GFSC* был получен средний по Черному морю реконструированный стерический уровень $H_{\text{стер}}$ (рис. 8). Стерическая компонента также характеризуется значительной межгодовой изменчивостью с различными режимами колебаний: 2005–2009 и 2012 гг. – квазирегулярные осцилляции стерического уровня с амплитудой до 15 см; 2010–2011 и 2013–2015 гг. – нарушение квазирегулярности колебаний и уменьшение амплитуды до 5 см (рис. 8). Кроме того, тренд реконструированного стерического уровня отрицательный (-0.59 ± 0.21 см/год).

Оценки межгодовых колебаний реконструированного по спутниковым данным уровня $H_{\text{стер}}$ подтверждаются расчетами среднего стерического уровня по гидрологическим данным буев-профилемеров Арго № 4900542, 6900805, 2901200 (рис. 8). Траектория движения буя Арго № 4900542 проходила через глубоководную часть моря, затем буй долгое время находился в Батумском антициклоне. Буи № 6900805 и 2901200 сделали несколько оборотов в глубоководной части моря примерно вдоль Основ-

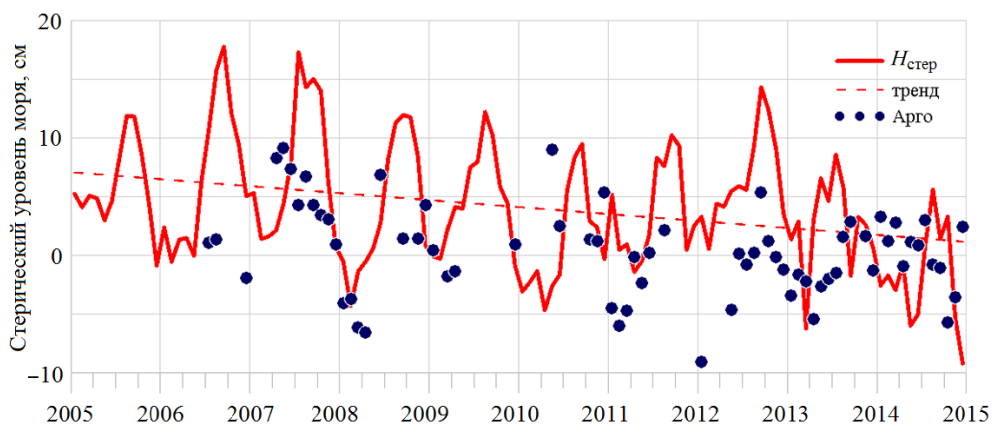


Рис. 8. Реконструкция среднего по всему морю стерического уровня $H_{\text{стер}} = H - H_{\text{ман}}$ и средний стерический уровень по данным буев Арго № 4900542, 6900805 и 2901200

Fig. 8. Reconstruction of the sea averaged steric level $H_{\text{стер}} = H - H_{\text{ман}}$ and average steric level according to Argo buoys ID 4900542, 6900805, and 2901200

ного Черноморского течения. Несмотря на неполное покрытие акватории Черного моря данными этих буев, стерический уровень, рассчитанный по их зондированиям, можно рассматривать как независимую инструментальную оценку, подтверждающую общую тенденцию межгодовых изменений реконструированного по спутниковым данным уровня $H_{\text{стер}}$. Размах стерических колебаний по Арго примерно в два раза меньше, чем у $H_{\text{стер}}$, и, соответственно, отрицательный тренд также меньше: -0.22 ± 0.05 см/год (рис. 8).

Обсуждение

Важность изучения изменчивости уровня моря, включая его стерическую и манометрическую компоненты, обусловлена непосредственной связью уровня с водным балансом и термохалинной структурой вод. Использование спутниковых альтиметрических и гравиметрических данных показало, что вклад обеих компонент в межгодовую изменчивость уровня Черного моря примерно одинаков. Внутриматериковое Черное море является подходящим местом для проведения методических работ по совместному использованию альтиметрических и гравиметрических данных как альтернативы традиционным оценкам стерических колебаний уровня и водного баланса. Однако на изменчивость манометрической компоненты уровня дополнительно влияет влагосодержание дренажного бассейна Черного моря. Для устранения этих погрешностей в нашей работе были использованы данные *GRACE RL06 GSFC*, полученные на основе методики расчета с использованием масконов [15]. Другой подход к коррекции влияния сигнала влагозапаса суши заключается в использовании гидрологических моделей вод суши [16] и учета влагосодержания дренажного бассейна Черного моря по данным *GRACE* для суши [14, 16].

Полученные нами оценки межгодовой изменчивости и отрицательного тренда стерического уровня Черного моря отражают интегральный эффект термохалинных изменений во всей толще моря. В сезонном ходе для верхнего 300-метрового слоя вклад термостерической компоненты стерического уровня в летний период на 1–2 см превышает вклад халостерической компоненты, а в зимний – наоборот (см. рис. 2). В последние десятилетия по данным численного моделирования и натурных наблюдений выделяется отрицательный линейный тренд солёности (-0.02 ЕПС/год) в слое 0–50 м, что обусловлено положительным трендом баланса пресных вод Черного моря. В последние годы значимый тренд в поверхностной температуре моря отсутствует [8]. С увеличением глубины между ядром ХПС и его нижней границей термостерические и халостерические эффекты компенсируют друг друга [5]. В слое 75–300 м в последние десятилетия наблюдаются положительные тренды солёности и температуры в среднем со скоростью 0.05 ЕПС/10 лет и 0.02 °C/10 лет [7]. Инструментальные измерения показали, что для северо-восточной части Черного моря климатические изменения привели к заметному росту солёности в верхнем 200-метровом слое, а также к росту температуры в слоях, расположенных ниже слоя температурного минимума (ХПС) [17]. Таким образом, в слое ниже 50–75 м одновременный рост солёности и температуры приводит к разнонаправленным тенденциям стерической компоненты колебаний уровня моря.

Тем не менее тренды реконструированного по спутниковым данным стерического уровня, отражающие изменения во всей толще моря от поверхности до дна, и тренды по гидрологическим зондированиям буев Арго в слое 0–500 м имеют отрицательные значения (рис. 8). Это означает, что интегрально по глубине в слое ниже 50 м рост солёности приводит к уменьшению стерического уровня по всему морю, превышая положительный вклад термостерической компоненты от роста температуры. Поступление солёных и теплых вод в глубинные слои Черного моря происходит через систему турецких проливов, но определение расходов воды через Босфор традиционными методами сопряжено с большими трудностями. В перспективе водообмен через проливы возможно будет оценить, используя уровень моря по данным альтиметрии и манометрическую компоненту уровня по данным *GRACE* [16].

Выводы

На основе спутниковых альтиметрических и гравиметрических данных реконструирован временной ряд стерических колебаний уровня Черного моря за 2002–2016 гг. Его сопоставление с оценками стерического уровня, рассчитанными по архивным гидрологическим данным, показало хорошее соответствие между ними. Получены оценки сезонного цикла стерического уровня: размах колебаний достигает 12 см, минимум приходится на зимний период (март), максимум – на летний период (август). Реконструированный по спутниковым данным сезонный ход стерического уровня имеет более сглаженную форму по сравнению с расчетами стерического уровня $H'_{стер}$ по архивным гидрологическим данным. Максимум реконструированного

стерического уровня достигается в августе и совпадает по времени с максимумом $H'_{\text{стер}}$, а минимум наступает на месяц раньше $H'_{\text{стер}}$ – в феврале. Для сезонного хода манометрической компоненты уровня моря по данным *GRACE* получено хорошее соответствие с сезонным ходом пресноводного баланса Черного моря, рассчитанного по данным гидрометеорологических наблюдений.

Максимальный перепад стерического уровня $H'_{\text{стер}}$ между периферией и центром моря составил около 15 см. Выявлены районы максимального размаха сезонного хода стерического уровня. Эти области соответствуют районам максимальных сезонных вертикальных смещений основного пикноклина. Сопоставление среднегодовых значений стерического уровня моря (отклонения от среднего по бассейну) в слое 0–50 м и в слое 50–300 м показывает, что, несмотря на разнонаправленные десятилетние тренды температуры и солёности, пространственное распределение среднееголетних значений в этих слоях имеет качественное соответствие.

Для реконструированного по спутниковым данным стерического уровня $H_{\text{стер}}$ характерна значительная межгодовая изменчивость с периодами различных режимов колебаний продолжительностью около 3 лет и изменением амплитуды от 5 до 15 см. В 2010–2011 и 2013–2015 гг. происходило нарушение квазирегулярности стерических колебаний уровня моря и уменьшение их амплитуды до 5 см. Оценка линейного тренда реконструированного стерического уровня имеет отрицательный знак и составляет -0.59 ± 0.21 см/год. Был также рассчитан стерический уровень по гидрологическим зондированиям буев Арго, что дало независимую инструментальную оценку, подтверждающую общую тенденцию межгодовых изменений реконструированного стерического уровня $H_{\text{стер}}$. Размах стерических колебаний по данным буев Арго примерно в два раза меньше, чем у $H_{\text{стер}}$, и, соответственно, коэффициент отрицательного тренда меньше (-0.22 ± 0.05 см/год). Общая отрицательная тенденция стерической составляющей уровня Черного моря свидетельствует о том, что в суммарном влиянии термохалинных изменений на уровень моря вклад роста солёности преобладает над вкладом роста температуры воды. Кроме регионального теплового и водного баланса, на изменения термохалинной структуры вод и стерическую компоненту уровня моря влияет поступление солёных и тёплых вод в Чёрное море через систему турецких проливов. В перспективе представляется возможным оценить водообмен через Босфор, используя рассмотренный подход комбинации альтиметрических и гравиметрических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малинин В. Н., Гордеева С. М., Шевчук О. И.* Изменения уровня Мирового океана в текущем столетии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 9–22. EDN KSAOIW. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-5-9-22
2. Concepts and terminology for sea level: mean, variability and change, both local and global / J. M. Gregory [et al.] // *Surveys in Geophysics*. 2019. Vol. 40. P. 1251–1289. doi:10.1007/s10712-019-09525-z

3. *Ponte R. M.* A preliminary model study of the larger-scale seasonal cycle in bottom pressure over the global ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C1. P. 1289–1300. doi:10.1029/1998JC900028
4. *Архипкин В. С., Бережной В. Ю.* Стерические колебания уровня Черного моря // *Океанология*. 1995. Т. 35, № 6. С. 809–816.
5. *Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B.* Climate change and regional ocean water mass disappearance: Case of the Black Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. doi:10.1029/2019JC015076
6. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В. В. Кныш [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 3. С. 433–446. EDN NWCJDF.
7. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г., Белокопытов В. Н.* Десятилетняя изменчивость температуры и солёности в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2013. № 6. С. 27–41. EDN TGIIVN.
8. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations / S. Miladinova [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 7. P. 5624–5644. doi:10.1002/2016JC012644
9. *Белокопытов В. Н.* Ретроспективный анализ термохалинных полей Черного моря на основе методов эмпирических ортогональных функций // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 412–421. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-412-421
10. Accurate polynomial expressions for the density and specific volume of seawater using the TEOS-10 standard / F. Roquet [et al.] // *Ocean Modelling*. 2015. Vol. 90. P. 29–43. doi:10.1016/j.ocemod.2015.04.002
11. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4 : Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
12. *Avsar N. B., Jin S., Kutoglu S. H.* Recent sea level changes in the Black Sea from satellite gravity and altimeter measurements // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018. Vol. XLII-3/W4. P. 83–85. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-83-2018
13. *Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П.* Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 2. С. 47–64. EDN ULWWQC. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-47-64
14. *Volkov D. L., Landerer F. W.* Internal and external forcing of sea level variability in the Black Sea // *Climate Dynamics*. 2015. Vol. 45, iss. 9–10. P. 2633–2646. doi:10.1007/s00382-015-2498-0
15. *Loomis B. D., Luthcke S. B., Sabaka T. J.* Regularization and error characterization of GRACE mascons // *Journal of Geodesy*. 2019. Vol. 93, iss. 9. P. 1381–1398. doi:10.1007/s00190-019-01252-y
16. Water mass variation in the Mediterranean and Black Seas / L. Fenoglio-Marc [et al.] // *Journal of Geodynamics*. 2012. Vol. 59–60. P. 168–182. doi:10.1016/j.jog.2012.04.001
17. *Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очередник В. В.* Рост солёности и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. EDN GVAYYQ. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-279-287

Поступила 21.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.06.2023 г.;
принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

Об авторах:

Новицкая Виктория Павловна, старший инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9079-6274**, *doronina.viktori@mail.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*

Белокопытов Владимир Николаевич, заведующий отделом океанографии, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 5697-5700; ResearcherID: ABA-1230-2020; Scopus Author ID: 6602381894**, *belokopytov.vn@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Новицкая Виктория Павловна – обзор литературы, обработка альтиметрических данных для района исследований, анализ результатов и их интерпретация, построение графиков, описание результатов исследования

Лемешко Евгений Михайлович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, выбор методов анализа данных, расчет стерической компоненты уровня моря по спутниковым данным, анализ полученных результатов, их интерпретация, формулирование выводов

Белокопытов Владимир Николаевич – расчет и анализ стерического уровня Черного моря, его термостерической и халостерической компонент, по архиву многолетних гидрологических данных

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.