

Восстановление температуры и солености в верхнем слое Черного моря по данным псевдоизмерений на нижележащих горизонтах

П. Н. Лишаев*, В. В. Кныш, Г. К. Коротаев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: pavellish@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2018 г., после доработки – 14.12.2018 г.

Введение. Ранее были построены трехмерные поля псевдоизмерений температуры и солености на горизонтах слоя 63–500 м с незаполненными зонами в районах справа от Основного Черноморского течения и в антициклонических вихрях до глубины 125 м по оригинальной методике комбинированного анализа альтиметрических данных и малочисленных измерений буями *Argo*.

Материалы и методы. Предложен алгоритм восстановления незаполненных районов значениями солености и температуры морской воды на всех горизонтах слоя 2,5–125 м (на примере измерений альтиметрии и буями *Argo* за 2012 г.). Среднесуточная соленость (температура) в слое 2,5–125 м восстановлена коррекцией рассчитанной в модели прогностической солености (температуры) взвешенными данными ее отклонений от псевдоизмерений с нижележащего базового горизонта. В качестве основного базового принимался горизонт 150 м, на котором имеются псевдоизмерения на всей площади моря. Весовые множители определяются функциями ковариаций солености (температуры) базового горизонта с модельной соленостью (температурой) на вышележащих горизонтах. Применена итерационная процедура восстановления псевдоизмерений солености и температуры.

Результаты исследования. Сопоставление профилей среднеквадратических отклонений восстановленных полей солености от измеренных и естественной изменчивости показало, что в галоклине на горизонте 88 м естественная изменчивость в 1,9 раза выше отклонений солености. Естественная изменчивость измеренной температуры на горизонте 88 м выше отклонений восстановленных полей температуры в 1,5 раза. Восстановленные поля псевдоизмерений солености (температуры) ассимилировались в модели Морского гидрофизического института методом адаптивной статистики для проведения реанализа полей Черного моря за 2012 г. Выполнена валидация восстановленных в реанализе полей температуры и солености. Хорошо воспроизведен холодный промежуточный слой в море, его холодозапас оказался несколько заниженным. Необходима ассимиляция спутниковых измерений температуры поверхности моря в модели циркуляции. Восстановленный в реанализе уровень моря в глубоководной области качественно и количественно оказался достаточно близким к альтиметрическому уровню.

Обсуждение и заключение. Трехмерные поля температуры и солености морской воды в главном пикноклине восстанавливаются с достаточно высокой точностью в глубоководной области Черного моря. Температура морской воды не может быть восстановлена с приемлемой точностью в приповерхностном слое моря 0–40 м. Предложенные в предыдущих работах и в настоящем исследовании подходы могут оказаться эффективными и для других морских акваторий, таких как окраинные моря океанического типа и океанические круговороты, где наблюдаются относительно однородные водные массы.

Ключевые слова: псевдоизмерения температуры и солености, альтиметрия, буи *Argo*, базовый горизонт, функции ковариаций, реанализ, адаптивная статистика.

Благодарности: результаты исследования, проведенные в рубрике «Процедура восстановления трехмерных полей псевдоизмерений солености и температуры в слое моря 2,5–125 м», получены в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и дан-

© Лишаев П. Н., Кныш В. В., Коротаев Г. К., 2019

ных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий». Остальные результаты исследований, представленные в работе, получены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-30001) и РФФИ, грант № 16-05-00264 А.

Для цитирования: Лишаев П. Н., Кныш В. В., Коротаев Г. К. Восстановление температуры и солености в верхнем слое Черного моря по данным псевдоизмерений на нижележащих горизонтах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 114–133. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-114-133

Reconstruction of Temperature and Salinity in the Upper Layer of the Black Sea Using Pseudo-Measurements on the Underlying Horizons

P. N. Lishaev*, V. V. Knysh, G. K. Korotaev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: pavellish@mail.ru*

Introduction. Using the original method consisting in the combined analysis of altimetry data and scanty measurements by the Argo buoys, three-dimensional fields of the temperature and salinity pseudo-measurements were previously reconstructed at the 63–500 m layer horizons, at that the areas to the right of the Rim Current and in the anticyclonic eddies up to the 125 m depth remained unfilled.

Data and methods. Proposed is the algorithm for restoring the unfilled areas by replenishing them with the seawater salinity and temperature values within the layer 2.5–125 m (using the altimetry and the Argo data for 2012 as an example). The daily-average salinity (temperature) in the 2.5–125 m layer was reconstructed by correcting the model-predicted salinity (temperature) through the weighted data of its deviations from the pseudo-measurements carried out on the underlying baseline. The 150 m horizon was assumed to be the main baseline for which pseudo-measurements are available on the entire horizon of the sea. The weighting factors are determined by the salinity (temperature) covariance functions of the baseline with the model salinity (temperature) on the overlying horizons. The iterative procedure was used to reconstruct the salinity and temperature pseudo-measurements.

Results. Comparison of the root-mean-square deviations of the reconstructed salinity fields from the measured ones and its variability showed that in the halocline on the 88 m horizon, its variability was 1.9 times higher than the salinity deviations. Variability of the measured temperature on the 88 m horizon was 1.5 times higher than the deviations of the reconstructed temperature fields. The reconstructed fields of the salinity (temperature) pseudo-measurements were assimilated in the model of the Marine Hydrophysical Institute (MHI) by the adaptive statistic method for reanalysis of the Black Sea fields for 2012. The temperature and salinity fields reconstructed in reanalysis were validated. The cold intermediate layer (CIL) is well reproduced; its temperature is slightly understated. The satellite measurements of the sea surface temperature should be necessarily assimilated in the circulation model. The sea level in the deep-water area reconstructed in reanalysis was quite close to the altimetry one.

Discussion and conclusion. Three-dimensional fields of temperature and salinity in the main pycnocline are reconstructed with sufficiently high accuracy in the deep-water part of the Black Sea. The seawater temperature in the surface layer 0–40 m cannot be reconstructed with acceptable accuracy. The approaches proposed in the previous studies and in the present paper can be effective for the other marine areas like the marginal seas of the oceanic type and the oceanic eddies, where relatively homogeneous water masses are observed.

Keywords: pseudo-measurements of salinity and temperature, altimetry, Argo floats, base horizon, covariance functions, reanalysis, adaptive statistic.

Acknowledgments: The results of the investigation carried out in the section “Procedure of reconstructing the three-dimensional fields of the salinity and temperature pseudo-measurements in the 2.5–125 m layer” are obtained within the framework of the state task on theme № 0827-2014-0011 “Investigation of the regularities in changes of the marine environment state based on the operational observations and the data of the system of nowcast, forecast and reanalysis of the marine water areas

state". The rest of the results represented in the paper were obtained at financial support of the Russian Scientific Foundation grant (project № 17-77-30001) and the RFBR grant № 16-05-00264 A.

For citation: Lishaev, P.N., Knysh, V.V. and Korotaev, G.K., 2019. Reconstruction of temperature and salinity in the upper layer of the Black Sea using pseudo-measurements on the underlying horizons. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 35(2), pp. 114–133. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-114-133 (in Russian).

Введение

Важной задачей оперативной океанологии является усвоение в моделях циркуляции вод данных об океане (контактных и дистанционных) для проведения реанализа состояния Мирового океана и его отдельных компонентов. Примером реализации такой задачи служит международная программа *GODAE* [1]. Именно совместное применение в моделях контактных и дистанционных данных высокого пространственного и временного разрешения позволяет описать изменчивость океана на требуемых масштабах.

Для Черного моря на сегодняшний день существует несколько продуктов ретроспективного анализа гидрофизических полей за различные временные промежутки. В работе [2] реанализ выполнен за период 1993–2012 гг. на основе изложенной в [3] модели с пространственным разрешением 5×5 км. В модели усваивались данные спутниковых измерений (температура поверхности моря, аномалии уровня), а также профили температуры и солёности на глубинах ниже 200 м, описывающие климатический сезонный ход. Представляется, что более аккуратный учет изменчивости стратификации бассейна по пространству мог бы повысить качество реанализа.

В [4] использовалась модель *NEMO* v3.4 с пространственным разрешением ~ 3 км, временной интервал реанализа 1992–2017 гг. Для ассимиляции данных о температуре поверхности, аномалиях уровня и профилях солёности и температуры, полученных буями *Argo* [5], использовалась схема *3D-Var*. Однако ввиду ограниченности гидрологических измерений применение процедуры *3D-Var* приводит к значительным погрешностям.

Для качественного воспроизведения термохалинной стратификации и мезомасштабных процессов важно усваивать данные наблюдений, равномерно распределенные по акватории исследуемого бассейна.

Оригинальная методика восстановления ежесуточных полей температуры (солёности) на горизонтах слоя 100–500 м глубоководной области бассейна, ограниченной изобатой 500 м, предложена в работах [6, 7]. Она основана на комбинированном анализе альтиметрических и малочисленных судовых гидрологических наблюдений в Черном море за 1993–2002 гг. Данная методика была уточнена и применена в работе [8] к измерениям солёности и температуры буями *Argo*. Это позволило воспроизвести трехмерные поля псевдоизмерений температуры и солёности на регулярной сетке в слое 63–500 м за 1993–2014 гг.

Положительным качеством разработанной методики является то обстоятельство, что горизонтальная структура полей псевдоизмерений солёности и температуры на всех горизонтах в слое 63–500 м для каждых суток периода 1993–2014 гг. сходна с топографией альтиметрического уровня моря и отражает основные синоптические процессы. Однако, в силу особенности мето-

дики, значения солености (температуры) не восстанавливаются на отдельных горизонтах слоя 63–125 м справа от фронта Основного Черноморского течения (ОЧТ) и в антициклонических вихрях (рис. 9 работы [7]). Причина наличия незаполненных зон в рассматриваемой глубоководной акватории моря объясняется тем, что, согласно нашей методике, верхняя граница восстановления профилей температуры и солености привязана к изопикнической поверхности.

В работе [9] выполнен реанализ гидрофизических полей Черного моря за 1993–2014 гг. с ассимиляцией описанных выше трехмерных полей температуры в модели Морского гидрофизического института (МГИ) [10] с разрешением 5×5 км. В целом в результате реанализа было получено удовлетворительное соответствие рассчитанных по модели полей температуры и солености полученным в результате наблюдений с буев-профилемеров в пределах основного пикноклина. Вместе с тем в верхних слоях моря отклонение рассчитанных значений температуры и солености было значительным. Кроме того, поле уровня, построенное в результате реанализа, имело меньшую амплитуду по сравнению с наблюдениями, что приводило к занижению скорости геострофических течений в верхних слоях моря.

Весьма показательной в этом отношении является работа [11], в которой решена задача вариационной ассимиляции данных спутниковых измерений температуры поверхности Черного моря в σ -координатной модели [12] для восстановления потоков тепла. Анализ профилей температуры в различных точках акватории моря показал, что температура уточняется не только на поверхности моря, но и на горизонтах слоя 2, 5–30 м. Специфика разработанного нами алгоритма восстановления полей псевдоизмерений температуры и солености на горизонтах слоя 2,5–50 м (см. ниже) состоит в том, что эти поля рассчитываются по данным с нижележащих базовых горизонтов.

Настоящая работа является продолжением исследований, выполненных в [9, 13]. Ее цель – развитие алгоритма, предложенного в указанных работах, для достижения более высоких точностей реанализа полей Черного моря в его верхнем деятельном слое. Для этого предлагается процедура, позволяющая дополнить полученные ранее профили недостающими значениями температуры и солености в слое 63–125 м в районе справа от фронта ОЧТ и в антициклонических вихрях и воспроизвести профили псевдоизмерений температуры и солености (по данным измерений за отдельный 2012 г.) в верхнем слое 2,5–63 м.

Основные соотношения для восстановления трехмерных полей псевдоизмерений солености и температуры моря в слое 2,5–125 м

Для восстановления профилей солености в слое 2,5–125 м использовались методологические принципы оптимальной интерполяции [14]. С целью нахождения интерполяционных весов необходимо знать автокорреляционные функции термohалинных полей и ошибки их измерений.

Автокорреляционную функцию поля солености (температуры) с учетом ее нормирования представим в следующем виде [13]:

$$P_s(\bar{x}, \bar{x}', t) = \sigma_s(\bar{x}, t) \sigma_s(\bar{x}', t) P_s''(\bar{x}, \bar{x}', t), \quad (1)$$

где $\sigma_S(\bar{x}, t), \sigma_S(\bar{x}', t)$ – среднеквадратические отклонения (СКО) солёности (температуры); $\bar{x} = (x, y, z)$; ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вниз; $P_S''(\bar{x}, \bar{x}', t)$ – нормированная автокорреляционная функция поля солёности (температуры). В настоящей работе солёность (температура) в слое 2,5–125 м восстанавливается посредством коррекции рассчитанной в модели прогностической трехмерной солёности (температуры) на горизонтах рассматриваемого слоя данными ее псевдоизмерений с нижележащего базового горизонта. Поэтому основное внимание уделим ковариациям поля солёности по вертикальной координате с учетом результатов работ [15, 16], в которых проводилась коррекция модельной солёности (температуры) альтиметрическими данными. С этой целью примем следующие допущения для множителей правой части соотношения (1):

$$\sigma_S(\bar{x}, t) \cong \sigma_S(z_*, t), \quad (2)$$

$$\sigma_S(\bar{x}', t) \cong \sigma_S(z_k, t), \quad (3)$$

$$P_S''(\bar{x}, \bar{x}', t) \cong P_S''(z_*, z_k, t) P_S''(|x - x'|, |y - y'|, z_*, t). \quad (4)$$

Здесь z_* – первый из горизонтов модели от поверхности моря (базовый горизонт), на котором в восстановленных по оригинальной методике ежесуточных трехмерных полях псевдоизмерений солёности [7] отсутствуют «пустые» области; z_k – те из вышележащих горизонтов по отношению к базовому, на которых требуется восстановить псевдоизмерения солёности; $P_S''(z_*, z_k, t)$ – нормированная функция ковариации псевдоизмерений солёности базового горизонта z_* с модельной солёностью на вышележащих горизонтах z_k ; $P_S''(|x - x'|, |y - y'|, z_*, t)$ – нормированная автокорреляционная функция псевдоизмерений солёности на горизонте z_* , зависящая от расстояния между узлами сеточной области модели. Аппроксимирующие функции в выражениях (2) – (4) предполагаются известными. Псевдоизмерения солёности на базовом горизонте z_* в каждом узле сетки в первом приближении считаются независимыми.

В качестве основного базового принимается горизонт $z_* = 150$ м, для которого имеются псевдоизмерения на всей площади моря. В этом случае формула для восстановления в глубоководной области моря псевдоизмерений солёности на горизонтах z_k в узлах i, j имеет вид

$$S_{i,j}^{\text{восст}}(z_k, t_l) = S_{i,j}^{\text{прогн}}(z_k, t_l) + \frac{\sigma_S(z_*, t_l) \sigma_S(z_k, t_l) P_S''(z_*, z_k, t_l)}{\sigma_S^2(z_*, t_l) + \sigma_{\text{омс}}^2(z_*)} \left[S_{i,j}^{\text{псевдо}}(z_k, t_l) - S_{i,j}^{\text{прогн}}(z_k, t_l) \right], \quad (5)$$

где k обозначают номера горизонтов (от 1 до 15) по оси z на глубинах 2,5–125 м включительно; время t_l ($l = 1, 2, \dots$) измеряется в сутках; $\sigma_S^2(z_*, t_l)$ – дисперсия псевдоизмерений солёности на базовом горизонте; $\sigma_{\text{омс}}^2(z_*)$ – дисперсия ошибок «измерений» на горизонте z_* . Числитель дроби представляет собой ненормированную функцию ковариации солёности $P_S''(z_*, z_k, t_l)$.

Оценка функции ковариации псевдоизмерений солёности на горизонте z_* с модельной солёностью на вышележащих горизонтах z_k выполнялась следующим образом:

$$P_S(z_*, z_k, t_l) = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j} \delta S_{i,j}(z_*, t_l) \delta S_{i,j}(z_k, t_l). \quad (6)$$

Здесь N – количество узлов сетки на горизонтах слоя 2,5–150 м в глубоководной области моря,

$$\delta S_{i,j}(z_*, t_l) = S_{i,j}^{\text{псевдо}}(z_*, t_l) - \bar{S}^{\text{псевдо}}(z_*, t_l), \quad (7)$$

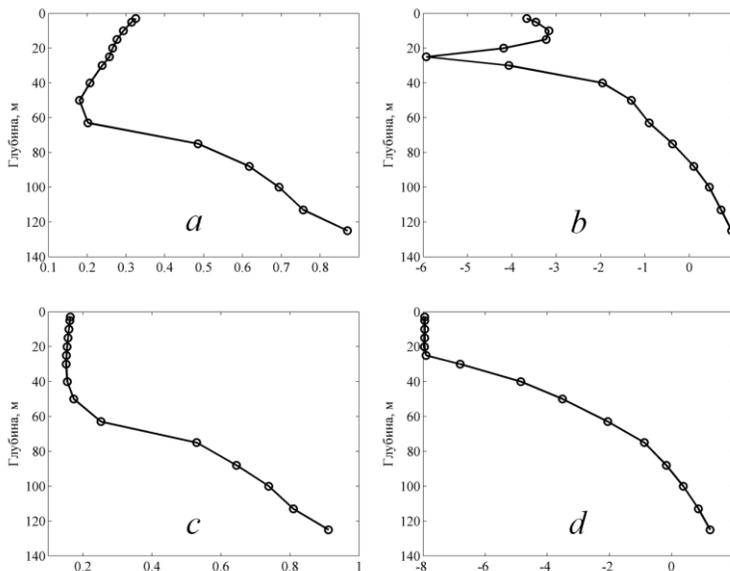
$$\delta S_{i,j}(z_k, t_l) = S_{i,j}^{\text{прогн}}(z_k, t_l) - \bar{S}^{\text{прогн}}(z_k, t_l), \quad (8)$$

черта означает осреднение по горизонту.

Формула (1), допущения (2) – (4) и выражения (5) – (8) имеют такой же вид для температуры.

Процедура восстановления трехмерных полей псевдоизмерений солёности и температуры моря в слое 2,5–125 м

Восстановление полей псевдоизмерений термохалинных параметров в глубоководной области моря проводили итерационным способом. Процедура итерационного восстановления солёности (температуры) выбрана для использования в формуле (5) более высоких значений весовых множителей (рис. 1).



Р и с. 1. Зависимость средних по сезонам весовых коэффициентов от глубины для солёности (a, c) и температуры (b, d) летом (a, b) и зимой (c, d) 2012 г.

F i g. 1. Dependence of the season-average weighting coefficients on depth for salinity (a, c) and temperature (b, d) in summer (a, b) and winter (c, d), 2012

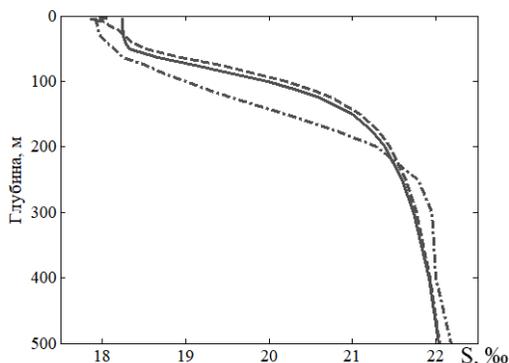
В первой итерации ежесуточные значения псевдоизмерений солёности (температуры) восстанавливаются в слое 63–125 м в узлах, которые принадлежат только зонам, расположенным справа от фронта ОЧТ, и антициклони-

ческим вихреобразованиям, а также на горизонтах слоя 2,5–50 м во всех узлах модельной сетки. При этом используются: первоначальное поле псевдоизмерений солёности (температуры) на основном базовом горизонте 150 м, его рассчитанная дисперсия $\sigma_S^2(z_*, t_l)$ (дисперсия ошибок «измерений» принималась равной $0,05 \sigma_S^2(z_*, t_l)$), модельные прогностические поля в слое 2,5–125 м, а также оцененные по формулам (6) – (8) функции ковариаций.

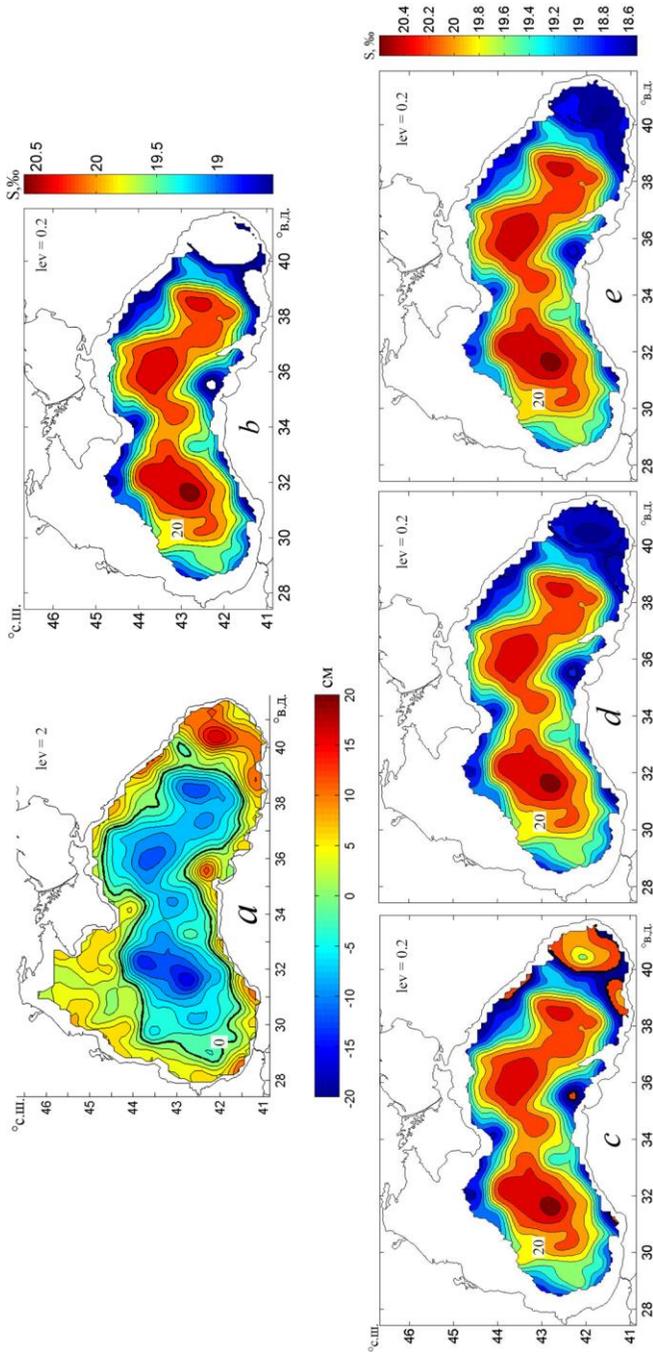
Исходными для второй итерации служили поля солёности (температуры), восстановленные на горизонтах слоя 2,5–50 м, и те же первоначальные поля псевдоизмерений солёности (температуры) в слое 63–125 м, но уточненные в результате первой итерации. Вторая и последующие итерации выполнялись таким же образом, как и первая, но с последовательным сдвигом на один горизонт к поверхности для использования его в качестве базового. Таким образом, на горизонтах слоя 63–125 м после шести итераций были восстановлены скорректированные первоначальные поля псевдоизмерений солёности (температуры). Последняя (седьмая) итерация, в которой базовым принимался горизонт 63 м, позволила восстановить ежесуточные поля псевдоизмерений солёности (температуры) на горизонтах слоя 2,5–50 м.

Анализ результатов восстановления полей псевдоизмерений солёности и температуры за 2012 г.

Средние по горизонтам и сезонам профили восстановленных итерационным методом псевдоизмерений солёности и температуры сопоставлялись с аналогичными профилями, построенными по данным измерений *Argo* и модельного прогностического расчета. На рис. 2 видно, что профили псевдоизмерений солёности в слое 2,5–125 м в летний сезон 2012 г., полученные в результате итераций, весьма близки к измеренным профилям в пределах основного галоклина, тогда как в модельных профилях солёности он более глубок. У поверхности выделяется квазиоднородный слой, примерно такой же, как и в модельном расчете, но более выраженный, чем по данным буев *Argo*. Соответствие восстановленных профилей солёности наблюдениям вполне удовлетворительно в зимний, весенний и осенний сезоны, а также при осреднении за год.



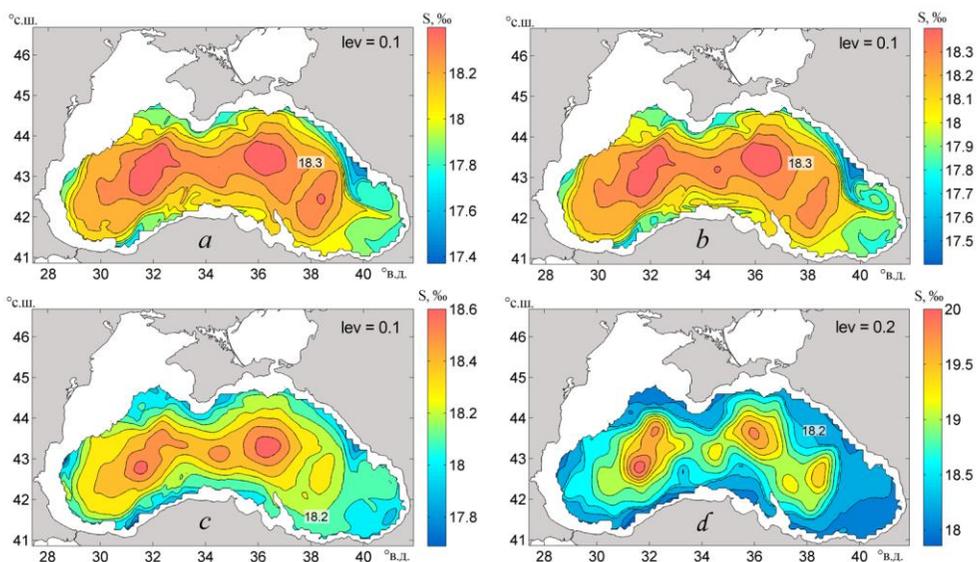
Р и с. 2. Средние для лета 2012 г. профили солёности, восстановленные итерациями (сплошная кривая), по данным буев *Argo* (штриховая кривая) и модельного расчета (штрихпунктирная кривая)
F i g. 2. Summer-average (2012) salinity profiles reconstructed using iterations (solid curve), data of *Argo* floats (stroke line) and model calculation (dash-dot line)



Р и с. 3. Топография асимметричного уровня моря (a) и соленость на горизонте 88 м: с «пустыми» областями (b) и восстановленная в первой (c), третьей (d), пятой (e) итерациях 14.08.2012 г.
Fig. 3. Topography of the sea altimetry level (a) and salinity on the 88 m horizon: with “empty” areas (b) and reconstructed in the first (c), third (d) and the fifth (e) iterations on 14.08.2012

Проанализируем теперь поле псевдоизмерений солёности в районах справа от ОЧТ и в антициклонических вихрях. Распределения солёности для примера приведены на горизонте 88 м в основном галоклине (рис. 3). Видно, что солёность монотонно понижается в направлении к периферии области. Такая же тенденция ярко проявляется для Синопского и Батумского антициклонов и антициклона мористее Кавказского побережья. Величина градиентов солёности соответствует общепринятым представлениям.

Особенности восстановленных полей солёности на горизонтах слоя 2,5–63 м демонстрирует рис. 4. Видно монотонное уменьшение солёности к границам области, прослеживающееся на всех приведенных горизонтах. Конфигурация восточного и западного циклонических круговоротов так же, как и расположение циклонических вихрей на этих горизонтах, хорошо согласуется с топографией альтиметрического уровня моря (рис. 3, *a*; 4, *d*). Такие же результаты получены при коррекции и воспроизведении полей псевдоизмерений солёности для зимнего, весеннего и осеннего сезонов.



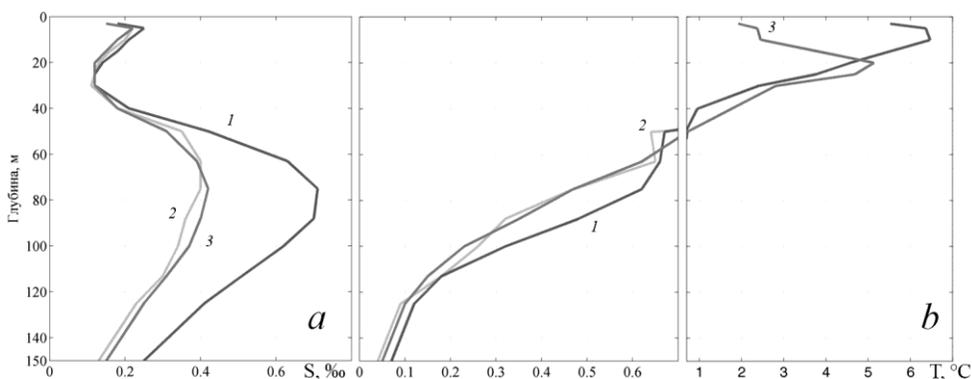
Р и с. 4. Восстановленные поля солёности за 14.08.2012 г. на горизонтах: 10 м – *a*, 20 м – *b*, 50 м – *c*, 63 м (базовый) – *d*

F i g. 4. Reconstructed salinity fields for 14.08.2012 on the horizons: 10 m – *a*, 20 m – *b*, 50 m – *c* and 63 m (basic one) – *d*

Некоторые проблемы существуют только в области, занимаемой Батумским антициклоном. Так, на горизонтах ниже 63 м он состоит из двух ядер (рис. 3, *e*). В то же время на горизонтах верхнего слоя 2,5–50 м в этой области наблюдаются как антициклонический, так и циклонический вихри. Их интенсивность, как видно на рис. 4, весьма слабая. Анализ показал, что возникновение слабоинтенсивного циклонического вихря обусловлено наличием соответствующей структуры в поле солёности при расчете по модели. Вихрь, образовавшийся в модельном расчете, не совпадает по фазе с данными измерений *Argo* и альтиметрии, что отразилось в структуре восстановленного поля

солёности. Несмотря на такое несоответствие в целом, можно сделать вывод, что восстановленные поля солёности в верхнем слое моря вполне удовлетворительные.

Показателями качества восстановленных полей псевдоизмерений солёности в верхнем слое моря являются СКО при сопоставлении с естественной изменчивостью полей солёности, оцененной по данным буев *Argo* за весь 2012 г. (рис. 5, *a*). Максимальное значение СКО солёности получено для горизонтов 63 и 75 м и равно 0,40‰, минимальное – для горизонта 30 м и равно 0,11‰. Естественная изменчивость на горизонтах слоя 2,5–40 м незначительно превышает СКО, примерно на 0,02‰ (такая же изменчивость наблюдается и в слое 250–500 м). Однако в галоклине, например на горизонте 88 м, она в 1,9 раза выше СКО. Приведенные статистические характеристики свидетельствуют об удовлетворительной точности воспроизведенных полей солёности в слое 2,5–125 м.



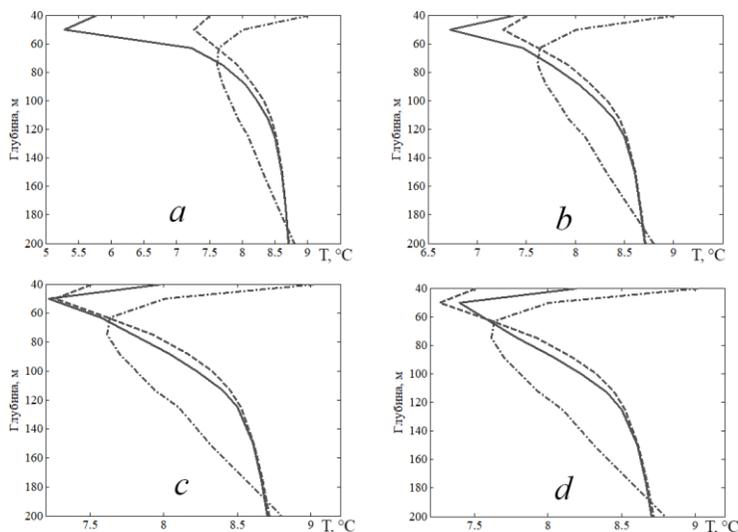
Р и с. 5. Естественная изменчивость (кривая 1), стандартное среднее квадратическое отклонение восстановленных полей от измеренных (кривая 2) и по данным реанализа (кривая 3) за 2012 г. как функции глубины для солёности – *a* и температуры – *b*

F i g. 5. Natural variability (curve 1), standard root-mean-square deviation of the reconstructed fields from the measured ones (curve 2) and that based on the reanalysis data (curve 3) for 2012 as the functions of depth for salinity – *a* and temperature – *b*

Анализ средних по сезонам профилей восстановленной температуры выявил более заметное расхождение между ними и построенными по измерениям профилями, особенно в приповерхностном слое 2,5–40 м. Сезонные профили температуры можно считать удовлетворительными только в слое 50–125 м. Формальной причиной этого является отрицательная ковариация флуктуаций температуры на базовом горизонте (63 м) с ее значениями в приповерхностном слое, что приводит к неустойчивости величин интерполяционных коэффициентов. Фактически плохое качество работы алгоритма восстановления температуры морской воды указывает на преобладание вклада потоков тепла на поверхности моря в формирование флуктуаций температуры по сравнению с влиянием динамики глубинных слоев моря по крайней мере до глубины 50 м.

С учетом сказанного выше остановимся на анализе среднегодовых профилей температуры (рис. 6). Известно [17], что подповерхностная водная

масса в глубоководной области моря представляет собой холодный промежуточный слой (ХПС). Сопоставление модельных и измеренных буями *Argo* профилей температуры показывает, что по данным модели воды ХПС залегают на больших глубинах. Среднегодовая температура этих вод на горизонтах 50 и 63 м оказалась выше, чем по измерениям. Среднегодовые профили температуры, восстановленной в пятой итерации (базовый горизонт 88 м) и полученной по измерениям буями *Argo*, по интегральным характеристикам ХПС наиболее приближены друг к другу (рис. 6, *c*).

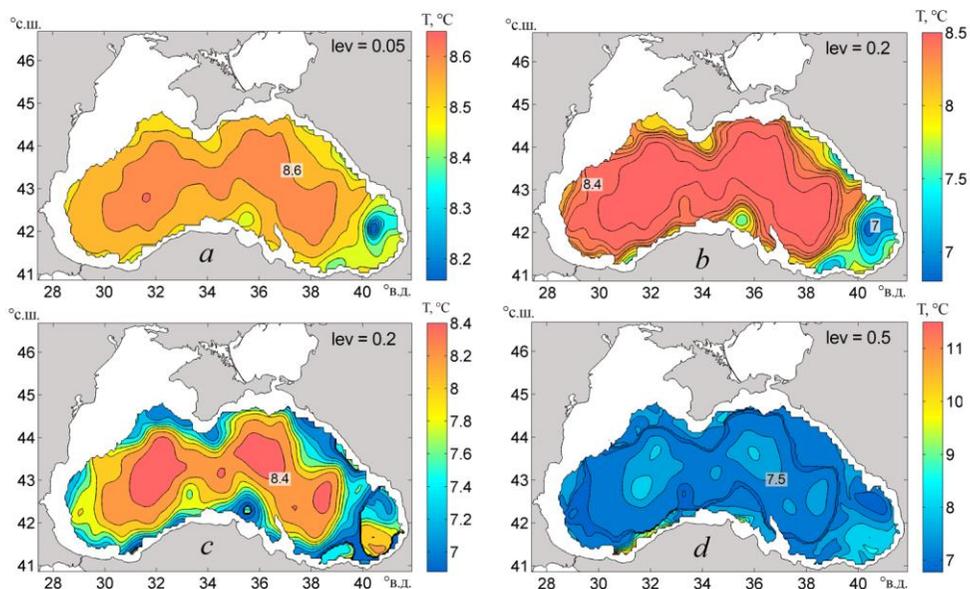


Р и с. 6. Среднегодовые профили температуры, восстановленной итерациями (сплошная), по данным измерений буями *Argo* (штриховая) и модельного расчета (штрихпунктир): в первой – *a*, третьей – *b*, пятой – *c*, шестой – *d* итерациях

F i g. 6. Annual-average profiles of temperature reconstructed by the iterations (solid line) using the data of the *Argo* floats measurements (stroke line) and the model calculations (dash-dot line): in the first – *a*, third – *b*, fifth – *c* and sixth – *d* iterations

Рассмотрим воспроизведенные поля псевдоизмерений температуры на горизонтах слоя 50–150 м для середины августа 2012 г. Уточнение итерациями первоначальных полей температуры на горизонтах 100, 113 и 125 м позволило восстановить в «пустых» зонах глубоководной области моря структуру Сакарьякского, Синопского, Батумского и двух кавказских антициклонов (рис. 7, *a, b*). Удалось получить также монотонное изменение температуры к периферии области.

Возникновение циклонического вихря в северо-восточной части Батумского антициклона на горизонтах слоя 50–88 м (рис. 7, *c, d*) объясняется, как и для поля солёности, влиянием циклона, полученного в модельных полях температуры. Для устранения подобных неточностей необходимо в дальнейшем провести специальные исследования.



Р и с. 7. Восстановленные поля температуры за 14.08.2012 г. на горизонтах: 150 м (базовый) – *a*, 113 м (вторая итерация) – *b*, 88 м (четвертая итерация) – *c*, 50 м (седьмая итерация) – *d*
F i g. 7. Reconstructed temperature fields for 14.08.2012 on the horizons: 150 m (basic one) – *a*, 113 m (the second iteration) – *b*, 88 m (the fourth iteration) – *c*, 50 m (the seventh iteration) – *d*

Ход кривых изменения по глубине СКО и естественной изменчивости псевдоизмерений температуры (рис. 5, *b*) показывает, что точность воспроизведения этого параметра выше 50 м неудовлетворительна. СКО температуры меньше естественной изменчивости на горизонтах 75, 88 и 100 м. Так, на глубине 88 м естественная изменчивость полей измеренной температуры выше восстановленных полей температуры в 1,5 раза. На горизонте 63 м и ниже 100 м СКО сопоставимо со значением естественной изменчивости.

Итерационный способ уточнения полученных ранее первоначальных полей псевдоизмерений солёности и температуры даёт возможность восстановить термохалинные параметры в «пустых» областях, что позволит приблизить размах модельного уровня моря в расчетах с ассимиляцией восстановленных полей солёности и температуры к размаху альтиметрического уровня.

Реанализ гидрофизических полей моря за 2012 г. посредством ассимиляции псевдоизмерений температуры и солёности в модели МГИ

Эффективность использования описанных выше трехмерных массивов температуры и солёности оценивается на основе их ассимиляции в модели циркуляции вод. В настоящее время в океанологии наиболее перспективными являются два подхода к разработке и успешному применению алгоритмов ассимиляции доступных данных измерений в моделях циркуляции – вариационный (*4D-Var* [18–20]) и ансамблевые фильтры Калмана. Последний подразделяется на расширенный ансамблевый фильтр Калмана (*Ensemble Kalman Filter, EnKF* [21, 22]) и ансамблевую оптимальную интерполяцию (*Ensemble Optimal Interpolation, EnOI* [23]). Отметим также работу [24], в которой разработан и практически реализован алгоритм усвоения среднемесячных кли-

матических полей температуры и солености Черного и Азовского морей в режиме «вариационная инициализация – прогноз». Однако практическая реализация этих подходов требует мощных вычислительных ресурсов. Особенно это касается метода *4D-Var* вследствие его вычислительной сложности, заключающейся в решении итерационно краевой задачи для системы прямых и сопряженных уравнений. Более простые методы, основанные на оптимальной интерполяции (*OI, EnOI, 3D-Var* [22, 23, 4]), обладают тем недостатком, что статистика ошибок прогноза фиксируется априори. Для преодоления отмеченных недостатков используются различные упрощения реализации фильтра Калмана.

В настоящей работе восстановленные по оригинальной методике трехмерные поля температуры и солености в слое 2,5–500 м мы использовали для реанализа гидрофизических полей Черного моря за 2012 г. посредством их ассимиляции в модели МГИ апробированным в [9, 13] методом адаптивной статистики. Подробное описание модели МГИ приведено в работе [10]. Заметим, что коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии тепла и соли по вертикали вычислялись с использованием параметризации Пакановски – Филандера [25].

Основу метода адаптивной статистики составляют: дифференциальные уравнения дисперсий ошибок прогноза солености ($\sigma_s^2(\bar{x}, t)$) и температуры ($\sigma_T^2(\bar{x}, t)$) с оптимально подобранным коэффициентом релаксации (REL) [13], источники в уравнениях переноса – диффузии тепла и соли [26, 13] и формулы корректирования дисперсий ошибок прогноза после ассимиляции псевдоизмерений в модели [13].

Представим здесь дифференциальное уравнение и соотношения для дисперсии ошибок прогноза солености (аргументы функций опущены) в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_s^2}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_s^2 u}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_s^2 v}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_s^2 w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k^s \frac{\partial \sigma_s^2}{\partial z} + k_H \Delta \sigma_s^2 + \text{REL}^{-1} (\sigma_{*s}^2 - \sigma_s^2), \quad (9)$$

$$Q_s = \frac{\sigma_s^2}{\text{REL} [\sigma_s^2 + \gamma(z) \sigma_{\text{oms}}^2]} [S^{\text{obs}} - S^{\text{m}}], \quad (10)$$

$$\sigma_s^{2*} = \sigma_s^2 - \frac{\sigma_s^2 \sigma_s^2}{[\sigma_s^2 + \sigma_{\text{oms}}^2]} \approx \frac{\sigma_s^2 \sigma_{\text{oms}}^2}{[\sigma_s^2 + \gamma(z) \sigma_{\text{oms}}^2]}. \quad (11)$$

В уравнении (9) u, v, w – компоненты вектора скорости течения по осям декартовой системы координат; k^s – коэффициент турбулентного обмена по вертикали (рассчитывался по модели из работы [10]); k_H – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии ($k_H = 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$); Δ – оператор Лапласа; последнее слагаемое правой части представляет собой источник, отражающий релаксирование рассчитываемой дисперсии (REL = 10 сут [13]) к сезонно меняющейся (для условного года) типичной дисперсии ошибок про-

гноза солёности $\sigma_{*S}^2(\bar{x}, t)$. Последняя оценивалась по данным модельного расчёта, проведенного на период 1993–2012 гг. с использованием атмосферного форсинга *ERA-Interim* [27]. Алгоритм оценки и анализ сезонной изменчивости среднесуточных значений типичной дисперсии солёности (температуры) представлены в работе [13]. В соотношениях (10), (11) Q_S – источник в уравнении переноса – диффузии соли; REL1 – параметр релаксации, равный 12 ч [13]; σ_S^{2*} – скорректированная дисперсия ошибок; $\gamma(z)\sigma_{\text{ош}S}^2$ – произведение подобранного эмпирически параметра ($\gamma(z) \leq 0,015$) на среднемесячную дисперсию ошибок восстановления псевдоизмерений солёности S^{obs} ; S^m – модельная солёность. Отличие первого сомножителя в источнике (10) от использованного в работе [26] состоит в том, что он зависит от изменяющейся со временем дисперсии ошибок прогноза солёности.

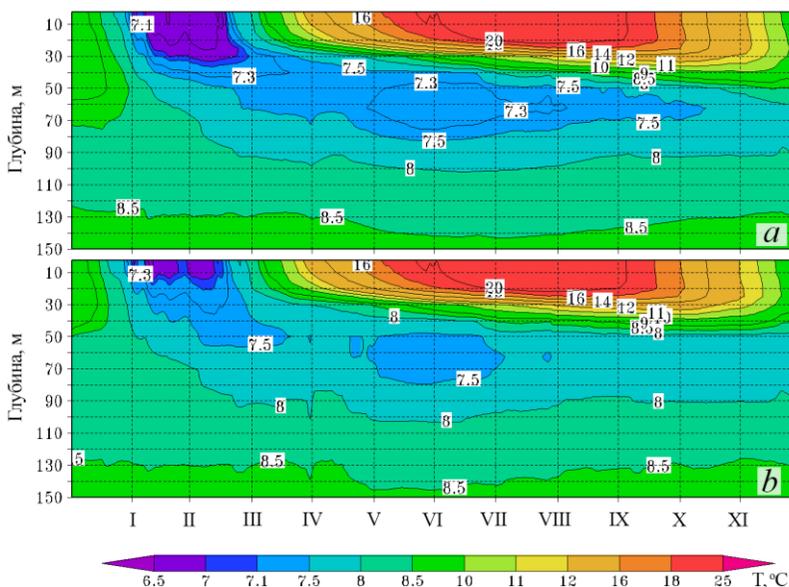
Граничные и начальные на 01.01.2012 г. условия для уравнения (9) приведены в [13]. Тип дифференциального уравнения дисперсии ошибок прогноза температуры, граничных и начальных условий и вид соотношений (10), (11) такие же, как для дисперсии ошибок прогноза солёности. Два уравнения вида (9) решали численно совместно с термогидродинамическими уравнениями модели. Ассимиляция псевдоизмерений солёности (температуры) в модели, как и коррекция вида (11), выполнялась на каждом шаге по времени.

Остановимся на результатах реанализа гидрофизических полей моря за 2012 г. Средние за год СКО солёности по данным реанализа и СКО восстановленных по предложенной методике близки между собой (рис. 5, а). Среднеквадратические отклонения солёности по данным реанализа относительно СКО псевдоизмерений солёности немного меньше на горизонтах слоя 2,5–63 м, а в слое 75–500 м они немного больше. Максимальное значение годового СКО солёности по данным реанализа равно 0,42‰ на горизонте 75 м. Это на 0,06‰ меньше максимального значения осредненного СКО солёности по всему массиву реанализа за 1993 – 2012 гг., выполненного с ассимиляцией в модели МГИ альтиметрических данных и температуры поверхности моря с применением уравнений и соотношений турбулентности из семейства моделей Меллора – Ямады [28]. Важно то, что корень квадратный из дисперсии измеренных буйами *Argo* полей солёности в слое 50–200 м существенно превосходит СКО восстановленных полей псевдоизмерений солёности и рассчитанных в реанализе за 2012 г. (рис. 5, а).

Годовые СКО температуры по данным реанализа на горизонтах слоя 2,5–40 м весьма высокие, поскольку в этом слое данные псевдоизмерений не усваивались. Максимальное значение СКО температуры равно 5,13°C на горизонте 20 м (рис. 5, б). Это свидетельствует о том, что термодинамика верхнего слоя моря воспроизводится неудовлетворительно. На рис. 5, б видно, что годовые профили СКО температуры в слое 50–200 м, построенные по данным реанализа и измерениям, и профили восстановленных полей псевдоизмерений температуры близки и перемежаются между собой. Скорее всего, причиной высоких значений СКО температуры в нашем расчёте являются неточности задания потоков тепла из атмосферы. Очевидно, что лучшего результата можно добиться, усваивая спутниковые наблюдения температуры

поверхности моря. Однако следует отметить, что даже при ассимиляции температуры поверхности моря в модели МГИ максимальное значение осредненного СКО температуры для лета, согласно реанализу из работы [28], равно 3,4°C на глубине ≈ 18 м, что обусловлено исключительно обостренным сезонным термоклином в Черном море.

Сопоставление диаграмм на рис. 8 свидетельствует, что ассимиляция восстановленных в данной работе псевдоизмерений термохалинных параметров позволила хорошо воспроизвести ХПС в море. Однако его холодозапас оказался несколько меньше, чем полученный в реанализе работы [29]. По данным [30], в 2012 г. нормированные аномалии теплозапаса вод шельфа (фактически открытого моря) были отрицательными. Поэтому этот год характеризуется, в соответствии с принятой в [30] шкалой, сильной степенью обновления вод ХПС. Увеличение холодозапаса ХПС можно получить, ассимилируя температуру поверхности моря, измеряемую с искусственных спутников Земли (ИСЗ).

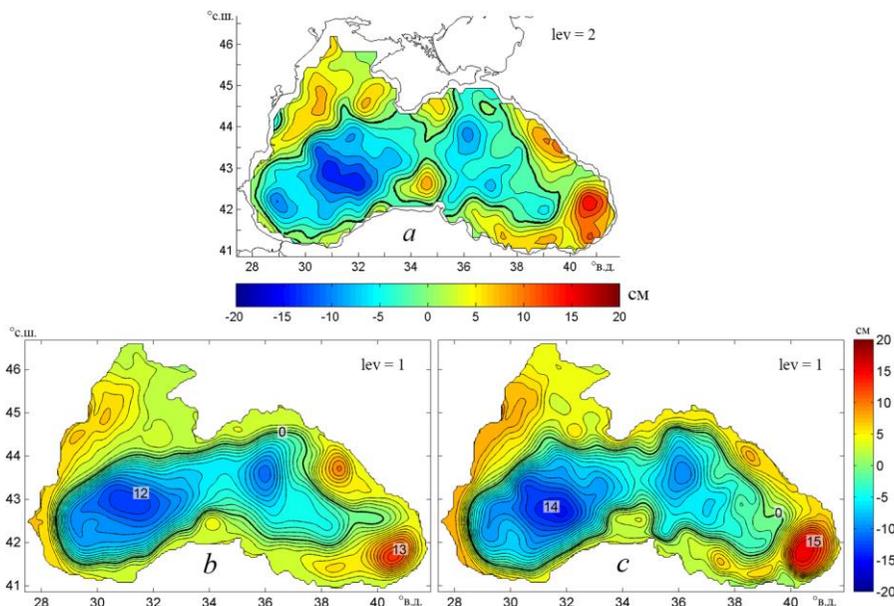


Р и с. 8. Диаграмма сезонной изменчивости средней по горизонтам ежесуточной температуры по данным реанализа за 2012 г. с ассимиляцией в модели: псевдоизмерений температуры и солёности в слое 63–500 м [9] – *a*; восстановленных псевдоизмерений температуры в слое 50–500 м и солёности в слое 2,5–500 м – *b*

F i g. 8. Diagram of seasonal variability of the horizons-average daily temperature based on the reanalysis for 2012 with model assimilation of: temperature and salinity pseudo-measurements in the 63–500 m layer [9] – *a*; with the reconstructed pseudo-measurements of temperature in the 50–500 m layer and salinity in the 2.5–500 m layer – *b*

Обратимся к рис. 9, который приведен для сопоставления структур полей возвышений свободной поверхности моря. Эталонем служит альтиметрическая уровенная поверхность. Конфигурация и локальные структуры уровня моря, показанного на рис. 9, *b*, отличаются от аналогичных характеристик,

определяющих топографию альтиметрического уровня (рис. 9, *a*). Заметное различие наблюдается между структурами Батумского и кавказского антициклонов. Интенсивность Синопского антициклонического вихря на рис. 9, *b* существенно меньше, чем в альтиметрическом уровне моря. Севастопольский антициклон на этом рисунке весьма размытый, а в центральной части бассейна наблюдаются лишь западный и восточный циклонические круговороты. Перепад обсуждаемого уровня равен 25 см.

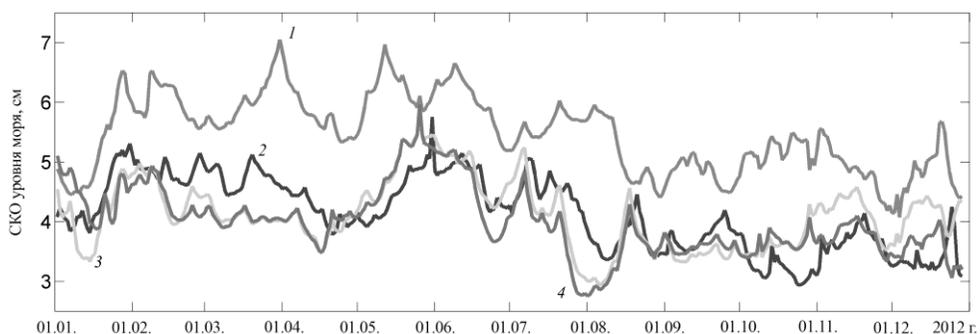


Р и с. 9. Топография уровня моря за 15.06.2012 г.: альтиметрического – *a*, в реанализе с ассимиляцией в модели некорректированных псевдоизмерений температуры и солёности в слое 63–500 м [9] – *b* и скорректированных псевдоизмерений температуры в слое 50–500 м и солёности в слое 2,5–500 м – *c*

F i g. 9. Topography of the sea level for 15.06.2012: altimetry one – *a*, that resulted from the reanalysis with model assimilation of the uncorrected pseudo-measurements of temperature and salinity in the 63–500 m layer [9] – *b* and the corrected pseudo-measurements of temperature in the 50–500 m layer and salinity in the 2.5–500 m layer – *c*

Конфигурация ОЧТ в реанализе с ассимиляцией в модели восстановленных в верхнем слое 2,5–63 м скорректированных псевдоизмерений температуры и солёности, так же как и расположение циклонических вихрей в центральной акватории моря и антициклонов справа от ОЧТ, заметно ближе к топографии альтиметрического уровня моря (рис. 9, *a*, *c*). Кизилармакский, Батумский и кавказский антициклоны по структуре и интенсивности весьма близки к аналогичным вихреобразованиям в альтиметрическом уровне. Интенсивность Синопского и Севастопольского антициклонов оказалась не совсем достаточной. Перепад в анализируемом уровне равен 29 см, что на 2 см меньше, чем в альтиметрическом уровне. Ассимиляция скорректированных псевдоизмерений температуры и солёности в модели в любые другие месяцы 2012 г. улучшает структуру рассчитанных полей уровня, приближая ее к структуре альтиметрического уровня моря.

Для количественной оценки достоверности восстановленного в модели уровня моря относительно альтиметрического уровня на рис. 10 приведена сезонная изменчивость СКО, рассчитанных в глубоководной акватории, для четырех численных экспериментов. Значения СКО, оцененные по модельному расчету, являются превалирующими. Величины СКО по данным проведенного в [31] реанализа (кривая 2) с января по апрель и с середины июля до середины августа превышают СКО уровня моря, восстановленного в двух выполненных нами реанализах (кривые 3, 4). В июне и сентябре они мало отличаются (увеличиваясь или уменьшаясь) от рассчитанных нами СКО уровня. В мае, октябре и декабре значения СКО уровня, согласно реанализу из работы [31], меньше полученных нами. Кривая 3 на рис. 10 отражает сезонную изменчивость СКО уровня моря, рассчитанного нами в реанализе за 2012 г. методом адаптивной статистики с усвоением в модели некорректированных псевдоизмерений температуры и солёности в слое 63–500 м. Кривая 4 соответствует поведению СКО уровня, восстановленного в реанализе настоящей работы. Видно, что кривая 4 располагается в основном ниже кривой 3. Это означает, что восстановленный в реанализе данной работы уровень моря в глубоководной области качественно и количественно более близок к альтиметрическому уровню.



Р и с. 10. Сезонная изменчивость СКО восстановленного за 2012 г. уровня моря (при сравнении с альтиметрическим) по четырем расчетам: модельному (кривая 1) и реанализам из работы [31] (кривая 2), работы [9] (кривая 3) и настоящей работы (кривая 4)

F i g. 10. Seasonal variability of root-mean-square deviation of the sea level reconstructed for 2012 (comparison with the altimetry one) based on four calculations: the model one (curve 1) and the reanalyses ones from [31] (curve 2), [9] (curve 3) and the present paper (curve 4)

Обсуждение

Представленная работа в определенном смысле завершает исследование возможности восстановления трехмерных полей температуры и солёности морской воды на основе альтиметрических измерений и небольшого числа наблюдений профилей температуры и солёности [6, 7]. В ней показано, что в этом случае трехмерные поля температуры и солёности морской воды в главном пикноклине восстанавливаются с достаточно высокой точностью на всей глубоководной части акватории Черного моря. При этом восстановленная солёность морской воды имеет неплохую точность даже в верхнем перемешанном слое моря. К сожалению, температура морской воды не может

быть восстановлена с хорошей точностью в приповерхностном слое, очевидно, в силу существенной изменчивости во времени потоков тепла на морской поверхности.

Мотивацией выполнения исследований в данном направлении явилось небольшое количество гидрологических наблюдений в Черном море в течение всего времени, когда стали доступными альтиметрические наблюдения. При усвоении в моделях циркуляции вод малого количества данных о халинной и термической стратификации моря возникают значительные погрешности. Кроме того, при продолжительных расчетах наблюдаются заметные тренды в полях температуры и солёности в основном пикноклине. Использование трехмерных массивов температуры и солёности морской воды, восстановленных по данным альтиметрии, позволяет избавиться от указанных проблем.

Исследования в данной работе проведены для Черного моря, но имеют более широкое значение. Еще со времен *ПОЛИМОДЕ* известно, что на океанских акваториях значительной протяженности первая мода разложения отклонений полей температуры и солёности на эмпирические ортогональные функции описывает около 80% энергии колебаний изопикнических, изотермических и изохалинных поверхностей относительно их равновесного состояния. Это обстоятельство является отражением адиабатичности синоптических процессов в океанской среде и преобладания первой динамической моды. Фактически на такой особенности морской динамики основывается метод ассимиляции альтиметрии в работах [32, 33]. Поэтому предложенный в данной работе подход может оказаться эффективным и для других морских акваторий, таких как окраинные моря океанического типа и океанические круговороты, где наблюдаются относительно однородные водные массы. В частности, на его основе представляется возможным улучшить точность реанализа полей Мирового океана для того периода времени, когда еще не были доступны наблюдения с буев *Argo*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects / M. Drévillon [et al.] // *Journal of Operational Oceanography*. 2008. Vol. 1, iss. 1. P. 51–57. doi:10.1080/1755876X.2008.11020095
2. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993–2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 33–48.
3. *Dorofeev V. L., Sukhikh L. I.* Modelling of Long-Term Evolution of Hydrophysical Fields of the Black Sea // *Oceanology*. 2017. Vol. 57, iss. 6. P. 784–796. doi:10.1134/S0001437017060017
4. The Black Sea physical reanalysis system for the Copernicus Marine Service: description and skill assessment / B. Lemieux-Dudon [et al.] // *Geophysical Research Abstracts*. 2018. Vol. 20. P. 19742. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-19742.pdf> (дата обращения: 20.11.2018).
5. The Argo Program: Observing the Global Ocean with Profiling Floats / Roemmich Dean [et al.] // *Oceanography*. 2009. Vol. 22, no. 2. P. 34–43. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.36>
6. *Коротяев Г. К., Лишаев П. Н., Кныш В. В.* Методика анализа данных измерений температуры и солёности Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2. С. 26–42.

7. *Korotaev G. K., Lishaev P. N., Knysh V. V.* Reconstruction of the three-dimensional salinity and temperature fields of the Black Sea on the basis of satellite altimetry measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 9. P. 961–973. doi:10.1134/S0001433816090152
8. *Кныш В. В., Лишаев П. Н.* Уточнение методики восстановления трехмерных полей солености и температуры Черного моря по редким измерениям и альтиметрии // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 5–17. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-5-17
9. *Лишаев П. Н., Кныш В. В., Коротаев Г.К.* Воспроизведение изменчивости уровня и характеристик пикноклина Черного моря на основе метода адаптивной статистики // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. № 4. С. 271–282. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-271–282
10. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П. Н. Лишаев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 49–68.
11. *Агошков В. И., Пармузин Е. И., Шутяев В. П.* Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 643–654. doi:10.7868/S0002351513060023
12. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov / V. B. Zalesny [et al.] // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 27, iss. 1. P. 95–111. doi:10.1515/rnam-2012-0006
13. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели / Г. К. Коротаев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 1. С. 40–56. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-40-56
14. *Гандин Л. С., Каган Р. Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л. : Гидрометеониздат, 1976. 360 с.
15. Оценка точности, методика и некоторые результаты усвоения альтиметрических данных TOPEX/POSEIDON в модели общей циркуляции Черного моря / Г. К. Коротаев [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 3–17.
16. *Korotaev G. K., Saenko O. A., Koblinsky C. J.* Satellite altimetry observation of the Black Sea level // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2001. Vol. 106, no. C1. P. 917–934. doi:10.1029/2000JC900120
17. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
18. Задачи вариационной ассимиляции данных наблюдений для моделей общей циркуляции океана и методы их решения / В. И. Агошков [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46, № 6. С. 734–770.
19. *Агошков В. И., Пармузин Е. И., Шутяев В. П.* Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 643–654. doi:10.7868/S0002351513060023
20. *Залесный В. Б., Ивченко В. О.* Моделирование крупномасштабной циркуляции морей и океанов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51, № 3. С. 295–308. doi:10.7868/S0002351515030141
21. *Evensen G.* The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation // *Ocean Dynamics*. 2003. Vol. 53, iss. 4. P. 343–367. doi:10.1007/s10236-003-0036-9
22. *Беляев К. П., Танажюра К. А. С., Тучкова Н. П.* Сравнение методов усвоения данных буев “АРГО” в гидродинамической модели океана // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 643–653.
23. *Кауркин М. Н., Ибраев Р. А., Беляев К. П.* Усвоение данных ARGO в модели динамики океана с высоким разрешением по методу ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI) // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 6. С. 852–860. doi:10.7868/s0030157416060058

24. *Залесный В. Б., Гусев А. В., Мошонкин С. Н.* Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 699–716. doi:10.7868/S000235151306014X
25. *Pacanowski R. C., Philander S. G.* Parameterization of Vertical Mixing in Numerical Models of Tropical Oceans // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 11. P. 1443–1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2)
26. *Sarmiento J. L., Bryan K.* An ocean transport model for the North Atlantic // *Journal of Geophysical Research*. 1982. Vol. 87, iss. C1. P. 394–408. <https://doi.org/10.1029/JC087iC01p00394>
27. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
28. *Сухих Л. И., Дорофеев В. Л.* Влияние параметризации вертикального турбулентного обмена на результаты реанализа гидрофизических полей Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 4. С. 283–301. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-283-301
29. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993–2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 33–48. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-33-48
30. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2. Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
31. *Dorofeev V. L., Sukhikh L. I.* Study of long-term variability of Black Sea dynamics on the basis of circulation model assimilation of remote measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, iss. 2. P. 224–232. doi:10.1134/S0001433817020025
32. *Mellor G. L., Ezer T.* A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme // *Journal of Geophysical Research*. 1991. Vol. 96, iss. C5. P. 8779–8795. <https://doi.org/10.1029/91JC00383>
33. *Knysh V. V., Saenko O. A., Sarkisyan A. S.* Method of assimilation of altimeter data and its test in the tropical North Atlantic // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 1996. Vol. 11, no. 5. P. 393–409. <https://doi.org/10.1515/mam.1996.11.5.393>

Об авторах:

Лишаев Павел Николаевич, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus AuthorID: 57193071072**, pavellish@mail.ru

Кныш Василий Васильевич, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: B-3603-2018**, vaknysh@yandex.ru

Коротаев Геннадий Константинович, научный руководитель ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: K-3408-2017**, gkorotaev@gmail.com