



## Региональная методика восстановления термохалинной структуры вод Черного моря по данным дистанционного зондирования на основе регрессионных соотношений

Е. В. Жук , В. Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 elena.zhuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 18.08.2025; одобрена после рецензирования 25.09.2025;  
принята к публикации 28.01.2026.

### Аннотация

**Цель.** Целью работы является создание региональной статистической методики расчета термохалинной структуры вод Черного моря по спутниковым данным поверхностной температуры воды и уровня моря.

**Методы и результаты.** В работе использовались массивы контактных измерений температуры и солёности воды, ежедневных аномалий альтиметрического уровня моря (сетка  $0,125^\circ$ ) и температуры поверхности моря (сетка  $0,05^\circ$ ) уровня обработки  $L4$  за период 1993–2023 гг., а также климатический массив термохалинных полей Черного моря за период 1950–2023 гг. Для расчета гидрологических полей использовался метод множественной линейной регрессии, устанавливающий статистические зависимости между физическими параметрами состояния поверхностного слоя моря и значениями температуры и солёности на глубинах до 300 м. Для учета многолетних изменений использовались поправки климатических значений на современный период и поправки на линейные тренды. Валидация методики путем сравнения рассчитанного 30-летнего массива реанализа и данных контактных измерений показала, что общие среднеквадратические ошибки воспроизведения температуры  $0,4^\circ\text{C}$  и солёности 0,2 соответствуют средней нормированной ошибке 0,4, что является хорошим показателем для статистического метода. Погрешности воспроизведения максимальны в слое сезонного термоклина и постоянного галоклина, где амплитуда мезомасштабного шума резко возрастает. Наилучшие показатели точности расчетов относятся к циклоническим круговоротам в центральной части моря, наихудшие – к периферии моря, Батумскому антициклону и зоне Основного Черноморского течения, для солёности – также к северо-западному шельфу. Сравнение уровня ошибок нескольких массивов реанализа термохалинных полей Черного моря показало, что точность данной методики близка к точности массивов *CMEMS*, рассчитываемых по современным гидродинамическим моделям и использующих сложные методы ассимиляции данных. По некоторым позициям для солёности регрессионная модель даже превосходит показатели точности указанных реанализов, несмотря на отсутствие в данном варианте блока усвоения контактных данных.

**Выводы.** Разработана методика оперативного диагноза и реанализа трехмерной термохалинной структуры вод Черного моря по спутниковым данным на основе регрессионных соотношений, которая обеспечивает достаточно хороший уровень ошибок воспроизведения температуры и солёности при минимизации вычислительных ресурсов. Методика использует регулярную, широко доступную информацию из открытых источников, не требует высокопроизводительного оборудования, что имеет прикладное значение, и может рассматриваться как быстрый эффективный метод оценки состояния морской среды. Регрессионный алгоритм также может использоваться в блоках усвоения оперативной информации прогностических моделей в условиях отсутствия данных гидрологических измерений.

**Ключевые слова:** Черное море, термохалинная структура, линейная регрессия, альтиметрия, реанализ

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014.


**Для цитирования:** Жук Е. В., Белокопытов В. Н. Региональная методика восстановления термохалинной структуры вод Черного моря по данным дистанционного зондирования на основе регрессионных соотношений // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 2. С. 216–234. EDN ACHDHL.

Original article

## Regional Methodology for Reconstructing Thermohaline Structure of the Black Sea based on Remote Sensing Data using Regression Relationships

E. V. Zhuk , V. N. Belokopytov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 elena.zhuk@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the work is to develop a regional statistical methodology for deriving the Black Sea thermohaline structure based on the satellite data on sea surface temperature and sea level.

**Methods and Results.** The study included *in-situ* temperature and salinity data, daily anomalies of altimetry sea level (0.125° grid) and sea surface temperature (0.05° grid) at the L4 processing level for 1993–2023, as well as the climatic array of the Black Sea thermohaline fields for 1950–2023. To reproduce the hydrological fields, the method of multiple linear regression, was used. It made it possible to determine statistical relationships between the physical parameters of sea surface layer and the values of temperature and salinity at the depths up to 300 m. In order to take into account the long-term changes, the corrections to modern climatic values and linear trends were applied. Validation of the methodology through comparing the calculated 30-year reanalysis and the *in-situ* measurement data showed that the total root-mean-square errors of temperature and salinity reconstruction – 0.4 °C and 0.2 psu, respectively – corresponded to the average normalized error 0.4 that was a good result for a statistical method. The errors are the highest in the seasonal thermocline and permanent halocline layers where the amplitude of mesoscale noise increases sharply. The best values of calculation accuracy are related to the cyclonic gyres in the central sea, the worst ones – to the sea periphery (Batumi anticyclonic eddy and Rim Current zone), and as for salinity – to the north-western shelf. A comparison of the error values of several arrays of the Black Sea thermohaline field reanalyses showed that the accuracy of this method was close to that of the *CMEMS* arrays calculated using modern hydrodynamic models and complex data assimilation methods. Some indicators relating to salinity show that, despite the absence of the *in-situ* data assimilation algorithm in this version, the regression model even exceeds the accuracy values of the specified reanalyses.

**Conclusions.** A method for operational diagnosis and reanalysis of the Black Sea 3-dimensional thermohaline structure based on satellite data and using the regression relationships has been developed. It provides a sufficiently good level of errors at temperature and salinity reconstruction, while minimizing computational resources. The methodology uses regular open source data, requires no high-performance equipment (it is of a practical importance), and can be regarded as a quick and effective instrument for assessing the state of marine environment. The regression algorithm can also be used in the procedures of operational data assimilation in the prognostic models in case the *in-situ* oceanographic data are absent.

**Keywords:** Black Sea, thermohaline structure, linear regression, altimetry, reanalysis

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0014.

**For citation:** Zhuk, E.V. and Belokopytov, V.N., 2026. Regional Methodology for Reconstructing Thermohaline Structure of the Black Sea based on Remote Sensing Data using Regression Relationships. *Physical Oceanography*, 33(2), pp. 263-280.

## Введение

В настоящее время массивы океанического ретроспективного анализа, рассчитываемые на основе гидродинамических моделей с усвоением метеорологической информации, данных контактных и дистанционных наблюдений, широко используются в океанологии. Степень их различия между собой достаточно велика [1, 2] и зависит от применяемой математической модели, источника информации об атмосферном воздействии и метода ассимиляции данных наблюдений. Традиционные оценки термохалинной структуры вод, основанные только на первичных океанографических измерениях, в условиях значительной неоднородности данных во времени и пространстве в значительной степени зависят от методов интерполяции и статистической обработки. Тем не менее статистические массивы продолжают быть актуальными как оценки, наиболее приближенные к прямым измерениям. Они востребованы как в климатических исследованиях, так и для ассимиляции данных и валидации результатов в гидродинамических моделях.

Статистические массивы Мирового океана, такие как *ISAS* [3], *EN3*, *EN4* [4], *CORA* [5], чаще всего создаются с использованием оптимальной интерполяции<sup>1</sup> [6] или метода последовательных приближений [7, 8]. С развитием технологий дистанционного зондирования Земли появилась возможность использовать при их создании также и спутниковые данные. Начиная с 1990-х гг. появляются работы [9, 10], связанные с определением регрессионных зависимостей между динамической топографией, альтиметрическим уровнем моря и вертикальным распределением температуры и солености воды. Цель такого подхода состоит в генерировании «псевдоизмерений» температуры и солености, рассчитываемых по дистанционным данным о состоянии поверхности моря, что позволяет оценить термохалинную структуру вод в слабо обеспеченных данными наблюдений районах океана. Наиболее известным продуктом в данном направлении является выполняемый на регулярной основе массив *ARMOR3D*<sup>2</sup> [11, 12], сочетающий расчеты по регрессионным соотношениям и оптимальную интерполяцию данных буев-профилемеров *Argo*. По классификации проекта *ORA-IP* [1], посвященного сравнению глобальных массивов реанализа, *ARMOR3D* тоже относят к продуктам, основанным на измерениях.

Анализ ошибок воспроизведения термохалинных полей океана в *ARMOR3D* и в аналогичных методиках Морского гидрофизического института (МГИ) РАН показал, что для большинства районов Мирового океана ошибки регрессионных моделей при минимальном объеме входной информации и быстрой обработке сопоставимы с точностью, достигаемой гораздо более сложными и трудоемкими методами. Вместе с тем в таких сильно изолированных

---

<sup>1</sup> Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Ленинград : Гидрометеозидат, 1963. 287 с.

<sup>2</sup> Черное море: гидрология – 2018 : база данных / Е. А. Годин [и др.]; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2019. № гос. регистрации № 2019621008. EDN PUGLGR.

от океана морях, как Черное и Средиземное, ошибки данного метода значительно возрастают, что приводит к необходимости создания региональных методик.

Для Черного моря в этом направлении был разработан и применялся метод использования альтиметрической информации [13, 14], основанный на представлении о преобладании в бассейне адиабатических процессов, определяющих изменчивость термохалинных полей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Выделялась «нулевая поверхность уровня», и расчет термохалинных полей проводился относительно этой поверхности.

Целью настоящей работы является создание региональной методики, основанной на подходе, аналогичном *ARMOR3D*, для расчета термохалинной структуры вод Черного моря по данным дистанционного зондирования с учетом специфической гидрологической структуры и временной изменчивости бассейна. Как и в [11, 12], методика может работать в сочетании с оптимальной интерполяцией контактных наблюдений, но в данной работе рассматривается только алгоритм, основанный на регрессионных зависимостях.

### Данные и методы исследования

В работе использовались контактные измерения температуры и солёности, спутниковые данные поверхностной температуры и уровня моря, а также климатические термохалинные поля.

Контактные измерения температуры ( $T$ ) и солёности ( $S$ ) за период 1993–2023 гг., соответствующий периоду регулярных альтиметрических наблюдений, были собраны из банка океанографических данных Морского гидрофизического института (БОД МГИ)<sup>2</sup>, информационных ресурсов *SeaDataNet*<sup>3</sup> и баз данных буев-профилемеров *Argo*<sup>4</sup>. Всего в работе использовано 26693 вертикальных профиля, которые прошли стандартные океанографические тесты. Во многих ячейках сетки  $20' \times 30'$  за период 30 лет было выполнено менее 50 зондирований (рис. 1). Наименьшая обеспеченность данными наблюдений относится к зимним месяцам, во многих районах моря измерения полностью отсутствуют. В пространственном распределении преобладают данные, полученные у Южного берега Крыма, побережья Новороссийска и берегов Болгарии. Подобная неоднородность измерений еще раз свидетельствует о том, что в Черном море, как и в других морях, использование методов ассимиляции контактных данных в гидродинамических моделях эффективно лишь в определенных районах.

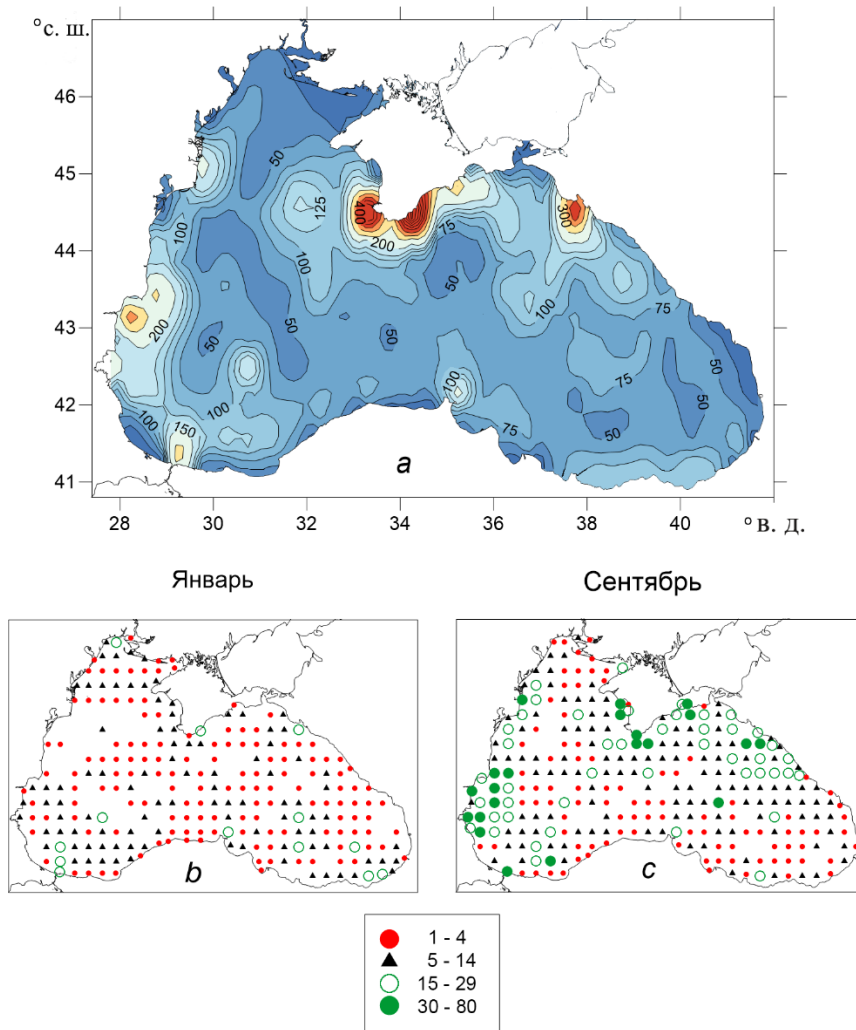
Данные дистанционного зондирования представлены массивами аномалий альтиметрического уровня моря ( $SLA$ )<sup>5</sup> и температуры поверхности моря ( $SST$ )<sup>6</sup> уровня обработки  $L4$ . Пространственное разрешение массива  $SLA$  равно  $0,125^\circ$  ( $1/8^\circ$ ) с дискретностью по времени в одни сутки. Массив  $SST$  также представлен ежедневными данными, но на более мелкой сетке с шагом  $0,05^\circ$  ( $1/20^\circ$ ).

<sup>3</sup> URL: <https://cdi.seadatanet.org/search> (date of access: 16.03.2023).

<sup>4</sup> URL: <https://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-selection> (date of access: 29.12.2023).

<sup>5</sup> Global ocean gridded L4 sea surface heights and derived variables reprocessed (1993–present) (SEALEVEL\_GLO\_PHY\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_008\_047) : [dataset] / Copernicus Marine Service, 2023. <https://doi.org/10.48670/moi-00141>

<sup>6</sup> Global ocean sea surface temperature (SST) L4 reprocessed (1981–present) (SST\_GLO\_SST\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_010\_011) : [dataset] / Copernicus Marine Service, 2023. <https://doi.org/10.48670/moi-00160>



**Р и с. 1.** Количество гидрологических станций за период 1993–2023 гг.: в целом по морю (а); в январе (b) и сентябре (c) в «квадратах»  $20' \times 30'$  ( $37 \times 39$  км)

**Fig. 1.** Amount of hydrological stations for 1993–2023: for the sea as a whole (a), and in the “squares”  $20' \times 30'$  ( $37 \times 39$  km) in January (b) and September (c)

Для расчета гидрологических полей использовался метод множественной линейной регрессии, аналогично [11, 12], устанавливающий статистические закономерности между состоянием поверхностного слоя моря, описываемого данными  $SST$  и  $SLA$ , и значениями  $T$  и  $S$  на глубинах до 300 м. Эти взаимосвязи выражаются в следующем виде:

$$T_r(x, y, z, t) = \alpha(x, y, z)SLA'(x, y, t) + \beta(x, y, z)SST'(x, y, t) + \lambda(x, y, z) + T_{clm}(x, y, z, t) + T_{cor}(z, t) + T_{tr}(z, t), \quad (1)$$

$$S_r(x, y, z, t) = \gamma(x, y, z)SLA'(x, y, t) + \mu(x, y, z) + S_{clm}(x, y, z, t) + S_{cor}(z, t) + S_{tr}(z, t), \quad (2)$$

где  $T_r, S_r$  – температура и соленость воды, рассчитанные по регрессионным соотношениям;  $t$  – время;  $x, y, z$  – пространственные координаты;  $SLA' = SLA - SLA_{clm} - SLA_{tr}$  (аномалия  $SLA$ );  $SST' = SST - SST_{clm} - SST_{tr}$  (аномалия  $SST$ );  $SLA_{clm}, SST_{clm}$  – климатические среднесуточные значения  $SLA, SST$ ;  $SST_{tr}, SLA_{tr}$  – поправки на линейные тренды  $SST, SLA$  в период 1993–2023 гг.;  $T_{clm}, S_{clm}$  – климатические среднесуточные значения  $T, S$ ;  $T_{cor}, S_{cor}$  – поправки климатических значений  $T, S$  на указанный период;  $T_{tr}, S_{tr}$  – поправки на тренды  $T, S$  в тот же период;  $\alpha, \beta, \gamma$  – регрессионные коэффициенты;  $\lambda, \mu$  – свободные члены регрессии в узле  $x, y$ :

$$\alpha(z) = \frac{\text{cov}(SST', SST')\text{cov}(SLA', T'(z)) - \text{cov}(SLA', SST')\text{cov}(SST', T'(z))}{\text{cov}(SLA', SLA')\text{cov}(SST', SST') - \text{cov}(SLA', SST')^2}, \quad (3)$$

$$\beta(z) = \frac{\text{cov}(SLA', SLA')\text{cov}(SST', T'(z)) - \text{cov}(SLA', SST')\text{cov}(SLA', T'(z))}{\text{cov}(SLA', SLA')\text{cov}(SST', SST') - \text{cov}(SLA', SST')^2}, \quad (4)$$

$$\gamma(z) = \frac{\text{cov}(SLA', S'(z))}{\text{cov}(SLA', SLA')}, \quad (5)$$

$$\lambda(z) = \overline{T'}(z) - (\alpha(z)\overline{SLA'} + \beta(z)\overline{SST'}), \quad (6)$$

$$\mu(z) = \overline{S'}(z) - \gamma(z)\overline{SLA'}, \quad (7)$$

где  $\text{cov}$  – ковариация;  $T'(z) = T(z) - T_{clm}(z) - T_{cor}(z) - T_{tr}(z)$  (аномалия температуры воды);

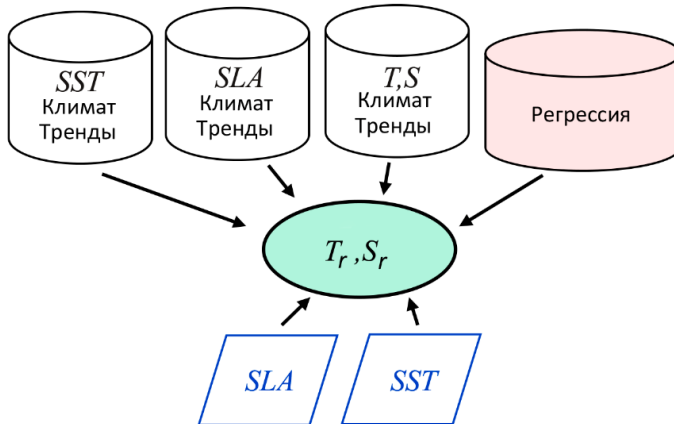
$$S'(z) = S(z) - S_{clm}(z) - S_{cor}(z) - S_{tr}(z) \text{ (аномалия солености).}$$

В отличие от [11, 12] корреляционные связи с динамической топографией океана в данной методике не учитываются, добавляются свободные члены  $\lambda$  и  $\mu$ , поправки  $T_{cor}, T_{tr}, S_{cor}, S_{tr}$ . Расчеты ведутся на более мелкой сетке ( $0,125^\circ$ ), и используется другой климатический массив  $T_{clm}, S_{clm}$ . Дополнительные физические положения, как в работах [13, 14], в данном методе не рассматриваются. Методика максимально приближена к чисто статистическим зависимостям, в океанографической части используется региональный климат и учитываются долгопериодные тренды.

Общие блок-схемы вычислительного процесса, информационных потоков и последовательности расчетов приведены на рис. 2 и 3.

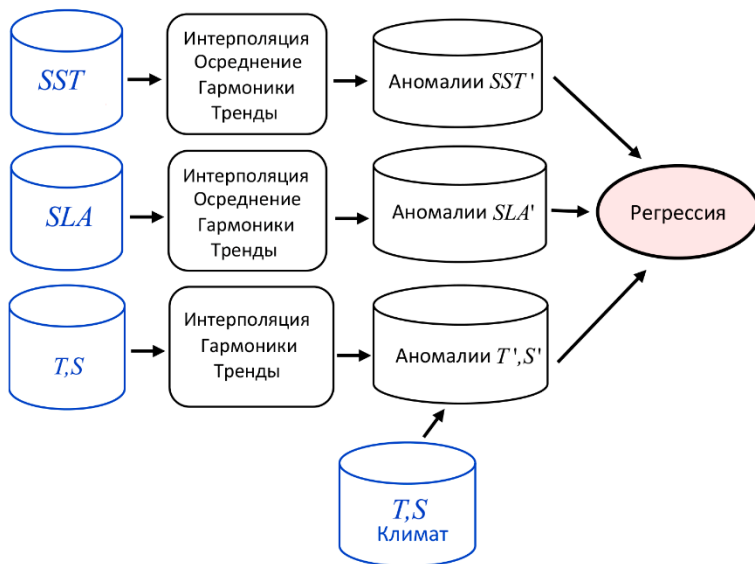
Расчет полей  $T_r, S_r$  по формулам (1), (2) на заданную дату (рис. 2) производится по полям  $SLA$  и  $SST$  с помощью заранее подготовленных массивов параметров регрессии  $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \mu$  по формулам (3) – (7), климатических ежедневных полей  $T_{clm}, S_{clm}, SLA_{clm}, SST_{clm}$  и многолетних трендов  $T_{tr}, S_{tr}, SLA_{tr}, SST_{tr}$ .

Расчет массивов параметров регрессии  $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \mu$  (рис. 3) осуществляется в несколько этапов: подготовка общей базы первичных данных  $T, S, SLA$  и  $SST$ , расчет климатического ежесуточного сезонного хода  $T_{clm}, S_{clm}, SLA_{clm}, SST_{clm}$ , интерполяция всех переменных на общую сетку, составление совместных временных рядов данных, расчет параметров регрессии.



**Р и с. 2.** Обобщенная блок-схема расчета трехмерных полей  $T_r, S_r$  по данным спутниковых измерений  $SLA$  и  $SST$

**F i g. 2.** General block-diagram for calculating three-dimensional  $T_r$  and  $S_r$  fields based on  $SLA$  and  $SST$  satellite measurements



**Р и с. 3.** Обобщенная блок-схема расчета регрессионных соотношений между полями  $SLA$  и  $SST$  и полями  $T$  и  $S$

**F i g. 3.** General block-diagram for calculating regression relationships between the  $SLA$  and  $SST$  fields, and the  $T$  and  $S$  fields

В качестве основы для климатических значений  $T_{clm}, S_{clm}$  принимались среднемесячные значения из климатического массива за период 1950–2023 гг. [15] с поправкой  $T_{cor}, S_{cor}$  на период 1993–2023 гг., для  $SST_{clm}$  и  $SLA_{clm}$  использовались осредненные среднесуточные значения  $SST$  и  $SLA$  за период 1993–2023 гг. На каждый день года значения аппроксимировались рядами Фурье: двумя гармониками для  $T_{clm}, S_{clm}, SST_{clm}$  и тремя гармониками для  $SLA_{clm}$ :

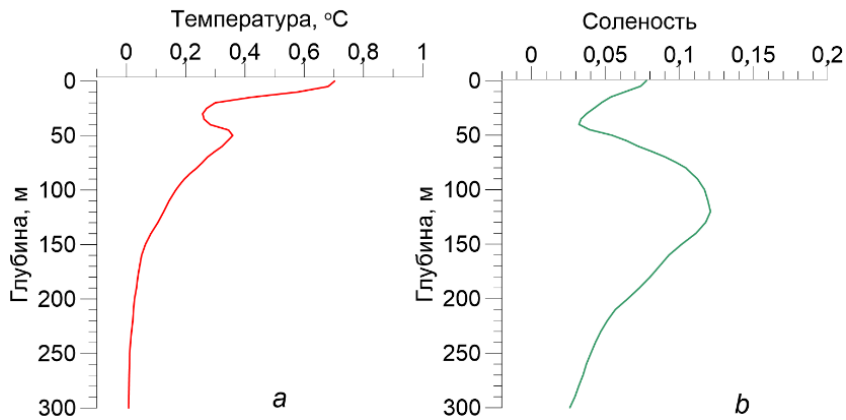
$$y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left[ A_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \right],$$

где  $y_t$  – аппроксимированные значения;  $\bar{y}$  – среднее значение ряда;  $n$  – количество членов ряда;  $k$  – порядковый номер гармоники;

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n [y_t \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right)];$$

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n [y_t \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right)].$$

Все исходные и климатические поля  $SST$ , а также  $T_{clm}$ ,  $S_{clm}$  интерполировались на общую сетку, соответствующую массиву  $SLA$  ( $0,125^\circ$ ).



**Р и с. 4.** Поправки климатических значений температуры и солёности для периода 1993–2023 гг.:  $T_{cor}$  (a);  $S_{cor}$  (b)

**F i g. 4.** Corrections of climatic temperature and salinity for 1993–2023:  $T_{cor}$  (a) and  $S_{cor}$  (b)

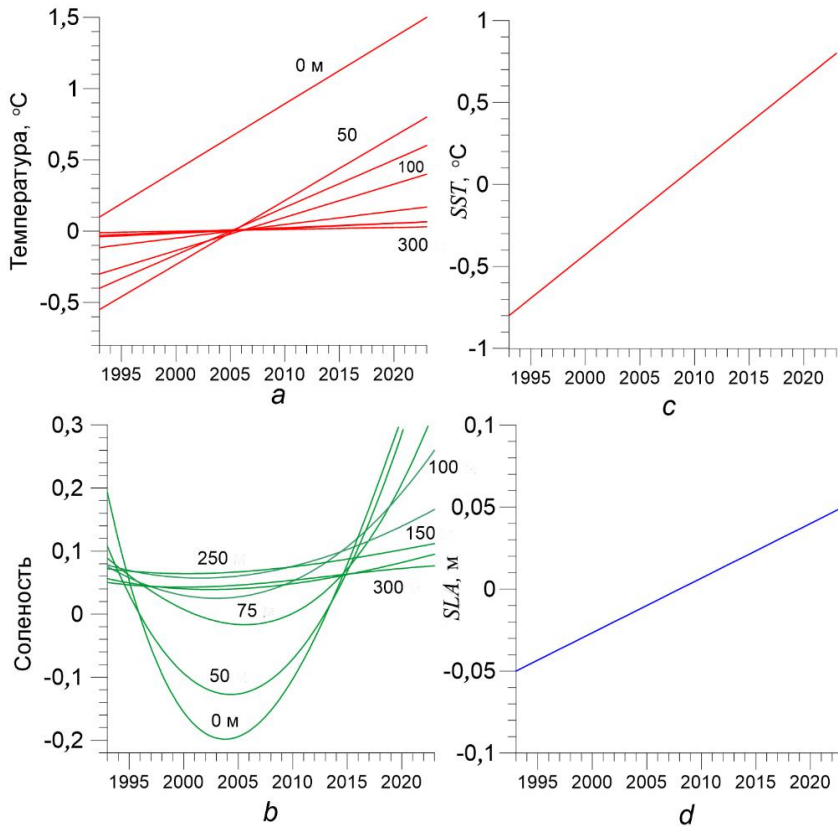
Так как регрессионные зависимости рассчитываются для аномалий относительно среднего сезонного хода, то и коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , рассчитанные по формулам (3) – (5), и окончательные результаты  $T_r$ ,  $S_r$ , рассчитанные по формулам (1), (2) и полученные суммированием расчетных аномалий и климатических сезонных полей, будут в значительной степени зависеть от качества климатического массива. Использование климата термохалинных полей за период 1993–2023 гг. было бы наиболее оптимальным и не требовало бы введения специальных поправок. Но предпринимаемые ранее попытки создать такой климатический массив не увенчались успехом, так как количества гидрологических данных за последние 30 лет недостаточно для надежного выделения сезонного хода на фоне различных видов изменчивости. Поэтому был выбран способ коррекции более обеспеченного данными наблюдений климатического массива за период 1950–2023 гг. [15]. Поправки по климату 1950–2023 гг.  $T_{cor}$  и  $S_{cor}$  (рис. 4) рассчитывались как средние из среднегодовых аномалий  $T$ ,  $S$  за период 1993–2023 гг.:

$$T_{\text{cor}}(z) = \frac{\sum_{i=1}^n (T(z) - T_{\text{clm}}(z))_i}{n},$$

$$S_{\text{cor}}(z) = \frac{\sum_{i=1}^n (S(z) - S_{\text{clm}}(z))_i}{n},$$

где  $n$  – количество лет.

Также было необходимо учесть устойчивые тенденции изменений термohалинных характеристик, которые в Черном море на фоне других районов Мирового океана достаточно высоки [15]. Поправки  $T_{\text{tr}}$ ,  $SST_{\text{tr}}$ ,  $SLA_{\text{tr}}$  для периода 1993–2023 гг. (рис. 5, *a*, *c*, *d* и формулы для вычисления поправок на тренды  $T_{\text{tr}}$  и  $SST_{\text{tr}}$ ,  $SLA_{\text{tr}}$ ) определялись из коэффициентов линейных трендов, рассчитанных по методу наименьших квадратов с использованием среднегодовых аномалий  $T$ ,  $SST$ ,  $SLA$ . Поправки  $S_{\text{tr}}$  для солености первоначально также аппроксимировались линейными трендами, но для уменьшения ошибок были заменены полиномами третьей степени (рис. 5, *b* и формулы для вычисления поправок на тренды  $T_{\text{tr}}$ ,  $S_{\text{tr}}$ ). Это связано с тем, что, несмотря на то что общий рост солености Черного моря в последние 30 лет можно аппроксимировать линейной зависимостью, в верхнем слое моря в начале указанного периода происходило снижение, а затем резкий рост солености [15].



**Р и с. 5.** Поправки на тренды для периода 1993–2023 гг.:  $T_{\text{tr}}$  (*a*);  $S_{\text{tr}}$  (*b*);  $SST_{\text{tr}}$  (*c*);  $SLA_{\text{tr}}$  (*d*)  
**F i g. 5.** Trend corrections for 1993–2023:  $T_{\text{tr}}$  (*a*),  $S_{\text{tr}}$  (*b*),  $SST_{\text{tr}}$  (*c*) and  $SLA_{\text{tr}}$  (*d*)

Приведем формулы для вычисления поправок на тренды  $T_{tr}$ ,  $S_{tr}$  для периода 1993–2023 гг.:

– на горизонте 0 м

$$T_{tr} = 0,1 + 0,0466667x - 0,8,$$

$$S_{tr} = 435342,9375 - 646,1815746x + 0,3196859612x^2 - 5,271547356 \cdot 10^{-5} x^3;$$

– на горизонте 50 м

$$T_{tr} = -0,55 + 0,045 x - 0,125,$$

$$S_{tr} = 53652,61413 - 76,7578727x + 0,03652614647x^2 - 5,780193564 \cdot 10^{-6} x^3;$$

– на горизонте 75 м

$$T_{tr} = -0,4 + 0,03333(x - 1993) - 0,1,$$

$$S_{tr} = -120843,1024 + 182,4786739x - 0,09184225926x^2 + 1,54068499 \cdot 10^{-5} x^3;$$

– на горизонте 100 м

$$T_{tr} = -0,3 + 0,02333(x - 1993) - 0,05,$$

$$S_{tr} = -18404,67283 + 28,63593108x - 0,01483085264x^2 + 2,557031364 \cdot 10^{-6} x^3;$$

– на горизонте 150 м

$$T_{tr} = -0,13 + 0,01033(x - 1993) - 0,025,$$

$$S_{tr} = 15457,18 - 22,62038x + 0,01102795851x^2 - 1,79102376 \cdot 10^{-6} x^3;$$

– на горизонте 200 м

$$T_{tr} = -0,00433 + 0,0035(x - 1993) - 0,015,$$

$$S_{tr} = 17552,31449 - 25,94658379x + 0,01278281352x^2 - 2,098795106 \cdot 10^{-6} x^3;$$

– на горизонте 250 м

$$T_{tr} = -0,03 + 0,003167(x - 1993) - 0,0175,$$

$$S_{tr} = 14678,00879 - 21,74886849x + 0,01074044889x^2 - 1,767750388 \cdot 10^{-6} x^3;$$

– на горизонте 300 м

$$T_{tr} = -0,015 + 0,001833(x - 1993) - 0,0125,$$

$$S_{tr} = 27686,98886 - 41,25085665x + 0,0204856215x^2 - 3,390964865 \cdot 10^{-6} x^3,$$

где  $x$  – год.

Поправки на тренды  $SST_{tr}$ ,  $SLA_{tr}$  для периода 1993–2023 гг. следующие:

$$SST_{tr} = -0,8 + 0,05333(y - 1993),$$

$$SLA_{tr} = -0,05 + 0,00333(y - 1993),$$

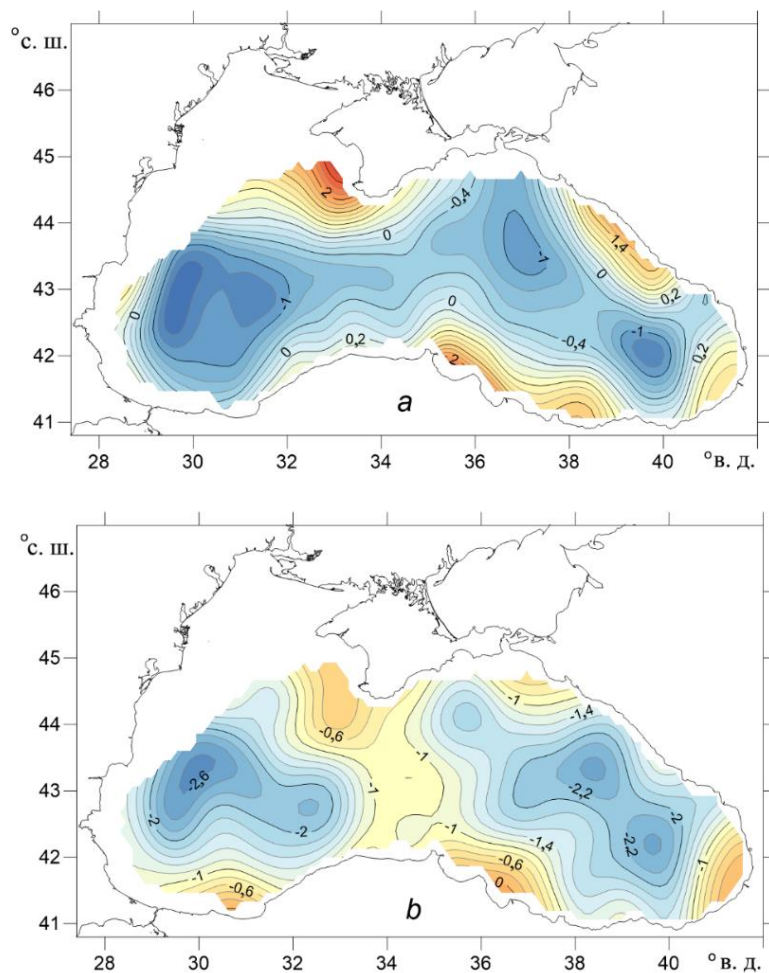
где  $y$  – год.

В результате расчетов по совмещенным 30-летним временным рядам аномалий  $T$ ,  $S$ ,  $SST$ ,  $SLA$  были получены 5 трехмерных массивов регрессионных коэффициентов на сетке  $0,125^\circ$ , которые вместе с климатическими массивами  $T_{clm}$ ,  $S_{clm}$ ,  $SLA_{clm}$ ,  $SST_{clm}$  являются основой вычислительного алгоритма.

### Обсуждение результатов

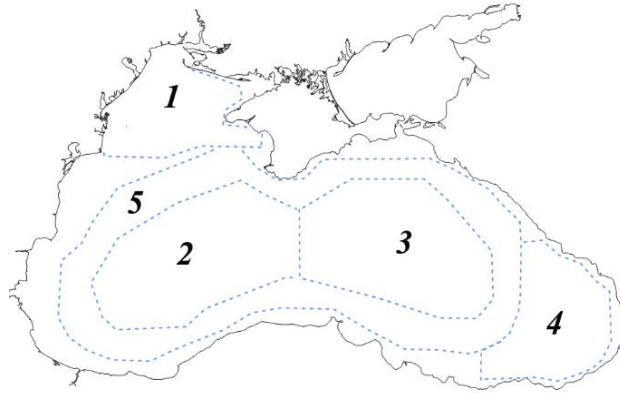
Следует подчеркнуть, что после фильтрации сезонного хода и трендов характеристики корреляционной структуры термохалинных полей относятся к диапазону синоптической и межгодовой изменчивости. Корреляционные связи сезонного хода здесь не рассматриваются, так как при расчете используются непосредственно климатические поля.

В пространственном распределении регрессионных коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  хорошо видны региональные отличия между глубоководной частью и периферией моря. С глубиной, особенно в верхней части пикноклина, более явно проявляется влияние общей циркуляции бассейна (рис. 6). В зоне действия Основного Черноморского течения (ОЧТ) коэффициенты корреляции и регрессии переходят через нулевое значение, меняя знак.



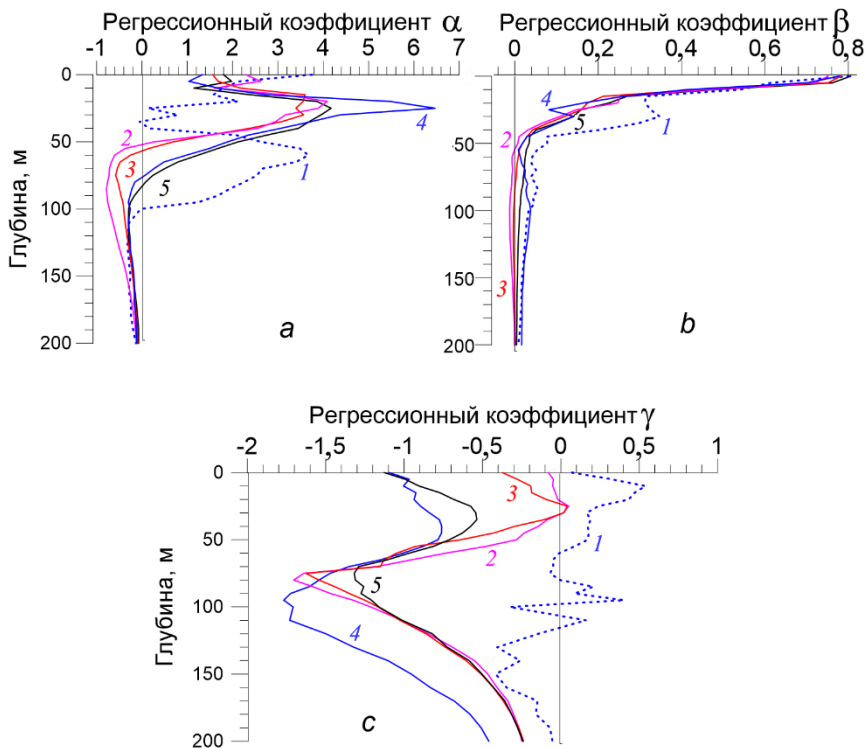
**Р и с. 6.** Горизонтальное распределение регрессионных коэффициентов  $\alpha$  (a) и  $\gamma$  (b) на глубине 75 м  
**Fig. 6.** Horizontal distribution of regression coefficients  $\alpha$  (a) and  $\gamma$  (b) at the 75 m depth

Вертикальное распределение регрессионных коэффициентов, во многом связанное с общей циркуляцией вод (рис. 7, 8), также имеет свои закономерности. Коэффициенты  $\beta$  для температуры воды практически полностью положительно коррелированы с SST во всем слое и быстро убывают с глубиной. Коэффициенты  $\gamma$  для солёности во всем слое вод отрицательно коррелированы с SLA, кроме мелководного северо-западного шельфа. Коэффициенты  $\alpha$  для температуры воды имеют более сложное распределение, для них характерны смены знака в основном пикноклине. Коэффициенты  $\gamma$  для солёности имеют похожую форму кривой, но смены знака не происходит, вместо этого в пикноклине существуют минимумы. Эти особенности кривых отражают влияние вертикальных движений, связанных с интенсивностью общей циркуляции моря. Также форма кривых зависит от различий в вертикальном положении пикноклина в центре и на периферии моря.



**Р и с. 7.** Районы Черного моря для анализа регрессионных соотношений и ошибок воспроизведения термохалинной структуры вод: 1 – северо-западный шельф; 2 – Западный циклонический круговорот; 3 – Восточный циклонический круговорот; 4 – Батумский антициклонический вихрь; 5 – Основное Черноморское течение

**F i g. 7.** Scheme of the Black Sea regions for analyzing regression relationships and errors in reproduction of water thermohaline structure: 1 – northwestern shelf; 2 – Western cyclonic gyre; 3 – Eastern cyclonic gyre; 4 – Batumi anticyclonic eddy, and 5 – Rim Current

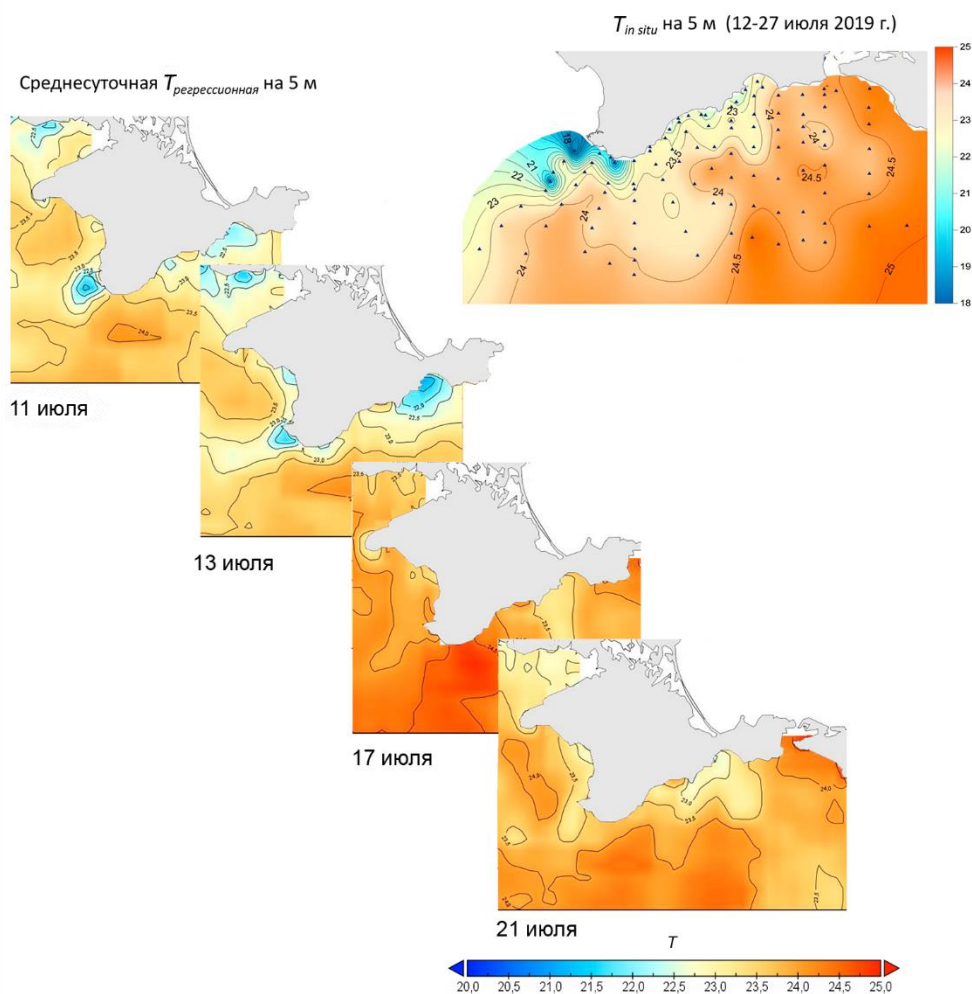


**Р и с. 8.** Вертикальное распределение регрессионных коэффициентов  $\alpha$  (a),  $\beta$  (b),  $\gamma$  (c) по районам Черного моря (цифры на кривых соответствуют районам, показанным на рис. 7)

**F i g. 8.** Vertical distribution of regression coefficients  $\alpha$  (a),  $\beta$  (b) and  $\gamma$  (c) by the Black Sea regions (numerals on the curves correspond to those shown in Fig. 7)

Для того чтобы оценить качество воспроизведения термохалинной структуры Черного моря, был рассчитан массив реанализа за период 1993–2023 гг. Далее приводятся примеры восстановления значений температуры воды по данным этого массива.

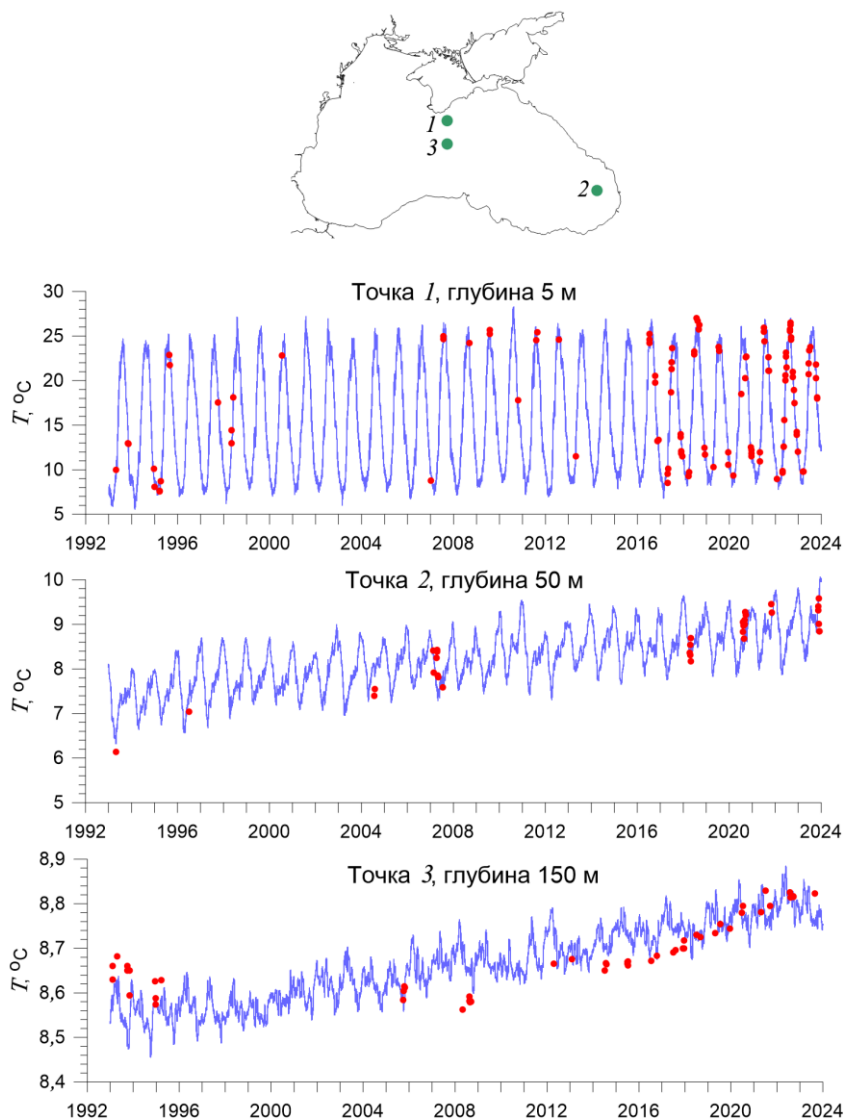
На рис. 9 показано воспроизведение берегового апвеллинга у Южного берега Крыма во время проведения судовой гидрологической съемки в июле 2019 г. Судно двигалось галсами вдоль побережья на протяжении 15 дней, при этом апвеллинг быстро возник и быстро прекратился. Сравнивая соответствующие карты реанализа с данными измерений с учетом даты и положения судна, можно прийти к выводу, что воспроизведение данного апвеллинга является вполне приемлемым.



**Р и с. 9.** Температура воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) в поверхностном слое в период апвеллинга у Южного берега Крыма в июле 2019 г. по данным измерений в 108-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» и массиву реанализа регрессионной модели

**F i g. 9.** Water temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) in the surface layer during the upwelling period off the southern coast of Crimea in July, 2019 based on the measurement data obtained in the 108th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” and the reanalysis array of regression model

На рис. 10 показаны примеры 30-летних рядов температуры воды, полученных по массиву реанализа и данным измерений в трех точках, характеризующих поверхностный слой в ОЧТ (точка 1), холодный промежуточный слой в Батумском антициклоническом вихре (точка 2) и основной пикноклин в центральной части моря (точка 3). Качественное воспроизведение сезонной и междесятилетней изменчивости также является удовлетворительным.



**Р и с. 10.** Временные ряды температуры воды по массиву реанализа регрессионной модели (синие кривые) в узлах сетки  $0,125^\circ$  с координатами: точка 1 –  $44,17^\circ$  с. ш.,  $34,25^\circ$  в. д. (a); точка 2 –  $42,17^\circ$  с. ш.,  $40,75^\circ$  в. д. (b); точка 3 –  $43,50^\circ$  с. ш.,  $34,25^\circ$  в. д. (c). Красные символы отображают данные контактных измерений в окрестности выбранных узлов сетки  $\pm 10'$  (18 км)

**F i g. 10.** Water temperature time series based on the regression model reanalysis (blue curves) at the  $0.125^\circ$  grid nodes with the following coordinates: point 1 –  $44.17^\circ$  N,  $34.25^\circ$  E (a); point 2 –  $42.17^\circ$  N,  $40.75^\circ$  E (b), and point 3 –  $43.50^\circ$  N,  $34.25^\circ$  E (c). Red symbols denote *in-situ* measurement data in the vicinity of selected grid nodes  $\pm 10'$  (18 km)

Для получения количественных характеристик ошибок воспроизведения термохалинной структуры вод рассчитывались средние квадратические ошибки  $S_q$ , средние ошибки  $S_m$  и нормированные ошибки  $S_n$ :

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_r - x_i)^2}{n-m}},$$

$$S_m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_r - x_i)}{n-m},$$

$$S_n = \frac{\sigma_x}{S_q},$$

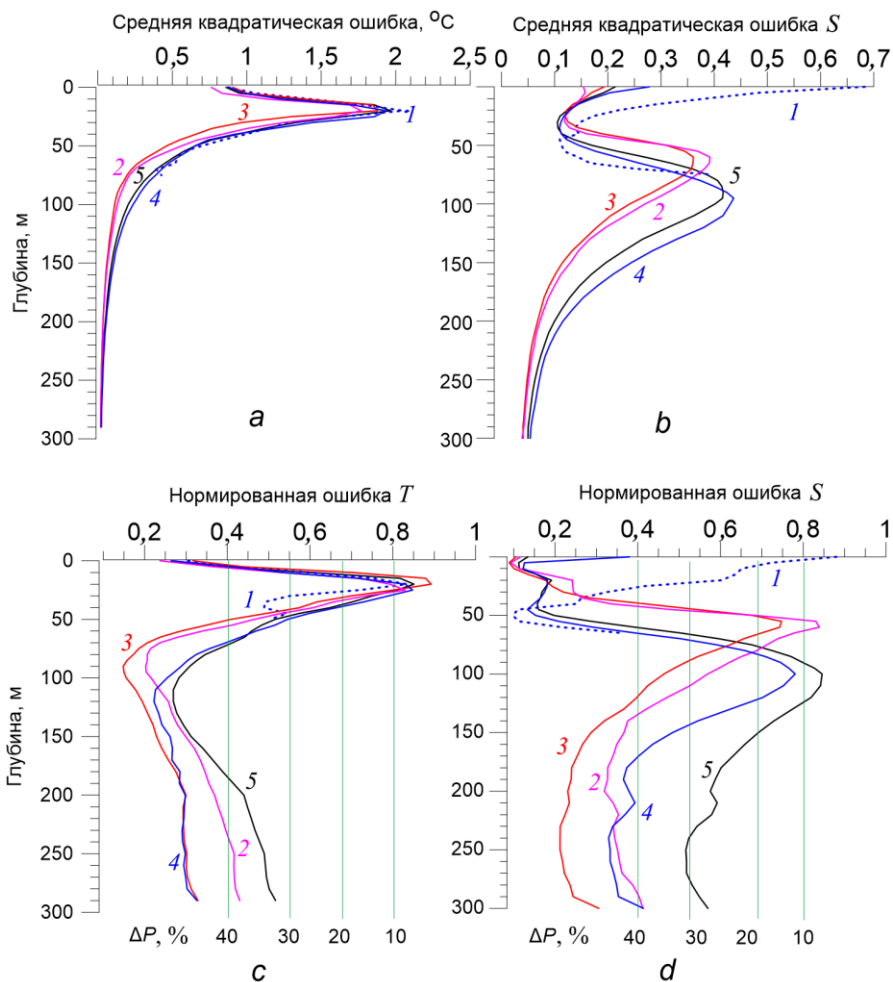
где  $x$  – фактические значения;  $x_r$  – рассчитанные по регрессионным соотношениям;  $n$  – количество членов ряда;  $m$  – число степеней свободы (3 – для температуры, 2 – для солёности);  $\sigma_x$  – среднее квадратическое отклонение природной изменчивости.

На рис. 11 показано вертикальное распределение средних ошибок воспроизведения температуры и солёности по районам Чёрного моря. Среднеквадратическая ошибка  $S_q$  температуры воды в слое 0–300 м составляет 0,4 °С, в слое сезонного термоклина ошибки  $S_q$  максимальны и достигают 2 °С (рис. 11, *a*). Средняя ошибка  $S_q$  солёности в слое 0–300 м равна 0,2, ошибки максимальны в основном галоклине и достигают 0,4, их положение в центре и на периферии моря различно по глубине (рис. 11, *b*). Расположение максимума ошибок в слоях пикноклина, где амплитуда мезомасштабного шума резко возрастает, характерно для всех массивов реанализа, независимо от технологии расчетов.

Практическую значимость уровня ошибок можно оценить по нормированным ошибкам  $S_n$ . Теоретически методика расчета будет эффективной, если нормированная ошибка  $S_n < 1$ , т. е. ее обеспеченность выше, чем климатический прогноз. Согласно <sup>7</sup>, в гидрометеорологической практике применяются допустимые критерии  $S_n$  от 0,67 для краткосрочных прогнозов до 0,8 – для долгосрочных, хотя эти оценки достаточно условны, так как показатели природной изменчивости  $\sigma_x$ , в свою очередь, определяются с большими погрешностями.

По приведенному критерию температура воды, рассчитанная по данной методике, хорошо воспроизводится в поверхностном слое до 10 м и в более глубоких слоях после 50 м, приращение обеспеченности метода относительно климатического прогноза составляет более 40 % ( $S_n < 0,4$ ) (рис. 11, *c*). Средняя нормированная ошибка  $S_n$  для температуры воды в слое 0–300 м равна 0,4. Для солёности приращение обеспеченности более 40 % ( $S_n < 0,4$ ) достигается в слоях до 50 м и глубже 150 м (рис. 11, *d*). Как для температуры, так и для солёности наилучшие показатели точности расчетов относятся к циклоническим круговоротам в центральной части моря, наихудшие – к периферии моря, Батумскому антициклону и зоне ОЧТ. Солёность также плохо воспроизводится на мелководном северо-западном шельфе. Средняя нормированная ошибка  $S_n$  для солёности в слое 0–300 м, как и для температуры воды, равна 0,4.

<sup>7</sup> Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов : Руководящий документ РД 52.27.759-2011. Москва : ТРИАДА ЛТД, 2011. 189 с.  
230 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 42 № 2 2026



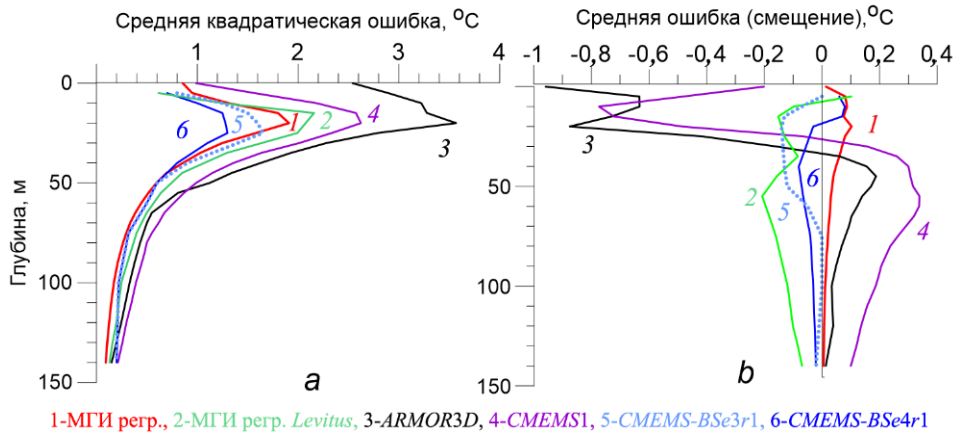
**Р и с. 11.** Средние квадратические ошибки  $S_q$  температуры воды (a) и солёности (b), нормированные ошибки  $S_n$  температуры воды (c) и солёности (d) в различных районах Чёрного моря (цифры на кривых соответствуют показанным на рис. 7);  $\Delta P$  – приращение обеспеченности метода относительно климатического прогноза

**Fig. 11.** Root-mean-square errors  $S_q$  of water temperature (a) and salinity (b), normalized errors  $S_n$  of water temperature (c) and salinity (d) for different Black Sea regions (numerals on the curves correspond to those shown in Fig. 7);  $\Delta P$  is increase of the method reliability relative to climatic forecast

При дальнейшем развитии регрессионной модели следует оценить эффективность использования спутниковых данных поверхностной солёности для составления двухпараметрической зависимости, аналогично  $SST$  для температуры воды.

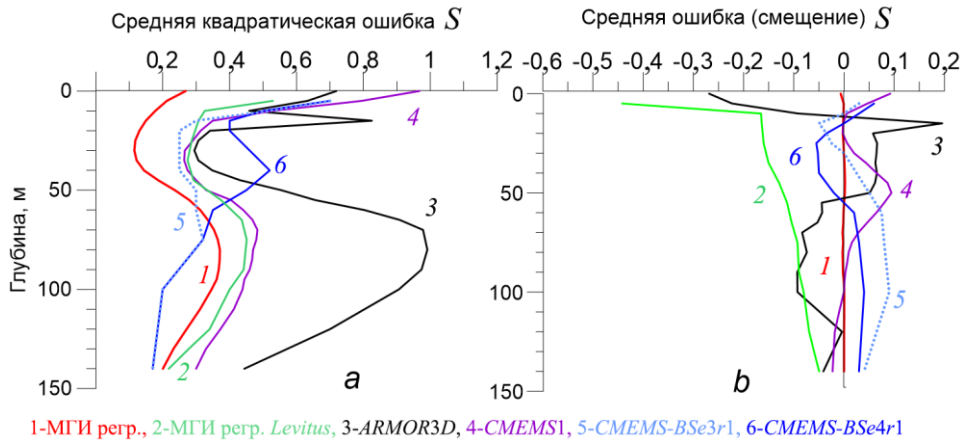
Представленные результаты валидации относятся ко всему объёму данных за весь период 1993–2023 гг. Независимые выборки здесь не приводятся, чтобы провести сравнение с другими работами, где результаты валидации представлены по всему ряду. На рис. 12, 13 показаны осредненные ошибки нескольких массивов реанализа термохалинных полей Чёрного моря – МГИ, *ARMOR3D*

и *CMEMS*<sup>8</sup>. В целом точность нашей методики (красные кривые) сопоставима с точностью массивов *CMEMS*, которые рассчитываются по современным моделям с использованием сложных методов ассимиляции. По некоторым позициям, таким как  $S_q$  солености в слое 0–50 м и  $S_m$  солености во всем слое, регрессионная модель даже превосходит их показатели, несмотря на отсутствие в данном варианте блока усвоения контактных данных.



**Рис. 12.** Средняя квадратическая  $S_q$  (а) и средняя  $S_m$  (б) ошибки температуры воды для различных массивов реанализа термохалинной структуры вод Черного моря

**Fig. 12.** Root-mean-square  $S_q$  (а) and mean  $S_m$  (б) errors of water temperature for different reanalysis arrays of the Black Sea water thermohaline structure



**Рис. 13.** Средняя квадратическая  $S_q$  (а) и средняя  $S_m$  (б) ошибки солености воды для различных массивов реанализа термохалинной структуры вод Черного моря

**Fig. 13.** Root-mean-square  $S_q$  (а) and mean  $S_m$  (б) errors of water salinity for different reanalysis arrays of the Black Sea water thermohaline structure

<sup>8</sup> Black Sea physics reanalysis (1993–2022) (BLKSEA\_MULTIYEAR\_PHY\_007\_004) : [dataset] / L. Lima [et al.]. CMEMS Black Sea Production Centre ; Copernicus Marine Service, 2023. [https://doi.org/10.25423/CMEMS/BLKSEA\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_007\\_004](https://doi.org/10.25423/CMEMS/BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004)

## Заключение

Разработана методика оперативного диагноза и реанализа трехмерной термохалинной структуры вод Черного моря по спутниковым данным на основе методов математической статистики. Использовались контактные измерения температуры и солёности за период 1993–2023 гг. из банка океанографических данных Морского гидрофизического института РАН, информационные ресурсы *SeaDataNet* и база данных буев-профиломеров *Argo*. Данные дистанционного зондирования представлены массивами *SLA* ( $0,125^\circ$ ) и *SST* ( $0,05^\circ$ ) уровня обработки *L4*.

Методика учитывает специфическую гидрологическую структуру Черного моря и его климатическую изменчивость, обеспечивает уровень ошибок воспроизведения температуры и солёности, сопоставимый с лучшими гидродинамическими моделями, такими как *NEMO*. При этом не требуется применение сложных алгоритмов ассимиляции данных, таких как *3DVar*, *4DVar*, фильтр Калмана, в методике используется регулярная широко доступная информация со спутниковых альтиметров и инфракрасных радиометров. В условиях отсутствия данных гидрологических измерений регрессионный алгоритм может также применяться в блоках усвоения оперативной информации прогностических моделей.

Пространственное распределение регрессионных зависимостей между уровенной поверхностью моря и вертикальной термохалинной структурой вод показывает существенное различие между глубоководной частью и периферией моря. С глубиной, особенно в верхней части пикноклина, более явно проявляется влияние общей циркуляции бассейна. Вертикальное распределение регрессионных коэффициентов отражает влияние вертикальных движений, связанных с интенсивностью общей циркуляции моря.

Учет многолетних изменений термохалинной структуры вод в виде поправок климатических значений на современный период, линейных и полиномиальных трендов снизил общий уровень среднеквадратических ошибок воспроизведения температуры до  $0,4^\circ\text{C}$  и солёности до  $0,2$ , что соответствуют средней нормированной ошибке  $0,4$  и является хорошим показателем для статистического метода. Погрешности воспроизведения термохалинных полей максимальны в слоях повышенного мезомасштабного шума – сезонном термоклине и постоянном галоклине. Наилучшие показатели точности расчетов относятся к циклоническим круговоротам в центральной части моря, наихудшие – к периферии моря, Батумскому антициклону и зоне Основного Черноморского течения, а также к северо-западному шельфу.

Методика позволяет максимально минимизировать использование вычислительных ресурсов, что имеет прикладное значение. Реализация в виде готового программного продукта, не требующего высокопроизводительного оборудования, может рассматриваться как быстрый эффективный метод оценки состояния морской среды.

С целью повышения точности воспроизведения солёности в дальнейшем следует оценить эффективность применения спутниковых данных поверхностной солёности для использования двухпараметрической зависимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP) / M. A. Balmaseda [et al.] // Journal of Operational Oceanography. 2015. Vol. 8, iss. suppl. 1. P. s80–s97. EDN CSAKME. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022329>

2. Ocean reanalyses: Recent advances and unsolved challenges / A. Storto [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6. 418. EDN DPDWEQ. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00418>
3. In situ-based reanalysis of the global ocean temperature and salinity with ISAS: Variability of the heat content and steric height / F. Gaillard [et al.] // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29, iss. 4. P. 1305–1323. EDN WPRUIH. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>
4. *Good S. A., Martin M. J., Rayner N. A.* EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 12. P. 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>
5. The CORA dataset: Validation and diagnostics of in-situ ocean temperature and salinity measurements / C. Cabanes [et al.] // *Ocean Science*. 2012. Vol. 9. P. 1273–1312. <https://doi.org/10.5194/os-9-1-2013>
6. *Bretherton F. P., Davis R. E., Fandry C. B.* A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73 // *Deep-Sea Research*. 1976. Vol. 23. P. 559–582. EDN XPLVDS. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(76\)90801-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90801-1)
7. NOAA Atlas NESDIS 81. World Ocean Atlas 2018. Volume 1: Temperature / R. A. Locarnini [et al.] ; Techn. ed. A. Mishonov. USA : NOAA, 2019. 52 p. [https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18\\_vol1.pdf3](https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18_vol1.pdf3)
8. NOAA Atlas NESDIS 82. World Ocean Atlas 2018. Volume 2: Salinity / M. M. Zweng [et al.] ; Techn. ed. A. Mishonov. USA : NOAA, 2019. 50 p. [https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18\\_vol2.pdf](https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18_vol2.pdf)
9. *Carnes M. R., Mitchell J. L., de Witt P. W.* Synthetic temperature profiles derived from Geosat altimetry: Comparison with air-dropped expendable bathythermograph profiles // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990. Vol. 95, iss. C10. P. 17979–17992. <https://doi.org/10.1029/JC095iC10p17979>
10. Relationship of TOPEX/Poseidon altimetric height to steric height and circulation in the North Pacific / J. Gilson [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, iss. C12. P. 27947–27966. <https://doi.org/10.1029/98JC01680>
11. Combining Argo and remote-sensing data to estimate the ocean three-dimensional temperature fields-A first approach based on simulated observations / S. Guinehut [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2004. Vol. 46, iss. 1–4. P. 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.11.022>
12. High resolution 3-D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations / S. Guinehut [et al.] // *Ocean Science*. 2012. Vol. 8, iss. 5. P. 845–857. <https://doi.org/10.5194/os-8-845-2012>
13. *Коротаяев 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. EDN VDVDCST. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-2-26-42>
14. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солёности в модели / Г. К. Коротаяев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 1. С. 40–56. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-1-40-56>
15. *Белокопытов В. Н., Жук Е. В.* Климатическая изменчивость термохалинных характеристик Черного моря (1950–2023 годы) // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40, № 6. С. 838–852. EDN CRAJHZ.

*Об авторах:*

**Жук Елена Владимировна**, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), SPIN-код: 3814-6300, ORCID ID: 0000-0002-4263-7734, WoS ResearcherID: JCD-8660-2023, Scopus Author ID: 57191412660, elena.zhuk@mhi-ras.ru

**Белокопытов Владимир Николаевич**, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, WoS ResearcherID: ABA-1230-2020, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588, Scopus Author ID: 6602381894, SPIN-код: 5697-5700, belokopytov.vn@mhi-ras.ru