

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.465  
EDN: PILFWG

## Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих ✉

Морской гидрофизический институт РАН  
✉ [l.sukhikh@gmail.com](mailto:l.sukhikh@gmail.com)

Поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 12.03.2023;  
принята к публикации 05.07.2023.

### Аннотация

*Цель.* Изучены тенденции долговременной эволюции гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе реанализа, выполненного за 28-летний период.

*Методы и результаты.* Для получения набора гидродинамических полей Черного моря за период с 1993 по 2020 г. был проведен расчет с использованием численной модели Черного моря МГИ с ассимиляцией данных дистанционного зондирования, а именно: полей аномалий возвышения свободной поверхности моря и поверхностной температуры, полученных по спутниковым измерениям. В качестве атмосферного воздействия использовались результаты атмосферного реанализа ERA-5. Проанализирована эволюция полей температуры, солёности и течений в верхних слоях моря за рассматриваемый период времени. Результаты моделирования сравнивались с профилями температуры и солёности, полученными буями АРГО в акватории Черного моря.

*Выводы.* Полученные результаты демонстрируют положительные тренды средней температуры в разных слоях, увеличение теплозапаса верхнего слоя моря и повышение средней температуры в ядре холодного промежуточного слоя. За изучаемый период солёность также имеет тенденцию к росту.

**Ключевые слова:** реанализ, модель циркуляции, Черное море, численное моделирование, ассимиляция данных измерений, спутниковые данные

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 0827-2021-0002.

**Для цитирования:** *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.

## Analysis of Long-Term Variability of Hydrodynamic Fields in the Upper 200-Meter Layer of the Black Sea Based on the Reanalysis Results

V. L. Dorofeev, L. I. Sukhikh ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
✉ l.sukhikh@gmail.com

### Abstract

*Purpose.* The research is purposed at studying the trends in the long-term evolution of hydrodynamic fields in the upper 200-m layer of the Black Sea based on the reanalysis of a 28-year period.

*Methods and Results.* To obtain a set of the Black Sea hydrodynamic fields for the period from 1993 to 2020, the following calculations were performed using the MHI numerical model of the Black Sea and including the assimilation of remote sensing data: the anomaly fields of the free sea surface elevation and the surface temperature derived from satellite measurements. The results of the ERA-5 atmospheric reanalysis were used as the atmospheric forcing. The evolution of temperature, salinity and current fields in the sea upper layers over the period under consideration was analyzed. The modeling results were compared to the temperature and salinity profiles obtained by the ARGO buoys in the Black Sea.

*Conclusions.* The results obtained demonstrate the positive trends in average temperature in different layers, an increase of heat content of the sea upper layer and a growth of average temperature in the core of the cold intermediate layer. In course of the period under study, salinity also tended to increase.

**Keywords:** reanalysis, circulation model, Black Sea, numerical modeling, assimilation of measurement data, satellite data

**Acknowledgments:** The study was carried out with the financial support of project No. 0827-2021-0002.

**For citation:** Dorofeev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2023. Analysis of Long-Term Variability of Hydrodynamic Fields in the Upper 200-Meter Layer of the Black Sea Based on the Reanalysis Results. *Physical Oceanography*, 30(5), pp. 581-593.

### Введение

Чтобы восстановить состояние гидродинамических полей океанов и морей за некоторый период времени в прошлом, широко применяется метод ретроспективного анализа (реанализ). Реанализ основывается на ассимиляции данных наблюдений в численной гидродинамической модели и дает возможность проводить мониторинг состояния морской среды и ее эволюции. Несмотря на то что численные модели представляют собой мощный инструмент для изучения трехмерной циркуляции вод в океане или другом водном бассейне, они не могут в полной мере обеспечить мониторинг состояния этого бассейна. Для задач мониторинга решающее значение имеет ассимиляция данных наблюдений в гидродинамической модели.

Одними из первых работ по реанализу состояния Черного моря являются работы, в которых восстанавливается сезонная и межгодовая изменчивость гидродинамических полей Черного моря на основе ассимиляции гидрологических измерений за периоды с 1985 по 1994 г. [1] и с 1973 по 1993 г. [2]. В последнее время большое распространение получили данные дистанционного

зондирования, которые обеспечивают широкий охват акватории и бесперебойность их поступления. В работе [3] представлены результаты реанализа гидродинамических полей Черного моря для периода 1992–2002 гг. Этот реанализ был выполнен на основе той же гидродинамической модели, которая применялась в работах [1, 2] (модель POM), но с использованием ассимиляции данных спутниковых альтиметрических измерений.

Результатом выполнения реанализа является временной набор трехмерных гидрологических полей и полей течений на регулярной сетке, которые используются для анализа временной изменчивости. Кроме того, результаты реанализа используются в качестве входных параметров при моделировании состояния и динамики морских экосистем [3, 4], а также при решении других прикладных задач.

Данная работа представляет некоторые результаты долгосрочной эволюции гидродинамических полей Черного моря, полученные на основе выполненного реанализа за 28-летний срок (1993–2020 гг.). Выбор такого периода объясняется тем, что с 1993 г. стали доступными спутниковые альтиметрические измерения, ассимиляция которых играет существенную роль в восстановлении морских течений. Представленные результаты являются дополнением к полученным ранее из реанализа для периода с 1993 по 2012 г. [5].

### Данные и методы

#### *Модель циркуляции Черного моря*

Как отмечалось выше, центральным элементом реанализа является численная модель. В данной работе за основу была взята модель циркуляции Черного моря МГИ, основанная на аппроксимации системы примитивных уравнений динамики океана [6]. Использовался вариант модели с пространственным шагом 4,8 км, что позволило адекватно описывать как крупномасштабную циркуляцию, так и синоптические процессы. По вертикали модель содержит 35 расчетных  $z$ -уровней, сгущающихся к морской поверхности. Для параметризации вертикальной турбулентной диффузии и вязкости используются коэффициенты, зависящие от глубины и сезонно от времени. Для расчета проникающей солнечной радиации используются климатические коэффициенты затухания, полученные по оптической модели [7]. В местах впадения крупных рек задавались климатические значения расходов [8]. Ранее эта версия модели циркуляции применялась в системе диагноза – прогноза гидрофизических полей Черного моря [9]. Для учета водообмена через Босфор на горизонтах, соответствующих нижнебосфорскому течению, задавались скорости, определяемые по климатическому расходу, и значение солености 36 ‰. На горизонтах, соответствующих верхнебосфорскому течению, где вода вытекает из Черного моря, задавалось постоянное значение скорости, обеспечивающее водный баланс за рассматриваемый период времени.

#### *Атмосферное воздействие*

Для постановки граничных условий на свободной поверхности моря для уравнений модели циркуляции использовались полученные по результатам атмосферного реанализа ERA-5 (ECMWF) [10] атмосферные поля приповерх-

ностного ветра, потоков тепла и пресной воды, солнечной радиации. Пространственное разрешение атмосферных полей составляет  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , частота по времени – 1 ч.

#### *Данные для ассимиляции*

В модели циркуляции Черного моря ассимилировались спутниковые данные температуры поверхности моря (ТПМ), альтиметрии и среднегодовые профили температуры и солёности. Температура поверхности представляла собой подготовленный *CMEMS* ежедневный набор данных на регулярной сетке с пространственным разрешением  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ . Альтиметрические данные (*CMEMS*) представляли собой *L4* аномалии уровня моря (*SLA*) на регулярной сетке ( $0,15^\circ \times 0,15^\circ$ ), рассчитанные по отношению к среднему значению за 20 лет (с 1993 по 2012 г.). *SLA* рассчитывались с помощью оптимальной интерполяции, объединяющей вдольтрековые измерения *L3* из различных доступных миссий альтиметров [11].

Для ассимиляции в модели циркуляции аномалии уровня преобразовывались в возвышение свободной поверхности. Для этого использовалась средняя динамическая топография, которая была рассчитана по результатам предыдущей версии реанализа (1993–2012 гг.) [5]. Среднегодовые профили температуры и солёности были подготовлены на основе всех имеющихся за рассматриваемый период гидрографических съёмок и данных буев АРГО.

Ассимиляция температуры морской поверхности осуществлялась методом релаксации. Спутниковые значения ТПМ сравнивались с модельными значениями поверхностной температуры раз в сутки. В точках измерений на горизонтах модели, входящих в верхний перемешанный слой, включались источники в правой части уравнения переноса – диффузии тепла, пропорциональные невязке значений температуры.

Для ассимиляции спутниковых альтиметрических данных использовался алгоритм, описанный в работе [12]. Профили температуры и солёности корректировались в каждой точке пропорционально разности между измеренной величиной возвышения свободной поверхности моря и модельной. При этом весовые коэффициенты, зависящие от глубины, вычислялись по кросс-ковариационным функциям ошибок уровня и солёности и/или температуры.

Средние по глубине значения температуры и солёности корректировались на горизонтах ниже 500 м в соответствии со среднегодовыми профилями, полученными по всем доступным данным контактных измерений.

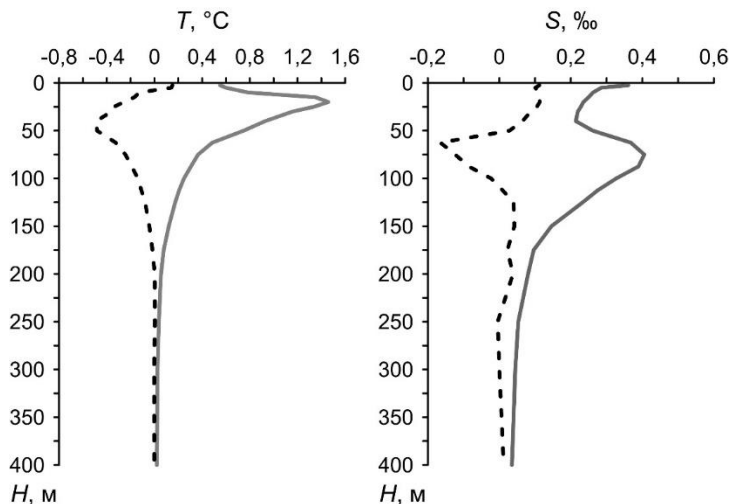
## **Результаты**

### *Оценка точности результатов реанализа*

Оценка качества продуктов реанализа была проведена путем сравнения полученных результатов с профилями температуры и солёности, измеренными буями АРГО, дрейфовавшими в Черном море в рассматриваемый период [13]. Для сравнения с данными измерений полученные в реанализе поля температуры и солёности интерполировались в точки проведения измерений буями АРГО. После этого были вычислены средние и среднеквадратичные отклонения измеренных значений от модельных для всего массива измерений на расчетных горизонтах модели циркуляции. Для устранения больших выбросов

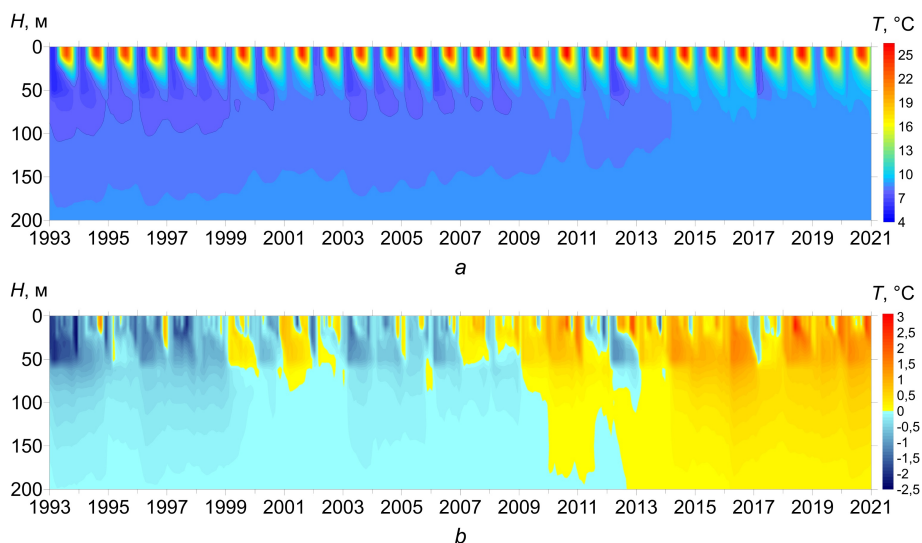
в данных измерений был проведен контроль по критерию превышения аномалий от среднего  $3\sigma$ .

На рис. 1 представлены профили средних и среднеквадратичных отклонений данных измерений от модельных значений температуры и солёности на расчетных горизонтах модели циркуляции.



**Рис. 1.** Профили средних (штриховая линия) и среднеквадратичных (сплошная линия) отклонений данных измерений от результатов реанализа для температуры (слева) и солёности (справа)

**Fig. 1.** Profiles of the average (dashed line) and standard (solid line) deviations of measurement data from the reanalysis results for temperature (left) and salinity (right)



**Рис. 2.** Эволюция средних по площади бассейна температуры (а) и аномалий температуры (b) в верхнем 200-метровом слое Черного моря

**Fig. 2.** Evolution of the average over the basin area temperature (a) and the temperature anomalies (b) in the upper 200-m layer of the Black Sea

Среднеквадратичное отклонение модельной температуры от измеренной имеет максимум на горизонте примерно 25 м. Этот максимум соответствует положению летнего сезонного термоклина, который характеризуется большим градиентом температуры. Поэтому даже небольшие погрешности в определении положения термоклина приводят к большим ошибкам. Наибольшее отклонение средних профилей наблюдается на глубине около 50 м, где средние модельные значения превышают измерения на  $\sim 0,5$  °С. Примерно на этой глубине располагается ядро холодного промежуточного слоя (ХПС) (рис. 2). Превышение модельной температуры над измеренной может быть вызвано более теплыми водами ХПС в модели. Кроме того, нижняя граница верхнего перемешанного слоя в зимнее время расположена приблизительно на этой глубине. Погрешность в определении этой границы моделью может также внести вклад в систематическую ошибку температуры.

Для солёности максимальные ошибки, как систематические, так и среднеквадратичные, расположены на глубинах примерно 60–80 м, то есть в области халоклина. При этом максимальное среднее завышение моделью солёности в этом слое составляет 0,2 %. На поверхности систематическая ошибка составляет 0,1 %. Полученная по результатам моделирования солёность воды ниже, чем по результатам измерений. Среднеквадратичное отклонение солёности имеет на поверхности второй максимум, который незначительно меньше максимума в халоклине.

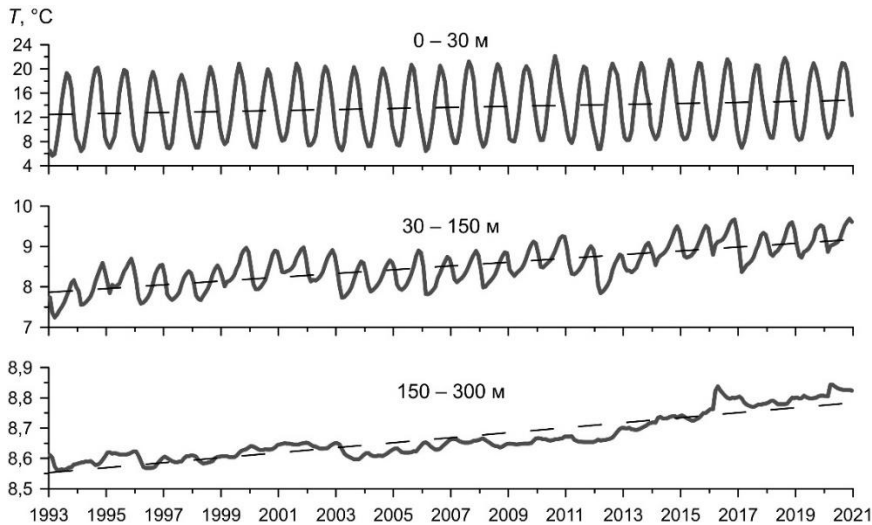
#### *Температурные тренды в верхнем слое моря*

Рассмотрим тренды изменения температуры воды в верхнем слое Черного моря. Для анализа долговременной и сезонной изменчивости будем рассматривать среднемесячные поля.

На рис. 2 приведены диаграммы Ховмеллера для средних по площади бассейна значений температуры и ее аномалий. Аномалии определялись по отношению к климатическим значениям, рассчитанным осреднением за весь период реанализа (28 лет). На диаграмме для температуры отчетливо виден сезонный сигнал. Кроме того, хорошо просматривается потепление воды в верхнем 200-метровом слое. Сплошной синей линией выделена область с температурой ниже 8 °С, которая является одним из индикаторов ХПС, используемых в Черном море [14]. В 90-х гг. эта область наблюдалась до глубины около 100 м и даже глубже. Затем она уменьшалась и в 10-е гг. почти не наблюдалась. На диаграмме для аномалий температуры нагрев верхнего слоя моря проявляется в том, что во второй половине рассматриваемого периода аномалии в основном положительны, тогда как в первой половине они отрицательны, кроме 1999 и 2001 гг.

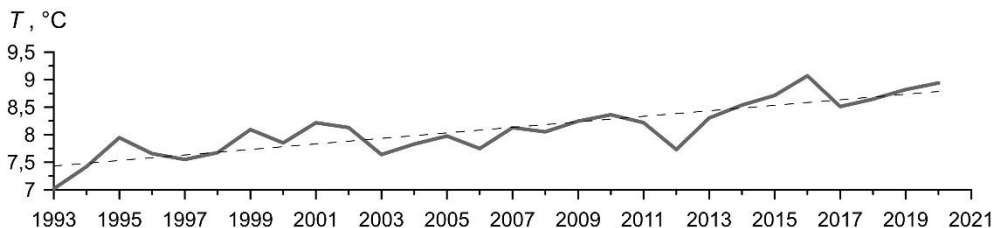
Для количественной оценки нагрева верхнего слоя Черного моря на рис. 3 приведены графики изменения средней температуры в трех слоях: 0–30 м, 30–150 м и 150–300 м и линейные тренды изменения температуры за рассматриваемый период. В слое 0–30 м основным элементом временной изменчивости являются сезонные колебания. В слое 30–150 м они также видны, но имеют меньшую амплитуду, а в слое 150–300 м сезонные колебания почти не наблюдаются. Температурный тренд, оцененный по всему рассматриваемому периоду, составляет для трех слоев:  $(0,084 \pm 0,032)$  °С/год,  $(0,047 \pm 0,0023)$  °С/год

и  $(0,0083 \pm 0,0002)$  °C/год соответственно. Для сравнения приведем значения температурных трендов, полученных в [15]. В этой работе также рассматриваются результаты реанализа Черного моря, но за период с 1993 по 2018 г. Для слоя 0–25 м линейный тренд составлял  $0,0829$  °C/год, для слоя 25–150 м –  $0,038$  °C/год и для слоя 150–300 м –  $0,0041$  °C/год.



**Р и с. 3.** Временная эволюция средней температуры в трех слоях (сплошная линия) и линейные тренды (штриховая линия)

**Fig. 3.** Temporal evolution of average temperature in three layers (solid line) and the linear trends (dashed line)

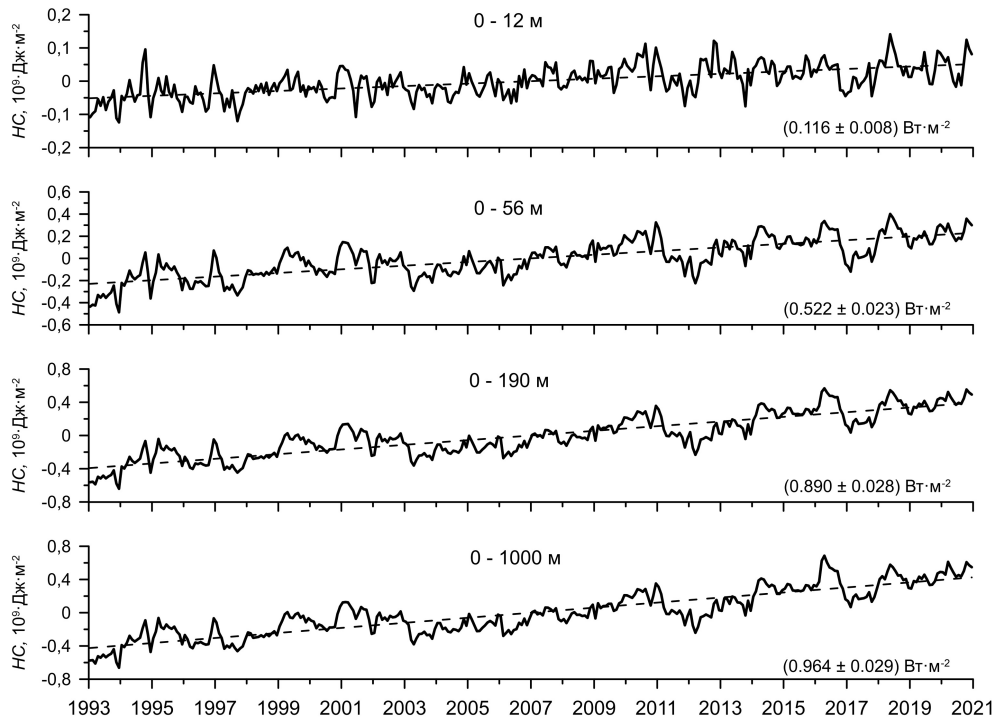


**Р и с. 4.** Временная эволюция средней температуры ядра ХПС для периода май – октябрь (сплошная линия), тренд температуры (штриховая линия)

**Fig. 4.** Temporal evolution of average temperature in the CIL core for the period May – October (solid line), the temperature trend (dashed line)

Как отмечалось ранее, общепринятым индикатором ХПС в Черном море являются водные массы с температурой воды ниже  $8$  °C. На рис. 2 видно, что почти половину рассматриваемого периода практически не наблюдаются области с температурой ниже  $8$  °C. Анализ полученных результатов показал, что в указанный промежуток времени ХПС также существует, однако температура в нем выше  $8$  °C. На рис. 4 представлена средняя температура ядра ХПС для мая – октября. Эта величина вычислялась осреднением по площади и указан-

ному промежутку времени значений температуры в точке минимума температурных профилей. На этом рисунке также отчетливо видно потепление верхнего слоя Черного моря. Линейный тренд температуры равен  $0,05\text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ , что почти совпадает с линейным трендом для всего слоя 30–150 м, в котором расположен ХПС.



**Рис. 5.** Изменение отклонения теплозапаса морской воды от климатического ( $HC$ ) и значение его тренда для разных слоев  
**Fig. 5.** Changes in the deviation of seawater heat content ( $HC$ ) from the climatic one and the value of its trend for different layers

Другой величиной, характеризующей термодинамику верхнего слоя моря, является его теплозапас. Следуя работе [16], определим теплозапас слоя моря формулой

$$HC = \rho_0 C_p \int_{z_1}^{z_2} (T - T_{cl}) dz, \quad (1)$$

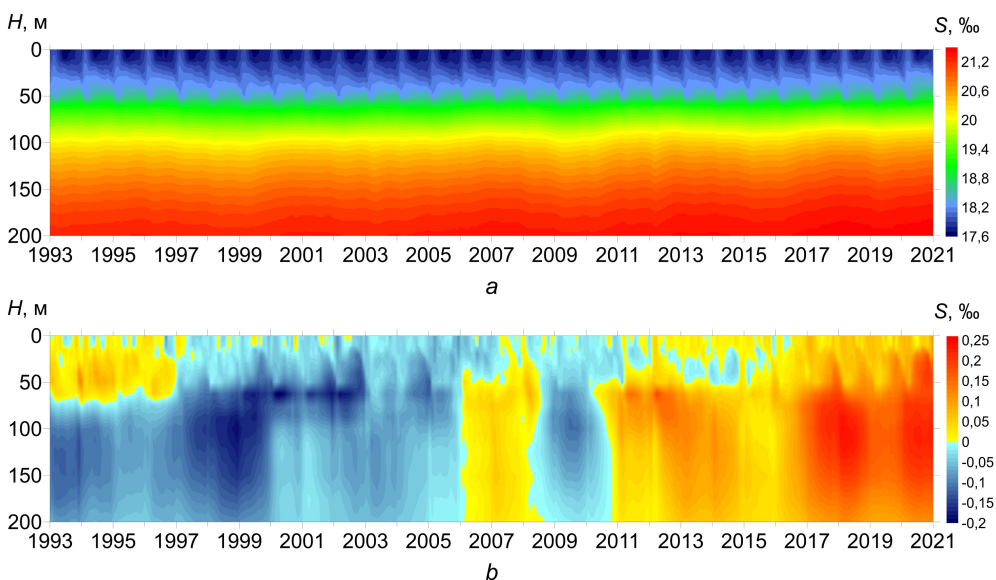
где  $\rho_0 = 1020\text{ кг}/\text{м}^3$  – плотность;  $C_p = 4181,3\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  – удельная теплоемкость морской воды;  $T$  – температура;  $T_{cl}$  – климатическая температура, полученная по всему рассматриваемому периоду;  $z_1$  и  $z_2$  – границы слоя. То есть формула (1) определяет отклонение теплозапаса слоя морской воды от климатического. На рис. 5 приведены графики изменения этой величины для разных слоев. Положительный тренд наблюдается для всех слоев. В слое 0–12 м при общем положительном тренде наблюдаются пики максимумов и минимумов. В конце 1994 и 1996 гг. наблюдаются наибольшие положительные значения



теплозапаса в виде пиков на графике, хотя в целом значения теплозапаса в окрестности этих пиков отрицательны. На диаграмме (см. рис. 2) в это время заметны положительные аномалии температуры воды возле поверхности на фоне отрицательных значений аномалии температуры. Наиболее значимые пики отрицательных значений аномалий теплозапаса соответствуют концу 2011 – началу 2012 г., концу 2013 г. и концу 2016 – началу 2017 г. На диаграмме (см. рис. 2) в эти промежутки отчетливо видны отрицательные аномалии температуры на фоне в целом положительных.

### *Соленость*

На рис. 6 представлены диаграммы изменения по глубине и времени осредненных по площади бассейна значений солености и аномалий солености, аналогичные диаграммам для температуры (см. рис. 2). Хорошо видна сезонная изменчивость до глубины примерно 60 м. Затем сезонный сигнал ослабевает. В межгодовой изменчивости примерно половину рассматриваемого промежутка времени аномалии солености отрицательны во всем 200-метровом слое. Исключение составляет верхний 60-метровый слой в течение первых четырех лет. Во второй половине аномалии солености в основном положительны. То есть в течение всего рассматриваемого периода соленость в верхнем 200-метровом слое Черного моря имеет тенденцию к повышению.

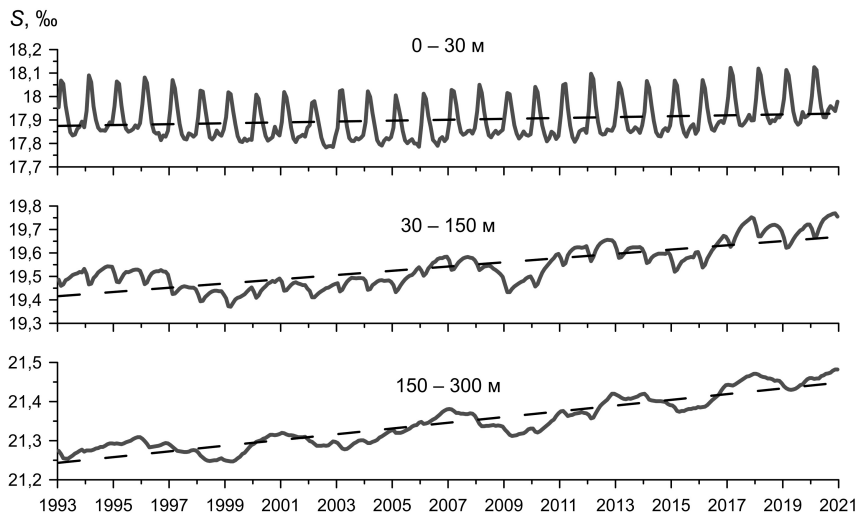


**Р и с. 6.** Диаграммы Ховмеллера для средних по площади бассейна солености (а) и аномалий солености (b)

**F i g. 6.** The Hovmoeller diagrams for the average over the basin area salinity (a) and salinity anomalies (b)

На рис. 7 приведены графики изменения средних значений солености в слоях: 0–30, 30–150 и 150–300 м. Штриховой линией показаны линейные тренды. Несмотря на то, что в слое 0–30 м примерно до 2003 г. соленость уменьшается, в целом по всему рассматриваемому периоду линейные тренды

для всех трех слоев положительны. Для слоя 0–30 м он имеет значение  $(0,002 \pm 0,0005) \text{ ‰/год}$ , для слоя 30–150 м –  $(0,009 \pm 0,0004) \text{ ‰/год}$  и для слоя 150–300 м –  $(0,007 \pm 0,00016) \text{ ‰/год}$ . В работе [15] для слоя 0–25 м линейный тренд составлял  $0,0068 \text{ ‰/год}$ , для слоя 25–150 м –  $0,0062 \text{ ‰/год}$  и для слоя 150–300 м –  $0,0029 \text{ ‰/год}$ . Таким образом, в нашей работе показано, что осолонение поверхностных вод идет медленнее (в сравнении с результатами, полученными в [15]), а в более глубоких слоях – быстрее.



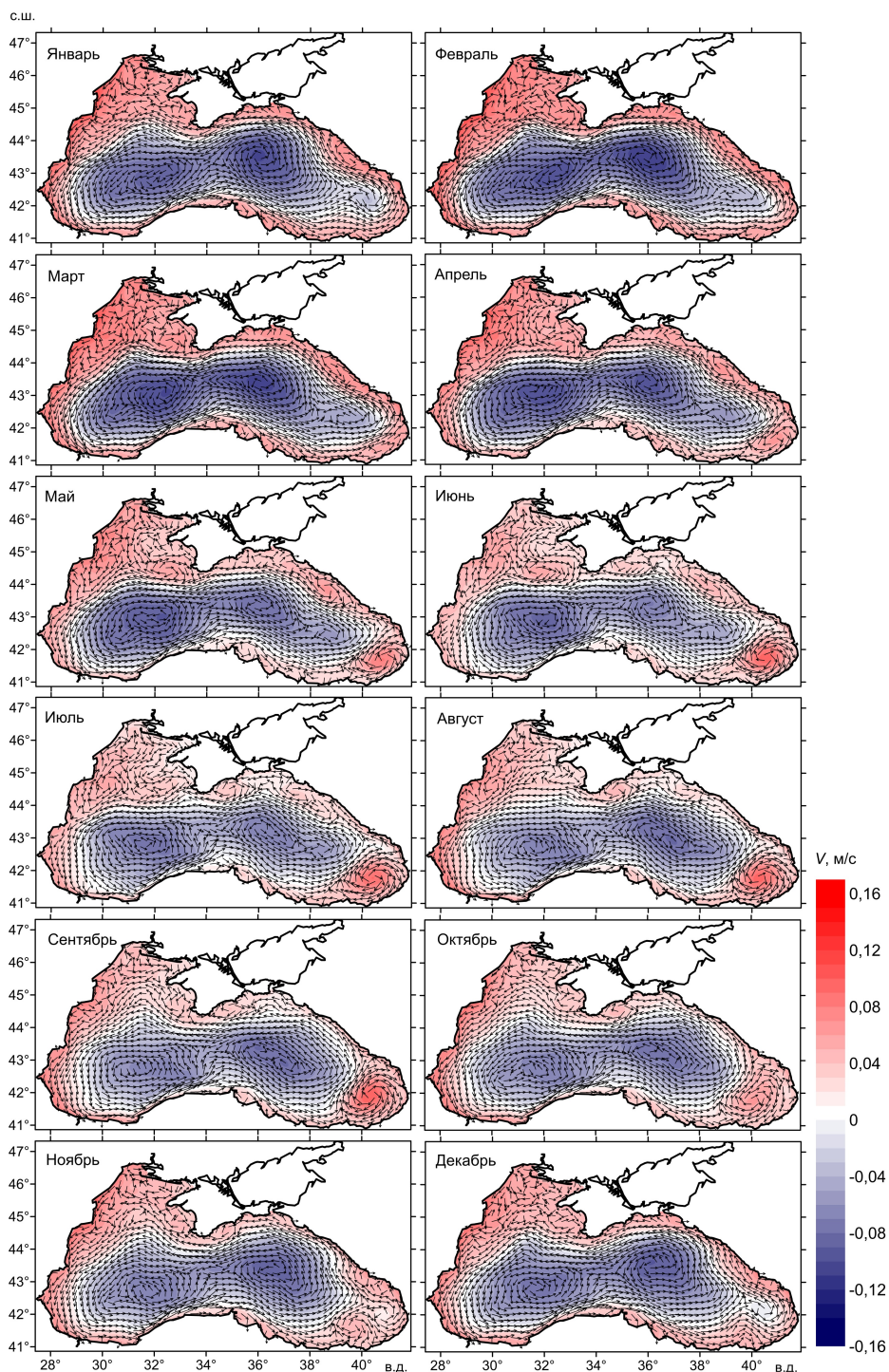
**Р и с. 7.** Временная эволюция средней солености в трех слоях (сплошная линия) и линейные тренды (штриховая линия)

**F i g. 7.** Temporal evolution of average salinity in three layers (solid line) and the linear trends (dashed line)

В работе [17] представлены графики изменения солености и температуры в верхнем слое Черного моря, полученные на станциях с глубиной 500 м в районе г. Геленджика. Поведение солености в слое 0–25 м качественно соответствует тому, которое изображено на рис. 7 в слое 0–30 м. Примерно до 2009 г. соленость уменьшается, затем растет. В слое до 150 м также наблюдается рост солености. Кроме того, согласно этой работе, температура верхнего слоя моря после 2010 г. повышается, что также согласуется с результатами нашего исследования.

### *Циркуляция*

На рис. 8 представлены карты среднемесячной климатической циркуляции в верхнем 30-метровом слое вместе с возвышением свободной поверхности Черного моря. Основным элементом циркуляции в верхнем слое является Основное Черноморское течение, образующее циклонический круговорот. Оно сопровождается пониженными значениями возвышения свободной поверхности в центральной части бассейна. Помимо двух основных минимумов уровня в первые шесть месяцев года наблюдается третий минимум в восточной части Черного моря. Затем он сливается с основным восточным минимумом уровня моря и появляется в декабре.

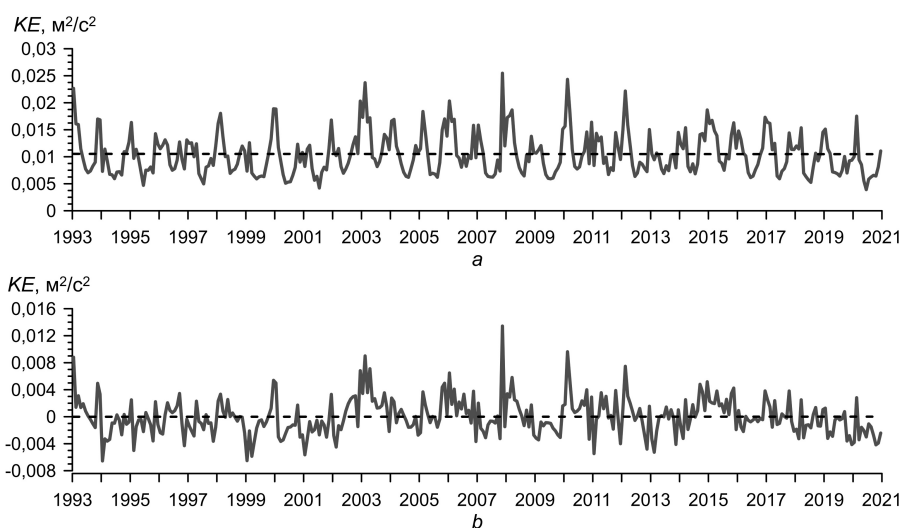


**Р и с. 8.** Карты среднемесячной климатической циркуляции в верхнем 30-метровом слое Черного моря (стрелки). Цветом показано возвышение свободной поверхности

**F i g. 8.** Maps of monthly average climatic circulation in the upper 30-m layer of the Black Sea (arrows). Color shows the free surface elevation

Другим важным элементом циркуляции является Батумский антициклонический круговорот. Он появляется в апреле и наиболее ярко выражен в летние месяцы. Летом также видны периферийные антициклоны у побережья Крыма и Кавказа. В ноябре от Батумского круговорота остается небольшой антициклон, прижатый к южному берегу, и в декабре он исчезает. Интересным также является поведение течения вдоль западного берега на северо-западном шельфе. Зимой оно направлено в основном к югу, а в летние месяцы – в противоположном направлении. Изменение направления интегрального по слою 30 м течения объясняется наличием на глубине примерно 20 м направленного к северу течения, вызванного сильной горизонтальной стратификацией (подробнее см. [18]).

Изменение интенсивности течений в верхнем 30-метровом слое за рассматриваемый период представлено на рис. 9 в виде графиков зависимости от времени средней в слое плотности кинетической энергии и ее отклонений от климата.



**Рис. 9.** Среднемесячная плотность кинетической энергии в верхнем 30-метровом слое Черного моря (а) и ее отклонение от климатических значений (b). Штриховые линии показывают линейные тренды

**Fig. 9.** Monthly average kinetic energy density in the upper 30-m layer of the Black Sea (a) and its deviation from the climatic values (b). Dashed lines show the linear trends

Отчетливо виден сезонный ход плотности кинетической энергии. Ее максимумы приходятся на зимний сезон, когда над Черным морем наблюдаются наиболее сильные ветры. Межгодовая изменчивость также хорошо просматривается, особенно в зимнее время, что проявляется в больших значениях отклонений от климата на графике (рис. 9). Если говорить о долговременной тенденции, то, в отличие от солености и температуры, значение линейного тренда для плотности кинетической энергии почти нулевое.

## Заключение

Анализ 28-летней эволюции гидрологических полей и полей течений Черного моря, полученных на основе ассимиляции спутниковых измерений возвышения свободной поверхности и поверхностной температуры, показывает тенденции нагрева и осолонения верхнего слоя моря. Графики изменения температуры в трех верхних слоях имеют положительные линейные тренды. Аномалии средней по площади бассейна температуры относительно климатических значений в верхнем 200-метровом слое имеют в основном отрицательные значения до 2010 г. и положительные – до конца рассматриваемого периода. Подтверждением нагрева верхнего слоя Черного моря служит также положительный тренд изменения теплозапаса в 1000-метровом слое и повышение средней температуры ХПС.

Соленость в верхнем слое Черного моря также имеет положительную тенденцию роста за весь период. Но если рассматривать период до 2005 г., то в верхнем 30-метровом слое соленость уменьшается, что видно на графике изменения солености в этом слое.

Климатическая картина течений в верхнем 30-метровом слое Черного моря, построенная по результатам реанализа, в целом отражает основные элементы циркуляции: Основное Черноморское течение, Батумский антициклонический круговорот и периферийные антициклонические вихри у побережья Крыма и Кавказа. Батумский круговорот появляется в марте – апреле и исчезает в ноябре. Среднее в 30-метровом слое вдольбереговое течение на северо-западном шельфе зимой направлено к югу, а летом меняет направление на противоположное. Изменчивость плотности кинетической энергии течений в верхнем слое моря имеет ярко выраженный сезонный и межгодовой характер, однако заметного тренда за рассматриваемый период не наблюдается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тенденции в изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря, выделенные по результатам реанализа за период 1985 – 1994 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 279–290.
2. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 433–446. EDN NWCJDF.
3. *Дорофеев В. Л.* Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 6. С. 71–81.
4. *Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К., Сухих Л. И.* Исследование долговременной изменчивости полей Черного моря с использованием междисциплинарной физико-биогеохимической модели // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 676–687. EDN PNCBNG. doi:10.7868/S0002351513060059
5. *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
6. *Демьяшев С. Г., Коротаев Г. К.* Численная энергосбалансирующая модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М. : ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.

7. Суслин В. В., Чурилова Т. Я. Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 47–60.
8. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? / W. Ludwig [et al.] // Progress in Oceanography. 2009. Vol. 80, iss. 3–4. P. 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>
9. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / G. K. Korotaev [et al.] // Ocean Science. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 629–649. doi:10.5194/os-7-629-2011
10. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
11. DUACS DT2018: 25 years of reprocessed sea level altimetry products / G. Taburet [et al.] // Ocean Science. 2019. Vol. 15, iss. 5. P. 1207–1224. doi:10.5194/os-15-1207-2019
12. Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихре-разрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 52–68.
13. The Argo Program: Observing the Global Ocean with Profiling Floats / D. Roemmich [et al.] // Oceanography. 2009. Vol. 22, no. 2. P. 34–43. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.36>
14. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
15. Climate Signals in the Black Sea From a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis / L. Lima [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. 710973. doi:10.3389/fmars.2021.710973
16. Copernicus marine service ocean state report, issue 4 / eds. K. von Schuckmann [et al.] // Journal of Operational Oceanography. 2020. Vol. 13, sup. 1. P. S1–S172. doi:10.1080/1755876X.2020.1785097
17. Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очередник В. В. Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-279-287
18. Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Особенности течений на северо-западном шельфе Черного моря по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 460–472. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-460-472

*Об авторах:*

**Дорофеев Виктор Львович**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: G-1050-2014**, [viktor.dorofeev@mhi-ras.ru](mailto:viktor.dorofeev@mhi-ras.ru)

**Сухих Лариса Ивановна**, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: M-4381-2018**, [l.sukhikh@gmail.com](mailto:l.sukhikh@gmail.com)