

Климатическая изменчивость термохалинных характеристик Черного моря (1950–2023 годы)

В. Н. Белокопытов , Е. В. Жук

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 v.belokopytov@gmail.com

Поступила в редакцию 03.07.2024; одобрена после рецензирования 28.08.2024;
принята к публикации 12.09.2024.

Аннотация

Цель. Целями работы являются создание нового климатического массива термохалинных полей Черного моря, оценка на его основе климатических изменений последних десятилетий и сравнение их с глобальными климатическими тенденциями в Мировом океане.

Методы и результаты. Новый климатический массив термохалинных полей Черного моря (МГИ-2024) с пространственным разрешением $1/6^\circ \times 1/4^\circ$ создан в Морском гидрофизическом институте РАН на основе статистической обработки более 123 тыс. гидрологических станций за период 1950–2023 гг. с применением методов оптимальной интерполяции. Климатический атлас и цифровой массив находятся в открытом доступе и могут использоваться в климатических исследованиях, математическом моделировании, а также при решении различных прикладных задач. Отклонения исходных данных и осредненных значений от климатических полей массива МГИ-2024 послужили основным материалом для оценок показателей временной изменчивости на различных масштабах и для формирования временных рядов среднемесячных и среднегодовых аномалий. Выявлено, что после 2015 г. потепление в слое 0–100 м устойчиво превышает средний фон межгодовой изменчивости с наибольшим ростом температуры воды в летне-осенний период. Примерно с 2010–2012 гг. наблюдается резкий рост солености, который пока не превышает уровня межгодового среднеквадратического отклонения (СКО). Наибольший рост солености в сезонном цикле происходит весной и осенью, в периоды максимумов водного баланса бассейна.

Выводы. Черное море относится к районам с повышенной скоростью климатических изменений, таким как тропические части Мирового океана. Высокий рост температуры в Черном море в последние 40 лет уступает по интенсивности только арктическим морям. Рост солености в Черном море на протяжении 70-летнего периода сопоставим с увеличением солености в районах океанических субтропических круговоротов с нетипичным для океана резким осолонением за последние 20 лет. Наступившая теплая и соленая фаза гидрологического состояния Черного моря аналогична условиям 1960–1970 гг., но с большей амплитудой колебаний. Результаты работы имеют широкую область применения, в том числе для формирования общих представлений о механизмах цикла углерода в Азово-Черноморском бассейне.

Ключевые слова: Черное море, термохалинная структура, климатический массив, изменение климата, глобальное потепление, соленость, температура воды

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственных заданий ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 и FNNN-2023-0001.

Для цитирования: 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 VQXRRU.

Climatic Variability of the Black Sea Thermohaline Characteristics (1950–2023)

V. N. Belokopytov ✉, E. V. Zhuk

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

✉ v.belokopytov@gmail.com

Abstract

Purpose. The purposes of the study are to create a new climatic array of thermohaline fields in the Black Sea, to estimate (on its basis) the climate changes during the last decades and to compare them with the global climatic tendencies in the World Ocean.

Methods and Results. A new climate array of thermohaline fields in the Black Sea (MHI-2024) with a $1/6^\circ \times 1/4^\circ$ spatial grid has been created in Marine Hydrophysical Institute of RAS based on statistical processing of more than 123 thousand hydrological stations in 1950–2023 and using the methods of optimal interpolation. The climate atlas and the digital array are the open access products and can be used in climate studies, mathematical modeling, as well as in solving various applied problems. The deviations of initial data and averaged values from the climatic fields in the MHI-2024 array have constituted a basis for calculating the parameters of temporal variability at different scales and for forming the time series of average monthly/annual anomalies. It is revealed that after 2015, sea warming in the 0–100 m layer steadily exceeded the natural background of interannual variability, at that its maximal increase fell on the summer-autumn seasons. Since about 2010–2012, a sharp salinity growth has been observed which does not yet surpasses the standard deviation (SD) of interannual variability. The highest salinity increase in course of a seasonal cycle occurs in spring and autumn, i. e. when the water balance in the basin is maximal.

Conclusions. The Black Sea is related to the areas with the increased rates of climate changes, such as tropical parts of the World Ocean. The high temperature rise in the Black Sea over the past 40 years is the second in intensity as compared to that of the Arctic seas. Salinity growth in the Black Sea over a 70-year period is close to that in the areas of subtropical anticyclonic gyres, where over last 20 years, sharp salinification, atypical for the ocean, was observed. The current warm and saline stage of hydrologic state of the Black Sea is similar to the conditions in 1960–1970, but with greater oscillation amplitude. The obtained results are of a wide range of applications including the formation of general ideas on the carbon cycle mechanisms in the Azov-Black Sea basin.

Keywords: Black Sea, thermohaline structure, climatic array, climate change, global warming, salinity, water temperature

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignments of FSBSI FRC MHI on themes FNNN-2024-0014 and FNNN-2023-0001.

For citation: Belokopytov, V.N. and Zhuk, E.V., 2024. Climatic Variability of the Black Sea Thermohaline Characteristics (1950–2023). *Physical Oceanography*, 31(6), pp. 788–801.

Введение

В обширном наборе методов климатических исследований традиционным, основополагающим подходом остается расчет отклонений текущих значений гидрометеорологических элементов от климатических норм. Для океанографических характеристик, неравномерно распределенных во времени и пространстве, получение статистически достоверных климатических норм является более неопределенной задачей, чем для длительных рядов измерений на стационарных метеорологических станциях или результатов дистанционного зондирования Земли на регулярной основе.

При использовании в качестве общих показателей климатической изменчивости абсолютных или нормированных аномалий относительно многолетнего сезонного хода на оценку интенсивности происходящих крупномасштабных изменений будут влиять значения рассчитанных ранее климатических норм. Для Черного моря в последние 40 лет был создан ряд климатических массивов термохалинных полей: СО ГОИН [1], WOA-2018 [2, 3], *MEDATLAS*¹, *SeaDataNet Climatology*², МГИ-2004³⁻⁵ [4]. Эти массивы охватывают различные исторические периоды, поэтому их средние характеристики по-разному отражают влияние долгопериодных трендов и изменчивости в десятилетнем – междесятилетнем диапазоне.

В работах по климатической изменчивости в Черном море в основном описывались сами изменения характеристик термохалинной структуры вод и меньше внимания уделялось их отношению к климатическим средним и общему уровню межгодовой – междесятилетней изменчивости. В работах [5–7] рассматривались общие многолетние тенденции, в том числе и для современного периода резкого потепления верхнего слоя моря в конце XX – начале XXI в. Много исследований было посвящено процессам в холодном промежуточном слое (ХПС) [8–12], в которых было показано, что в последние годы вслед за потеплением в поверхностном слое этот характерный элемент термохалинной структуры черноморских вод (в его классическом определении как подповерхностный слой с температурой $\leq 8^{\circ}\text{C}$) стал исчезать уже к началу 2010-х гг. Неоднократно отмечался в литературе и медленный, постоянный рост температуры и солёности в слое постоянного пикноклина [1, 5].

Гораздо меньше в литературе освещались вопросы многолетних колебаний солёности Черного моря. Результаты экспедиционных наблюдений свидетельствуют, что начавшееся в 1980-х гг. снижение солёности поверхностного слоя, впервые отмеченное в работе [1], завершилось в целом к 2005–2010 гг. Начавшийся в дальнейшем общий рост содержания солей в море обсуждался специалистами большей частью в рамках научных конференций. Признаки начала осолонения бассейна можно найти лишь в отдельных работах, например на графиках временных рядов солёности в работе [11, рис. 5, с. 4812].

¹ MEDATLAS/2002 database. Mediterranean and Black Sea database of temperature salinity and bio-chemical parameters. Climatological Atlas / MEDAR Group. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) and Instituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS). 2002. 4 CD-ROMs.

² Myroshnichenko V., Simoncelli S. SeaDataCloud Temperature and Salinity Climatology for the Black Sea (Version 2). Product Information Document. SeaDataCloud, 2020. 37 p. <https://doi.org/10.13155/77420>

³ Белокопытов В. Н. Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Севастополь : МГИ НАНУ, 2004. 24 с.

⁴ Океанографический атлас Чорного и Азовського морів / С. В. Симоненко [и др.]. Киев : ДУ «Держгидрографія», 2009. 365 с.

⁵ Экологический Атлас. Черное и Азовское моря / В. О. Мокиевский [и др.]. Москва : Фонд «НИР», 2019. 464 с.

Насущная необходимость проведения более точных и обоснованных оценок современных региональных климатических изменений и сопоставления их с глобальными тенденциями стимулирует работы по определению характеристик всего диапазона временной изменчивости и созданию новых версий климатических полей. Увеличение количества наблюдений в Черном море за последнее десятилетие позволяет повысить пространственное разрешение климатических массивов, которые имеют широкую область применения. В частности, оценки климатических аномалий, полученные на их основе, важны не только в качестве традиционных климатологических характеристик, а также для решения новых актуальных задач, таких как формирование общих представлений о механизмах цикла углерода в Азово-Черноморском бассейне.

Целью работы является оценка климатических изменений термохалинных характеристик Черного моря в последние десятилетия на основе отклонений от нового климатического массива и сравнение их с глобальными климатическими тенденциями в Мировом океане

Данные и методы исследования

Существующие климатические массивы Черного моря рассчитывались на основе данных для различных исторических периодов: СО ГОИН – до 1977 г., *MEDATLAS* – до 1997 г., МГИ-2004 – для 1923–2004 гг., *SeaDataNet* – для 1955–1994 гг., 1995–2019 гг. и 1955–2019 гг., из списка массивов *WOA-2018* наиболее близки к современности периоды 1981–2010 и 2005–2017 гг.

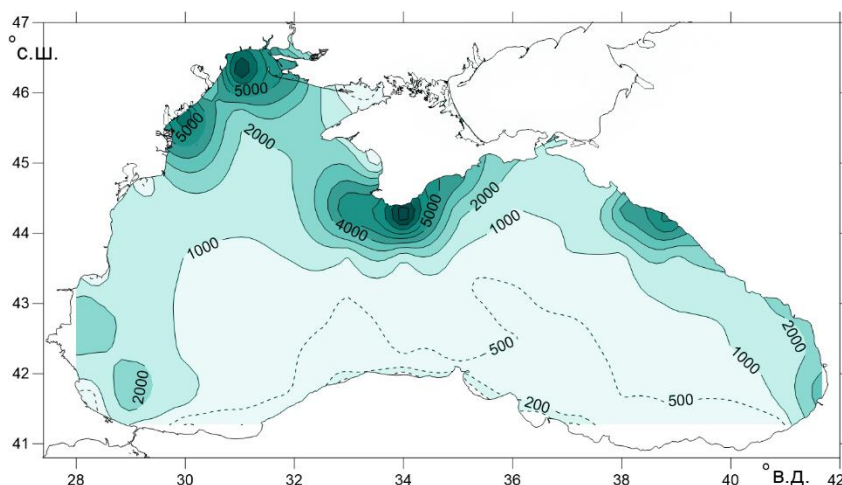
Для нового климатического массива (МГИ-2024) был выбран период 1950–2023 гг., который охватывает два климатических периода Всемирной метеорологической организации (ВМО): 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг., а также близок к периодам количественных оценок долгопериодных изменений в Мировом океане из отчета Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) ⁶.

Существующие климатические массивы Черного моря кроме различных периодов осреднения имеют и различное пространственное разрешение: СО ГОИН – $2/3^\circ \times 1^\circ$ ($40' \times 60'$, 74×78 км), МГИ-2004 – комбинированную сетку $2/3^\circ \times 1^\circ$ ($40' \times 60'$, 74×78 км) и $1/3^\circ \times 1/5^\circ$ ($20' \times 30'$, 37×39 км – для более обеспеченных районов), *WOA-2018* – $1^\circ \times 1^\circ$ (111×78 км) и $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ ($15' \times 15'$, 28×19 км), *SeaDataNet* – $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ($7,5' \times 7,5'$, 14×10 км), *MEDATLAS* – 958 неравномерно расположенных узлов. Для создания массива МГИ-2024 была выбрана сетка $1/6^\circ \times 1/4^\circ$ ($10' \times 15'$, 19×19 км) как компромисс между стремлением к более высокому, равномерному пространственному разрешению и необходимостью учета значительной разности в количестве данных между северной и южной частями моря (рис. 1).

Основой массива МГИ-2024 послужили 123533 вертикальных профиля температуры и солёности, собранные для периода 1950–2023 гг. из банка океанографических данных Морского гидрофизического института РАН (БОД

⁶ Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. V. Masson-Delmotte [et al.]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

МГИ)⁷, информационных ресурсов *SeaDataNet*⁸ и баз данных буев-профилемеров *Argo*⁹. Все профили температуры и солёности прошли контроль качества на основе стандартных океанографических тестов и статистических критериев (3σ). Для расчёта климатических полей в глубинных слоях использовались данные *CTD*-зондов (начиная с 1990-х гг.) и буев *Argo* после 2010 г. (когда стабильность измерительных датчиков солёности на протяжении длительного дрейфа значительно улучшилась), всего 28885 станций для данного периода.



Р и с. 1. Количество гидрологических станций в Черном море за период 1950–2023 гг. в квадратах $2/3^\circ \times 1^\circ$ ($40' \times 60'$)

F i g. 1. Amount of oceanographic stations in the Black Sea in the $2/3^\circ \times 1^\circ$ ($40' \times 60'$) “quadrants” over 1950–2023

Методическая основа расчёта существующих климатических массивов также различна: в массиве СО ГОИН использовались сплайн-функции и стандартные статистические методы, в *WOD-18* и *МГИ-2004* – метод последовательных приближений [13, 14], в *MEDATLAS* [15] и *SeaDataNet* [16] (*divand* вер. 2.6.4) – вариационные обратные методы.

Методика расчёта климатического массива *МГИ-2024* состояла в последовательном выполнении трёх этапов.

На первом, самом длительном этапе для регуляризации пространственно-временной неоднородности исходных данных и фильтрации мезомасштабной изменчивости формировался начальный массив среднедекадных (10 сут) значений для всего периода наблюдений на сетке $10' \times 15'$ [17]. Использовался метод оптимальной интерполяции¹⁰ [18] с допущением изотропности пространственной коррелированности термохалинных полей в Черном море [19,

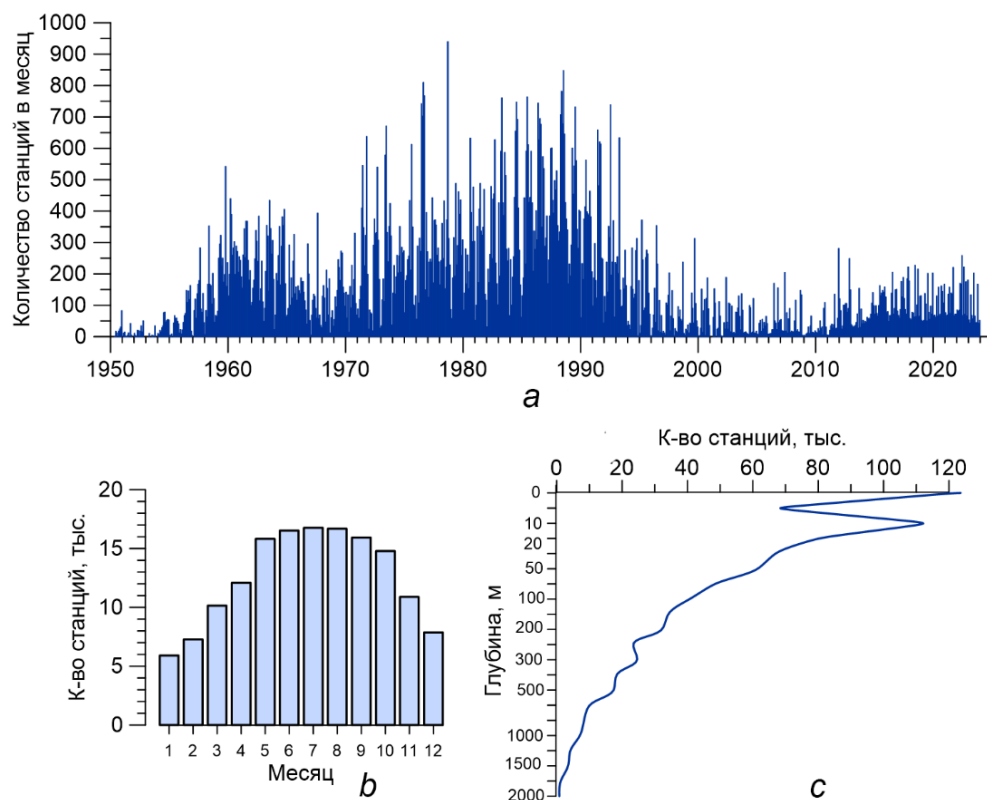
⁷ Черное море: гидрология – 2018 : база данных / Е. А. Годин [и др.] ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2019. № гос. регистрации № 2019621008. EDN PUGLGR.

⁸ URL: <https://cdi.seadatanet.org/search> (date of access: 16.03.2023).

⁹ URL: <https://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-selection> (date of access: 29.12.2023).

¹⁰ Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Ленинград : Гидрометеоздат, 1963. 287 с.

20] и автокорреляционной функции из работы [19]. В сравнении с исходной информацией (рис. 2, *a*) интерполированные данные имеют более равномерное распределение, тем не менее периоды до 1957 г. и 1997–2013 гг. остаются наименее обеспеченными данными наблюдений. Относительная доля покрытия акватории Черного моря данными, сведенными в узлы сетки $10' \times 15'$, в эти годы не превышает 10–15% в месяц (рис. 3).



Р и с. 2. Количество гидрологических станций в Черном море за период 1950–2023 гг.: распределение по годам и месяцам (*a*), по месяцам (*b*), по глубине (*c*)

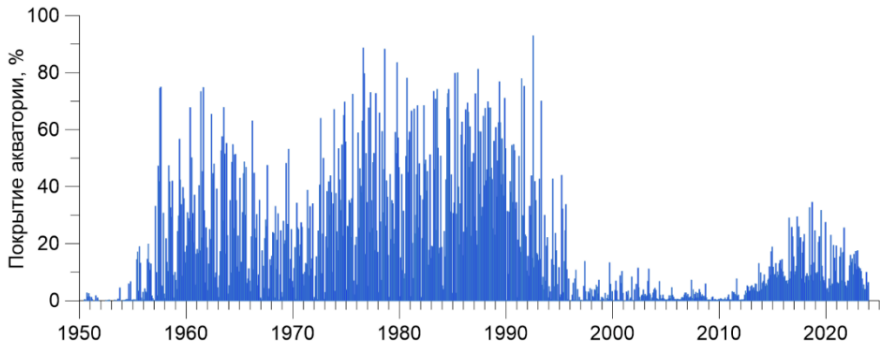
F i g. 2. Amount of oceanographic stations in the Black Sea over 1950–2023: distribution by years and months (*a*), months (*b*) and depth (*c*)

На втором этапе по среднедекадным величинам в узлах сетки рассчитывались среднемесячные значения за каждый год, затем вычислялись климатические среднемесячные значения как средние арифметические из имеющихся в период 1950–2023 гг.

На третьем этапе полученные средние поля сглаживались гауссовским фильтром с радиусом 3–5 узлов сетки с 2–6 итерациями в зависимости от обеспеченности данными и уровня внутрисезонной изменчивости.

Результирующий климатический массив содержит среднемесячные поля температуры и солёности (до 350 м) и среднегодовые поля (начиная с 400 м) на 67 горизонтах: через 5 м в слое 0–100 м с последовательным увеличением

далее вертикального шага от 10 до 200 м. Климатический атлас и цифровой массив размещены на сайте БОД МГИ ¹¹ (для открытого доступа с 01.01.2025 г.).



Р и с. 3. Относительная доля покрытия акватории Черного моря (%) в месяц данными наблюдений температуры и солёности, сведёнными на сетку 10' × 15' методом оптимальной интерполяции
Fig. 3. Relative share of monthly coverage (%) of the Black Sea water area by temperature and salinity observation data reduced to a 10' × 15' grid by the optimal interpolation method

Т а б л и ц а 1
Table 1

Качественные оценки различий пространственной структуры полей температуры воды для февраля и августа в массивах МГИ-2004, WOD-18, SeaDataNet в сравнении с массивом МГИ-2024
Qualitative assessments of distinctions in spatial structure of water temperature fields for February and August in the MHI-2004, WOD-18 and SeaDataNet arrays as compared to the MHI-2024 array

Глубина, м / Depth, m	Месяц / Month	МГИ-2004 (1923–2004) / МHI-2004 (1923–2004)	WOD-18 (1981–2010)	SeaDataNet (1955–2019)
0	2	–	+	–
50	2	–	+	–
100	2	+	+	×
0	8	+	+	–
50	8	+	–	–
100	8	+	+	–
500	8	–	–	–
1000	8	–	–	+

П р и м е ч а н и е: здесь и в табл. 2 знак **+** означает качественное соответствие пространственной структуры полей и близкие количественные значения; **×** – качественное соответствие пространственной структуры полей с существенной разницей количественных значений; **–** несоответствие пространственной структуры полей и количественных значений.

Note: here and in table 2, **+** means qualitative correspondence between the field spatial structures and the close quantitative values; **×** – qualitative correspondence between the field spatial structures and the significant difference of quantitative values; **–** – discrepancy between the field spatial structures and the quantitative values.

¹¹ Климатический атлас Черного моря (МГИ-2024) : набор данных. Данные в формате netCDF // Банк океанографических данных : сайт. 01.01.2025. URL: http://bod-mhi.ru/ru/climaticAtlas_2024.shtml (дата обращения: 31.12.2024).

Сравнение массива МГИ-2024 с имеющимися аналогами показывает, что их отличия в пространственной структуре гидрологических полей (расположение минимумов и максимумов, сезонная конфигурация циклонических круговоротов) не имеют явно выраженного систематического характера, они различны по сезонам года и глубинам. В табл. 1, 2 представлены качественные оценки различий между массивами на примере февраля и августа как центральных месяцев гидрологических сезонов. Несмотря на практически одинаковый период осреднения с *SeaDataNet*, массив МГИ-2024 в целом имеет большее сходство с WOD-18 и МГИ-2004, хотя исторические периоды в них совпадают лишь частично. Скорее всего, это обусловлено большей традиционностью подходов при создании указанных массивов, чем при создании *SeaDataNet*. Учитывая то обстоятельство, что благодаря международному обмену гидрометеорологической информацией набор доступных исходных океанографических данных практически одинаков, выбор методики вычислений является определяющим фактором для воспроизведения особенностей пространственной структуры полей.

Т а б л и ц а 2
Table 2

**Качественные оценки различий пространственной структуры полей
солёности для февраля и августа в массивах МГИ-2004, WOD-18,
SeaDataNet в сравнении с массивом МГИ-2024**
**Qualitative assessments of distinctions in spatial structure of salinity fields
for February and August in the MHI-2004, WOD-18 and *SeaDataNet* arrays
as compared to the MHI-2024 array**

Глубина, м / Depth, m	Месяц / Month	МГИ-2004 (1923–2004) / МHI-2004 (1923–2004)	WOD-18 (1981–2010)	<i>SeaDataNet</i> (1955–2019)
0	2	+	+	+
100	2	+	–	–
200	2	×	–	–
0	8	+	+	×
100	8	+	–	×
200	8	+	–	×
500	8	+	+	×
1000	8	–	–	–

Отдельно следует отметить проблему надежности количественных оценок в глубинных слоях Черного моря, где пространственно-временная изменчивость термохалинных характеристик резко снижается. Среднеквадратические отклонения рядов температуры и солёности для всего периода наблюдений, начиная с нижней части основного пикноклина, не превышают 10^{-1}°C и единиц солёности, а для отдельных судовых съёмок или периодов работы конкретных буев-профилемеров они находятся в пределах 10^{-3} – 10^{-2}°C и единиц солёности. При такой однородности термохалинных полей инструментальные и систематические погрешности измерений сопоставимы с естественной изменчивостью, при этом влияние выбросов или несвоевременности поверки приборов

резко возрастает. Выбор достоверных по метрологическим стандартам данных глубоководных измерений очень субъективен, а жесткая фильтрация значений уменьшает их количество, необходимое для надежных оценок средних величин. В связи с этим во всех рассматриваемых массивах, включая МГИ-2024, пространственная структура средних термохалинных полей на глубинах > 1000 м может рассматриваться лишь как ориентировочная. Это относится также и к среднегодовым полям, не говоря уже о среднемесячных значениях, которые представлены в *WOD-18* и *SeaDataNet*. Наибольшую достоверность имеют только осредненные по всей глубоководной акватории вертикальные профили из тщательно отфильтрованных данных, полученных современными измерительными средствами.

Еще одна проблема, часто возникающая при расчетах климатических массивов, – появление искусственных вертикальных инверсий при несогласованном пространственном сглаживании полей на различных горизонтах. При создании массива МГИ-2024 для устранения подобных артефактов на третьем этапе расчетов применялась итерационная процедура контроля наличия инверсий плотности с последующим увеличением/уменьшением радиуса и количества итераций сглаживания на различных горизонтах.

На основе отклонений исходных данных и среднедекадных значений от климатических полей были рассчитаны оценки интенсивности временной изменчивости для различных масштабов:

- сезонной изменчивости $D[X_{mc}]$,
- межгодовой – междесятилетней изменчивости $D[X'_m]$,
- синоптической изменчивости $D[X'_s]$,
- мезомасштабной изменчивости $D[X'] - (D[X'_m] + D[X'_s])$,
- внутрисезонной изменчивости $D[X']$, под которой подразумевается общая изменчивость за вычетом сезонного хода, т. е. суммы мезомасштабной, синоптической и более низкочастотной (от межгодовой до междесятилетней) изменчивости. Здесь

D – оператор дисперсии;

X – исходные данные измерений;

X_{mc} – климатический среднемесячный сезонный ход;

$X'_m = M[X'_d]$ – среднемесячные аномалии,

M – оператор математического ожидания,

$X'_d = X_d - X_{mc365}$ – среднедекадные аномалии (от климатического сезонного хода и линейного тренда (на глубинах > 100 м)),

X_d – среднедекадные значения (за 10 сут),

X_{mc365} – климатический среднемесячный сезонный ход, аппроксимированный на каждый день года двумя гармониками;

$X'_s = X'_d - X'_m$ – синоптические аномалии,

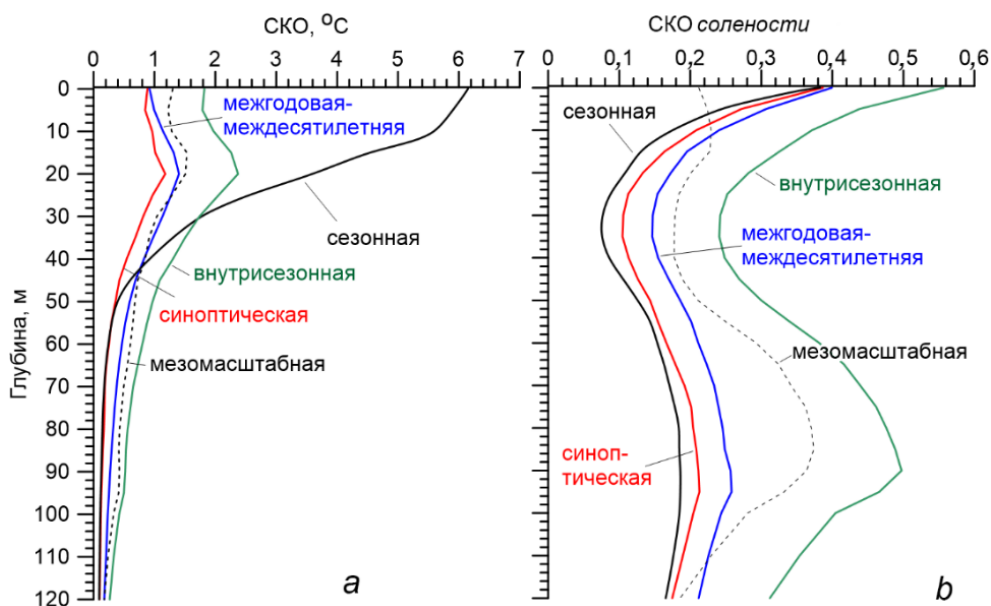
$X'_d = X_d - X_{mc365}$ – среднедекадные аномалии (от климатического сезонного хода и линейного тренда (на глубинах > 100 м)).

Оценки интенсивности межгодовой – междесятилетней изменчивости необходимы для определения значимости долгопериодных климатических аномалий, оценки общей внутрисезонной изменчивости – для фильтрации из-

меренных и рассчитанных значений, оценки синоптической и мезомасштабной изменчивости могут учитываться при исследованиях процессов соответствующих масштабов.

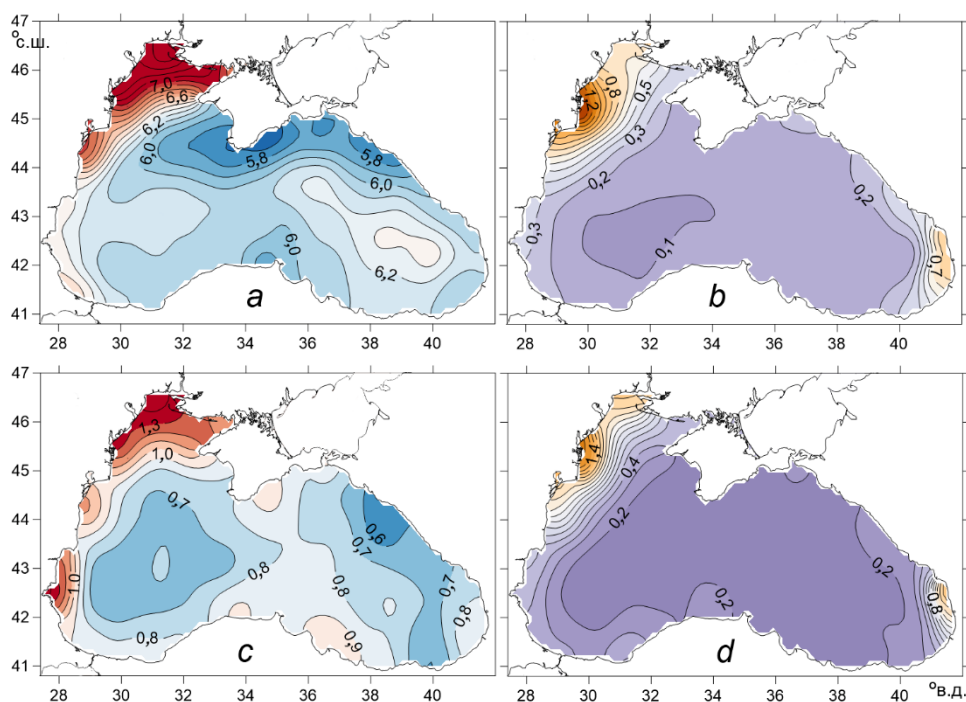
Обсуждение результатов

Среднее по Черному морю вертикальное распределение оценок временной изменчивости температуры воды (рис. 4, *a*), как и описывалось ранее в литературе [21], характеризуется одним максимумом: для сезонного хода – на поверхности моря, для остальных диапазонов изменчивости – в слое сезонного термоклина. Для солёности (рис. 4, *b*) все виды временной изменчивости имеют два максимума: первый – на поверхности моря и второй – в основном галоклине. По сравнению с работой [21] возросла оценка амплитуды сезонного хода солёности в поверхностном слое моря, а также увеличилась оценка вклада мезомасштабной изменчивости температуры и солёности, что связано, скорее всего, с тем, что ранее она определялась по достаточно небольшому количеству многосуточных станций. Пространственное распределение сезонной изменчивости в Черном море соответствует традиционным представлениям [1, 21], в новых оценках более детально представлена южная часть моря (рис. 5).



Р и с. 4. Вертикальное распределение средних по Черному морю оценок временной изменчивости различных масштабов для температуры воды (*a*) и солёности (*b*)

F i g. 4. Vertical distribution of the Black Sea average estimates of temporal variability of different scales for water temperature (*a*) and salinity (*b*)



Р и с. 5. Пространственное распределение оценок временной изменчивости на поверхности моря: сезонное (a) и внутрисезонное (c) СКО температуры воды; сезонное (b) и внутрисезонное (d) СКО солёности

Fig. 5. Spatial distribution of temporal variability estimates on the sea surface: seasonal (a) and intra-seasonal (c) water temperature SD; seasonal (b) and intra-seasonal (d) salinity SD

Для оценки масштаба региональных климатических изменений были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые аномалии температуры и солёности относительно климатического сезонного хода в узлах регулярной сетки массива МГИ-2024 (рис. 6, 7). Отношение текущих аномалий к СКО межгодовой – междесятилетней изменчивости характеризует относительную интенсивность климатических изменений.

После относительного похолодания 1980–1990-х гг. в поле температуры вод Черного моря преобладают положительные среднегодовые аномалии (рис. 6, a). В поверхностном слое превышение межгодового СКО ($1,0^{\circ}\text{C}$) в отдельные годы отмечается с 2000 г., после 2015 г. потепление уже устойчиво превышает средний фон межгодовой изменчивости. На горизонте 50 м (ХПС) превышение аномалиями температуры межгодового СКО ($0,6^{\circ}\text{C}$) в отдельные годы начинает проявляться с 2010 г., устойчиво – с 2015 г., что часто отмечается в литературе как выход ХПС за границы изотермы 8°C . Следует отметить, что превышение температуры ядра ХПС 8°C не является чрезвычайно редким явлением, временами оно происходило и ранее (в конце 1930-х и в 1962–1972 гг.).

Также начиная с 2015 г. устойчивое превышение межгодового СКО ($0,2^{\circ}\text{C}$) наблюдается на горизонте 100 м. Глубже 150 м продолжается устойчивый многолетний рост температуры воды, прослеживаемый с самого начала океанографических наблюдений в Черном море. Наибольший сезонный рост

температуры в поверхностных слоях происходит в летне-осенний период, когда скорость потепления в 1,5–2 раза выше, чем в зимне-весенний сезон (рис. 7, а).

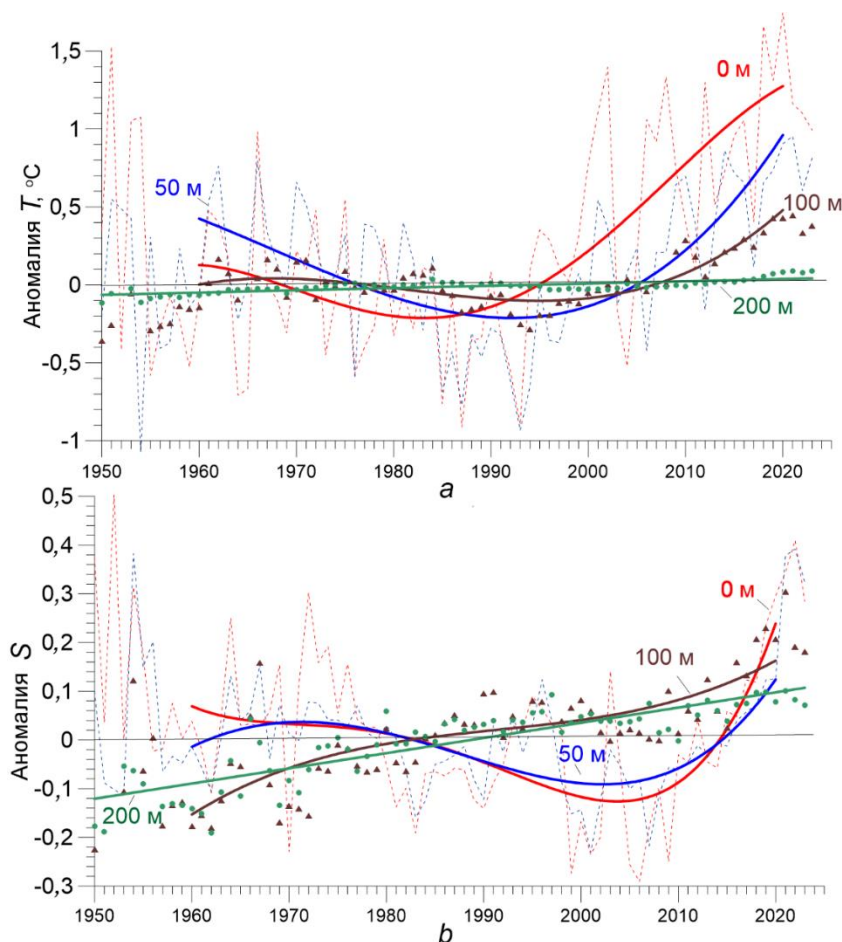
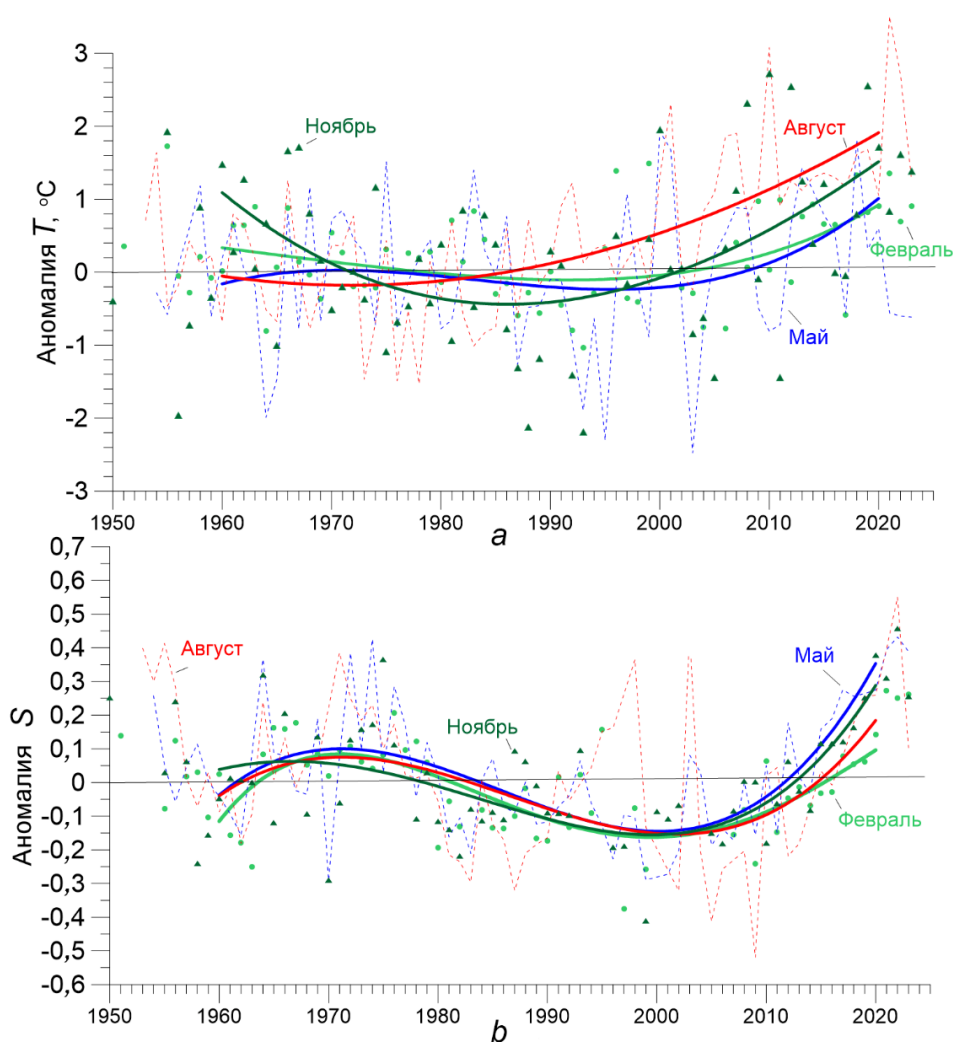


Рис. 6. Временной ход средних по Черному морю среднегодовых аномалий от климатического сезонного хода за период 1950–2023 гг. на различных горизонтах: для температуры воды (а) и солёности (b). Тонкие штриховые линии и символы отображают значения аномалий, жирные линии – аппроксимацию полиномами; разными цветами выделены отдельные горизонты

Fig. 6. Time-series of the Black Sea average annual anomalies relative to climatic seasonal variations at different depths for 1950–2023: water temperature (a) and salinity (b). Thin dashed lines and symbols show the anomaly values, thick lines – the polynomial approximation; individual depths are highlighted in different colors

После периода распреснения поверхностных слоев Черного моря в 1980–2010 гг. примерно с 2010–2012 гг. наблюдается резкий рост солёности (рис. 6, b). Среднегодовые аномалии тем не менее пока еще не превышают межгодового СКО солёности (0,4) и сопоставимы по величине с положительными аномалиями 1950–1970 гг. Качество измерения солёности в гидрологических съемках 1950-х гг. может вызывать сомнения, тем не менее измерения на морских гидрометеостанциях также свидетельствуют о высоких значениях солёности в тот период.



Р и с. 7. Временной ход средних по Черному морю среднемесячных аномалий от климатического сезонного хода за период 1950–2023 гг. на поверхности моря в центральные месяцы гидрологических сезонов года: для температуры воды (а) и солёности (b). Тонкие штриховые линии и символы отображают значения аномалий, жирные линии – аппроксимацию полиномами, разными цветами выделены отдельные месяцы

F i g. 7. Time-series of the Black Sea average monthly anomalies relative to climatic seasonal variations on the sea surface in the mid months of hydrological seasons for 1950–2023: water temperature (a) and salinity (b). Thin dashed lines and symbols show the anomaly values, thick lines – the polynomial approximation; individual months are highlighted in different colors

Межгодовые – междесятилетние тенденции для ХПС (горизонт 50 м) и поверхностного слоя аналогичны, в основном галоклине (≥ 75 м) продолжается постоянное долговременное увеличение солёности. Наибольший сезонный рост солёности в поверхностных слоях происходит весной и осенью, в месяцы положительной фазы водного баланса бассейна, что свидетельствует о его общем снижении и переходе региона к более засушливым условиям (рис. 7, b).

Заключение

По сравнению с глобальными оценками скорости климатического потепления за период 1950–2020 гг. линейный тренд роста температуры в поверхностном слое Черного моря ($0,2^{\circ}\text{C}/10$ лет) в целом выше среднего по Мировому океану. По этому показателю Черное море относится к районам с повышенной скоростью потепления, таким как тропические части Атлантики, Индийского океана и западной половины Тихого океана. В то же время черноморский тренд за 70-летний период не достигает таких высоких показателей, как в арктических морях, в зоне взаимодействия Гольфстрим-Лабрадорское течение или в Фолклендском течении. В период 1980–2020 гг. рост поверхностной температуры в Черном море значительно усилился и составил $0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет, уступая только трендам в арктических районах.

По сравнению с глобальными климатическими тенденциями в изменениях солёности за период 1950–2020 гг. черноморский тренд в поверхностном слое $0,03/10$ лет соответствует положительным трендам в районах с высокой солёностью, в частности в крупномасштабных субтропических круговоротах. Такая скорость резкого осолонения, как в Черном море в период 2000–2020 гг. ($0,18/10$ лет), в целом не характерна для океана. Подобные быстрые процессы присущи внутренним морям с ограниченным внешним водообменом, сильно зависящим от регионального баланса пресных вод.

В последовательности десятилетних колебаний общего гидрологического состояния Черного моря наступившая теплая и соленая фаза аналогична условиям 1960–1970 гг., но с большей амплитудой колебаний. И текущее состояние, и период 1960–1970 гг., в свою очередь, следуют за предшествующими им более холодными и менее солеными фазами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гертман И. Ф. Термохалинная структура вод моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия / под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. С. 146–195.
2. NOAA Atlas NESDIS 81. World Ocean Atlas 2018. Volume 1: Temperature / R. A. Locarnini [et al.]; techn. ed. A. Mishonov. Silver Spring, MD, USA : NOAA. 2019. 52 p. https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18_vol1.pdf
3. NOAA Atlas NESDIS 82. World Ocean Atlas 2018. Volume 2: Salinity / M. M. Zweng [et al.]; techn. ed. A. Mishonov. Silver Spring, MD, USA : NOAA, 2019. 50 p. https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18_vol2.pdf
4. Digital atlas and evaluation of the influence of inter-annual variability on climate analyses / A. M. Suvorov [et al.] // Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future. San Diego, CA, USA. IEEE, 2003. Vol. 2. P. 990–995. (IEEE Cat. No. 03CH37492). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178468>
5. Полонский А. Б., Шокурова И. Г., Белокопытов В. Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солёности в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 6. С. 27–41. EDN TGIIVH.
6. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations / S. Miladinova [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122, iss. 7. P. 5624–5644. <https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
7. Полонский А. Б., Серебренников А. Н. Изменение характера температурных аномалий поверхности Черного моря в период потепления конца 20-го – начала 21-го вв. // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 118–132. EDN DGILDM. doi:10.31857/S0205961423060064

8. Белокопытов В. Н. Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 33–41. EDN TOERWX.
9. Untangling spatial and temporal trends in the variability of the Black Sea Cold Intermediate Layer and mixed Layer Depth using the DIVA detrending procedure / A. Capet [et al.] // Ocean Dynamics. 2014. Vol. 64, iss. 3. P. 315–324. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0683-4>
10. Formation and changes of the Black Sea cold intermediate layer / S. Miladinova [et al.] // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 167. P. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.07.002>
11. Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B. Climate Change and Regional Ocean Water Mass Disappearance: Case of the Black Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
12. Полонский А. Б., Новикова А. М. Долгопериодная изменчивость характеристик холодного промежуточного слоя в Черном море и ее причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 29–37. EDN YCSZMV.
13. Cressman G. P. An Operational Objective Analysis Scheme // Monthly Weather Review. 1959. Vol. 87, iss. 10. P. 367–374. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1959\)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2)
14. Barnes S. L. A Technique for Maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1964. Vol. 3, iss. 4. P. 396–409. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2)
15. A numerically efficient data analysis method with error map generation / M. Rixen [et al.] // Ocean Modelling. 2000. Vol. 2, iss. 1–2. P. 45–60. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(00\)00009-316](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(00)00009-316).
16. divand-1.0: n-dimensional variational data analysis for ocean observations / A. Barth [et al.] // Geoscientific Model Development. 2014. Vol. 7, iss. 1. P. 225–241. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-225-2014>
17. Белокопытов В. Н. Ретроспективный анализ термохалинных полей Черного моря на основе методов эмпирических ортогональных функций // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 5. С. 412–421. EDN YMQLYT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-412-421>
18. 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 and Oceanographic Abstracts. 1976. Vol. 23, iss. 7. P. 559–582. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(76\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90001-2)
19. Григорьев А. В., Иванов В. А., Капустина Н. А. Корреляционная структура термохалинных полей Черного моря в летний сезон // Океанология. 1996. Т. 36, № 3. С. 364–369.
20. Полонский А. Б., Шокурова И. Г. Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солености в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 1. С. 51–65. EDN YORJZR.
21. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.

Об авторах:

Белокопытов Владимир Николаевич, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, 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, v.belokopytov@gmail.com**

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, alenixx@gmail.com**