

Тенденции ускорения климатических изменений термохалинной структуры верхнего слоя Черного моря

Г. К. Коротаев, В. Н. Белокопытов, В. Л. Дорофеев ✉,
А. И. Мизюк, О. С. Пузина, А. Л. Холод

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ dorofeyev_viktor@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 05.03.2025;
принята к публикации 13.03.2025.

Аннотация

Цель. Оценить тенденции изменения термохалинной структуры Черного моря на межгодовых временных масштабах в 2000–2020 гг. на основе трех реанализов, выполненных по разным методикам, и непосредственных наблюдений – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Для выполнения исследования используются четыре набора данных. Первый представляет собой массив профилей температуры и солёности на регулярной сетке с временной дискретностью 10 сут и пространственным разрешением $10' \times 15'$ для периода 2000–2021 гг. на базе 13952 океанографических станций. Второй набор основан на результатах реанализа, выполненного на основе модели циркуляции Черного моря Морского гидрофизического института. В качестве атмосферного воздействия использовались результаты атмосферного реанализа ERA-5. В модели ассимилировались спутниковые данные температуры поверхности моря и альтиметрии. Третий набор данных представляет собой результаты реанализа, полученного на основе региональной конфигурации комплекса NEMO. Атмосферное воздействие также задавалось на основе результатов реанализа ERA-5. Для ассимиляции использовались массивы профилей температуры и солёности, данные спутниковых альтиметрических измерений и измерений температуры поверхности моря. В качестве четвертого набора использовался продукт BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004 морской службы Copernicus, содержащий реанализ среднесуточных полей для бассейна Черного моря с 01.01.1993 по 30.06.2021 гг. На основе четырех наборов данных проанализированы тенденции изменения температуры и солёности в верхнем слое Черного моря.

Выводы. Показано, что в результате роста средней температуры поверхности моря в акватории Черного моря (начиная с 2005 г.) наблюдается тенденция исчезновения холодного промежуточного слоя в его традиционном понимании как подповерхностного слоя с температурой воды $\leq 8^\circ\text{C}$. Кроме того, наблюдается ускоренное потепление вод моря в пределах основного пикноклина. Халинный режим моря при этом характеризуется переходом от распреснения к осолонению поверхностного слоя в 2012–2015 гг., связанным с изменением внешнего бюджета пресных вод, и долговременным повышением солёности вод в основном пикноклине.

Ключевые слова: ретроспективный анализ, Черное море, температура морской воды, солёность, климатические изменения, термохалинная структура

Благодарности: подготовка данных наблюдений (массив 1) и климатических профилей выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014, подготовка численных моделей для проведения расчетов выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012, расчеты реанализов на основе модели МГИ (массив 2) и модели NEMO (массив 3) подготовлены в рамках тем государственных заданий ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2023-0001 и Минобрнауки FMWE-2023-0002 Федеральной программы «Климат» и «Экология».

Для цитирования: Тенденции ускорения климатических изменений термохалинной структуры верхнего слоя Черного моря / Г. К. Коротаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 264–278. EDN RHIKLY.

Original article

Trends in Acceleration of Climate Changes in the Thermohaline Structure of the Black Sea Upper Layer

G. K. Korotaev, V. N. Belokopytov, V. L. Dorofeev, A. I. Mizyuk,
O. S. Puzina, A. L. Kholod

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ dorofeyev_viktor@mail.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to assess the trends in a change of the Black Sea thermohaline structure on the interannual time scales in 2000–2020 based on three reanalyses performed using different methods, as well as direct observations.

Methods and Results. Four datasets are applied to perform the research. The first one is an array of temperature and salinity profiles on a regular grid with a 10-day time resolution and a $10' \times 15'$ spatial resolution for 2000–2021, which is based on the data of 13952 oceanographic stations. The second set is formed according to the results of reanalysis carried out using the MHI Black Sea circulation model. The ERA-5 atmospheric reanalysis results are used as an atmospheric forcing. The satellite data on sea surface temperature and altimetry are assimilated in the model. The third dataset represents the reanalysis results obtained based on the NEMO model regional configuration. The atmospheric forcing is also preset using the ERA-5 reanalysis results. The following data are engaged in assimilation: the arrays of temperature and salinity profiles, and the satellite altimetry and sea surface temperature measurements. The BLKSEA_MULTYEAR_PHY_007_004 product of the Copernicus Marine Service containing the reanalysis of daily average fields for the Black Sea basin from 01.01.1993 to 30.06.2021 constitutes the fourth set. The described four data sets have made it possible to analyze the trends in temperature and salinity changes in the upper layer of the Black Sea.

Conclusions. It is shown that since 2005, an increase in the average sea surface temperature in the Black Sea area has resulted in a tendency towards the disappearance of cold intermediate layer in its traditional understanding as a subsurface layer with a water temperature $\leq 8^\circ\text{C}$. Besides, the accelerated sea water warming within the main pycnocline is observed. The sea haline regime in 2012–2015 is characterized by a transition from freshening to salinization of the sea surface layer that is related to a change in the external budget of fresh water, and a long-term increase in water salinity in the main pycnocline.

Keywords: retrospective analysis, Black Sea, seawater temperature, salinity, climatic changes, thermohaline structure

Acknowledgments: The observational data (array 1) and climate profiles were prepared within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0014, the numerical models intended for simulations were prepared within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012, reanalysis calculations based on the MHI model (array 2) and the NEMO model (array 3) were prepared within the framework of state assignments of FSBSI FRC MHI FNNN-2023-0001) and the Ministry of Education and Science FMWE-2023-0002 of the Federal programs “Climate” and “Ecology”.

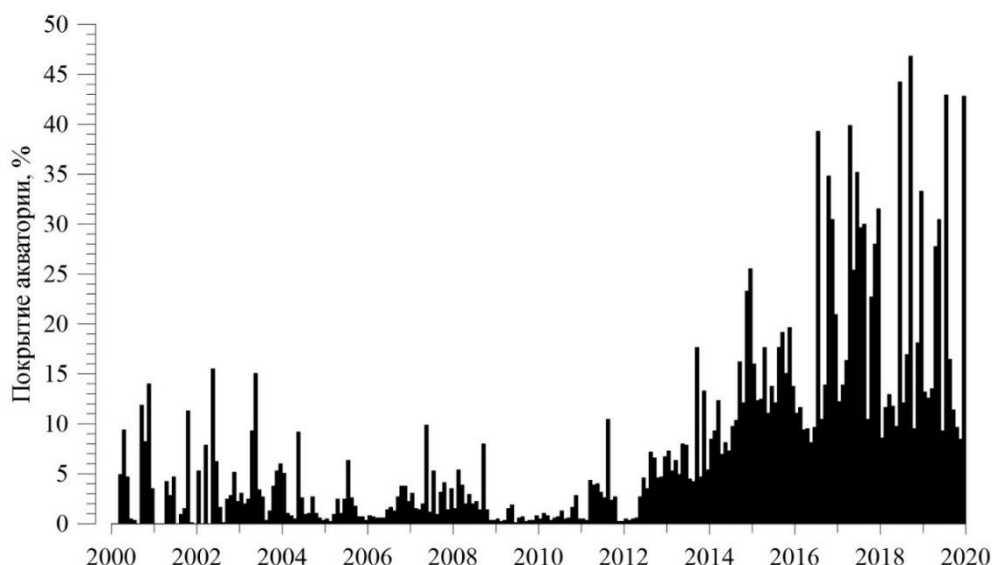
For citation: Korotaev, G.K., Belokopytov, V.N., Dorofeev, V.L., Mizyuk, A.I., Puzina, O.S. and Kholod, A.L., 2025. Trends in Acceleration of Climate Changes in the Thermohaline Structure of the Black Sea Upper Layer. *Physical Oceanography*, 32(3), pp. 283–296.

Введение

Черное море является полузамкнутым водоемом, полностью окруженным сушей и соединяющимся с Мировым океаном через Средиземное и Мраморное моря и сеть проливов. Черноморский бассейн имеет положительный водный баланс и характерную термохалинную структуру вод с резким халоклином и холодным промежуточным слоем (ХПС). Помимо этого, Черное море имеет и свои особенности межгодовой и многолетней изменчивости термохалинной структуры вод, которые во многом отличаются от других морей. В слое основного пикноклина поступающие средиземноморские воды вызывают устойчивую тенденцию медленного, но постоянного нагревания и осолонения. В верхнем же слое моря эта тенденция меняется на хорошо выраженные междесятилетние колебания [1]. Различные сочетания положительных и отрицательных аномалий содержания тепла и солей в верхнем 100-метровом слое формируют временную последовательность 10–20-летних периодов гидрологического режима Черного моря – холодного и соленого 1950-х гг., теплого и соленого 1970–80-х гг. и т. д. На рубеже 2010–2015 гг. произошел переход от распресненного и теплого периода 2000-х гг. к современному состоянию, характеризующемуся более высокой температурой и соленостью [1–3].

Более детальное исследование процесса перехода к современным климатическим условиям затрудняется тем обстоятельством, что в период 1996–2013 гг. произошло резкое сокращение инструментальных измерений в Черном море (рис. 1). Относительная доля покрытия глубоководной части его акватории упала до 0–10% по сравнению с 70–100% в 1980-х гг., и лишь начиная с 2014 гг. благодаря возобновлению океанографических съемок в экономической зоне РФ и работе буев-профиломеров она возросла до 20–40%. Восполнить имеющийся пробел в обеспеченности данными наблюдений возможно только с помощью массивов реанализов, созданных на основе численных термогидродинамических моделей. В работе [4] представлены результаты оценок тенденций изменения состояния морской среды на межгодовых временных масштабах в 2000–2020 гг. на основе трех реанализов, выполненных по разным методикам, и непосредственных наблюдений в те периоды, когда они достаточно равномерно покрывали акваторию Черного моря. Сравнение результатов расчетов, выполненных различными методами, позволило определить общие климатические тенденции и выявить степень их различия в воспроизведении природных процессов в определенные периоды. В частности, в этой работе показано, что известные ранее тенденции прогрева вод моря, приводящие к эпизодическому исчезновению ХПС в его традиционных границах с температурой воды в ядре ниже 8°C, значительно ускорились после 2012 г. В результате в 2020 г. полностью прекратилось обновление ХПС в зимний период.

Цель настоящей работы – детализация анализа термических изменений в верхнем слое Черного моря в 2000–2020 гг. и обсуждение тенденций изменения в поле солености морской воды.



Р и с. 1. Относительная доля покрытия глубоководной части Черного моря (%) данными океанографических наблюдений в 2000–2020 гг.

F i g. 1. Relative portion of coverage of the Black Sea deep part (%) with oceanographic observation data in 2000–2020

Методы оценки тенденций изменения термохалинных характеристик Черного моря

В данной работе оценки тенденций изменения термохалинных характеристик Черного моря проводились, как и в [4], по данным непосредственных наблюдений и результатам трех реанализов, основанных на применении разных методик.

Непосредственный анализ данных наблюдений. Массив данных температуры и солёности был подготовлен на регулярной сетке (массив 1) с пространственным разрешением $10' \times 15'$ и дискретностью 10 сут. Для создания этого массива использовался метод оптимальной интерполяции Гандина¹. Система уравнений интерполяции решалась методом Гаусса, ошибка наблюдений оценивалась как сумма инструментальной погрешности и среднеквадратического отклонения мезомасштабной изменчивости. В качестве нормы для аномалий использовались климатические среднемесячные поля температуры и солёности. Принималось допущение об изотропности в Черном море пространственных корреляционных функций [5, 6], в качестве автокорреляционной функции использовалось приближение из работы [5], аппроксимирующее структуру гауссовых полей в зависимости от глубины. Всего для периода 2000–2021 гг. было подготовлено 16845 профилей в узлах регулярной сетки на основе 13952 океанографических станций. При этом задавалось условие, согласно которому число случаев экстраполяции для заполнения свободного пространства максимально ограничивалось.

¹ Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Ленинград : Гидрометеиздат, 1963. 287 с.

Реанализ на основе модели циркуляции Черного моря Морского гидрофизического института (МГИ). При проведении реанализа за основу была взята модель циркуляции Черного моря МГИ, основанная на аппроксимации системы примитивных уравнений динамики океана [7]. 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. В местах впадения крупных рек задавались климатические значения расходов. Для учета водообмена через Босфор на горизонтах, соответствующих нижнебосфорскому течению, задавались скорости, определяемые по климатическому расходу, и соленость 36. На горизонтах, соответствующих верхнебосфорскому течению, где вода вытекает из Черного моря, задавалось постоянное значение скорости, обеспечивающее водный баланс за рассматриваемый период времени.

В граничных условиях на свободной поверхности моря для уравнений модели циркуляции применялись параметры из результатов атмосферного реанализа *ERA-5 (ECMWF)* [8]: приповерхностный ветер, потоки тепла и пресной воды, солнечная радиация. Пространственное разрешение использованных атмосферных полей составляет $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, частота по времени 1 ч.

В модели циркуляции Черного моря ассимилировались спутниковые данные температуры поверхности моря (ТПМ) и альтиметрии. Температура поверхности представляла собой подготовленный *CMEMS* ежесуточный набор данных на регулярной сетке с пространственным разрешением $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. Альтиметрические данные (*CMEMS*) подготовлены в виде *L4* аномалий уровня моря (*SLA*) на регулярной сетке ($0,15^\circ \times 0,15^\circ$), рассчитанных по отношению к среднему значению за 20 лет (1993–2012). Для ассимиляции в модели циркуляции аномалии уровня преобразовывались в возвышение свободной поверхности. Для этого использовалась средняя динамическая топография, которая была рассчитана по результатам реанализа (1993–2012) [9]. Среднегодовые профили температуры и солености были подготовлены на основе всех имеющихся за рассматриваемый период гидрографических съемок и данных буев *Argo*.

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 [10]. Профили температуры и солености подправлялись в каждой точке пропорционально разности между измеренной величиной возвышения свободной поверхности моря и модельной. При этом весовые коэффициенты, зависящие от глубины, вычислялись по кроссковариационным функциям ошибок уровня и солености и/или температуры.

Значения температуры и солености корректировались на горизонтах ниже 500 м в соответствии со среднегодовыми профилями, полученными по всем

доступным данным контактных измерений. Этот массив данных в дальнейшем идентифицируется как массив 2.

Реанализ на основе модели *NEMO*. Для проведения реанализа (далее упоминается как массив 3) использована региональная конфигурация комплекса численного моделирования динамики океана *NEMO*², позволяющая воспроизводить динамику и тренды гидрофизических параметров в морях Эвксинского каскада (Черное, Азовское и Мраморное моря (*BAMS24*)) [11]. Расчетная сетка – географическая и покрывает отмеченные бассейны с шагами по пространству $\approx 4,6 \times 4,6$ км.

Атмосферное воздействие задавалось на основе полей реанализа *ERA-5* (*ECMWF*) [8]. Использовались поля температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, компоненты горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, суммарные осадки и осадки в твердой фазе. Отмеченные метеопараметры с исходной дискретностью по времени использовались для расчета суммарных потоков тепла, массы и напряжения трения ветра согласно балк-формулам протокола *CORE*³.

В региональной конфигурации учитываются климатические расходы 16 рек в бассейне Черного моря. В акватории Азовского моря и соответственно для водообмена в Керченском проливе учитываются реальные изменения водного баланса со временем. С этой целью используются данные наблюдений объемного стока рек Дон и Кубань⁴. На выходе из пролива Дарданеллы западнее о. Мармара задаются граничные условия на открытой жидкой границе. Для этого используются квазиреальные изменения уровня моря, баротропных и бароклинных скоростей течений, температуры и солености, полученные на основе продуктов глобальной системы реанализа *CMEMS*⁵.

Для проведения ретроспективного анализа за период 2000–2021 гг. использовалась следующая база данных наблюдений:

- объединенный массив профилей температуры и солености в акватории Черного моря из массивов *EasyCORA* службы *CMEMS* (1999–2021) и океанографической базы *SeaDataNet* (<https://www.seadatanet.org/>) (1999–2008);
- данные спутниковых альтиметрических измерений уровня морской поверхности уровня обработки *L4* (на регулярной сетке), предоставляемые службой морских прогнозов *CMEMS* (<https://doi.org/10.48670/moi-00141>);
- спутниковые данные ТПМ Черного моря на регулярной сетке уровня обработки *L4* (на регулярной сетке), предоставляемые службой морских прогнозов *CMEMS* (<https://doi.org/10.48670/moi-00160>).

Восстановление трехмерных полей температуры и солености моря для ассимиляции в модели осуществляется на базе процедуры совместного анализа

² NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. France : IPSL, 2016. 412 p. (Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>

³ Large W. G., Yeager S. G. Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. USA, Colorado : National Center for Atmospheric Research, 2004. 105 p. <https://doi.org/10.5065/D6KK98Q6>

⁴ Основные гидрологические характеристики морских устьев рек европейской территории России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620681.

⁵ Global Ocean Physics Analysis and Forecast. Copernicus Marine Monitoring Service. <https://doi.org/10.48670/moi-00016>

аномалий альтиметрического уровня и профилей температуры и солёности, представленной в [12]. Так же, как и в указанной работе, определялась базовая термохалинная стратификация бассейна в заданном временном диапазоне, однако окно осреднения достигало максимального значения 180 сут при малом количестве наблюдений. При отсутствии достаточного количества наблюдений в отдельные годы в начале нулевых базовая стратификация рассчитывалась по соседним значениям посредством интерполяции.

Далее находились зависящие от глубины коэффициенты прямой регрессии между значениями альтиметрического уровня моря (уровня обработки $L4$) в заданном временном окне и отклонениями наблюдений температуры и солёности от базовой стратификации. Полученные коэффициенты использовались для восстановления трехмерных массивов псевдоизмерений температуры и солёности морской воды *Tobs* и *Sobs*.

Ассимиляция данных проводилась по следующей гибридной процедуре. В слое главного пикноклина выполнялась релаксация полей температуры и солёности к трехмерным массивам псевдоизмерений *Tobs* и *Sobs* по всей глубине для солёности и в слое глубже 60 м – для температуры. В верхнем слое моря также ассимилировались спутниковые альтиметрические наблюдения согласно процедуре, описанной в работе [9]. Ассимиляция данных ТПМ осуществлялась посредством коррекции потока тепла в верхнем слое ².

Реанализ CMEMS (массив 4). Данный продукт *BLKSEA_MULTITYEAR_PHY_007_004* морской службы *Copernicus* представляет собой среднесуточные гидродинамические поля Черного моря с 01.01.1993 по 30.06.2021 гг., полученные на основе реанализа. Для промежутка времени до конца 2018 г. эти поля анализировались ранее в работе [3]. Гидродинамическое ядро реанализа основано на модели общей циркуляции океана *NEMO v4* и ее конфигурации для бассейна Черного моря с горизонтальным разрешением $1/27^\circ \times 1/36^\circ$ на 31 вертикальном уровне. В качестве атмосферного форсинга используются атмосферные поля *ERA-5* системы *ECMWF* с пространственным разрешением $1/4^\circ$ и временным разрешением 1 ч. В текущей конфигурации для расчета реанализа закрыта граница в проливе Босфор. Ассимиляция данных осуществлялась на основе вариационной схемы *3DVAR*, для реализации которой использовалась программа *OceanVar* [13, 14]. При выполнении реанализа ассимилировались данные *in situ* измерений температуры и солёности из наборов *SeaDataNet* и *CMEMS* и спутниковые данные вдоль трековых аномалий уровня морской поверхности (*CMEMS*).

Отметим, что основная разница между массивами 3 и 4 заключается, во-первых, в процедуре ассимиляции данных: для реконструкции массива 3 использовалась оригинальная процедура, разработанная в МГИ, суть которой представлена выше. Различаются также версии используемых моделей, параметры расчетных сеток. Кроме того, в реанализе МГИ (массив 3) бассейн Мраморного моря также учитывается в расчетах, что должно отразиться на характеристиках водообмена через пролив Босфор. По-видимому, ввиду различия размеров ячеек расчетной сетки можно ожидать, что коэффициенты турбулентного обмена и шаг по времени при выполнении двух реанализов также будут различны, однако более подробная информация при описании массива 4 авторами не приводится.

Основные тенденции изменений поля температуры и солёности Чёрного моря в 2000–2020 гг.

Подготовленные массивы результатов трех реанализов и данных наблюдений в отдельные месяцы, когда гидрологические зондирования более или менее равномерно покрывают акваторию Чёрного моря, используются далее для анализа тенденций изменений температуры и солёности морской воды за последние 20 лет. Если в данных рассматриваемых реанализов наблюдаются существенные расхождения, достоверными считаются те, которые близки не менее чем в двух из них. Такой подход вызван тем, что выполненные на основе разных моделей реанализы могут давать заметный разброс в результатах ⁶ [15].

Тенденции изменений полей температуры и структуры ХПС. В работе [4] рассматриваются тенденции нагрева верхнего слоя Чёрного моря на основе анализа изменений средних значений температуры для горизонтов 60 м вблизи минимума температуры ХПС и 150 м на нижней границе основного пикноклина по данным трех реанализов. В данной работе процесс потепления верхнего 200-метрового слоя Чёрного моря будет иллюстрироваться в основном поведением ХПС.

Временной ход осредненной по площади бассейна Чёрного моря температуры на горизонте 5 м показан на рис. 2. Приведенный график демонстрирует явно выраженный сезонный ход приповерхностной температуры и межгодовую изменчивость ее максимальных и минимальных значений. При этом все реанализы дают близкие значения изменения температуры.

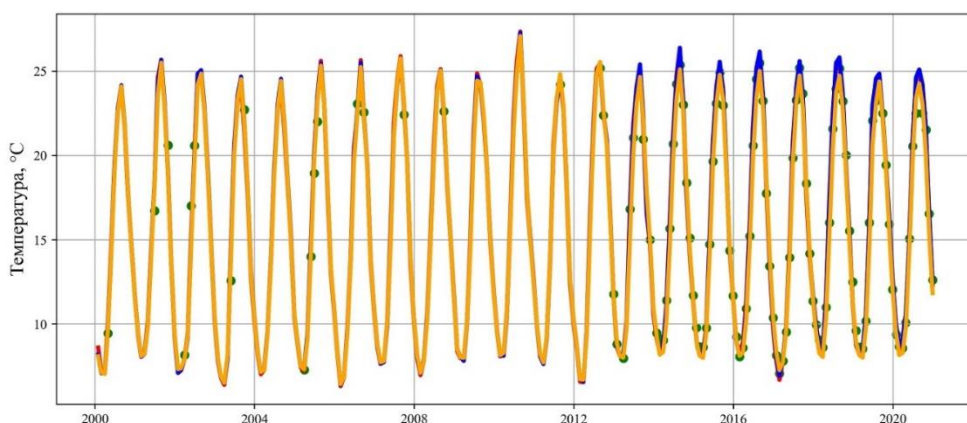
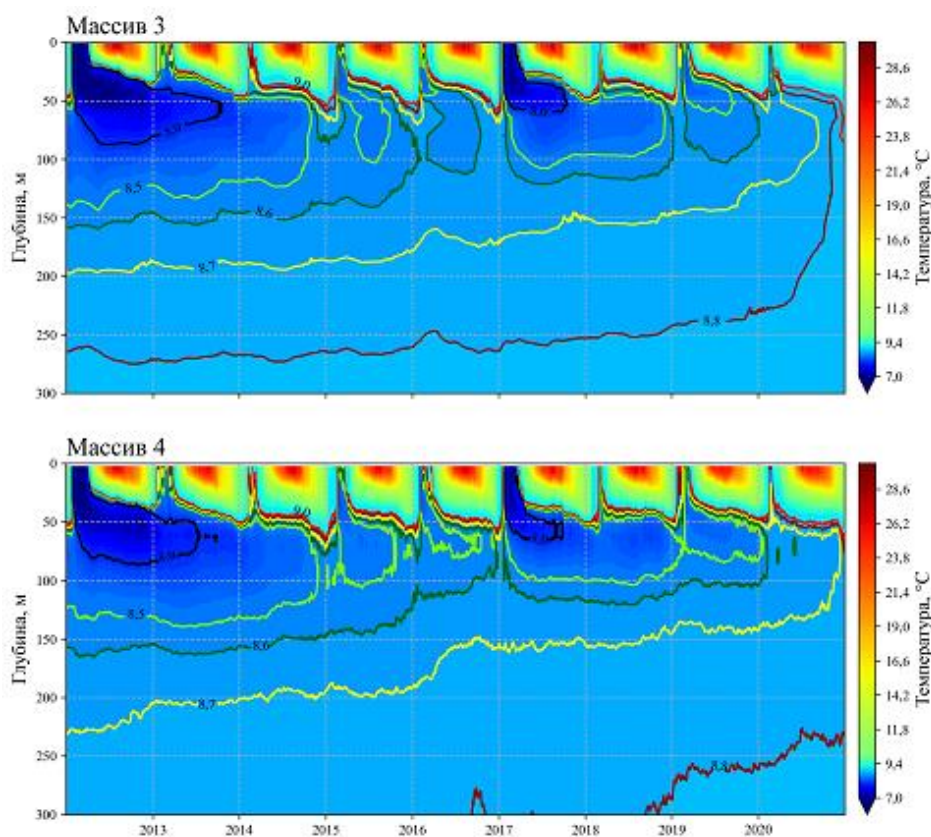


Рис. 2. Временной ход средней по площади температуры на горизонте 5 м, полученной по трем реанализам. Красная линия соответствует массиву 3, синяя – массиву 4, желтая – массиву 2. Зеленые кружочки показывают измерения

Fig. 2. Time evolution of the area-averaged temperature at the 5 m horizon resulted from three reanalyses. Red line corresponds to array 3, blue line – to array 4, and yellow one – to array 2. Green circles denote measurements

⁶ Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge : Cambridge University Press, 2023. 2392 p.
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 41 № 3 2025

Близость временного хода температуры на горизонте 5 м в разных реанализах в значительной степени определяется тем, что в каждом из них ассимилируются спутниковые наблюдения ТПМ. Поэтому в приповерхностном слое моря временной ход температуры в реанализах близок к спутниковой ТПМ (см. рис. 1 из работы [4]) и соответственно – друг к другу. До 2012 г. число минимумов средних значений приповерхностной температуры Черного моря ниже 8°C довольно велико, затем оно заметно снижается. В работе [4] приведены временные диаграммы изменения средних по горизонтальным сечениям значений температуры морской воды для всех трех реанализов. При этом все реанализы демонстрируют наличие областей воды, ограниченных изотермой 8°C, вплоть до 2012 г. с небольшими перерывами. Кроме того, хорошо видно обновление вод ХПС холодными поверхностными водами в зимнее время. Затем традиционный ХПС, ограниченный изотермой 8°C и вентилируемый во время зимней конвекции, наблюдается реже.



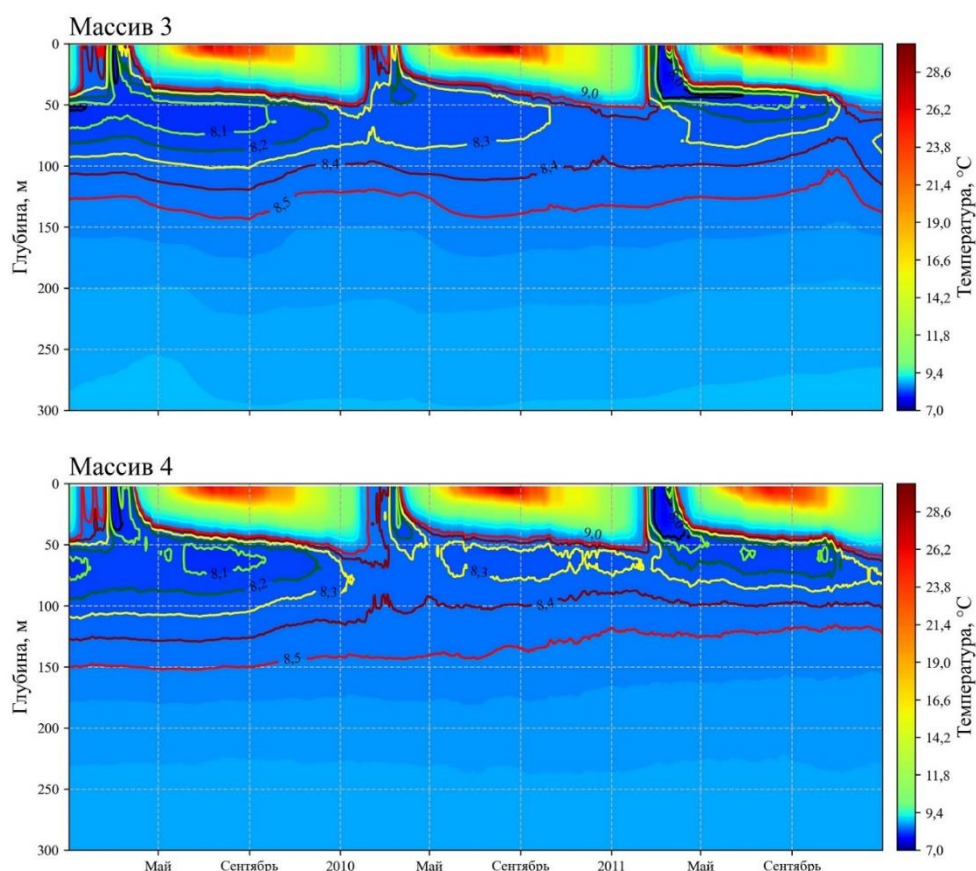
Р и с. 3. Временная диаграмма изменений средней по горизонтальным сечениям температуры морской воды в глубоководной части Черного моря для двух реанализов

F i g. 3. Time diagram of changes in sea water temperature average over the horizontal cross-sections in the Black Sea deep part for two reanalysis

В настоящей работе более подробно рассмотрено поведение ХПС с 2012 г., т. е. в период наибольшего нагревания верхнего слоя Черного моря.

Согласно рис. 5 из работы [4], увеличение скорости роста температуры после 2012 г. демонстрирует линейная регрессия, построенная по данным наблюдений и всех реанализов для временных интервалов 2000–2011 и 2012–2020 гг. Для второго периода времени наблюдается практически двукратное увеличение скорости роста температуры морской воды. На рис. 3 представлены диаграммы изменения по времени средних по площади горизонтов значений температуры в верхнем 300-метровом слое для массивов данных 3 и 4. Массив 2, как показано в работе [4], дает несколько завышенные значения температуры морской воды на горизонте 60 м, примерно соответствующие глубине ядра ХПС, и не воспроизводит зимнюю конвекцию 2017 г. (рис. 3 из работы [4]). В то же время массивы 3 и 4 демонстрируют сходные изменения температуры в течение исследуемого периода времени.

В 2012 г. наблюдалась холодная зима. В результате зимней конвекции восстановился ХПС с температурой в ядре ниже 8°C . Такая температура продержалась примерно до середины 2013 г. При этом в предыдущие три года температура в ядре ХПС превышала 8°C (рис. 4).

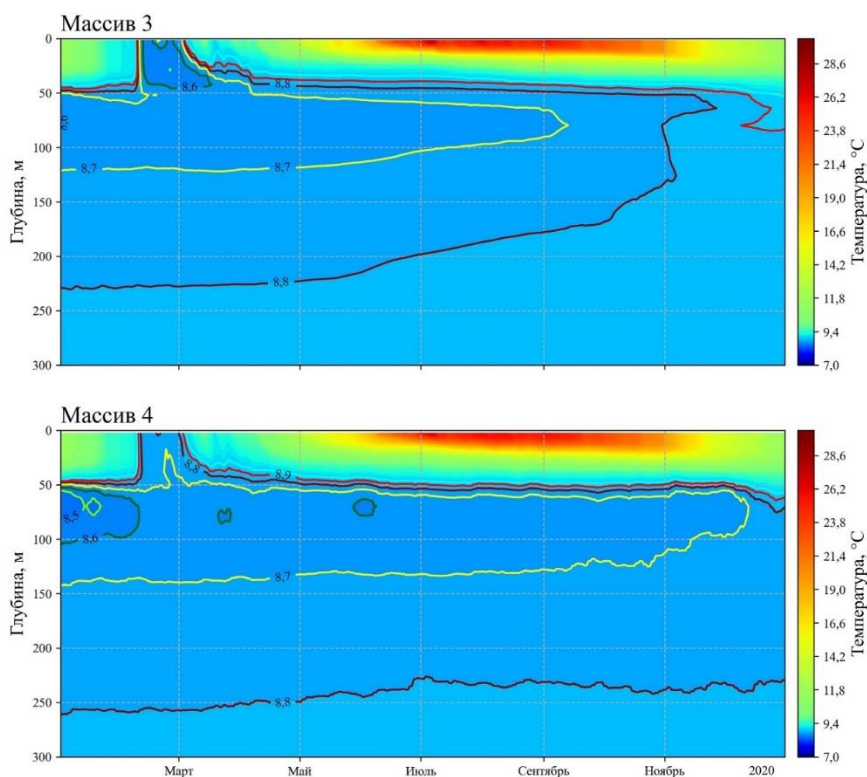


Р и с. 4. То же, что на рис. 3, для 2009–2011 гг.

Fig. 4. The same as in Fig. 3, for 2009–2011

После 2013 г. сохраняется традиционный вентилируемый ХПС, однако значения температуры в его ядре увеличиваются до 8,5–8,6°C. В 2017 г. в акватории Черного моря наблюдалась довольно холодная зима с минимальными значениями приповерхностной температуры ниже 8°C (рис. 2), что было близко к условиям зимы 2004 г. Сформировавшийся в результате зимней конвекции традиционный вентилируемый ХПС имеет существенно меньший холодозапас, чем в 2004 г. Поступившая в ХПС масса холодных вод в 2017 г. поддерживала далее этот слой с увеличивающимися значениями температуры в ядре до 8,6–8,7°C к концу 2018 г. В следующем 2019 г. зимняя приповерхностная температура опустилась немного ниже 8°C, при этом ХПС, сформировавшийся в результате зимней термической конвекции, имел температуру морской воды в ядре уже 8,5°C. Затем она поднялась до 8,6°C к концу года.

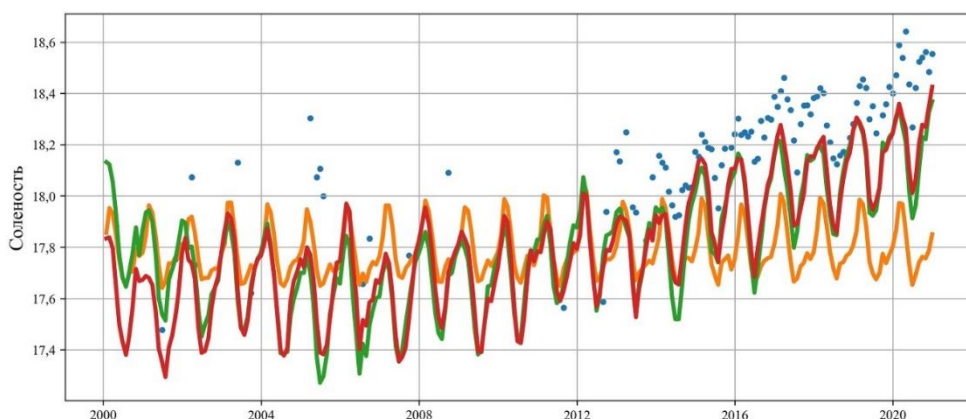
В 2020 г. зимняя термическая конвекция не достигает 50 м, поэтому традиционный вентилируемый ХПС, который формируется поступлением поверхностных холодных вод, не возобновляется (рис. 5). Такое явление не наблюдалось за всю историю океанографических исследований в Черном море. Согласно данным массивов 3 и 4, на горизонте ~ 75 м, тем не менее, наблюдается минимум температуры со значением ~ 8,7°C. Этот слой с минимумом температуры по своей природе отличается от традиционного ХПС, вентилируемого в зимний период. Его существование обусловлено исключительно наличием теплых вод с температурой более 9°C у дна бассейна.



Р и с. 5. То же, что на рис. 3, для 2020 г.

Fig. 5. The same as in Fig. 3, for 2020

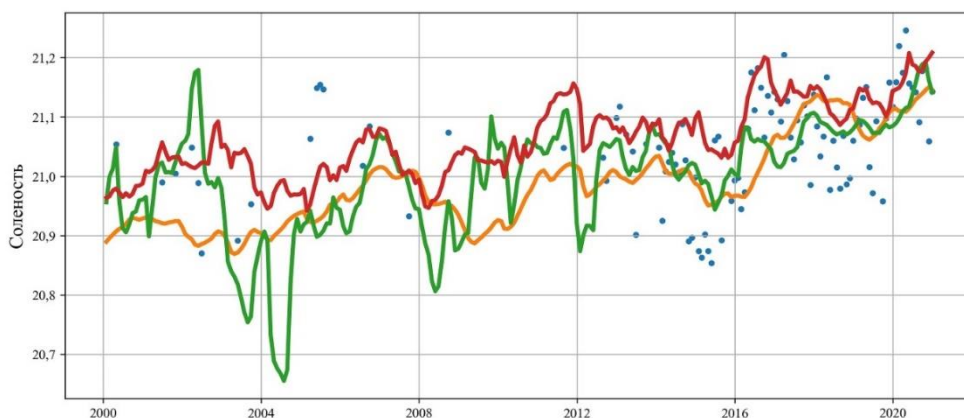
Тенденции изменения полей солёности. Рассмотрим тенденции изменения солёности морской воды за рассматриваемый период. На рис. 6 приведены графики изменения со временем осредненной по площади глубоководной части Черного моря солёности на горизонте 5 м. На этом рисунке хорошо просматривается тенденция повышения солёности в поверхностном слое моря. Видно, что солёность поверхностных вод глубоководной части бассейна имеет пониженное значение в 2000–2008 гг., достигая среднегодового значения $\sim 17,6$ в 2006–2007 гг. Максимальное распреснение, которого поверхностные воды Черного моря достигли к 2005–2006 гг., ранее уже отмечалось по данным наблюдений, но малое количество измерений не позволяло дать достоверные количественные оценки этого состояния, хотя оценки водного баланса в атмосферных реанализах косвенно подтверждали это. Начиная с 2008 г. солёность поверхностных вод растёт в массивах реанализов 3 и 4 и по данным наблюдений, доходя до 18,1–18,15 в 2019–2020 гг. Наблюдаемые изменения солёности поверхностного слоя Черного моря соответствуют примерно 20-летней цикличности, которая ассоциируется с колебаниями бюджета пресных вод, поступающих в Черное море.



Р и с. 6. Временная эволюция среднemesячных значений солёности морской воды на горизонте 5 м для каждого из реанализов и по имеющимся наблюдениям. Красная линия соответствует массиву 4, зеленая – массиву 3, желтая – массиву 2. Синие точки показывают результаты измерений

F i g. 6. Temporal evolution of monthly average values of seawater salinity at the 5 m horizon for each reanalysis and based on available observations. Red line corresponds to array 4, green line – to array 3, and yellow one – to array 2. Blue points denote measurement results

По всем реанализам, представленным в данной работе, на горизонте 150 м, что примерно соответствует нижней границе пикноклина, наблюдается рост значений солёности морской воды примерно на 0,2 за 20 лет (рис. 7). Тенденция непрерывного роста температуры и солёности в нижних слоях основного пикноклина отмечается с начала регулярных гидрологических наблюдений в Черном море [16] и указывает на нестационарность халинного режима бассейна, связанную с поступлением солёных и теплых средиземноморских вод через пролив Босфор.



Р и с. 7. То же, что на рис. 6, для горизонта 150 м
Fig. 7. The same as in Fig. 6, for the 150 m horizon

Заключение

В настоящей работе проведено изучение тенденций изменения гидрологического режима Черного моря. Оно основано на данных реанализов, выполненных тремя различными способами, подкрепленных там, где это возможно, непосредственными наблюдениями. Анализ показал, что в результате роста средней ТПМ в акватории Черного моря (начиная с 2005 г.) наблюдается тенденция исчезновения черноморского ХПС в его традиционном понимании как подповерхностного слоя с температурой воды $\leq 8^{\circ}\text{C}$. Кроме того, наблюдается ускоренное потепление вод моря в пределах основного пикноклина. Сохранение отмеченных тенденций в течение 8–10 лет может привести к значительным изменениям вертикальной стратификации вод Черного моря, что, по-видимому, окажет влияние на биоресурсы бассейна. Халинный режим моря при этом характеризуется переходом от распреснения к осолонению поверхностного слоя моря в 2012–2015 гг., связанным с изменением внешнего бюджета пресных вод и долговременным повышением солености вод в основном пикноклине. В итоге можно ожидать обострения плотностной стратификации в бассейне и замедления процесса вентиляции глубинных вод в связи с медленным постоянным подъемом основного пикноклина и потеплением поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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>

4. Acceleration of Climate Change in the Upper Layer of the Black Sea / G. K. Korotaev [et al.] // *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 518, iss. 1. P. 1550–1555. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602797>
5. 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.
6. 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.
7. Демьшиев С. Г., Коротаев Г. К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. Москва : ИВМ РАН, 1992. С. 163–231. EDN ZHFEIP.
8. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
9. 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. EDN VTPCZH.
10. Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2004. № 1. С. 52–68. EDN YXQYNN.
11. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели / А. И. Мизюк [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 496–510. EDN XHZXAR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-496-510>
12. Коротаев Г. К., Лишаев П. Н., Кныш В. В. Восстановление трехмерных полей солености и температуры Черного моря по данным спутниковых альтиметрических измерений // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 199–212. EDN VTOVQN. <https://doi.org/10.7868/S0205961416010073>
13. Dobricic S., Pinardi N. An oceanographic three-dimensional variational data assimilation scheme // *Ocean Modelling*. 2008. Vol. 22, iss. 3–4. P. 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.oceanmod.2008.01.004>
14. Assimilating Along-Track Altimetric Observations through Local Hydrostatic Adjustment in a Global Ocean Variational Assimilation System / A. Storto [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2011. Vol. 139, iss. 3. P. 738–754. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3350.1>
15. The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP) / M. A. Balmaseda [et al.] // *Journal of Operational Oceanography*. 2015. Vol. 8, iss. 1. P. 80–97. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022329>
16. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург : Гидрометеониздат, 1991. 429 с.

Об авторах:

Коротаев Геннадий Константинович, научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **Scopus Author ID: 7004998153**, **ResearcherID: K-3408-2017**, **SPIN-код: 9861-2241**, gkorotaev@gmail.com

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

Дорофеев Виктор Львович, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7979-8235**, **Scopus Author ID: 16411510200**, **ResearcherID: G-1050-2014**, **SPIN-код: 7144-1950**, viktor.dorofeev@mhi-ras.ru

Мизюк Артем Игоревич, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4885-354X**, **ResearcherID: C-6125-2016**, **Scopus Author ID: 36446217200**, **SPIN-код: 8285-8260**, artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Пузина Оксана Сергеевна, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1637-4475**, **Scopus Author ID: 57205120208**, **SPIN-код: 2207-4617**, oksana_puzina@mhi-ras.ru

Холод Антон Леонидович, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 55632951600**, **ORCID ID: 0000-0003-4694-8406**, **ResearcherID: ABA-3482-2020**, **SPIN-код: 3978-3077**, antonholod@mail.ru