

УДК 551.46

УСКОРЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ЧЁРНОГО МОРЯ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН Г. К. Коротаев*, В. Н. Белокопытов,
В. Л. Дорофеев, А. И. Мизюк, А. Л. Холод

Поступило 06.03.2024 г.

После доработки 27.04.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

На основе данных трёх ретроспективных анализов (реанализов) полей Чёрного моря исследованы тенденции изменения термохалинного режима бассейна в 2000–2021 гг. Показано, что кумулятивный эффект роста средней температуры поверхности моря и смягчения зимних условий в акватории Чёрного моря в последние 7–8 лет приводят к рекордному прогреву, а затем и исчезновению вентилируемого черноморского холодного промежуточного слоя в его традиционном понимании к 2020 году. Кроме того, в последние 7–8 лет наблюдается ускоренное потепление вод моря в пределах основного пикноклина. Изменения теплового режима верхнего слоя моря сопровождается продолжающимся ростом солёности в основном пикноклине.

Ключевые слова: температура и солёность Чёрного моря, климатические изменения, численное моделирование, ретроспективный анализ

DOI: 10.31857/S2686739724090173

Чёрное море, как обособленный от Мирового океана морской бассейн с положительным водным балансом, имеет не только характерную термохалинную структуру вод с резким халоклином и холодным промежуточным слоем, но и свои региональные особенности межгодовой и многолетней изменчивости, которые во многом отличаются от других морей. Устойчивая тенденция в слое основного пикноклина, где поступление средиземноморских вод вызывает слабое, но постоянное нагревание и осолонение, сменяется в верхнем слое моря на хорошо выраженные междесятилетние колебания [1]. В ряде исследований [1–3] было показано, что смягчение зимних условий в акватории Черного моря и рост средней температуры поверхности моря (ТПМ) в последние 20–30 лет приводит к изменениям термохалинного режима моря и, в частности, значительному ослаблению интенсивности черноморского холодного промежуточного слоя (ХПС). Однако детальное исследование более быстрой трансформации термохалинного режим верхнего слоя моря затруднительно по причине

использования процедур сглаживания и фильтрации [1] либо из-за погрешностей, связанных с пространственной неоднородностью ХПС при сведении воедино относительно небольшого количества наблюдений, выполненных в разных частях Чёрного моря [3]. В настоящей работе исследуется изменчивость термохалинных полей на межгодовых временных масштабах в 2000–2020 гг. на основе данных трёх реанализов, выполненных в Чёрном море тремя различными способами [4–6], подкреплённых там, где это возможно, непосредственными наблюдениями.

Для создания массива данных наблюдений на регулярной сетке с временной дискретностью 10 суток и пространственным разрешением $10' \times 15'$ использовался метод оптимальной интерполяции [7] с применением пространственных корреляционных функций [8, 9] и аппроксимации зависимости автокорреляционной функции от глубины [8]. Для периода 2000–2020 гг. на базе 13 952 океанографических станций рассчитано 16 845 профилей в узлах регулярной сетки при заданном условии максимального ограничения случаев экстраполяции для заполнения свободного пространства, что позволило обеспечить более или менее равномерное покрытие акватории Чёрного моря в отдельные декады.

Федеральный исследовательский центр “Морской гидрофизический институт Российской Академии наук”,
Севастополь, Россия

*E-mail: korotaevgren@mail.ru

Подготовленный таким образом массив данных температуры и солёности на регулярной сетке в дальнейшем идентифицируется как “массив 1”.

Методология первого, представленного в настоящей работе, реанализа полей Чёрного моря была разработана в рамках проектов “MyOcean”, “MyOcean2” [10] и основана на ассимиляции спутниковых наблюдений. Затем эта методология была развита в работе [4], где дополнительно ассимилировались климатические профили температуры и солёности. В настоящем исследовании представлен реанализ за 1993–2020 гг., который далее обозначается как “массив 2”, выполненный по схеме, описанный в работе [4].

Второй реанализ за период 2000–2020 гг. выполнен на основе региональной конфигурации комплекса численного моделирования динамики океана NEMO [11], воспроизводящей поля гидрофизических параметров в Азовском, Чёрном и Мраморном морях [12]. В модели ассимилируются трёхмерные поля температуры и солёности морской воды, восстановленных по данным спутниковых альтиметрических наблюдений, и данных наблюдений ТПМ с ИСЗ по методике, описанной в работе [5]. В верхнем слое выполняется коррекция потока тепла на основе

данных о ТПМ [11], что эквивалентно усвоению ТПМ. В дальнейшем этот массив реанализа цитируется как “массив 3”.

В исследовании использовался также продукт BLACKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004 морской службы Copernicus (CMEMS), цитируемый далее, как “массив 4”, содержащий реанализ среднесуточных полей океана для бассейна Чёрного моря с 1993 по 2021 гг., анализировавшийся ранее в работе [6]. Для ассимиляции данных использовалась вариационная схема 3DVAR [13, 14]. В процессе подготовки реанализа усваивались вдоль трековые данные аномалий уровня морской поверхности и *in situ* измерений вертикальных профилей температуры и солёности из наборов данных SeaDataNet и CMEMS.

Сведения о точности представленных выше методов реанализа приводятся в статьях [4–6]. Наибольшие погрешности наблюдаются в окрестности зон повышенных вертикальных градиентов. При этом неточности в определении глубин залегания изолиний температуры или солёности невелики. Как известно [15, 16], реанализы, выполненные на основе разных моделей, могут давать в некоторых случаях заметный разброс в оценках. Поэтому при возникновении

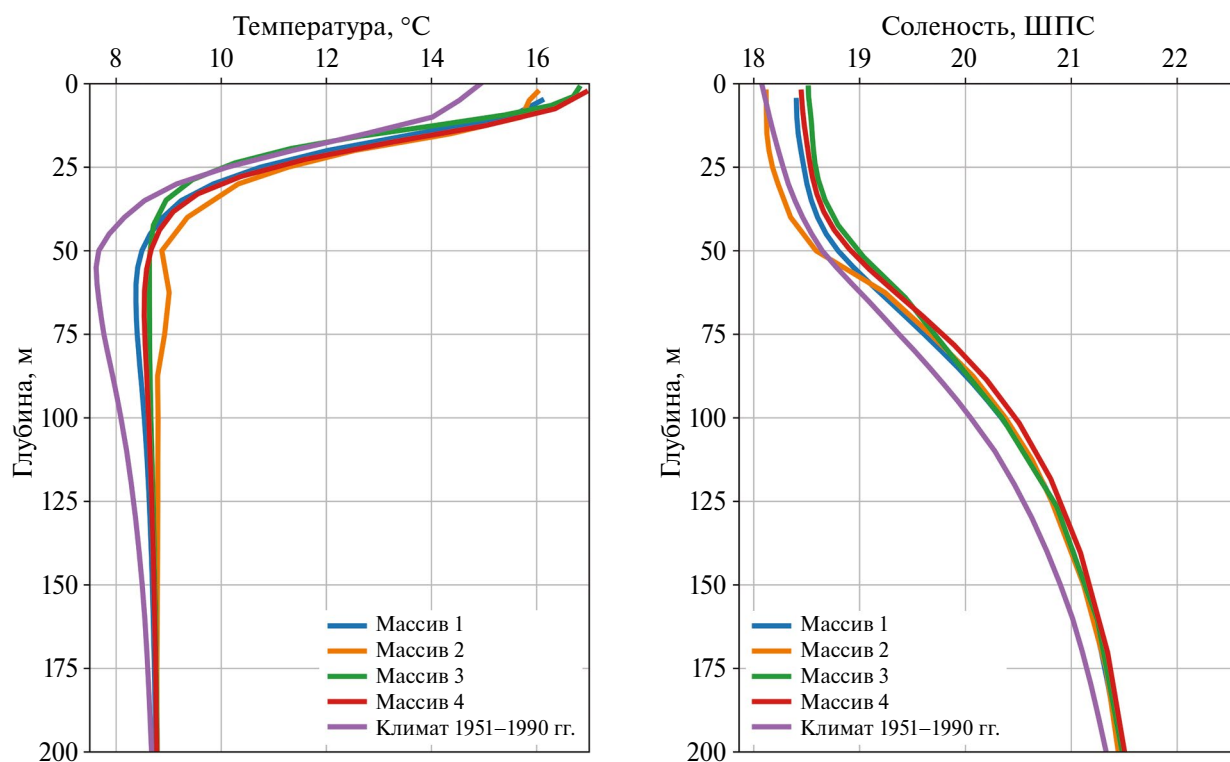


Рис. 1. Вертикальные профили температуры (слева) и солёности (справа) морской воды, полученные осреднением на каждом горизонте за период времени с 2019 по 2020 гг. для каждого из реанализов и по имеющимся наблюдениям. Дополнительно показан климатический профиль за 1951–1990 гг.

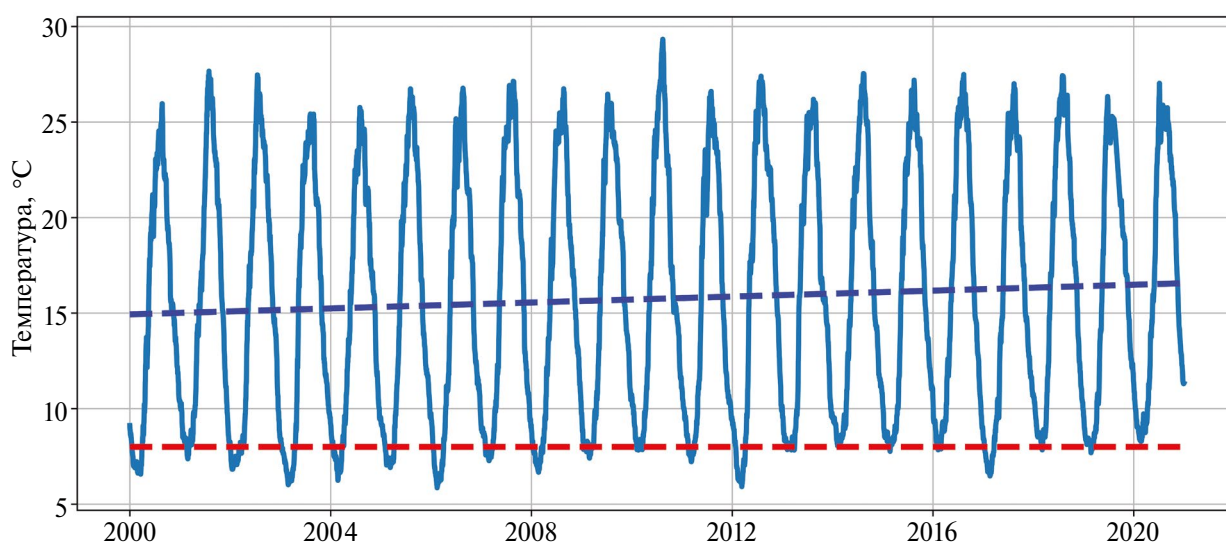


Рис. 2. Временной ряд спутниковых измерений ТПМ, осреднённой по площади Чёрного моря. Синей линией показана линия регрессии для временного ряда ТПМ. Красная линия соответствует температуре 8°C.

существенных расхождений в данных реанализов, мы считаем достоверными события, отражавшиеся не менее чем в двух из них.

На рис. 1 представлены профили температуры и солёности морской воды, полученные осреднением на каждом горизонте и за период времени с 2019 по 2020 гг. для каждого из реанализов и по имеющимся наблюдениям. Для представления об общих тенденциях изменения состояния моря в последние годы, на рис. 1 приведены также построенные по данным наблюдений средние профили температуры и солёности морской воды за 1951–1990 годы. На рис. 1 по всем реанализам видно заметное потепление в слое 0–200 м в 2019–2020 гг. в сравнении с периодом 1951–1990 гг. В дальнейшем мы сконцентрируемся на анализе изменений, происходящих именно в этом слое в 2000–2020 годы.

В поверхностном слое моря, до глубин порядка 10 м, все реанализы дают очень близкие изменения температуры моря, отражающие её сезонные и межгодовые изменения. Совпадение временного хода в этом слое в разных реанализах не удивительно, поскольку в каждом из них ассимилируются наблюдения ТПМ с ИСЗ. Поэтому на рис. 2 приведён временной ход осреднённой по площади ТПМ только по спутниковым наблюдениям. Приведённый график показывает явно выраженный сезонный ход ТПМ и межгодовую изменчивость максимальных и минимальных температур. Приведённая на рис. 2 линейная регрессия показывает тенденцию повышения средней ТПМ за весь рассматриваемый

период. Положительный тренд температуры в поверхностном слое, рассчитанный по среднегодовым значениям, составил 0.4°C за 10 лет, что превышает типичные для Мирового океана значения и сопоставим с высокими темпами потепления в полярных широтах. Отметим особо значительное сокращение событий с минимальным значением ТПМ ниже 8°C после 2008 и особенно после 2012 года.

Тенденции изменений температуры морской воды на горизонте 60 м, вблизи минимума температуры ХПС, представлена на рис. 3. Видно, что массив 2 даёт несколько завышенные значения температуры морской воды и не воспроизводит зимнюю конвекцию 2017 года, что вызывает существенный прогрев в последующие годы, тогда как массивы 3 и 4 демонстрируют сходные её изменения в течение всего исследуемого периода времени. Тем не менее во всех трёх реанализах наблюдается синхронное развитие зимней конвекции близкой интенсивности вплоть до 2016 года. В те годы, когда ТПМ опускается ниже 8°C, температура на горизонте 60 м также принимает значения, характерные для ядра ХПС. Однако в силу относительно мягких зим 2009–2011 гг. температура воды на глубине 60 м превысила 8°C в течение всего года.

В результате зимней конвекции 2012 года температура воды на горизонте стала ниже 8°C. Однако к следующей холодной зиме 2017 года температура воды на глубине 60 м уже достигла 8.5°C. Зимняя конвекция 2017 года на пару месяцев понизила температуру на горизонте до 8°C,

но затем в течение всего 2020 году температура воды на глубине 60 м уже превысила и это значение, приблизившись к концу года по данным двух реанализов к 9°C . Таким образом, сокращение событий с минимальными значениями зимних ТПМ ниже 8°C после 2012 года приводит к существенному повышению значений температуры воды на этом горизонте.

Эволюция ХПС хорошо видна на рис. 4, где представлена диаграмма изменений во времени средней по горизонтальным сечениям температуры морской воды в глубоководной (с глубинами более 500 м) части моря. Все реанализы показывают наличие в глубоководной части моря традиционного (т.е. вентилируемого во время зимней конвекции) ХПС, ограниченного изотермами 8°C , с небольшими перерывами, вплоть до конца 2008 года. В реанализе, представленном массивом 2 при этом интенсивность зимней конвекции ниже, чем в двух других реанализах, поэтому дальнейшие выводы основаны на данных близких между собой массивах 3 и 4.

В 2009–2011 годы температура в его ядре ХПС повышается до $8.1\text{--}8.3^{\circ}\text{C}$. Холодная зима 2012 года восстановила ненадолго привычные для ХПС температуры. Однако затем, традиционный вентилируемый ХПС хоть и сохраняется, но температура в его ядре возрастает до $8.5\text{--}8.6^{\circ}\text{C}$. В 2017 году минимальная зимняя ТПМ была ниже 8°C и соответствовала примерно зиме 2004 года. На рис. 4 видно, что тем не менее сформировавшийся в 2017 году традиционный вентилируемый ХПС имеет значительно меньшую интенсивность в сравнении с 2004 годом.

Тем не менее поступивший в 2017 году объём холодных вод ещё поддерживал ХПС с постепенно нарастающей температурой в ядре до $8.6\text{--}8.7^{\circ}\text{C}$ в конце 2018 года. В 2019 году ТПМ была немного ниже 8°C , однако сформировавшийся в результате конвекции ХПС имел температуру воды в ядре уже 8.5°C , которая выросла до 8.6°C к концу года. Значение температуры морской воды в ядре ХПС в 8.6°C , достигнутое в 2019 году, является рекордным.

Результаты реанализов, представленных массивами 3 и 4, показывают, что зимняя конвекция в 2020 году не достигает 50 м и традиционный вентилируемый ХПС, обусловленный поступлением поверхностных вод, больше не возобновляется, что произошло впервые за всю историю океанографических наблюдений. Тем не менее, на глубинах 75–80 м наблюдается минимум температуры со значением $8.7\text{--}8.8^{\circ}\text{C}$, природа которого отлична от традиционного вентилируемого ХПС, поскольку он заполнен водами, сформировавшимися в течение длительного времени при взаимодействии вод традиционного холодного ХПС и глубинных вод и его существование обусловлено исключительно возрастанием температуры морской воды с глубиной.

Изменение характеристик зимней конвекции и увеличение температуры в ядре ХПС оказывает влияние на температурный режим Чёрного моря в пределах основного пикноклина. На рис. 5 приведён временной ход температуры морской воды на глубине 150 м, на нижней границе основного пикноклина, по данным трёх реанализов. Точками на этом рисунке показаны

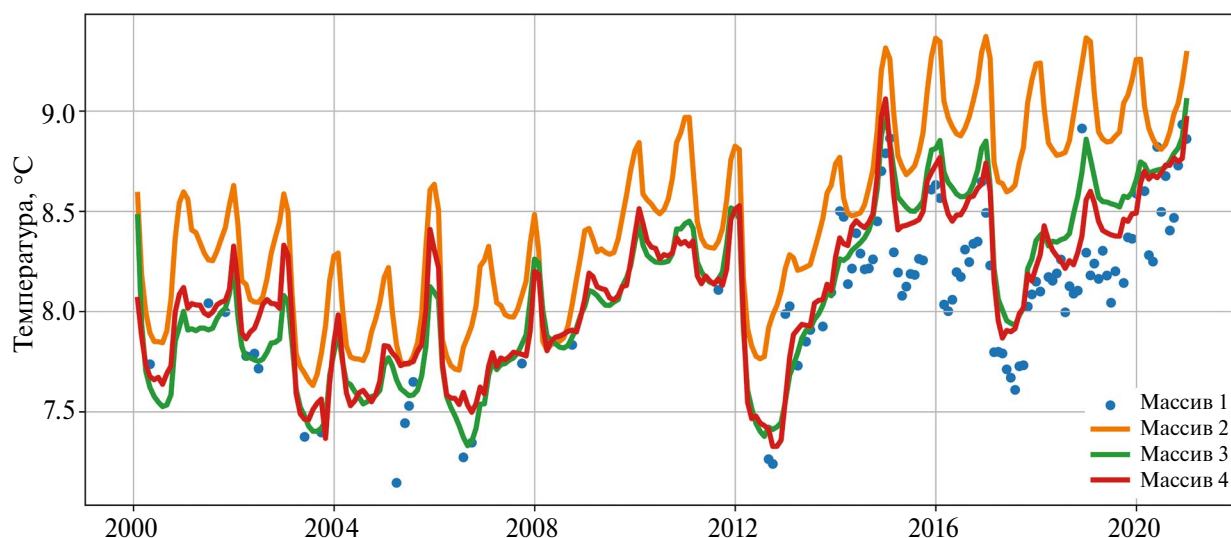


Рис. 3. Временные ряды среднемесячных значений температуры морской воды на горизонте 60 м для каждого из реанализов и по имеющимся наблюдениям.

среднемесячные значения температуры по данным наблюдений в те периоды, когда наблюдения более или менее равномерно покрывали площадь Чёрного моря. Как реанализы, так и наблюдения, показывают рост температуры морской воды на горизонте почти на 0.4°C за 20 лет. Кроме того, как по наблюдениям, так и по данным реанализов, наблюдается не отмечавшееся ранее и хорошо согласующееся с наблюдениями ускорение прогрева морской воды на горизонте после 2012 года. Изменение скорости нарастания температуры воды в последние годы демонстрирует линейная регрессия, построенная по данным всех реанализов и по наблюдениям и оцененная для временных интервалов 2000–2011 гг.

и 2012–2020 гг. (рис. 5). Реанализы дают почти двукратное увеличение скорости роста температуры морской воды в последние годы. Таким образом, увеличение числа мягких зим приводит к ускоряющимся изменениям температурного режима моря не только в поверхностных его слоях, но и в пределах всего основного пикноклина.

Остановимся теперь на тенденциях изменения солёности морской воды. На рис. 1 приведены результаты реанализов, осреднённые по площади моря и во времени, показывающие общее осолонение морских вод в сравнении с аналогичным вертикальным профилем, построенным по всем наблюдениям с 1951 по 1990 гг. Более подробный анализ показывает, что солёность

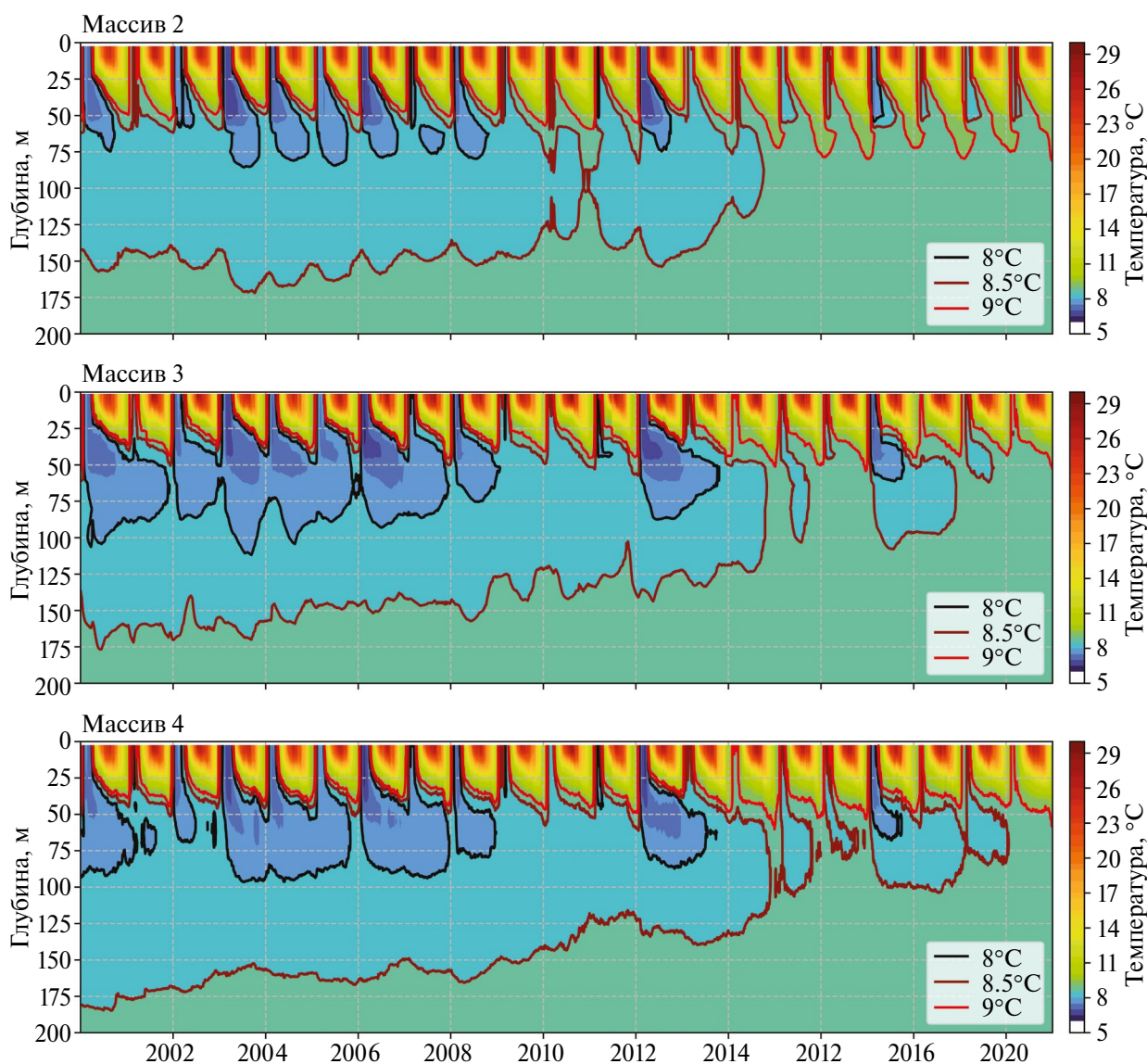


Рис. 4. Диаграмма изменений во времени средней по горизонтальным сечениям температуры морской воды в глубоководной части Чёрного моря для каждого из реанализов.

приповерхностного слоя моря понижается между 2000 и 2008 годом, падая до среднегодового значения около 17.6 ШПС в 2006–2007 гг. Начиная с 2008 года солёность в приповерхностном слое растёт в близких между собой массивах 3 и 4 и по данным наблюдений, доходя до 18.1–18.15 ШПС в 2019–2020 гг. В целом тенденция изменения солёности поверхностного слоя моря соответствует отмечаемой ранее примерно 20-летней цикличности, связанной с изменением внешнего бюджета пресных вод. На нижней границе пикноклина, на глубине 150 м, по всем реанализам наблюдается непрерывный рост солёности морской воды примерно на 0.2 ШПС за 20 лет.

Таким образом, выполненный комплексный анализ показывает, что кумулятивный эффект роста средней ТПМ и смягчения зимних условий в акватории Чёрного моря приводит к существенным и быстрым изменениям термической структуры верхнего слоя моря вплоть до нижней границы пикноклина в последние 7–8 лет. В частности, традиционный вентилируемый в зимний период черноморский ХПС после 2012 года быстро нагревался и впервые за всю историю океанографических наблюдений в Чёрном море полностью выродился в 2020 году. В пределах основного пикноклина в те же 7–8 лет наблюдается ускоренное потепление вод моря. По-видимому, повышение температуры в нижней части основного пикноклина обусловлено изменением температурного режима ХПС

и сокращением числа эпизодов его обновления после 2012 года. Можно предположить также, что интенсивный прогрев нижней части основного пикноклина в 2012–2020 гг. в свою очередь способствовал быстрой деградации традиционного ХПС.

Результаты нашего исследования показывают, что отмечаемая с начала регулярных гидрологических наблюдений в Чёрном море тенденция непрерывного роста солёности в нижних слоях основного пикноклина продолжается вплоть до 2020 года и указывает на нестационарность халинного режима бассейна, связанную с постоянным поступлением солёных вод через пролив Босфор. В приповерхностном слое моря изменения халинного режима между 2000 и 2020 годами соответствуют цикличности процессов распреснения и осолонения поверхностных слоёв моря с периодами от 20 до 40 лет, связанными с изменением внешнего бюджета пресных вод и долговременным повышением солёности вод в основном пикноклине. В итоге при последующем наступлении фазы распреснения можно ожидать обострения плотностной стратификации в бассейне и ещё большего блокирования процесса зимней вентиляции вод. Приток тёплых средиземноморских вод через систему турецких проливов при этом может обеспечивать дальнейший прогрев основания пикноклина до температуры в 9.1°C, характерной для глубинной водной массы.

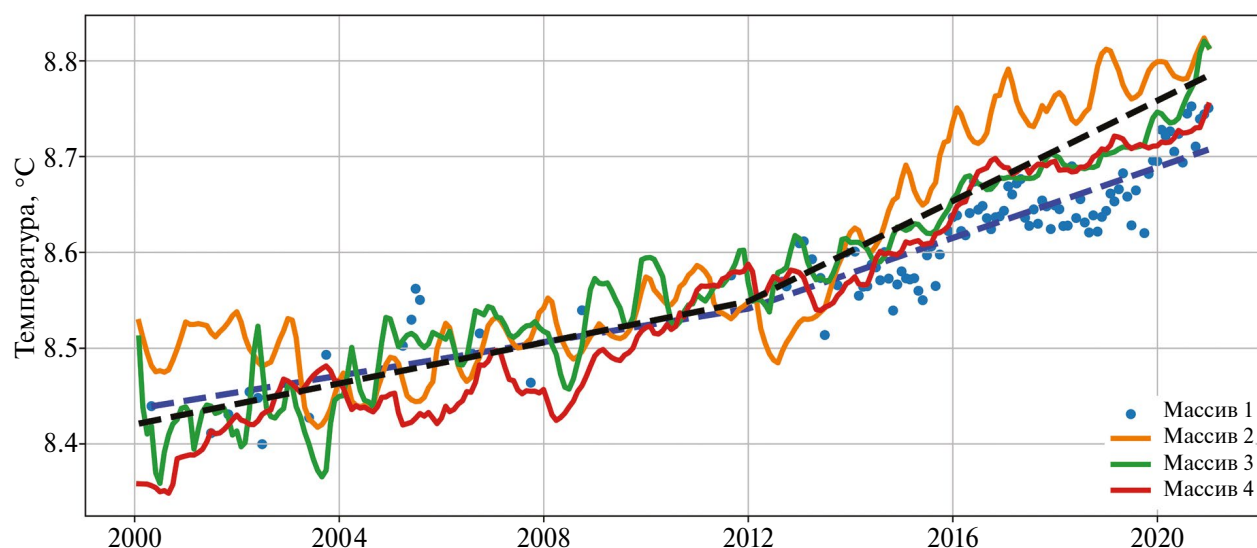


Рис. 5. Временные ряды среднемесячных значений температуры морской воды на горизонте 150 м для каждого из реанализов и по имеющимся наблюдениям. Синим и чёрным цветом показаны линии регрессии, построенные по данным всех реанализов и по наблюдениям для временных интервалов 2000–2011 гг. и 2012–2020 гг.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Подготовка данных наблюдений (“массив 1”) и климатических профилей выполнено в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0014, подготовка численных моделей для проведения расчётов выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0012, расчёты 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” соответственно.

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.
2. Belokopytov V. N. Interannual variations of the renewal of waters of the cold intermediate layer in the Black Sea for the last decades // Physical Oceanography. 2011. V. 20. № 5. P. 347–355. <https://doi.org/10.1007/s11110-011-9090-x>
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. V. 124. № 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
4. Dorofeev V. L., Sukhikh L. I. Study of Long-term Variability of Black Sea Dynamics on the Basis of Circulation Model Assimilation of Remote Measurements // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. № 2. P. 224–232.
5. Коротаев Г. К., Лишаев П. Н., Кныш В. В. Восстановление трехмерных полей солёности и температуры Черного моря по данным спутниковых альтиметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 199–212.
6. Lima L. et al. Climate signals in the Black Sea from a multidecadal eddy-resolving reanalysis // Frontiers in Marine Science. 2021. V. 8. P. 710973.
7. Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 287 с.
8. Григорьев А. В., Иванов В. А., Капустина Н. А. и др. Корреляционная структура термохалинных полей Черного моря в летний сезон // Океанология. 1996. 36. № 3. С. 364–369.
9. Polonskii A. B., Shokurova I. G. Statistical structure of the large-scale fields of temperature and salinity in the Black Sea // Physical Oceanography. 2008. 18. P. 38–51 <https://doi.org/10.1007/s11110-008-9008-4>
10. Korotaev G. K. et al. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Science. 2011. V. 7. № 5. P. 629–649.
11. Madec G. NEMO reference manual, ocean dynamics component // ISSN 1288-1619, Note du pôle de modélisation IPSL № 27, France, January 2016.
12. Mizyuk A. I., Korotaev G. K., Grigoriev A. V., Puzina O. S., Lishaev P. N. Long-Term Variability of Thermohaline Characteristics of the Azov Sea Based on the Numerical Eddy-Resolving Model // Physical Oceanography. 2019. 26(5). P. 438–450. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-5-438-450>
13. Dobricic S., Pinardi N. An oceanographic three-dimensional variational data assimilation scheme // Ocean modelling. 2008. V. 22. № 3–4. P. 89–105.
14. Storto A. et al. Assimilating along-track altimetric observations through local hydrostatic adjustment in a global ocean variational assimilation system // Monthly Weather Review. 2011. V. 139. № 3. P. 738–754.
15. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021. The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2023.
16. Balmaseda M. A. et al. The ocean reanalyses intercomparison project (ORA-IP) // Journal of Operational Oceanography. 2015. V. 8. № sup1. P. s80–s97.

ACCELERATION OF THE CLIMATE CHANGE IN THE BLACK SEA UPPER LAYER

Corresponding member of the RAS **G. K. Korotaev[#], V. N. Belokopytov,
V. L. Dorofeev, A. I. Mizyuk, A. L. Kholod**

*Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Center
“Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences“,
Sevastopol, Russian Federation
[#]E-mail: korotaevgren@mail.ru*

The thermohaline regime trends of the Black Sea basin in 2000–2021 were studied based on the data from three retrospective analysis (reanalysis) of the Black Sea hydrophysical fields. It is shown that the cumulative effect of an increase in average the sea surface temperature (SST) and the softening of winter conditions in the Black Sea area in recent 7–8 years leads to the record warming and then the disappearance of the ventilated Black Sea cold intermediate layer (CIL) in its traditional sense by 2020 year. In addition, accelerated warming of sea waters has been observed within the permanent (main) pycnocline in the last 7–8 years. Changes in the thermal regime of the upper sea layer are accompanied by a continued increase in salinity in the main pycnocline.

Keywords: temperature and salinity of the Black Sea, climate changes, numerical simulation, retrospective analysis