

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.465

DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-279-287

Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год

О. И. Подымов , А. Г. Зацепин, В. В. Очередник

Институт океанологии им. П. П. Шириова РАН, Москва, Россия
 huravela@yahoo.com

Поступила в редакцию 18.12.2020 г., после доработки – 09.02.2021 г.

Цель. На основе анализа архивных и собственных экспедиционных данных оценена изменчивость солености и температуры в верхнем 300-метровом слое северо-восточной части Черного моря.

Методы и результаты. Использованы данные выполненных с 1999 по 2009 г. разрезов берег – центр моря протяженностью от 70 до 110 морских миль, а также результаты регулярного судового мониторинга, проводившегося в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 г. Обнаружено, что в последнее десятилетие наблюдалось поступательное увеличение солености в верхнем 200-метровом слое моря. В среднем рост солености составлял около 0,05–0,06 PSU ежегодно. Вместе с этим также росла температура на глубине ниже слоя температурного минимума (ядра холодного промежуточного слоя). В частности, нижняя изотерма 8,7 °C поднималась в среднем на 11 м ежегодно, от среднегодового значения глубины 242 м в 2010 г. до 121 м в 2020 г. Рост солености привел к соответствующим изменениям в плотности воды, в результате чего нижняя граница кислородсодержащего слоя (условная плотность 15,8) поднялась с горизонта 143 м в 2010 г. до 124 м в 2020 г.

Выводы. Климатические изменения привели к заметному росту солености в верхнем 200-метровом слое северо-восточной части Черного моря, а также росту температуры в слоях, расположенных ниже слоя температурного минимума. Хотя измерения проводились на определенном участке шельфово-склоновой зоны, есть основания считать, что выявленная динамика характерна для всего Черного моря. Физические причины наблюдающихся изменений нуждаются в обстоятельном исследовании.

Ключевые слова: Черное море, соленость, температура, климатические изменения

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания 0149-2019-0014 (проведение судовых работ и сбор данных) и при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00167 (обработка и анализ).

Для цитирования: Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очередник В. В. Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-279-287

Increase of Temperature and Salinity in the Active Layer of the North-Eastern Black Sea from 2010 to 2020

O. I. Podymov [✉], A. G. Zatsepin, V. V. Ocherednik

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[✉]huravela@yahoo.com

Purpose. The paper is aimed at assessing salinity and temperature variability in the upper 300-meter layer of the northeastern part of the Black Sea based on the analysis of the archival and modern expeditionary data.

Methods and Results. The data on the cross-sections “coast – sea center” (with the length of 70–110 nautical miles) performed from 1999 to 2009, as well as the results of regular ship monitoring in the shelf-slope zone of the northeastern part of the Black Sea carried out in 2010–2020 were used. It was found that salinity was progressively increasing in the upper 200-meter layer during the last decade. Salinity increase, on the average, constituted annually about 0.05–0.06 PSU. An increase of temperature was also observed below the layer of temperature minimum (core of the cold intermediate layer). In particular, the lower 8.7 °C isotherm rose annually, on the average, by 11 m from its annual average depth 242 m in 2010 up to 121 m in 2020. Salinity growth led to the corresponding changes in water density that resulted in elevation of the lower boundary of oxygen-containing layer (potential density 15.8) from the depth 143 m in 2010 to 124 m in 2020.

Conclusions. Climatic changes have led to a noticeable salinity increase in the upper 200-meter layer of the northeastern Black Sea, as well as to a temperature increase in the layers situated below the temperature minimum layer. Though the measurements were carried out in a certain area of the shelf-slope zone, there are the reasons to assume that the observed dynamics can be attributed to the entire Black Sea. Physical reasons for the observed changes require a detailed research.

Keywords: Black Sea, salinity, temperature, climatic changes

Acknowledgments: the study was carried out within the framework of the state task No. 0149-2019-0014 (expeditions and data collection) and at the support of the RFBR grant No. 20-05-00167 (processing and analysis).

For citation: Podymov, O.I., Zatsepin, A.G. and Ocherednik, V.V., 2021. Increase of Temperature and Salinity in the Active Layer of the North-Eastern Black Sea from 2010 to 2020. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(3), pp. 257-265. doi:10.22449/1573-160X-2021-3-257-265

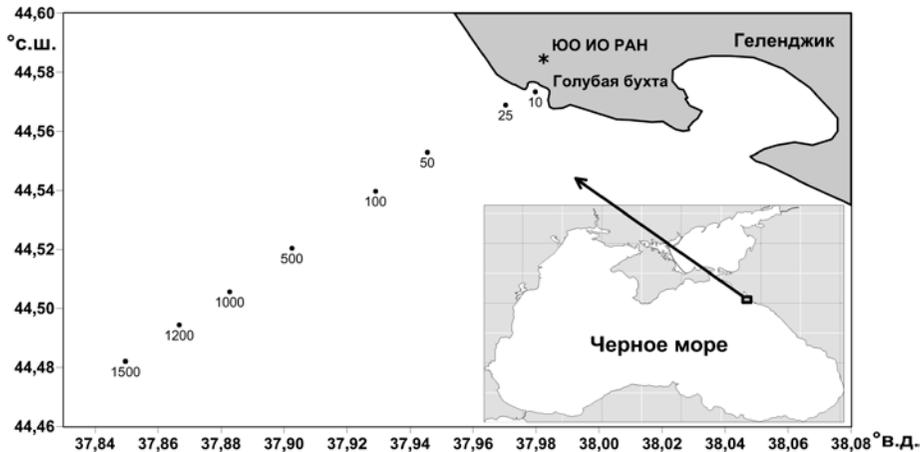
Введение

В последнее десятилетие теплые зимы становятся климатической нормой для Черного моря. Потепление климата и перестройка атмосферной циркуляции ведут к изменению процессов формирования термохалинной структуры в верхнем аэробном слое моря [1]. Регулярные наблюдения на поперечном берегу разрезе протяженностью девять морских миль, которые проводятся на базе ЮО ИО РАН в районе Геленджика, показали исчезновение холодного промежуточного слоя (ХПС) в классическом определении (температура воды менее 8 °C) и значительное увеличение температуры и солености в верхнем слое моря (от поверхности до 200–300 м) с 2010 по 2020 г.

В статье представлено краткое описание изменений термохалинной структуры, выявленных на основе анализа данных регулярного судового мониторинга шельфово-склоновой зоны Черного моря, и выдвинуты гипотезы о причинах этих изменений. Судовой мониторинг является частью программы ежегодной черноморской комплексной научной экспедиции ИО РАН.

Район и методы исследования

Комплексный гидрофизический и экологический мониторинг на базе Южного отделения ИО РАН ведется с середины 2009 г. [2, 3]. Работы проводятся один раз в 2–4 недели в зависимости от сезона (с мая по октябрь чаще). С конца декабря по начало апреля работы прекращаются, за исключением единичных экспедиций. Для гидрофизических измерений использовался CTD-зонд *SBE 19Plus* производства *Sea-Bird Electronics*, объединенный с комплексом *Rosetta SBE 32*, передающий данные в режиме реального времени через кабель-трос и палубный блок *SBE 33*. Район исследований показан на рис. 1. Зондирование велось до дна (на шельфе и континентальном склоне) либо до глубины 300 м в глубоководной зоне моря.



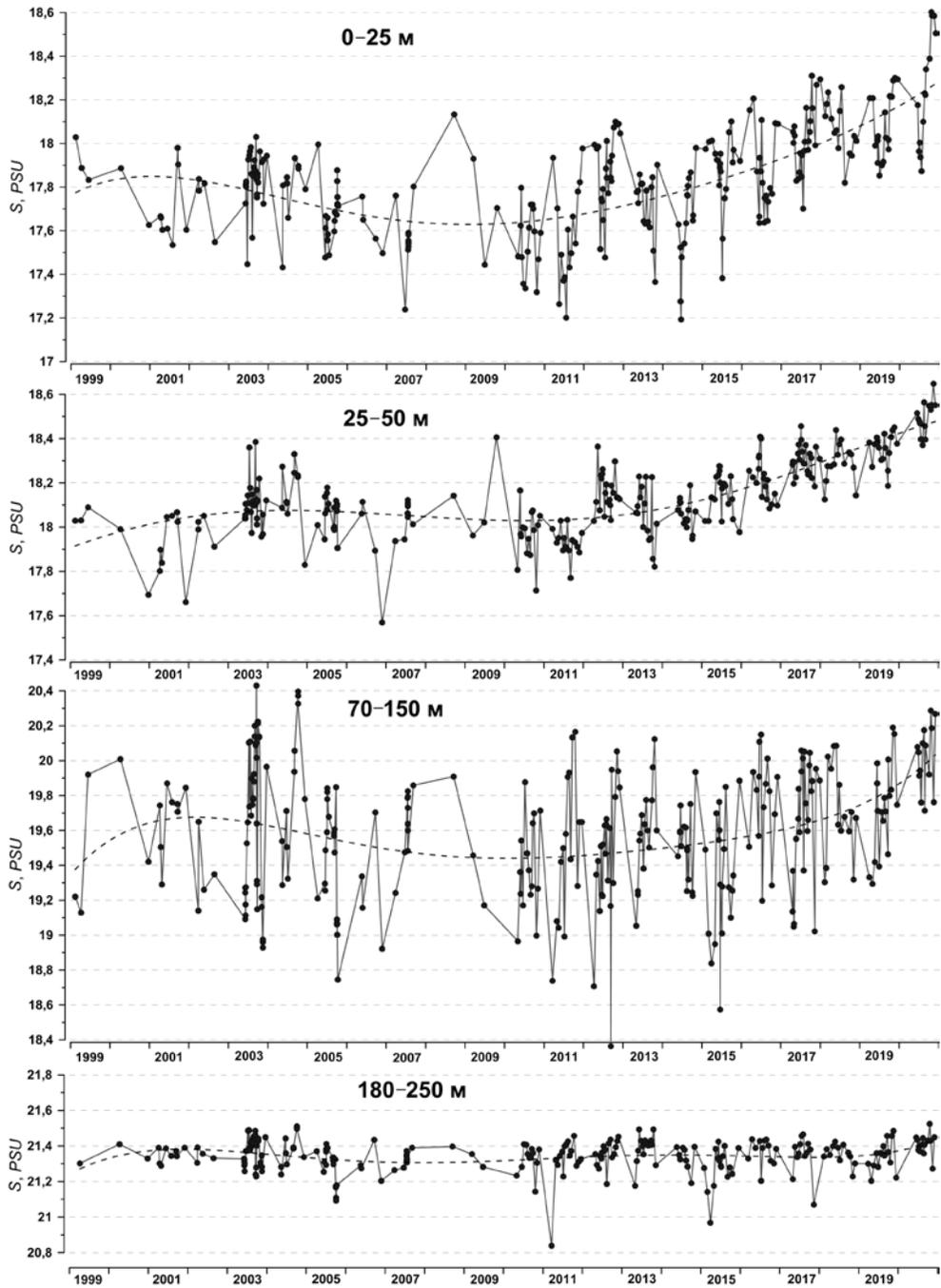
Р и с. 1. Район проведения многолетнего мониторинга в северо-восточной части Черного моря. Цифрами на схеме показана максимальная глубина в точках выполнения станций

F i g. 1. The study site of the long-term monitoring in the northeastern Black Sea. The numbers show the maximum depth at each station

Всего с 2010 по 2020 г. было выполнено около 250 мониторинговых экспедиций. В анализ были включены также архивные данные исследований на разрезах Геленджик – центр моря, выполнявшихся ИО РАН относительно регулярно с начала 1999 г. по 2009 г. с использованием аналогичного оборудования (зонд *SBE 19Plus*) для гидрофизических измерений. Архивные данные были взяты для станции, выполненной в середине мониторингового разреза (глубина 500 м).

Результаты

Рассмотрена динамика долговременных изменений солёности и температуры на станциях с глубинами 25, 50 и 500 м. На шельфовых станциях проанализированы слои 0–25 м (верхний квазиоднородный слой, далее – ВКС) и 25–50 м (область сезонного термоклина). Для станции с глубиной 500 м проанализированы также изменения в основном пикноклине (70–150 м) и в слое под ним (180–250 м). На рис. 2 приведен график долговременных изменений солёности для станции с глубиной 500 м; на шельфовых станциях наблюдалась аналогичная картина.



Р и с. 2. Соленость на станции с глубиной 500 м, осредненная в различных диапазонах глубины, с 1999 по 2020 г. (каждая точка на графике – отдельное зондирование; штриховая линия – средняя аппроксимирующая функция (полином четвертого порядка))

F i g. 2. Salinity at the 500 meter depth station averaged for different depth ranges from 1999 to 2020 (each dot indicates a separate profile; the dotted line is a polynomial fit)

Следует отметить, что гидрофизическая структура в Черном море в слое основного пикноклина и в нижележащих слоях подвержена значительным вертикальным колебаниям [4, 5], как кратковременным (в пределах нескольких суток), так и сезонным [6]. По этой причине отследить долгосрочную динамику солености и температуры на отдельных горизонтах при небольшом количестве случайных экспедиций или же на коротком промежутке времени было бы затруднительно. Поэтому были рассчитаны значения солености в выделенных слоях.

Как видно из рис. 2, с 2001 по 2009 г. наблюдалось некоторое снижение солености, затем начался ее видимый рост в верхнем 150-метровом слое. Следует отметить, что квазициклические изменения солености наблюдались в Черном море и ранее. Авторы работ [7, 8] отмечали их, равно как и начавшийся в 2009 г. рост поверхностной солености, связывая эти изменения прежде всего с колебаниями климатического режима Черного моря.

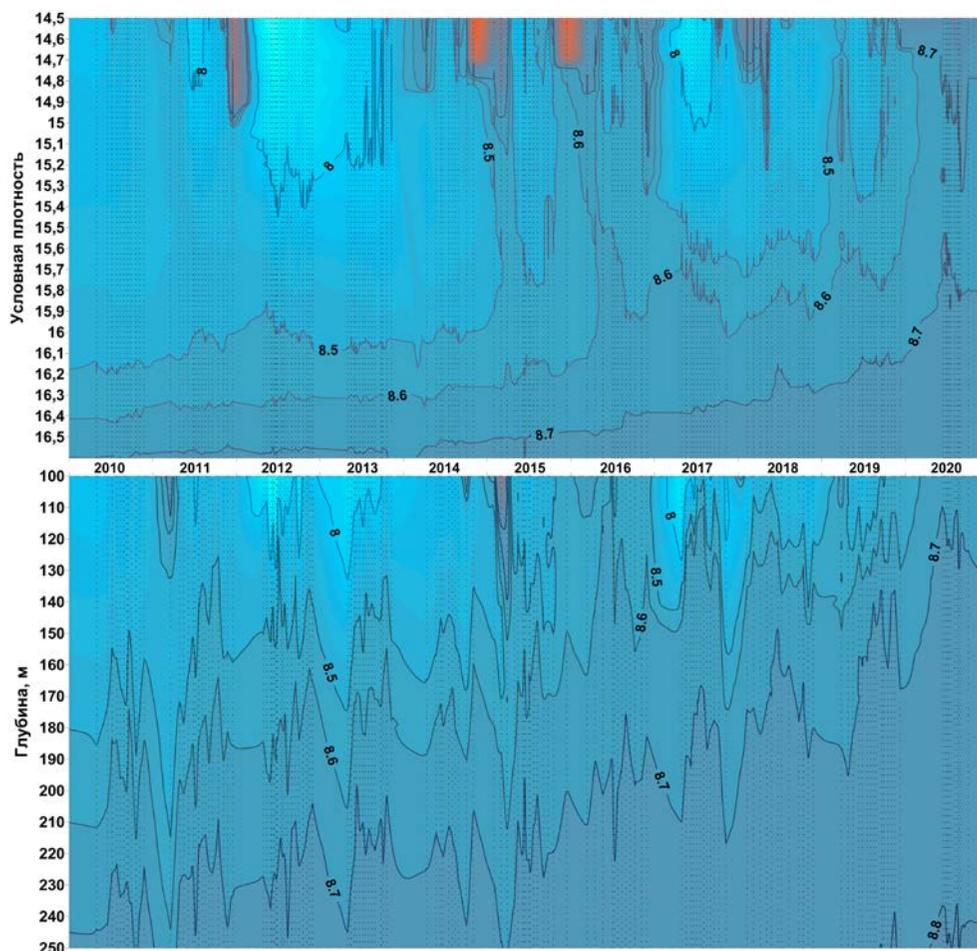
В слое, расположенном под основным пикноклином, соленость была без выраженных изменений, оставаясь примерно на одном уровне, что несколько противоречит ряду предыдущих работ [9–12], в которых отмечалось постоянное увеличение глубинной солености. Среднее ежегодное увеличение солености в слоях 0–25, 25–50 и 70–150 м составило 0,05–0,06 *PSU*, а за десятилетний период соленость в указанных слоях, таким образом, увеличилась на 0,5–0,6 ‰.

Поскольку в слоях, лежащих ниже слоя термоклина, именно соленость дает основной вклад в плотность воды, то резонно было бы ожидать и соответствующий подъем изопикн. Он, действительно, отмечается. К примеру, изопикна 15,8, ниже которой практически исчезает кислород и начинается редокс-слой [13, 14], поднялась с 2010 к 2019 г. в среднем с горизонта 143 м до 134 м. В 2020 г. наблюдался еще более заметный скачок – до 124 м. Хотя в 2020 г. в связи с пандемией Covid-19 не проводились весенние экспедиционные исследования, при анализе данных, полученных с июня по декабрь, выявлен подъем сероводородной границы в среднем на 6 м по сравнению с аналогичным периодом 2019 г. Таким образом, одним из последствий подобной динамики изменения солености и плотности вод является уменьшение толщины активного (продуктивного) кислородсодержащего слоя.

Помимо роста солености, в слое, лежащем ниже слоя температурного минимума, наблюдалось также увеличение температуры (рис. 3). Поскольку температура в этом слое всегда выше, чем в слое минимума, ее увеличение не связано напрямую с атмосферным потеплением и потоком тепла сверху вниз вследствие диапикнического перемешивания. Очевидно, что источник тепла следует искать в слое основного пикно-халоклина и в слоях, расположенных ниже него.

В период с 2010 по 2020 г. нижняя изотерма 8.7 °C поднималась в среднем со скоростью 11 метров в год, от средней глубины 242 м в 2010 г. до средней глубины 159 м в 2019 г. и 121 м в 2020 г. Аномальный скачок за пос-

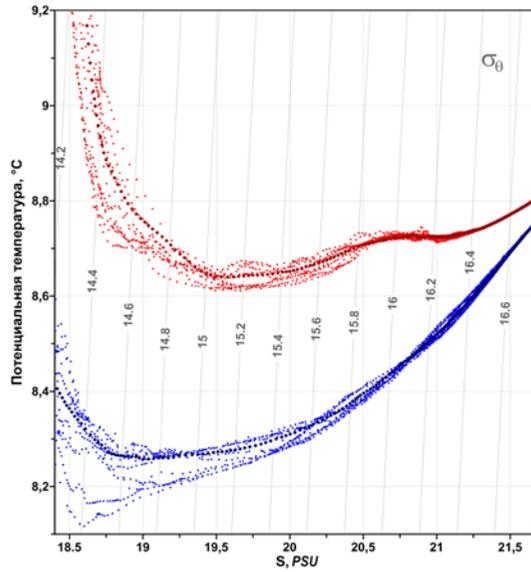
ледный год, возможно, отчасти был вызван упомянутой выше ограниченной статистикой данных. Тем не менее скорость подъема изотерм заметно увеличилась с 2018 г.



Р и с. 3. Динамика изотерм в период с 2010 по 2020 г. в координатах условной плотности (*сверху*) и глубины (*снизу*). Вертикальный пунктир соответствует датам проведения реальных измерений

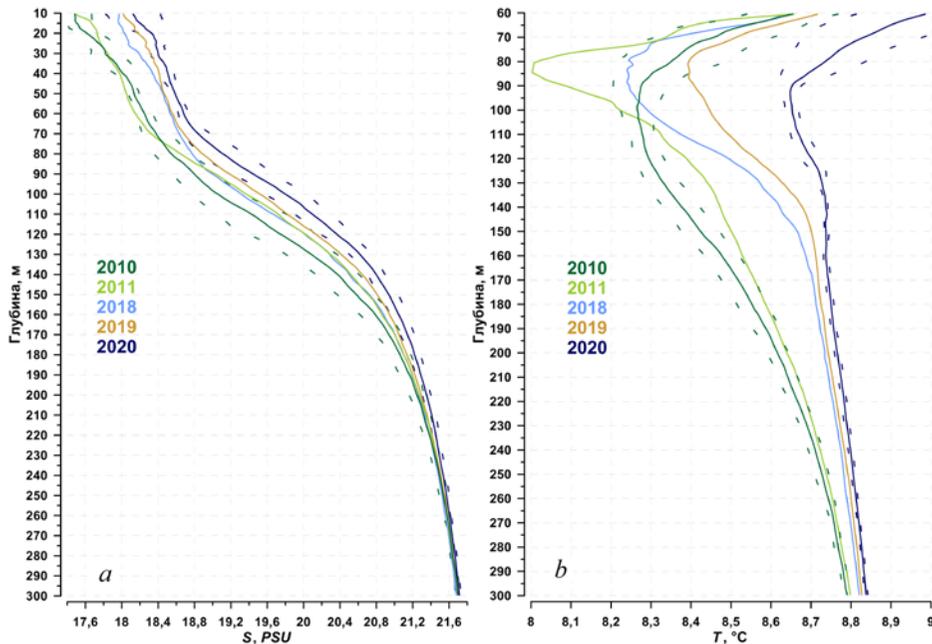
F i g. 3. Isotherm dynamics from 2010 to 2020 in the fields of potential density (*above*) and depth (*below*). Vertical dotted lines correspond to the dates of actual measurements

О существенном изменении температуры и солёности вод в верхнем 200–300-метровом слое свидетельствуют также T, S -диаграммы вод в верхнем слое от 50 до 300 м глубины за 2010 и 2020 гг. (рис. 4), а также средние профили солёности и температуры воды в отдельные годы этого десятилетнего периода (рис. 5). Из этих рисунков также следует, что наряду с осолонением и потеплением вод сверху вниз росли солёность и температура в области основного пикно-халоклина и даже в слоях, лежащих ниже его.



Р и с. 4. *T, S*-диаграммы черноморских вод в верхнем 300-метровом слое в 2010 г. (синий цвет) и в 2020 г. (красный цвет). Тонкой пунктирной линией показаны отдельные *CTD*-профили, толстой пунктирной – среднегодовой профиль

Fig. 4. *T, S*-diagrams of the Black Sea water in the upper 300 meter layer in 2010 (blue color) and in 2020 (red color). Thin dotted lines show individual *CTD*-profiles, bold dotted line – annual average profile



Р и с. 5. Изменение среднего профиля солёности (*a*) и температуры (*b*) в верхнем 300-метровом слое черноморских вод с 2010 по 2020 г. Штриховые линии – профили СКО для средних профилей температуры и солёности в 2010 и 2020 гг.

Fig. 5. Changes in the average profiles of salinity (*a*) and temperature (*b*) in the upper 300 meter layer of the Black Sea from 2010 to 2020. Dotted lines denote standard deviations of the temperature and salinity annual average profiles in 2010 and 2020

Обсуждение

Потепление регионального климата, уменьшение речного стока и осадков над акваторией ведут к увеличению температуры верхнего слоя Черного моря и осолонению его вод сверху вниз, что описано в литературе [7, 9, 15]. Процесс увеличения температуры верхнего слоя и ХПС, начавшийся в 2009 г., шел поступательно с двумя перерывами, вызванными холодными зимами 2011/12 и 2016/17 гг.

Вместе с тем представленный нами материал свидетельствует о поступательном увеличении солености и температуры в основном пикно-халоклине и слое, расположенном ниже него. Причиной этого может являться увеличение притока воды нижнебосфорского течения в слой воды с условной плотностью 14,6–16,2 и, возможно, в более глубоко лежащие слои. Однако точное объяснение феномена роста температуры и солености требует дополнительных данных и более глубокого анализа.

Важный вопрос, который также хотелось бы обсудить в данной статье: как влияет наблюдаемое повышение солености на вертикальную устойчивость вод в верхнем 40–80-метровом слое, подверженном зимнему конвективному перемешиванию. Очевидно, что повышение солености сверху вниз должно уменьшать вертикальную устойчивость и способствовать развитию конвекции вследствие зимнего выхолаживания. Однако анализ данных показывает, что рост солености происходил примерно одинаково в верхнем 120–130-метровом слое воды и среднегодовой профиль солености демонстрировал равномерное увеличение с 2010 по 2020 г. (рис. 5, а). Это означает, что вертикальный градиент солености в этом слое сохранял все эти годы почти постоянное значение и его вклад в вертикальную устойчивость не изменялся существенно на протяжении последнего десятилетия.

В статье авторы описали происходящие изменения термохалинной структуры вод в одной части акватории Черного моря. Однако с учетом высокой скорости горизонтального (изопикнического) перемешивания вод в Черном море, постоянная времени которого в верхнем слое составляет около полугода [16], можно с большой долей уверенности полагать, что представленные в статье тенденции увеличения температуры и солености в верхнем 200–300-метровом слое в последнее десятилетие характерны для всей акватории моря. Тем не менее данный вопрос требует дальнейшего исследования на основе анализа данных буев Арго и судовых *CTD*-съемок в глубоководной части моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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>
2. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 1. С. 16–29. <https://doi.org/10.7868/S0002351513060163>
3. Судовой экологический мониторинг в шельфовой зоне Черного моря: оценка современного состояния пелагической экосистемы / Е. Г. Арашкевич [и др.] // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 6. С. 964–970. <https://doi.org/10.7868/S0030157415060015>

4. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа / А. Г. Зацепин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 16–25. doi:10.22449/0233-7584-2016-3-16-25
5. *Ostrovskii A. G., Zatsepin A. G.* Short-term hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // *Ocean Dynamics*. 2011. Vol. 61, iss. 6. P. 797–806. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0400-0>
6. *Подымов О. И., Зацепин А. Г.* Сезонная и межгодовая изменчивость солёности верхнего слоя в геленджикском районе Черного моря // *Океанология*. 2016. Т. 55, № 3. С. 370–383. <https://doi.org/10.7868/S0030157416020167>
7. *Полонский А. Б., Ловенкова Е. А.* Долговременные тенденции в изменчивости глубоководных термохалинных характеристик Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 4. С. 18–30. URL: http://мгфж.рф/images/files/2006/04/200604_02.pdf (дата обращения: 10.12.2020).
8. *Белокопытов В. Н.* Климатическая изменчивость плотностной структуры Черного моря // *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. № 14. С. 227–235.
9. *Блатов А. С., Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* Изменчивость гидрологической структуры вод Черного моря и ее связь с внешними факторами // *Водные ресурсы*. 1980. № 6. С. 71–82.
10. On the forcing of sea level in the Black Sea / M. N. Tsimplis [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C8. C08015. <https://doi.org/10.1029/2003JC002185>
11. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Долговременная изменчивость температуры и солёности в Черном море и ее причины // *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 1. С. 105–110.
12. *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. URL: http://мгфж.рф/images/files/2013/06/201306_03.pdf (дата обращения: 10.12.2020).
13. *Розанов А. Г.* Окислительно-восстановительная стратификация воды Черного моря // *Океанология*. 1995. Т. 35, № 4. С. 544–549.
14. *Стунжас П. А.* О строении зоны взаимодействия аэробных и анаэробных вод Черного моря по измерениям безмембранным датчиком кислорода // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 4. С. 539–545.
15. *Альтман Э. М., Кумыш Н. И.* Многолетняя внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря // *Труды ГОИН*. 1986. Вып. 176. С. 3–18.
16. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48.

Об авторах:

Подымов Олег Игоревич – старший научный сотрудник, Лаборатория гидрофизики и моделирования, ФГБУН ИО им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 5), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 1471-9272, Author ID: 134840, ORCID ID: 0000-0002-6591-9160**, huravela@yahoo.com

Зацепин Андрей Георгиевич – руководитель лаборатории, ФГБУН ИО им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 5), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5527-5234**, zatsepin@ocean.ru

Очередник Владимир Владимирович – младший научный сотрудник, Лаборатория гидрофизики и моделирования, ФГБУН ИО им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 5), **ORCID ID: 0000-0002-3593-7114**, v.ochednik@ocean.ru