

Научная статья


УДК 551.468+551.46.062.5

EDN: QKWICT

Изменчивость параметров холодного промежуточного слоя над материковым склоном у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений

Ю. В. Артамонов , Е. А. Скрипалева, А. В. Федирко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *artam-ant@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.05.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025;
принята к публикации 10.09.2025.

Аннотация

Цель. Цель работы – проанализировать особенности изменчивости характеристик холодного промежуточного слоя (ХПС) над материковым склоном у берегов Крыма за период 2016–2024 гг.

Методы и результаты. В работе использовались данные гидрологических измерений, выполненных в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий». Температура и соленость морской воды измерялись с помощью CTD-комплексов *SBE-911 plus* и *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM*. На вертикальных профилях по данным 279 станций, расположенных над изобатами 200–1500 м, определялись температура, соленость, плотность в ядре ХПС и глубина его залегания. По данным спутниковых измерений температуры поверхности моря из массива *BS HR and UHR SST Analysis CMEMS* рассчитывались среднемесячные аномалии температуры относительно климатических норм за указанный период. Выявлено, что в среднем за период измерений температура в ядре ХПС составила 8,42 °С, оно прослеживалось на глубине 91 м и на изопикнической поверхности 14,95 усл. ед., соленость в нем составила 19,3 ЕПС. Показано, что сезонный цикл температуры и солености в ядре холодного промежуточного слоя у берегов Крыма отличается от их сезонного цикла, среднего для всей акватории Черного моря. Установлено, что синоптические изменения параметров ХПС были почти на порядок меньше, чем изменения, обусловленные совместным влиянием синоптической и межгодовой изменчивости. Распределения значений характеристик холодного промежуточного слоя за период 2016–2024 гг. содержат значимые линейные тренды, характеризующие общую тенденцию увеличения глубины залегания ядра ХПС, повышения в нем температуры, солености и плотности. Вклад изменчивости параметров холодного промежуточного слоя, описываемой линейным трендом, в их общую изменчивость достигает 35–47 %. Размах линейного тренда средней по каждому рейсу глубины залегания ядра ХПС составил 38 м, температуры в ядре – 0,88 °С, плотности и солености в нем – 0,97 усл. ед. и 1,36 ЕПС. Периоды повышения и понижения температуры в ядре ХПС по данным экспедиционных измерений качественно согласуются с межгодовыми аномалиями температуры на поверхности моря по спутниковым данным у берегов Крыма и в районах формирования и обновления вод холодного промежуточного слоя (северо-западный шельф, центры Западного и Восточного циклонических круговоротов).

Выводы. Температура ядра ХПС у берегов Крыма в последнее десятилетие была выше 8 °С, поэтому использование этой изотермы в качестве критерия выделения границ этого слоя невозможно. Выявлены два основных периода максимального повышения температуры в ядре холодного промежуточного слоя (2019–2021 и 2023–2024), которое сопровождалось его заглублением и повышением в нем значений солености и плотности.

Ключевые слова: Черное море, континентальный склон, гидрологические измерения, пространственно-временная изменчивость, холодный промежуточный слой, температура поверхности моря, спутниковые измерения

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Взаимодействие океана и атмосферы». Данные получены в ЦКП «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН».

Для цитирования: Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Изменчивость параметров холодного промежуточного слоя над материковым склоном у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 788–806. EDN QKWICT.

Original article

Variability of Cold Intermediate Layer Parameters over the Continental Slope off the Crimea Coast Based on Expeditionary Measurements

Yu. V. Artamonov ✉, E. A. Skripaleva, A. V. Fedirko

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

✉ artam-ant@yandex.ru

Abstract

Purpose. The aim of the study is to analyze the features of variability of the cold intermediate layer (CIL) characteristics over the continental slope off the Crimea coast in 2016–2024.

Methods and Results. Hydrological measurement data obtained during the cruises of R/V “Professor Vodyanitsky” were used. The seawater temperature and salinity were measured by the CTD complexes *SBE-911 plus* and *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM*. Water temperature, salinity and density in the CIL core as well as its depth were determined on the vertical profiles based on the data from 279 stations located above the 200–1500 m isobaths. Monthly average temperature anomalies were calculated relative to climate norms for 2016–2024 using satellite measurement data on sea surface temperature from the *BS HR* and *UHR SST Analysis CMEMS* array. It is found that, on average, over the measurement period, temperature in the CIL core was 8.42 °C, the core itself was traced at the 91 m depth and at the isopycnic surface 14.95 cond. units, and salinity in it was 19.3 psu. It is shown that the seasonal cycle of temperature and salinity in the cold intermediate layer core off the Crimea coast differs from their seasonal cycle, which is average for the whole Black Sea area. The synoptic changes in CIL parameters were established to be almost by an order of magnitude smaller than the changes induced by the combined influence of synoptic and interannual variability. The distributions of cold intermediate layer characteristics obtained for 2016–2024 contain significant linear trends characterizing the general tendency to increase both in the CIL core depth, and temperature, salinity and density in it. The contribution of variability of the cold intermediate layer parameters described by a linear trend, to their total variability reaches 35–47 %. The ranges of linear trends averaged for each cruise were as follows: for the CIL core depth – 38 m, for temperature, density and salinity in the core – 0.88 °C, 0.97 cond. units and 1.36 psu, respectively. The periods of temperature increase and decrease in the CIL core resulted from *in situ* measurements are in qualitative agreement with the interannual series of sea surface temperature anomalies derived from the satellite data for the Crimea coastal regions and for the areas of cold intermediate layer formation and renewal (northwestern shelf, centers of the western and eastern cyclonic gyres).

Conclusions. During the last decade, the temperature of CIL core off the Crimea coast exceeded 8 °C, hence it is impossible to use this isotherm as a criterion for identifying the CIL boundaries. Two main periods (2019–2021 and 2023–2024) of maximum increase of the CIL core temperature accompanied by its deepening, as well as by growth of salinity and density in it, were revealed.

Keywords: Black Sea, continental slope, *in situ* measurements, spatio-temporal variability, cold intermediate layer, sea surface temperature, satellite measurements

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0014 “Ocean – atmosphere interaction”. The data were obtained at the CCU “R/V Professor Vodyanitsky” of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS.

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Fedirko, A.V., 2025. Variability of Cold Intermediate Layer Parameters over the Continental Slope off the Crimea Coast Based on Expeditionary Measurements. *Physical Oceanography*, 32(6), pp. 807-825.

Введение

Одной из наиболее характерных особенностей вертикальной термохалинной структуры вод Черного моря является холодный промежуточный слой (ХПС), расположенный между сезонным и основным пикноклинами и характеризующийся пониженной температурой воды, при этом положение его верхней и нижней границ определяется обычно по положению изотермы $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹ [1–6]. Согласно многочисленным исследованиям [1–14], базирующимся на данных как контактных измерений [1–5, 7, 9, 10, 12–14], так и численного моделирования [6, 8, 11], формирование и обновление ХПС обусловлено осенне-зимней конвекцией в глубоководной части моря, при которой охлажденные воды из центров крупномасштабных циклонических круговоротов распространяются к их перифериям. Другим важным источником вод ХПС являются холодные низкосолёные воды северо-западного шельфа, которые опускаются на промежуточные глубины и распространяются с потоком Основного Черноморского течения (ОЧТ) по всей акватории моря.

При формировании ХПС происходит кислородная вентиляция вод и подъем биогенных элементов в фотический слой [9, 14], поэтому изменения характеристик этого слоя оказывают заметное влияние на экологическое состояние и биопродуктивность вод моря. Это обусловило появление большого количества работ, в которых анализируются особенности изменчивости характеристик ХПС на различных пространственно-временных масштабах [5, 8–25].

Оценки сезонной эволюции ХПС для всей акватории моря, полученные на основе данных контактных измерений [4, 5], математического моделирования [15] и различных реанализов [8, 16], показали, что минимум температуры ХПС наблюдается в феврале – марте, в период обновления его вод, затем в сезонном цикле температура постепенно повышается, достигая максимальных значений в декабре – январе [5, 16].

Все более актуальными являются исследования межгодовой изменчивости характеристик ХПС, поскольку заметное потепление вод Черного моря в последние годы ведет к уменьшению концентрации кислорода в ядре ХПС и снижению его запасов во всех слоях аэробной зоны [17]. Оценки межгодовых тенденций температуры в ХПС [2, 8–13, 16, 18–22] показали, что ее повышение на глубинах этого слоя привело к тому, что изотерму $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, положение которой традиционно принимается за критерий выделения границ ХПС, использовать уже недопустимо. Так, в работе [18], основанной на данных интерполяционного вариационного анализа *DIVA* за период 1955–2011 гг., в качестве критерия выделения ХПС предлагается изотерма $8,35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ дан-

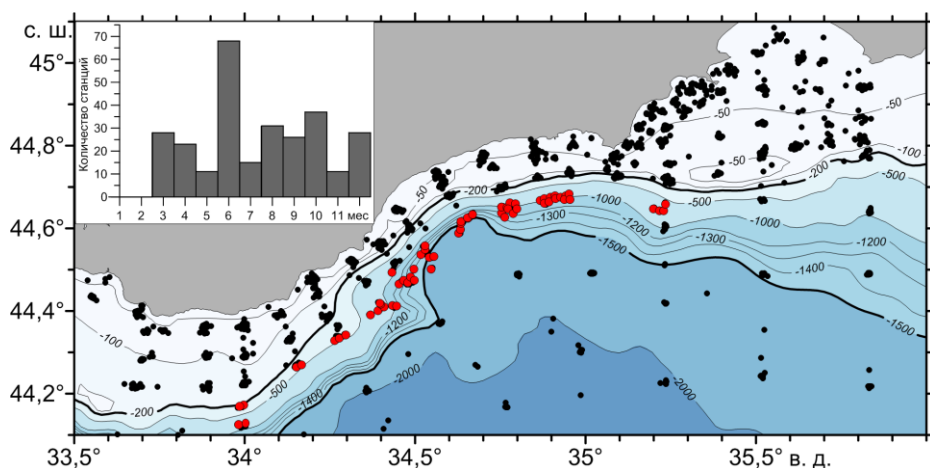
¹ Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.

ных профилирующих буев *Argo* за период с марта 2005 по декабрь 2018 г. в работе [19] показал, что изменение климата в Черном море приводит к практическому исчезновению ХПС. Начиная с 1991 г. температура в ядре ХПС увеличилась более чем на 1 °С и приблизилась к температуре вод более глубоких слоев, тренд потепления ХПС составил почти 0,05 °С/год. Температура воды ниже 8 °С, которая использовалась в прошлом для определения верхней и нижней границ ХПС, фиксировалась только в течение 2005–2009 гг., а за критерий выделения ХПС, согласно работе [19], необходимо принимать изотерму 8,7 °С. Оценки долгопериодной изменчивости температуры промежуточного слоя вод Черного моря за период 1951–2017 гг. показали, что на глубинах ХПС наблюдаются междесятилетние вариации температуры с периодом ~ 50 лет и амплитудой до 0,7 °С, при этом средняя температура ядра ХПС к 2010 г. превысила 8 °С и продолжает заметно увеличиваться [20]. Данные реанализа Черного моря *BS-REA* службы мониторинга морской среды *Copernicus* за период 1993–2018 гг. показали, что после 2008 г. обновление и формирование ХПС происходило только в 2012 и 2017 гг., а тренд потепления в слое 25–150 м, т. е. на глубинах ХПС, за период 2005–2018 гг. заметно увеличился и составил 0,045 °С/год [21]. Аналогичные результаты показали и данные реанализа за 1993–2020 гг., полученные на основе численной модели Черного моря Морского гидрофизического института (МГИ) [22]. Согласно этим данным, в течение почти половины рассматриваемого периода в слое 30–150 м практически не наблюдаются области с температурой ниже 8 °С, а линейный тренд температуры в ХПС составил 0,05 °С/год [22]. По данным обновленного климатического гидрологического массива за период 1950–2023 гг., созданного в Морском гидрофизическом институте РАН, показано, что после 2015 г. в Черном море наблюдается устойчивый рост температуры воды, которая в пределах ХПС становится выше 8 °С [23]. Данные контактных измерений, выполненных в ходе 12 рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2016–2019 гг. в северной части Черного моря, также показали, что классическая граница ХПС по изотерме 8 °С отмечалась только в экспедициях 2017 г., а позже повышение температуры в ядре этого слоя происходило почти по экспоненциальному закону, и в качестве границы ХПС можно принять значение температуры 8,6 °С [24]. Продолжение регулярных гидрологических исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в рамках экспедиционной программы МГИ после 2019 г. позволило существенно пополнить информацию о состоянии термохалинных полей у берегов Крыма и оценить эволюцию характеристик ХПС на более длинном временном ряде.

Цель настоящей работы – анализ изменчивости характеристик ХПС над материковым склоном у берегов Крыма на основе данных контактных измерений, выполненных в ходе 30 рейсов НИС «Профессор Водяницкий» за период 2016–2024 гг.

Материалы и методы

В работе использовались данные гидрологических измерений, выполненных у берегов Крыма в пределах территориальных вод России в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2016–2024 гг. Характеристики ХПС анализировались по данным станций, расположенных в районе материкового склона примерно над изобатами 200–1500 м (рис. 1, табл. 1).



Р и с. 1. Положение гидрологических станций, выполненных у берегов Крыма в 30 рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016–2024 гг. Красным цветом отмечены станции, по данным которых анализировались характеристики ХПС; жирными линиями выделены изобаты 200 и 1500 м; на врезке показано распределение количества станций по месяцам

F i g. 1. Location of hydrological stations carried out off the Crimea coast during 30 cruises of R/V “Professor Vodyanitsky” in 2016–2024. Stations whose data are used to analyze the CIL characteristics are marked in red; the 200 and 1500 m isobaths are highlighted in bold; inset shows the distribution of station quantity by months

Температура ($^{\circ}\text{C}$) и соленость (ЕПС) морской воды измерялись на каждой станции от поверхности до дна с помощью зондирующих *CTD*-комплексов *SBE-911 plus*² и *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM*³. Были проанализированы 279 вертикальных профилей, на каждом из которых выбирались характеристики ХПС – значение минимальной температуры (T_{\min}) глубже сезонного термоклина (температура ядра ХПС), глубина залегания этого минимума (H , глубина залегания ядра ХПС), значения солености (S) и условной плотности (σ_t) в ядре ХПС на глубине H . Отметим, что распределение количества станций по месяцам крайне неоднородно: в январе и феврале данные измерений отсутствуют, максимальное количество станций (68) выполнено в июне, минимальное (11) – в мае и ноябре (рис. 1, врезка).

В работе также использовались среднесуточные данные спутниковых измерений температуры поверхности моря (ТПМ) за период 1 января 2008 – 31 декабря 2024 г. с пространственным разрешением $0,01^{\circ} \times 0,01^{\circ}$ из массива *Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis* службы мониторинга морской среды *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)*⁴. По этим данным для ТПМ рассчитывались: среднесеasonные значения для каждого года, среднесеasonные осредненные за 17 лет значения и среднесеasonные аномалии для периода 2016–2024 гг. как разность текущего среднесеasonного и среднесеasonного значения температуры поверхности моря для конкретного месяца.

² URL: http://www.technopolecom.ru/downloads/doc_138.pdf (дата обращения: 24.10.2025).

³ URL: http://www.technopolecom.ru/downloads/doc_212.pdf. (дата обращения: 24.10.2025).

⁴ URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00159>, <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-004-006-012-013.pdf>, продукт SST_BS_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_006. (дата обращения: 24.10.2025).

Т а б л и ц а 1
Table 1

**Сроки проведения измерений над материковым склоном и количество
выполненных станций в рейсах НИС «Профессор Водяницкий»
за период 2016–2024 гг.**
**Timing of measurements over the continental slope and the number of stations carried
out during the cruises of R/V “Professor Vodyanitsky” in 2016–2024**

Номер рейса / Cruise number	Дата / Date	Количество станций / Quantity of stations
87	10–12.07.2016	5
91	17–18.11.2016	5
94	23–24.04.2017	5
95	15–16.06.2017	5
98	15–18.11.2017	5
102	18–19.06.2018	5
103	05–07.09.2018	5
105	26.11.–01.12.2018	5
106	25–29.04.2019	5
108	16–19.07.2019	5
110	10–12.10.2019	4
111	15–17.12.2019	5
113	09–11.06.2020	5
114	21.09, 05–06.10.2020	5
115	10–11.12.2020	4
116	28.04.–01.05.2021	5
117, 1-й этап / 117, stage 1	05–08.07.2021	5
119	14–16.09.2021	6
121, 1-й этап / 121, stage 1	21–26.04.2022	8
121, 2-й этап / 121, stage 2	01–10.05.2022	4
122, 1-й этап / 122, stage 1	08–11.06.2022	9
122, 2-й этап / 122, stage 2	17–20.06.2022	9
123, 1-й этап / 123, stage 1	17–20.08.2022	9
123, 2-й этап / 123, stage 2	26–29.08.2022	9
124	05–19.10.2022	13
125, 1-й этап / 125, stage 1	07–08.12.2022	6
125, 2-й этап / 125, stage 2	17–23.12.2022	9
126	17.03.–04.04.2023	11
127, 1-й этап / 127, stage 1	15–17.06.2023	9
127, 2-й этап / 127, stage 2	22–25.06.2023	10
128, 1-й этап / 128, stage 1	06–10.08.2023	6
128, 2-й этап / 128, stage 2	19–22.08.2023	7
129, 1-й этап / 129, stage 1	07–12.10.2023	9
129, 2-й этап / 129, stage 2	23–25.10.2023	8
130, 1-й этап / 130, stage 1	10–14.03.2024	9
130, 2-й этап / 130, stage 2	24–29.03.2024	10
131, 1-й этап / 131, stage 1	30.05.–04.06.2024	11
131, 2-й этап / 131, stage 2	13–18.06.2024	11
133, 1-й этап / 133, stage 1	13–21.09.2024	8
133, 2-й этап / 133, stage 2	28–30.09.2024	5

Результаты исследований

Анализ вертикальных термохалинных профилей на всех станциях показал, что в течение всего периода измерений в 2016–2024 гг. параметры ХПС изменялись в крайне широких пределах: температура в ядре ХПС – от 7,04 до 8,95 °С, соленость – от 18,48 до 20,96 ЕПС, ядро ХПС располагалось на глубинах 38–151 м и на изопикнических поверхностях 14,3–16,15 усл. ед. Такие значительные изменения параметров ХПС обусловлены совместным влиянием пространственной, внутрисуточной, синоптической (межсуточной), внут-

ригодовой и межгодовой изменчивости. Пространственная изменчивость обусловлена тем, что расстояние между крайними западной и восточной станциями в пределах анализируемой области составляло почти 150 км. Несмотря на то что измерения выполнялись в разное время суток, внутрисуточной изменчивостью параметров ХПС мы пренебрегаем, поскольку, согласно [26], внутрисуточный ход температуры на глубинах более 35–40 м уже не проявляется. Синоптическая (межсуточная) изменчивость связана с тем, что измерения, даже выполненные в один и тот же месяц, в разных рейсах проводились в разные дни (табл. 1).

Анализ внутригодовых изменений параметров ХПС по данным гидрологических измерений, осредненным для каждого месяца по всем станциям, показал, что максимум глубины залегания ядра ХПС (105–110 м) наблюдается в марте, мае и сентябре (рис. 2, *a*). В эти же месяцы в ядре ХПС отмечаются самые высокие значения температуры (8,6–8,75 °C), условной плотности (15,3–15,35 усл. ед.) и солёности (19,8–19,85 ЕПС) (рис. 2, *b – d*). Полученный внутригодовой ход температуры и солёности в ядре ХПС не согласуется со среднемноголетним сезонным циклом температуры и солёности в холодном промежуточном слое, средним для всей акватории Черного моря [5]. По данным указанной работы, минимум температуры в ХПС наблюдается в период обновления его вод в феврале – марте, затем температура постепенно повышается, достигая наибольших значений в декабре – январе, а солёность монотонно возрастает от января к декабрю. Отличия между сезонными циклами параметров ХПС, полученными по экспедиционным данным у берегов Крыма и по данным для всего Черного моря в целом, могут быть обусловлены рядом причин. Во-первых, данные гидрологических измерений по месяцам распределены крайне неравномерно и в январе – феврале они отсутствуют (рис. 1, врезка). Во-вторых, анализ сезонной изменчивости ТПМ для акватории всего Черного моря по данным спутниковых измерений показал, что у берегов Крыма наблюдается ее минимум, связанный с переносом ОЧТ теплых вод от берегов Кавказа в зимне-весенний период [27]. В-третьих, нами получены высокие значения среднеквадратических отклонений параметров ХПС для каждого месяца ($СКО_{мес}$), которые связаны с пространственной, синоптической и межгодовой изменчивостью этих параметров (рис. 2). Для большинства месяцев значения $СКО_{мес}$ сопоставимы с изменениями средних параметров ХПС в сезонном цикле. Так, максимальные изменения средней глубины залегания ядра ХПС в течение марта–декабря составляют 40 м, а значения $СКО_{мес}$ этого параметра достигают в мае 30,5 м, в июне и сентябре 25,5 м (рис. 2, *a*). Максимальное изменение средней T_{min} составляет 0,7 °C, тогда как ее $СКО_{мес}$ для некоторых месяцев (апрель, июнь, ноябрь) достигает 0,46–0,53 °C (рис. 2, *b*). Максимальные внутригодовые изменения условной плотности в ядре ХПС составляют 0,81 усл. ед., а ее $СКО_{мес}$ достигает в мае, июне и сентябре 0,64–0,99 усл. ед. (рис. 2, *c*). Максимальные внутригодовые изменения солёности в ядре ХПС составляют 1,07 ЕПС, ее $СКО_{мес}$ в мае достигает 0,99 ЕПС (рис. 2, *d*).

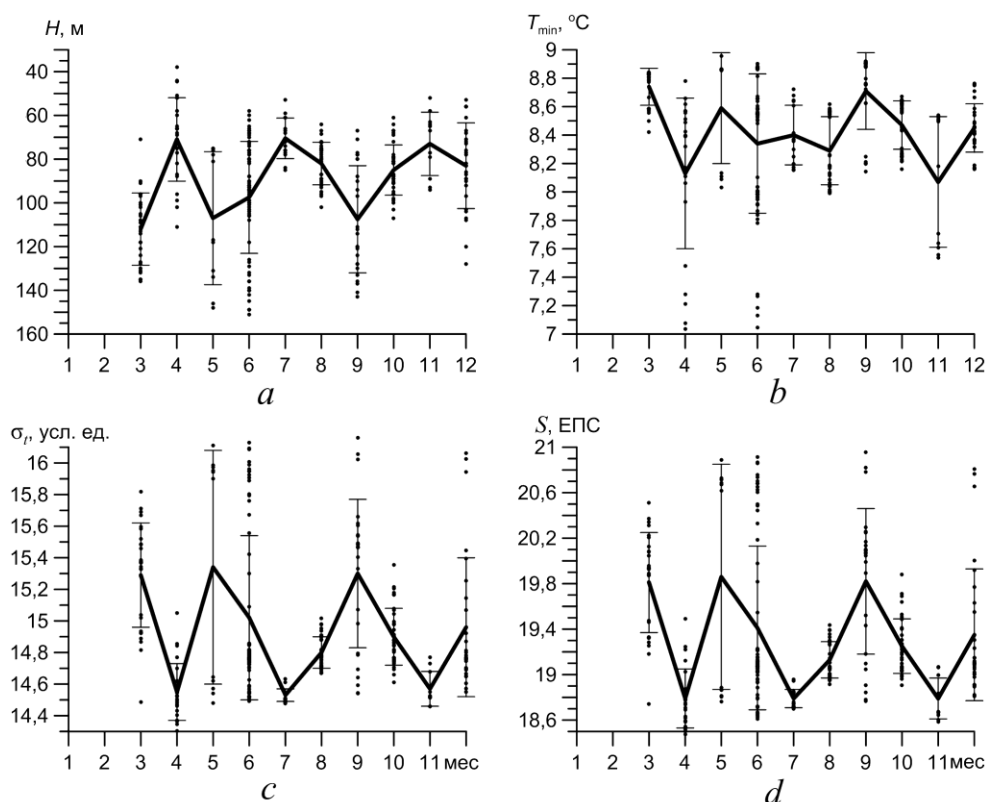


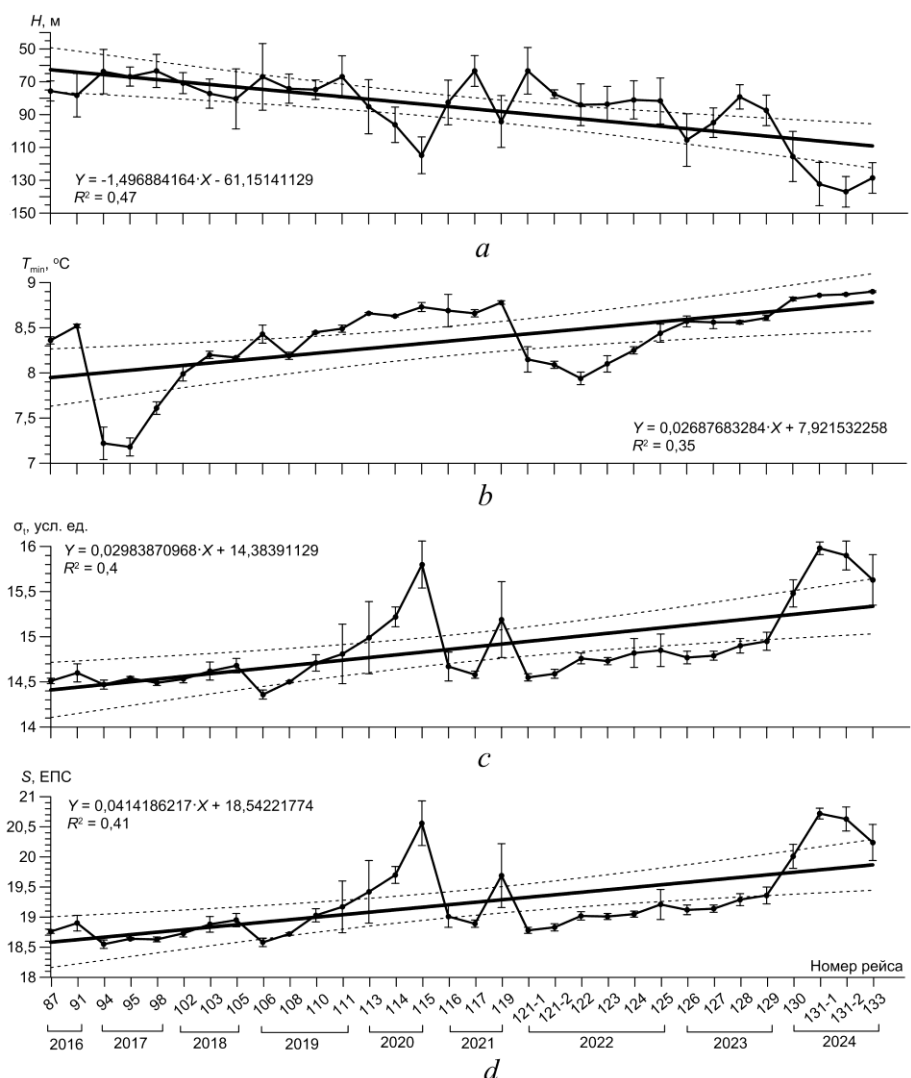
Рис. 2. Распределение по месяцам значений глубины залегания ядра ХПС (*a*), температуры (*b*), плотности (*c*) и солености (*d*) в ядре (точки). Жирные линии – значения параметров, осредненные по всем станциям для каждого месяца; отрезки – разброс значений, соответствующий $\pm 1 \text{ СКО}_{\text{мес}}$

Fig. 2. Distribution of the values of CIL core depth (*a*), as well as temperature (*b*), density (*c*), and salinity (*d*) in it (points) by months. Bold lines are the parameter values averaged over all the stations for each month; segments are the spread of values corresponding to $\pm 1 \text{ RMSD}_{\text{month}}$

Таким образом, высокие значения $\text{СКО}_{\text{мес}}$, обусловленные совместным влиянием пространственной, синоптической и межгодовой изменчивости параметров ХПС, и большая неоднородность распределения данных по месяцам приводят к существенным отличиям сезонного цикла параметров ХПС для материкового склона у берегов Крыма от климатического сезонного цикла, полученного в целом для всего Черного моря.

Далее были проанализированы ряды значений СКО параметров ХПС, рассчитанных по данным каждого отдельного рейса ($\text{СКО}_{\text{рейс}}$), которые характеризуют разброс значений параметров, обусловленный совместным влиянием синоптической (межсуточной) и пространственной изменчивости (рис. 3).

Максимальные значения $\text{СКО}_{\text{рейс}}$ глубины залегания, T_{\min} , σ_t и S в ядре ХПС не превышали 16 м (рис. 3, *a*), $0,18^\circ\text{C}$ (рис. 3, *b*), $0,42$ усл. ед. (рис. 3, *c*), $0,53$ ЕПС (рис. 3, *d*) и были в 2–2,5 раза меньше, чем значения $\text{СКО}_{\text{мес}}$ (рис. 2), которые кроме пространственной и синоптической изменчивости отражают еще и вклад межгодовой изменчивости. Это свидетельствует о значительном вкладе межгодовых вариаций в общую изменчивость характеристик ХПС.



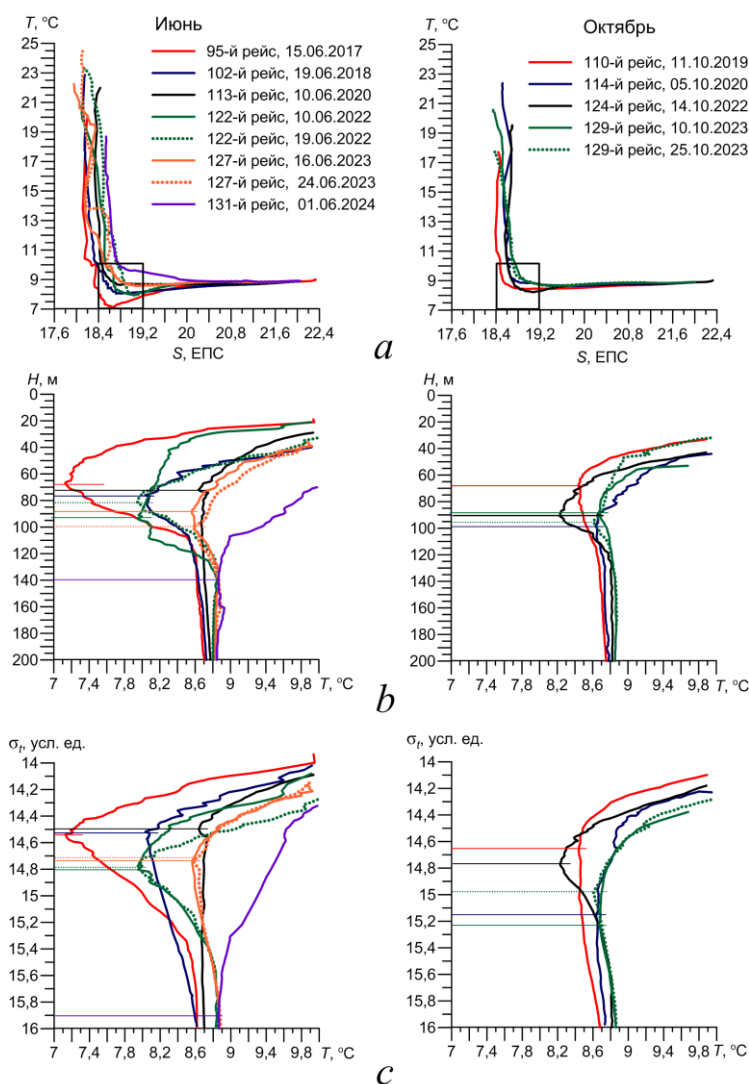
Р и с. 3. Распределение осредненных по всем станциям для каждого рейса значений глубины залегания ядра ХПС (*a*), температуры (*b*), плотности (*c*) и солености (*d*) в ядре. Жирные прямые – линейные тренды; штриховые кривые – границы доверительных интервалов 99%-ного уровня статистической достоверности; отрезки – разброс значений ± 1 СКО_{рейс}

Fig. 3. Distribution of the values of CIL core depth (*a*), as well as temperature (*b*), density (*c*), and salinity (*d*) in it averaged over all the stations for each cruise. Bold straight lines are linear trends; dashed curves are the boundaries of 99%-confidence intervals, and segments are the spread of values ± 1 RMSD_{cruise}

Распределения средних по каждому рейсу значений H , T_{min} , σ_t и S содержат значимые на уровне $\alpha = 0,01$ (99%-ный уровень достоверности) линейные тренды, характеризующие общую тенденцию долгопериодной изменчивости параметров ХПС за 2016–2024 гг. Эта тенденция проявляется в увеличении глубины залегания ядра ХПС и повышении в нем температуры, солености и плотности (рис. 3). Коэффициенты детерминации (R^2) для линейных трендов всех параметров ХПС составляют 0,35–0,47 (рис. 3), т. е. вклад изменчивости параметров ХПС, описываемой линейным трендом, в их общую изменчивость, связанную с сезонными и межгодовыми вариациями, достигает 35–

47 %. Размах линейного тренда средней по каждому рейсу глубины залегания ядра ХПС составил 38 м (рис. 3, *a*), температуры, плотности и солёности в ядре – 0,88 °C (рис. 3, *b*), 0,97 усл. ед. (рис. 3, *c*) и 1,36 ЕПС (рис. 3, *d*).

Для оценки изменений параметров ХПС без влияния сезонной и пространственной изменчивости были проанализированы *T*, *S*-кривые и вертикальные профили температуры на отдельных станциях, совпадающих по местоположению и выполненных в одни и те же месяцы (рис. 4). Следует отметить, что чаще всего в рейсах измерения проводились в июне (в течение 6 лет) и в октябре (4 года).



Р и с. 4. Примеры *T*, *S*-кривых (*a*), вертикальных профилей температуры в зависимости от глубины (*b*) и изопикнической поверхности (*c*) на станциях, расположенных на 34,65° в. д., в июне (слева) и октябре (справа). Прямоугольниками на фрагменте *a* выделены участки *T*, *S*-кривых, соответствующие ядру ХПС; прямыми линиями на фрагментах *b* и *c* отмечено положение минимумов температуры

F i g. 4. Examples of *T*, *S*-curves (*a*), vertical temperature profiles depending on depth (*b*), and isopycnal surface (*c*) at the stations located at 34,65° E in June (left) and October (right). Rectangles in fragment *a* highlight the sections of *T*, *S*-curves corresponding to the CIL core; straight lines in fragments *b* and *c* mark the position of temperature minima

На большинстве T , S -кривых хорошо прослеживается подповерхностный минимум температуры, соответствующий ядру ХПС. Исключение составляет T , S -кривая по данным измерений в июне 2024 г. (131-й рейс), на которой подповерхностный минимум температуры в виде явно выраженного экстремума не прослеживается (рис. 4, *a*). Отличия значений T_{\min} , глубины ее залегания и соответствующей изопикнической поверхности по данным каждого рейса, выполненного в июне и октябре, связаны с совместным влиянием синоптической и межгодовой изменчивости (рис. 4, *b*, *c*). В июне, по данным измерений в шести рейсах, за период 2017–2024 гг. изменения глубины залегания ядра ХПС составили 72 м, температуры в ядре – 1,785 °С, плотности в ядре ХПС – 1,44 усл. ед. Минимальные значения H , T_{\min} и σ_t (68 м, 7,08 °С и 14,47 усл. ед.) наблюдались в 2017 г., максимальные (140 м, 8,865 °С и 15,91 усл. ед.) – в 2024 г. В октябре за период 2019–2023 гг. изменения указанных значений были заметно меньше, чем в июне, и составили 31 м, 0,44 °С и 0,565 усл. ед. (рис. 4, *b*, *c*).

Дать оценки синоптических изменений параметров ХПС, исключив влияние межгодовой изменчивости, позволили данные 122, 127 и 129-го рейсов, в течение каждого из которых измерения на анализируемых станциях были выполнены повторно с временным интервалом примерно 8–15 сут (соответственно 10 и 19 июня 2022 г., 16 и 24 июня 2023 г., 10 и 25 октября 2023 г.). Синоптические изменения параметров ХПС (H , T_{\min} , σ_t) в июне 2022 г. составили 12 м, 0,003 °С, 0,01 усл. ед., в июне 2023 г. – 12 м, 0,02 °С, 0,01 усл. ед., в октябре 2023 г. – 7 м, 0,06 °С, 0,235 усл. ед. (рис. 4, *b*, *c*). Эти изменения на масштабе от недели до двух были как минимум в несколько раз меньше, чем изменения, обусловленные совместным влиянием синоптической и межгодовой изменчивости (72 м, 1,785 °С, 1,44 усл. ед. в июне и 31 м, 0,44 °С и 0,565 усл. ед. в октябре) (рис. 4, *b*, *c*), что свидетельствует о существенном влиянии межгодовых изменений на изменчивость параметров ХПС. Отметим, что повышение вклада межгодовых вариаций в общую дисперсию ТПМ у берегов Крыма было выявлено ранее по данным спутниковых измерений [27].

Далее для оценок тенденций долгопериодной изменчивости характеристик ХПС в различных районах материкового склона были проанализированы временные ряды значений глубины, T_{\min} , σ_t и S в ядре ХПС за период 2016–2024 гг. на совпадающих по местоположению станциях, которые были выполнены в западной (34,28° в. д., 36 станций), центральной (34,65° в. д., 41 станция) и восточной (34,94° в. д., 35 станций) частях материкового склона (рис. 5). Эти распределения показывают качественно одинаковые тенденции долгопериодной изменчивости параметров ХПС и содержат значимые линейные тренды, характеризующие заглубление ядра ХПС (рис. 5, *a*), повышение температуры (рис. 5, *b*), солености (рис. 5, *c*) и плотности (рис. 5, *d*) в ядре. Отличия между рядами параметров ХПС в разных районах материкового склона отражаются в величине вклада долгопериодной изменчивости, описываемой линейным трендом, в общую изменчивость характеристик ХПС за 9 лет, включающую в себя еще и синоптическую и сезонную изменчивость. В центральной части значения R^2 составляют 0,4 для всех параметров (рис. 5, *a* – *d*). В восточной части линейный тренд глубины залегания ядра ХПС характеризуется значением R^2 , равным 0,45 (рис. 5, *a*), при этом отмечается некоторое уменьшение значений для линейных трендов плотности и солености в ядре ХПС (до 0,3) (рис. 5, *c*, *d*). Такое уменьшение может быть свя-

зано с повышением синоптической изменчивости этих параметров вследствие периодического выноса азовоморских вод пониженной солености из Керченского пролива [28]. В западной части района значения R^2 для линейных трендов температуры, солености и плотности в ядре ХПС составляют 0,35, для тренда глубины залегания ядра значение R^2 уменьшается до 0,3 (рис. 5, $a-d$).

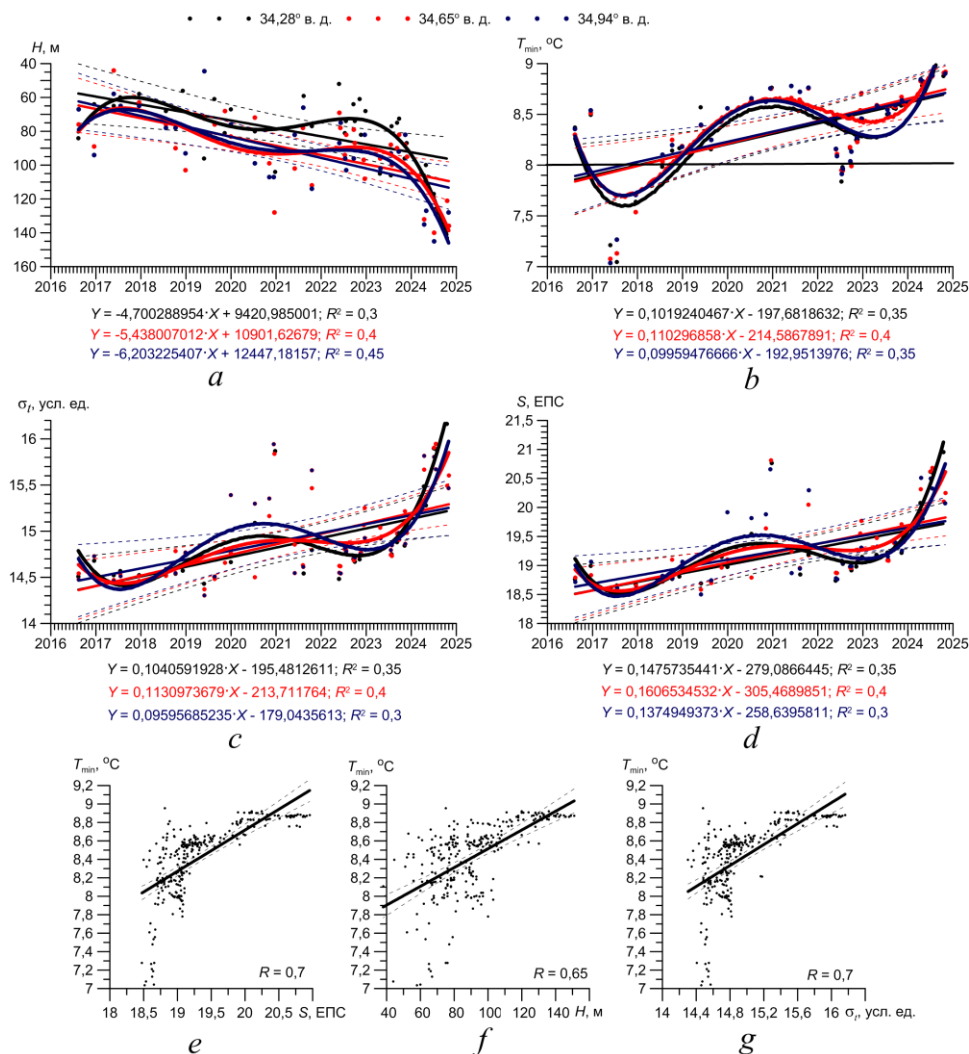


Рис. 5. Распределение значений H (a), T_{\min} (b), σ_t (c) и S (d) в ядре ХПС в западной, центральной и восточной частях материкового склона по данным всех станций за период 2016–2024 гг.; графики линейной связи между значениями T_{\min} и S (e), T_{\min} и H (f), T_{\min} и σ_t (g). Точки на фрагментах $a-d$ – значения параметров на каждой станции. Жирные прямые – линейные тренды; жирные кривые – аппроксимация полиномами 5-й степени; штриховые линии – границы доверительных интервалов 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig. 5. Distribution of the H (a), T_{\min} (b), σ_t (c) and S (d) values in CIL core in the western, central and eastern parts of the continental slope based on the data from all stations performed in 2016–2024; graphs of the linear correlations between T_{\min} and S (e), T_{\min} and H (f), and T_{\min} and σ_t (g). Points in fragments $a-d$ are the parameter values at each station. Bold straight lines are linear trends, bold curves are approximations by the 5th degree polynomials; dashed lines are the boundaries of 99%-confidence intervals

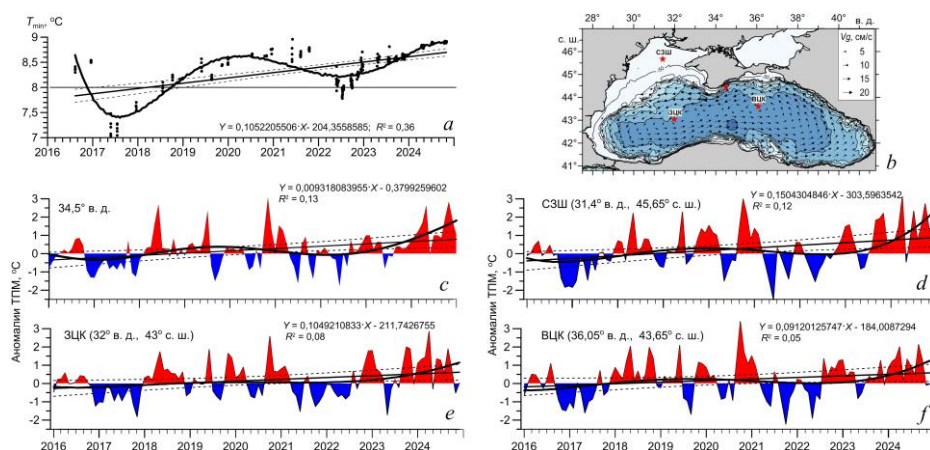
Аппроксимация рядов значений параметров ХПС полиномами 5-й степени показывает, что при наличии значимого линейного тренда, характеризующего общую долгопериодную тенденцию изменчивости этих параметров, отмечаются два периода их повышения и два периода понижения.

В течение большей части анализируемого периода температура в ядре ХПС была выше $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, по совокупности данных всех станций средняя температура составила $8,42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значения T_{\min} были ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ только в течение 2017 и в летний период 2022 г. В работах [24, 25] по данным экспедиционных измерений у берегов Крыма за период 2016–2019 гг. также отмечается понижение температуры ядра ХПС ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2017 г. Аналогичное понижение было выявлено и у материкового склона северо-восточной части Черного моря [14]. Согласно [14, 21], в начале 2017 г. произошло обновление вод ХПС вследствие аномально холодной зимы 2016–2017 гг. Отметим, что в период повышения температуры в ядре ХПС в 2019–2021 гг. (когда по данным всех выполненных за это время станций она изменялась от $8,2$ до $8,95\text{ }^{\circ}\text{C}$) на T , S -кривых и вертикальных профилях температуры в зависимости от глубины и изопикнической поверхности ХПС выделялся в виде явно выраженного экстремума, тогда как по данным измерений на всех станциях в 2024 г. (когда значения T_{\min} достигали $8,77$ – $8,92\text{ }^{\circ}\text{C}$) ХПС на T , S -кривых и вертикальных профилях температуры в виде экстремума не прослеживался (рис. 4). При этом в сентябре 2024 г. минимум температуры прослеживался на изопикнических поверхностях $15,85$ – $16,15$ усл. ед., т. е. ядро ХПС приблизилось к верхней границе сероводородной зоны, определяемой по положению изопикны $16,2$ усл. ед. В среднем по данным всех станций ядро ХПС прослеживалось на глубине 91 м и на изопикнической поверхности $14,95$ усл. ед., соленость в ядре составляла $19,3$ ЕПС. В периоды повышения температуры в ядре ХПС происходило его заглубление и увеличение значений солености и плотности (рис. 5, a – d). Анализ данных всех измерений за 2016–2024 гг. показал, что наблюдается значимая на уровне $\alpha = 0,01$ положительная линейная корреляция между значениями T_{\min} , S и σ_t в ядре ХПС с коэффициентами корреляции $R = 0,7$ (рис. 5, e , g), а также между значениями T_{\min} и H с коэффициентом корреляции $R = 0,65$ (рис. 5, f). Увеличение солености при повышении температуры в ядре ХПС по данным экспедиционных измерений у берегов Крыма отмечалось и ранее в работе [24], а повышение температуры при его заглублении – в работах [29, 30].

Все типы распределения значений температуры в ядре ХПС (осредненных по всем станциям для каждого рейса (рис. 3, b); полученных по совокупности данных на станциях в отдельных районах материкового склона (рис. 5, b) и по данным всех выполненных станций (рис. 6, a)) показывают качественно одинаковые долгопериодные тенденции, описываемые линейными трендами, а также отражают два периода, когда значения T_{\min} были ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2017 г. и лето 2022 г.), и два периода максимального повышения T_{\min} (2019–2021 и 2023–2024).

Отметим, что общая тенденция изменения T_{\min} за период 2016–2024 гг. по данным экспедиционных измерений и периоды повышения и понижения ее значений качественно согласуются с распределением среднемесячных значений аномалий ТПМ по спутниковым данным в узлах сетки, расположенных над изобатой 1000 м у берегов Крыма. Анализ взаимно-корреляционных функций $R(\tau)$ между временными рядами среднемесячных значений анома-

лий ТПМ, рассчитанных по всему периоду 2016–2024 гг. в узлах сетки с шагом $0,5^\circ$ по долготе, показал, что максимальные значения коэффициентов $R(\tau)$ наблюдаются при нулевом временном сдвиге τ и составляют 0,95–0,99 (табл. 2). Отсутствие временного сдвига свидетельствует о том, что межгодовые изменения ТПМ в разных районах материкового склона в пределах анализируемой области качественно одинаковы и происходят квазисинхронно. Распределение аномалий ТПМ у берегов Крыма в узле сетки на $34,5^\circ$ в. д. над изобатой 1000 м и его положение показаны на рис. 6, *b*, *c*. Высокие отрицательные аномалии ТПМ (до $-1,5^\circ\text{C}$), которые наблюдались со второй половины 2016 до конца 2017 и весной 2022 г., обусловили понижение значений T_{\min} в 2017 и в летний период 2022 г. Высокие положительные аномалии ТПМ ($2,5\text{--}3^\circ\text{C}$), которые наблюдались в 2018 и в первой половине 2019 г., осенью – зимой 2020–2021 и в течение 2023–2024 гг., согласуются с повышением значений T_{\min} в 2019–2021 и 2023–2024 гг. (рис. 6, *a*, *c*). Распределения значений аномалий ТПМ, также как и распределение значений T_{\min} , характеризуются наличием линейного тренда. В то же время R^2 для линейных трендов аномалий ТПМ составляет 0,13 (рис. 6, *c*), тогда как для линейного тренда T_{\min} по данным всех станций он почти в 3 раза выше и составляет 0,36 (рис. 6, *a*). Это свидетельствует о том, что вклад долгопериодной изменчивости, описываемой линейным трендом, в общую изменчивость температуры у берегов Крыма в ядре ХПС выше, чем вклад долгопериодной тенденции в межгодовую изменчивость ТПМ на поверхности.



Р и с. 6. Распределение значений T_{\min} по данным всех станций (*a*); векторы геострофических течений на поверхности относительно 300 дБ [27] и положение узлов сетки (звездочки), для которых представлены аномалии ТПМ (*b*); распределение положительных (красный цвет) и отрицательных (синий) аномалий ТПМ у берегов Крыма над изобатой 1000 м на $34,5^\circ$ в. д. (*c*), в районе северо-западного шельфа (СЗШ) (*d*), в центрах западного (ЗЦК) (*e*) и восточного (ВЦК) (*f*) циклонических круговоротов. Жирные прямые – линейные тренды; жирные кривые – аппроксимация полиномами 7-й степени; штриховые линии – границы доверительных интервалов 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig. 6. Distribution of T_{\min} values based on the data from all stations (*a*); geostrophic current vectors on the surface relative to 300 dB [27] and grid node positions (asterisks) for which the SST anomalies are presented (*b*); distribution of positive (red) and negative (blue) SST anomalies off the Crimea coast above the 1000 m isobath at 34.5° E (*c*), in the region of northwestern shelf (NWS) (*d*), and in the centers of western (*e*) and eastern (*f*) cyclonic gyres (WCG and ECG, respectively). Bold straight lines are linear trends; bold curves are approximations by the 7th degree polynomials, and dashed lines are the boundaries of 99%-confidence intervals

Т а б л и ц а 2
Table 2

Максимальные значения коэффициентов $R(\tau)$ взаимно-корреляционных функций между рядами среднемесячных аномалий ТПМ за период 2016–2024 гг.
Maximum values of the cross-correlation function coefficients $R(\tau)$ between the series of monthly average SST anomalies in 2016–2024

Узлы сетки и районы Черного моря / Grid nodes and regions of the Black Sea							
–	34° в. д. / 34° E	34,5° в. д. / 34.5° E	35° в. д. / 35° E	35,5° в. д. / 35.5° E	СЗШ / NWS	ЗЦК / WCG	ВЦК / ECG
34° в. д. / 34° E	–	0,96	0,96	0,95	0,81	0,80	0,85
34,5° в. д. / 34.5° E	0,96	–	0,99	0,96	0,79	0,77	0,85
35° в. д. / 35° E	0,96	0,99	–	0,97	0,79	0,77	0,85
35,5° в. д. / 35.5° E	0,95	0,96	0,97	–	0,76	0,74	0,85
СЗШ / NWS	0,81	0,79	0,79	0,76	–	0,81	0,78
ЗЦК / WCG	0,80	0,77	0,77	0,74	0,81	–	0,83
ВЦК / ECG	0,85	0,85	0,85	0,85	0,78	0,83	–

Согласно [1–14], основными источниками формирования и обновления вод ХПС служат воды центральных частей крупномасштабных циклонических круговоротов и северо-западного шельфа. Учитывая, что особенности изменения T_{\min} за период 2016–2024 гг. по данным экспедиционных измерений качественно согласуются с особенностями распределения аномалий ТПМ у берегов Крыма, для оценки согласованности межгодовых изменений T_{\min} с изменениями ТПМ в источниках обновления вод ХПС нами были проанализированы межгодовые ряды среднемесячных значений аномалий ТПМ по спутниковым данным. Эти аномалии рассчитывались в узлах сетки, расположенных над СЗШ, в центрах ЗЦК и ВЦК. Центры круговоротов выбирались по распределению векторов геострофических течений на поверхности моря согласно [27] (рис. 6, b).

Отметим, что ряд значений температуры в ядре ХПС по данным всех выполненных станций характеризуется большой неоднородностью по времени: интервал между выполнением соседних станций в ходе отдельных рейсов может отличаться до нескольких часов; в январе и феврале данные отсутствуют; измерения, проведенные в разные годы/месяцы, не всегда выполнялись в одни и те же месяцы/дни. Поэтому дать количественные оценки связи температуры в ядре ХПС по фрагментарным экспедиционным данным и среднемесячных аномалий ТПМ по данным непрерывных спутниковых измерений, рассчитав взаимно-корреляционные функции между рядами этих параметров, не представляется возможным.

Распределения значений аномалий ТПМ в области СЗШ и в центре ЗЦК так же, как и у берегов Крыма, характеризуются наличием линейного тренда, но его вклад в межгодовую изменчивость ТПМ в этих районах заметно уменьшается в восточном направлении. На северо-западном шельфе значение R^2 составляет 0,12, в центре ЗЦК оно понижается до 0,08. В центре ВЦК ли-

нейный тренд становится незначимым при $R^2 = 0,05$ (рис. 6, *d – f*). Распределения аномалий ТПМ на СЗШ и в центрах ЗЦК и ВЦК характеризовались максимальными положительными значениями (до 2,5–3 °С) в 2018 – первой половине 2019 г., осенью – зимой 2020–2021 и в течение 2023–2024 гг. Это согласуется с распределением аномалий ТПМ у берегов Крыма и с повышением значений T_{\min} в 2019–2021 и 2023–2024 гг. (рис. 6, *c – f*). В целом межгодовые изменения ТПМ на СЗШ и в центрах ЗЦК и ВЦК хорошо согласуются между собой, максимальные значения коэффициентов $R(\tau)$ взаимно-корреляционных функций между рядами аномалий ТПМ в этих районах были получены при отсутствии временного сдвига τ и составили 0,78–0,83 (табл. 2). Распределения аномалий ТПМ у берегов Крыма и в центре ВЦК показывают наиболее высокую согласованность, значения $R(\tau)$ составили 0,85. Уровень связи между рядами аномалий ТПМ у берегов Крыма и рядами аномалий ТПМ в центре ЗЦК и на СЗШ несколько понижается, значения $R(\tau)$ уменьшаются до 0,74–0,81 и 0,76–0,8 соответственно (табл. 2).

Выявленный высокий уровень значимой связи межгодовых аномалий ТПМ у берегов Крыма с межгодовыми аномалиями ТПМ в районах обновления вод ХПС ($R(\tau) = 0,74–0,85$ при $\tau = 0$) (табл. 2) свидетельствует о квазисинхронных межгодовых изменениях ТПМ в этих районах. Максимальные значения $R(\tau)$ между временными рядами аномалий ТПМ у берегов Крыма и в центре ВЦК можно объяснить географической близостью центра ВЦК к берегам Крыма и общим влиянием циркуляции – переносом потоком ОЧТ вод из центра ВЦК к Крымскому побережью (рис. 6, *b*). Учитывая хорошую согласованность изменения T_{\min} по данным экспедиционных измерений с распределением аномалий ТПМ у берегов Крыма, можно использовать регулярные непрерывные ряды спутниковых измерений ТПМ в центре ВЦК и у Крымского побережья для косвенных оценок изменений температуры в ядре ХПС.

Заключение

По данным гидрологических измерений, выполненных в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий», выявлено, что в среднем за период 2016–2024 гг. температура в ядре ХПС составила 8,42 °С, ядро прослеживалось на глубине 91 м и на изопикнической поверхности 14,95 усл. ед., соленость в ядре составила 19,3 ЕПС. Показано, что внутригодовые изменения параметров ХПС над материковым склоном у берегов Крыма по осредненным для каждого месяца данным отличаются от среднегололетнего сезонного цикла температуры и солености в ХПС, среднего для всей акватории Черного моря.

Выявлено, что синоптические изменения параметров ХПС были почти на порядок меньше изменений, обусловленных совместным влиянием синоптической и межгодовой изменчивости. Распределения средних по каждому рейсу значений характеристик ХПС содержат значимые линейные тренды, характеризующие общую тенденцию увеличения глубины залегания ядра ХПС, повышения температуры, солености и плотности в ядре. Вклад изменчивости параметров ХПС, описываемой линейным трендом, в их общую изменчивость, связанную с сезонными и межгодовыми вариациями, достигает 35–47 %. За период 2016–2024 гг. размах линейного тренда средней по каждому

рейсу глубины залегания ядра ХПС составил 38 м, температуры в ядре – 0,88 °С, плотности и солёности в ядре – 0,97 усл. ед. и 1,36 ЕПС.

Показано, что в течение большей части анализируемого периода температура в ядре ХПС была выше 8 °С, что подтверждает невозможность использования этой изотермы в качестве критерия выделения границ ХПС в последнее десятилетие. Значения T_{\min} по данным экспедиционных измерений были ниже 8 °С только в течение 2017 г. и в летний период 2022 г. Выявлены два основных периода максимального повышения T_{\min} – 2019–2021 гг. (до 8,2–8,95 °С) и 2023–2024 гг. (до 8,77–8,92 °С). Показано, что в периоды повышения температуры в ядре ХПС происходило его заглубление и повышение в нем значений солёности и плотности. Повышение плотности было наиболее выражено по данным измерений в 2024 г., когда ядро ХПС приблизилось к верхней границе сероводородной зоны.

Общая тенденция изменения T_{\min} в 2016–2024 гг. по данным экспедиционных измерений и периоды повышения и понижения ее значений качественно согласуются с распределением по спутниковым данным среднемесячных значений межгодовых аномалий ТПМ у берегов Крыма и в центрах обновления вод ХПС (северо-западный шельф, центры ЗЦК и ВЦК). Понижению значений T_{\min} в 2017 г. предшествовали высокие отрицательные аномалии ТПМ (до –1,5 °С), которые наблюдались со второй половины 2016 до конца 2017 г. Высокие положительные аномалии ТПМ (2,5–3 °С), наблюдаемые в 2018 и в первой половине 2019 г., осенью – зимой 2020–2021 и в течение 2023–2024 гг., согласуются с повышением значений T_{\min} в 2019–2021 и 2023–2024 гг.

Высокий уровень значимой корреляционной связи межгодовых изменений ТПМ у берегов Крыма с межгодовыми изменениями ТПМ на северо-западном шельфе и в центрах ЗЦК и ВЦК свидетельствует о квазисинхронных межгодовых изменениях ТПМ в этих районах и позволяет использовать регулярные непрерывные ряды спутниковых измерений ТПМ для косвенных оценок изменений температуры в ядре ХПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников И. М., Попов Ю. И. Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // *Океанология*. 1987. Т. 27, № 5. С. 739–746.
2. Полонский А. Б., Попов Ю. И. Условия формирования вод холодного промежуточного слоя Черного моря // *Современные проблемы океанологии*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. Вып. 8. 54 с.
3. Ivanov L. I., Beşiktepe Ş., Özsoy E. The Black Sea Cold Intermediate Layer // *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea* / Eds. E. Özsoy, A. Mikaelyan. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 253–264. (NATO ASI Series, vol. 27). https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_20
4. Tuzhilkin V. S. Thermohaline Structure of the Sea // *The Black Sea Environment* / Eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. P. 217–253. (The Handbook of Environmental Chemistry Book Series, vol. 5, part Q). https://doi.org/10.1007/698_5_077
5. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
6. Staneva J. V., Stanev E. V. Cold Intermediate Water formation in the Black Sea. Analysis on Numerical Model Simulations // *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea* / Eds. E. Özsoy, A. Mikaelyan. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 375–393. (NATO ASI Series, vol. 27). https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_29

7. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1999. Vol. 46, iss. 10. P. 1733–1753. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00028-X)
8. *Демьшев С. Г., Коротаев Г. К., Кныш В. В.* Эволюция холодного промежуточного слоя Черного моря по результатам ассимиляции климатических данных в модели // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 4. С. 3–19. EDN YWOJVR.
9. *Титов В. Б.* Зоны формирования и объемы вод холодного промежуточного слоя в Черном море с учетом суровости зим // Метеорология и гидрология. 2006. № 6. С. 62–68. EDN KUHNLN.
10. *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.
11. *Коротаев Г. К., Кныш В. В., Кубряков А. И.* Исследование процессов формирования холодного промежуточного слоя по результатам реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1971–1993 гг. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 41–56. EDN RTOUVN. <https://doi.org/10.7868/S0002351513060102>
12. *Akpınar A., Fach B. A., Oguz T.* Observing the subsurface thermal signature of the Black Sea cold intermediate layer with Argo profiling floats // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2017. Vol. 124. P. 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.002>
13. 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>
14. *Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Подымов О. И.* Формирование холодного промежуточного слоя в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 58–71. EDN YTCWVR. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5)
15. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Численное моделирование зимнего выхолаживания Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 1. С. 5–19. EDN DQGQSI.
16. *Пузина О. С., Мизюк А. И.* Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик холодного промежуточного слоя Черного моря в 1993–2012 гг. по результатам ретроспективного анализа // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции, г. Севастополь, 25–29 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. Севастополь : ФГБУН МГИ. С. 183–188. EDN WBHPKT. URL: http://mhi-ras.ru/news/news_201605201055.html (дата обращения: 30.10.2025).
17. *Видничук А. В., Коновалов С. К.* Изменение кислородного режима глубоководной части Черного моря за период 1980–2019 годы // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 195–206. EDN UVMXXM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-195-206>
18. 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>
19. *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>
20. *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.
21. Climate Signals in the Black Sea From a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis / L. Lima [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. 710973. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
22. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.

23. 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.
24. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-5-16>
25. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Пространственные характеристики холодного промежуточного слоя Черного моря летом 2017 года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 436–446. EDN BCSYUB. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-436-446>
26. Особенности вертикального распределения суточного хода температуры в различные сезоны в Черном море на основе данных модели NEMO / В. А. Рубакина [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 1. С. 63–78. EDN JHRQVQ. <https://doi.org/10.31857/S0002351522010114>
27. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Региональные особенности климатической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 56–67. EDN XWUADV.
28. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64>
29. Гидрологические условия в западной части Черного моря в ноябре 2015 года (по материалам 81-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4. С. 64–78. EDN WINRDB. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-4-64-78>
30. Термохалинная структура вод у берегов Крыма и прилегающей открытой акватории Черного моря летом 2016 г. / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 3. С. 20–31. EDN ZMZFVL.

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 9350-8966, ORCID ID: 0000-0003-2669-7304, ResearcherID: AAC-6651-2020**, artam-ant@yandex.ru

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 6064-4860, ORCID ID: 0000-0003-1012-515X, ResearcherID: AAC-6648-2020**, sea-ant@yandex.ru

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2496-1715, ORCID ID: 0000-0002-8399-3743, ResearcherID: AAC-6629-2020**, vault102@gmail.com