

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.465
EDN: PNPJDY

Эволюция холодного промежуточного слоя Черного моря в 2000–2021 годах

Г. К. Коротаев, А. Л. Холод ✉

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

Поступила в редакцию 26.02.2026; одобрена после рецензирования 03.04.2026;
принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель. Исследовать пространственно-временную эволюцию холодного промежуточного слоя в глубоководной части Черного моря за период 2000–2021 гг. – цель настоящей работы.

Методы и результаты. На основе комплексного использования данных спутниковых измерений температуры морской поверхности, данных измерений буев-профилемеров *Argo* и двух реанализов, обеспечивающих регулярные трехмерные поля температуры, исследуются процессы формирования холодного промежуточного слоя в Черном море и его временная эволюция в течение 2000–2021 гг. За исследуемый интервал времени выделено четыре периода эволюции. В течение первого периода с 2000 по 2005 гг. холодный промежуточный слой был близок к климатической норме, активно обновлялся зимней конвекцией, занимал всю глубоководную часть моря и сохранял сплошность почти до конца года. Во второй период (2006–2011 гг.) после мощной вентиляции в 2006 г. последовали теплые зимы, что вызвало эрозию холодного промежуточного слоя у южных и восточных берегов, его фрагментацию и сокращение холодозапаса. В течение третьего периода (2012–2016 гг.) холодная зима 2012 г. временно восстановила холодный промежуточный слой, но в последующие теплые годы он стал сезонным, полностью исчезая к концу лета. В четвертый период (2017–2021 гг.) даже после холодной зимы 2017 г. холодный промежуточный слой сместился ближе к поверхности, что ускорило его деградацию, а к 2020 г. слой с температурой ядра меньше 8 °C полностью исчез.

Выводы. За период 2000–2021 гг. классический холодный промежуточный слой Черного моря с температурой ядра ниже 8 °C подвергся значительной деградации, завершившейся его полным исчезновением к 2020 г. Основная причина деградации – региональные климатические изменения, которые характеризуются увеличением частоты теплых зимних периодов и сокращением интенсивности и продолжительности зимней конвекции. Ускорение деградации холодного промежуточного слоя связано с подъемом его ядра к поверхности, уменьшением вертикальной протяженности, нарушением сплошности и усилением горизонтального перемешивания крупномасштабными течениями. Результаты, полученные по данным реанализов, согласуются с натурными наблюдениями и подтверждают тенденцию к утрате холодным промежуточным слоем своей классической идентификации по изотерме 8 °C, что свидетельствует о глубокой перестройке термической структуры Черного моря.

Ключевые слова: холодный промежуточный слой, Черное море, температура, эволюция, вертикальная структура, ретроспективный анализ, численное моделирование, натурные наблюдения

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использо-

ванием данных дистанционных и контактных методов измерений». Авторы выражают благодарность А. И. Мизюку за предоставленный массив данных реанализа Черного моря, полученный в Морском гидрофизическом институте РАН.

Для цитирования: Коротаев Г. К., Холод А. Л. Эволюция холодного промежуточного слоя Черного моря в 2000–2021 годах // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 511–535. EDN PNPJDY.

Original article

Evolution of Cold Intermediate Layer of the Black Sea in 2000–2021

G. K. Korotaev, A. L. Kholod ✉

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

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to study the spatial-temporal evolution of cold intermediate layer in the deep part of the Black Sea in 2000–2021.

Methods and Results. The processes of formation of cold intermediate layer in the Black Sea and its temporal evolution during 2000–2021 are studied based on the integrated application of satellite measurements of sea surface temperature, the Argo float measurement data, and two reanalyses providing regular three-dimensional temperature fields. Within the period under study, four stages of evolution were identified. During the first stage from 2000 to 2005, the cold intermediate layer was close to the climatic norm, was actively renewed by winter convection, it occupied the entire deep part of the sea and remained continuous almost until the end of a year. In 2006–2011 (the second stage), powerful ventilation in 2006 was followed by warm winters that induced the erosion of cold intermediate layer off the southern and eastern coasts, its fragmentation and a reduction in its cold content. During the third stage (2012–2016), the cold intermediate layer was temporarily restored due to the cold winter in 2012, but in course of subsequent warm years it became seasonal, disappearing completely by late summer. And during the fourth stage (2017–2021), even after cold winter in 2017, the cold intermediate layer moved closer to the surface which accelerated its degradation, and by 2020 the layer with a core temperature less than 8 °C had completely disappeared.

Conclusions. During the period from 2000 to 2021, the classic cold intermediate layer of the Black Sea with a core temperature below 8 °C has been subjected to a significant degradation culminating in its complete disappearance by 2020. The main reason for its degradation consists in the regional climate changes which are characterized by an increase in the frequency of warm winter periods and a reduction of the winter convection intensity and duration. The acceleration of cold intermediate layer degradation is also related to the rise of its core to the surface, a decrease in its vertical extent, disruption of its continuity, as well as to the increased horizontal mixing by large-scale currents. The results obtained from reanalysis data are consistent with the field observations and confirm the tendency for the cold intermediate layer to lose its classical identification, namely presence of the 8 °C isotherm. This fact indicates a significant reconstruction of the Black Sea thermal structure.

Keywords: cold intermediate layer, Black Sea, temperature, evolution, vertical structure, retrospective analysis, numerical modeling, field measurements

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of FSB SI FRC MHI FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on mathematical modeling using the data from remote and contact measurement methods”. The authors are grateful to A. I. Mizyuk for providing the Black Sea reanalysis data array obtained in Marine Hydrophysical Institute, RAS.

For citation: Korotaev, G.K and Kholod, A.L., 2026. Evolution of Cold Intermediate Layer of the Black Sea in 2000–2021. *Physical Oceanography*, 33(4), pp. 541–564.

Введение

Наблюдения последних лет убедительно свидетельствуют о существенной трансформации вертикальной термической структуры Черного моря [1]. Наиболее значительным изменениям подвержен холодный промежуточный слой (ХПС) – специфическая водная масса, формирующаяся в основном в результате вентиляции верхних слоев моря при развитии зимней конвекции и теряющая связь с поверхностным слоем моря при весеннем прогреве. В результате потепления в регионе в течение последних десятилетий ХПС, который устойчиво наблюдался во все сезоны более ста лет инструментальных наблюдений, заметно деградировал.

Постепенная деградация ХПС была установлена по данным наблюдений [2–5] и результатам моделирования [6–9]. Анализ интегральной динамики этого слоя за 2000–2020 гг. выполнен также в работах [10, 11], где использовались данные трех реанализов, представляющих изменения трехмерного поля температуры морской воды на регулярной сетке. Данные реанализов показали, что примерно до 2012 г. наблюдалось относительно медленное повышение температуры ядра ХПС, которое сменялось затем ускорением его прогрева. В работах [10, 11] оценивалась эволюция только средней по площади моря вертикальной температурной стратификации. Вместе с тем данные реанализов позволяют достаточно подробно проследить пространственные изменения структуры ХПС [6].

В настоящей работе данные двух реанализов используются для описания характерных изменений пространственной структуры ХПС в течение 2000–2021 гг. В дальнейшем мы используем термин ХПС для «традиционной» водной массы, заключенной между изотермами 8 °C. Во втором разделе статьи дается описание используемых массивов наблюдений и реанализов. В третьем разделе приводится сравнительная характеристика используемых массивов. В четвертом разделе описываются особенности формирования ХПС и его временной эволюции в течение 2000–2021 гг. В заключение обсуждаются общие закономерности формирования указанного слоя в зависимости от зимних атмосферных условий, его распространения по акватории Черноморского бассейна и деградации с течением времени.

Цель настоящей работы – комплексный анализ многолетней динамики холодного промежуточного слоя Черного моря, включая его пространственную структуру, периоды обновления и последовательную деградацию на основе данных ретроспективных анализов и измерений буев-профиломеров *Argo*.

Данные и методы

Оценки изменений характеристик ХПС Черного моря проводились с использованием данных спутниковых наблюдений температуры поверхности моря (ТПМ) (продукт *SST_BS_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_022* морской службы *Copernicus (CMEMS)*), вертикальных распределений температуры по данным буев-профиломеров *Argo* и результатов двух реанализов.

Реанализ, выполненный в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН, основан на модели *NEMO*¹, позволяющей воспроизводить динамику и тренды гидрофизических параметров в Азовском, Черном и Мраморном морях [12]. Расчетная сетка региональной конфигурации комплекса численного моделирования динамики океана *NEMO v.3.6* покрывает отмеченные бассейны с шагами по пространству $1/17^\circ \times 1/24^\circ$. В модели ассимилируются трехмерные поля температуры и солёности морской воды, восстановленные по данным спутниковых альтиметрических наблюдений и спутниковых наблюдений ТПМ по методике, близкой к описанной в работе [8]. Более подробное описание процедуры реанализа приведено в работе [11].

Продукт *BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004* морской службы *CMEMS* представляет собой среднесуточные гидродинамические поля Черного моря с 01.01.1993 г. по 30.06.2021 г. Гидродинамическое ядро реанализа основано на модели общей циркуляции океана *NEMO v.4* с горизонтальным разрешением $1/27^\circ \times 1/36^\circ$. Ассимиляция данных осуществлялась на основе вариационной схемы *3DVAR* [13, 14]. При выполнении реанализа ассимилировались *in situ* данные измерений температуры и солёности из наборов *SeaDataNet* и *CMEMS* и спутниковые вдольтрековые аномалии уровня морской поверхности *CMEMS*. Подробное описание алгоритма реанализа *CMEMS* также приведено в работе [11].

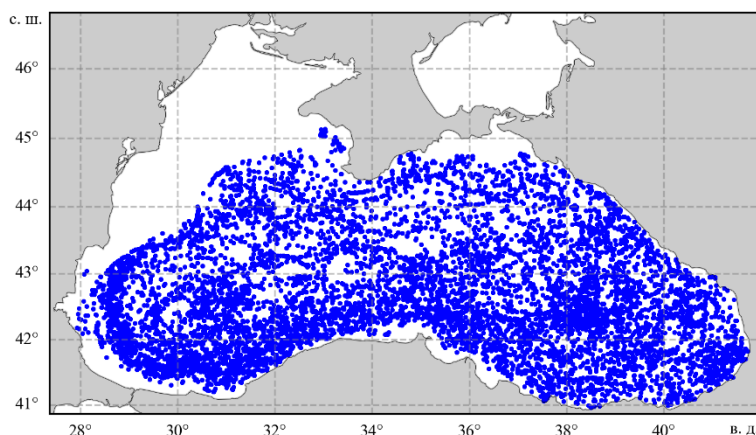
Точностные характеристики используемых массивов

Спутниковая ТПМ имеет среднеквадратическую погрешность (СКО) около $0,5^\circ\text{C}$ относительно данных натурных измерений. Оценить реальную точность наблюдений температуры на буях-профилемерах довольно затруднительно, поскольку по причине отсутствия регулярной поверки может наблюдаться дрейф измерений. Предположительно более поздние измерения были стабильнее. В данной работе мы пренебрегаем погрешностями измерения температуры морской воды на буях-профилемерах.

Данные буй-профилемеров доступны с 2005 г. Количество буй-профилемеров в акватории Черного моря менялось в разные годы, и они обычно были распределены неравномерно по площади бассейна. На рис. 1 видно, что плотность зондирований буями-профилемерами повышается в юго-западной области бассейна и на юге вдоль Анатолийского побережья п-ова Анатолия (п-ов Малая Азия).

Такое распределение объясняется отчасти тем обстоятельством, что буи запускались в юго-западном углу бассейна и затем переносились вдоль побережья Основным Черноморским течением (ОЧТ). Также повышенная плотность зондирований наблюдается на востоке в ограниченном районе с координатами примерно $42,2^\circ$ с. ш. и $38,1^\circ$ в. д., что, по-видимому, обусловлено взаимодействием ОЧТ с Батумским вихрем. Относительно небольшое количество измерений в течение года и их неравномерное распределение по площади бассейна затрудняют анализ изменений ХПС только по данным наблюдений на буях [4].

¹ *Madec G.* NEMO ocean engine (Note du Pôle de Modélisation, No. 27). France : Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), 2008. 300 p.



Р и с. 1. Распределение зондирований буями *Argo* по акватории Черного моря в 2005–2021 гг.
Fig. 1. Distribution of the *Argo* float soundings in the Black Sea in 2005–2021

Преимущество реанализов состоит в возможности получить представления о непрерывной эволюции полей морских бассейнов по пространству и во времени. Однако точность воспроизведения поля температуры в реанализах существенно ниже, чем у инструментальных наблюдений. Поскольку нас интересуют изменения, происходящие в ХПС, оценка точности реанализов была проведена по всей выборке буев, проводивших наблюдения в Черном море в 2005–2021 гг. в слое 40–100 м, т. е. там, где располагаются верхняя и нижняя границы ХПС.

Реанализ МГИ дает среднее отклонение от инструментальных измерений в этом слое, равное $-0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, и СКО, равное $0,43\text{ }^{\circ}\text{C}$. По данным реанализа *CMEMS*, среднее отклонение и СКО равны $-0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,30\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Отметим, однако, что оценка точности реанализа *CMEMS* может быть несколько завышенной, поскольку данные буев, по которым проводилась оценка, уже ассимилировались моделью.

По данным обоих реанализов были построены карты холодозапаса – условной величины, пропорциональной объему холодной воды и ее отклонению от температуры $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Холодозапас рассчитывался для глубоководной части моря в каждом узле сетки модели по формуле

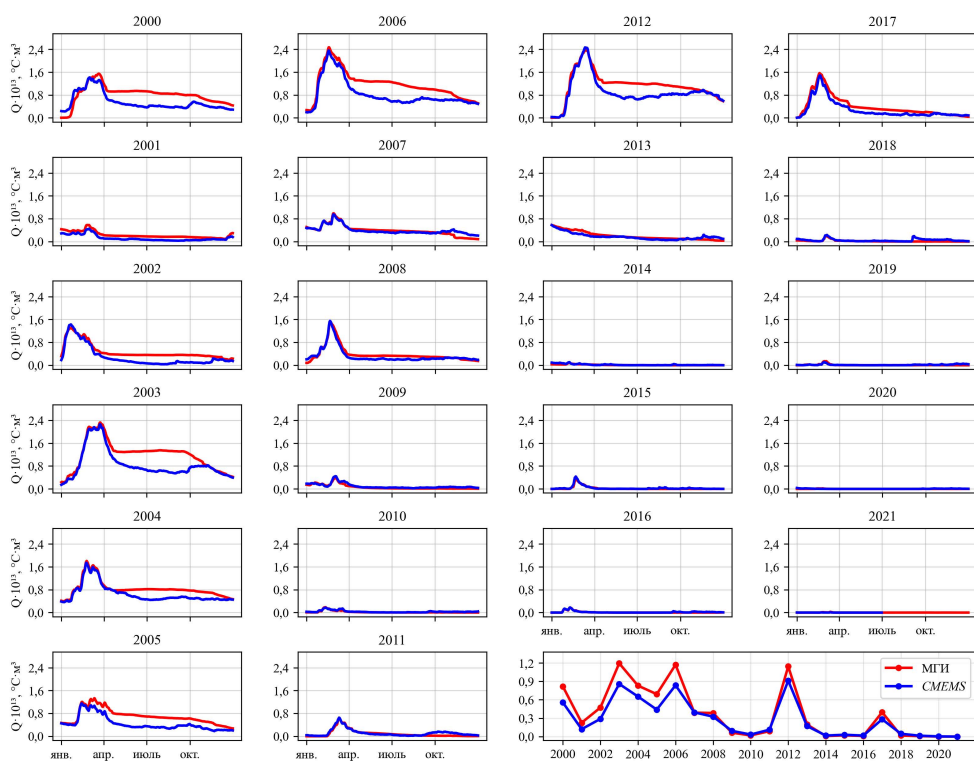
$$Q = \int (8\text{ }^{\circ}\text{C} - T) dz,$$

в которой интегрирование ведется по глубине в пределах ХПС. Отметим, что в зимнее время, когда в море развивается конвекция, верхняя граница ХПС в используемых данных реанализов и по наблюдениям на буях в некоторых местах может совпадать с поверхностью моря. Поэтому построенные карты отражают холодозапас ХПС только после того, как он будет отсечен от поверхности моря более теплой водой в результате прогрева.

Качество данных реанализов, используемых при картировании холодозапаса, оценивалось посредством сопоставления с наблюдениями на буях *Argo*. Всего анализировалось 7108 профилей температуры, для которых отмечалось наличие или отсутствие воды с температурой ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реанализ МГИ в 334

случаях показал отсутствие воды с указанной температурой, тогда как по данным буев она присутствовала; в 6447 случаях данные реанализа соответствовали данным буев и в 327 случаях реанализ показал наличие воды с температурой менее 8 °С при ее отсутствии в данных буев. Реанализ *CMEMS* показал отсутствие воды с температурой ниже 8 °С в 344 случаях, тогда как по данным буев она присутствовала; в 6578 случаях реанализ показал соответствие данным буев и в 186 случаях – наличие воды с температурой ниже 8 °С при ее отсутствии по данным буев. Таким образом, в целом имеется вполне удовлетворительное соответствие данных реанализов наблюдениям.

Представление о соответствии результатов реанализов дают графики изменений интегрального среднесуточного холодозапаса глубоководной части моря (рис. 2).



Р и с. 2. Изменения интегрального среднесуточного холодозапаса ХПС за каждый год и его среднегодовых значений по результатам реанализов МГИ и *CMEMS*

Fig. 2. Changes in the integral daily average CIL cold content for each year and its annual average values based on the results of MHI and *CMEMS* reanalyses

Наибольшее расхождение между оценками наблюдается в годы, когда в акватории моря дрейфовало небольшое количество буев. В частности, расхождения в оценке холодозапаса по данным реанализов МГИ и *CMEMS* в начале 2000-х гг. связаны с тем, что до 2005 г. в открытом море отсутствовали наблюдения буев *Argo* и данные измерений не ассимилировались в модели *CMEMS*, тогда как методика ассимиляции, использованная в модели

МГИ, позволяла проводить ассимиляцию, базируясь только на спутниковых наблюдениях. В случаях расхождения оценок реанализ МГИ дает более высокие значения холодозапаса по сравнению со *CMEMS*, что видно на рис. 2. После 2014 г. количество буев увеличилось и кривые, оцененные по данным реанализов МГИ и *CMEMS*, сближаются.

Наблюдающиеся расхождения в величинах холодозапаса отчасти связаны с пороговым значением температуры $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, выбранным для выделения ХПС. Как показал анализ результатов, в большинстве случаев реанализ *CMEMS* показывает температуру воды, превышающую $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, в тех районах, где реанализ МГИ дает температуру ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому различия в кривых на рис. 2 можно считать незначительными. Для определенности, а также в связи с тем, что методика ассимиляции МГИ менее чувствительна к количеству наблюдений буями *Argo*, в дальнейшем будем опираться на оценки реанализа МГИ.

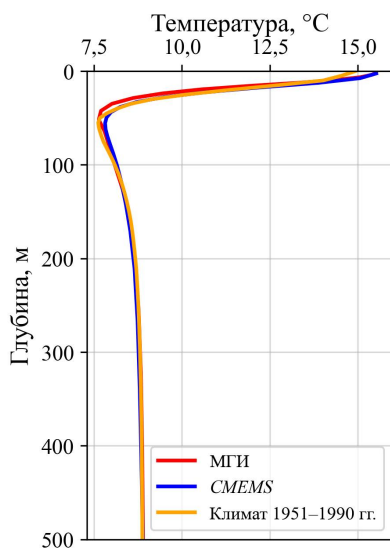
Формирование ХПС и его временная эволюция

Временная эволюция холодозапаса ХПС в глубоководной части бассейна в течение года различается в период конвекции и после отсечения холодной воды от поверхности в результате повышения ТПМ, которая является индикатором этого процесса. Анализ карт спутниковых измерений ТПМ с выделенной изотермой $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за исследуемый период показывает, что появление воды на поверхности с ТПМ менее $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается, как правило, в середине января сначала на северо-западном шельфе и в виде струи вдоль западного мелководья до устья Босфора. В глубоководной части бассейна, по данным реанализов, холодная вода на поверхности моря, как правило, сначала появляется на западе и затем с течением времени распространяется на восток. В некоторые годы в то же время появляется пятно холодной воды в центре или на северо-востоке моря. Спутниковые наблюдения показывают, что по завершении зимы вода с ТПМ выше $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ продвигается с востока на запад, отсекая ХПС от поверхности моря. Отметим, что полное отсечение ХПС от поверхности соответствует смене быстрого изменения интегрального холодозапаса во времени на более медленное (рис. 2). Такая смена происходит в основном в марте, но иногда растягивается до конца апреля.

На рис. 2 выделяются также четыре периода эволюции ХПС: первый – с 2000 по 2005 г. (первая колонка), второй – с 2006 по 2011 г. (вторая колонка), третий – с 2012 по 2016 г. (третья колонка) и четвертый – с 2017 по 2021 г. (четвертая колонка). Второй – четвертый периоды характеризуются обновлением ХПС в начале цикла вследствие холодной зимы и дальнейшей деградации этого слоя. Рассмотрим эволюцию ХПС в течение каждого периода.

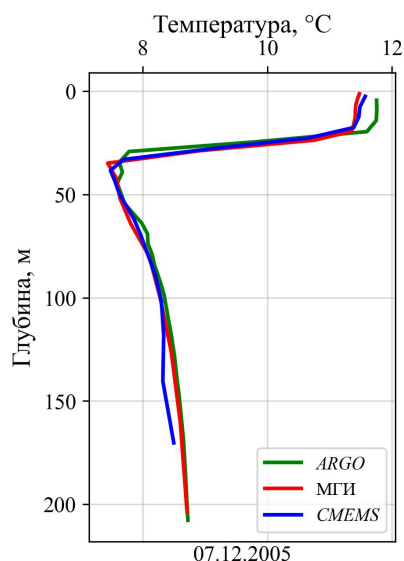
С 2000 по 2005 г. на акватории Черного моря, за исключением 2001 г., наблюдались относительно холодные зимы, когда ТПМ была ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на значительной части поверхности. Кроме 2001 г. в отдельные дни зимы вода с ТПМ менее $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдалась во всей глубоководной части моря. Холодозапас ХПС, сформировавшегося после окончания зимней конвекции, был примерно или выше $0,5 \cdot 10^{13}\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^3$. Средний вертикальный профиль температуры, по данным реанализов 2000–2005 гг., близок к климатическим данным за 1951–1990 гг.

(рис. 3). Климатический профиль за указанный период был рассчитан для глубоководной части Черного моря на основе данных климатического массива, подготовленного по методике, описанной в работе [15].



Р и с. 3. Средние вертикальные профили температуры по данным реанализов МГИ и CMEMS за 2000–2005 гг. и климатическим данным за 1951–1990 гг.

F i g. 3. Average vertical temperature profiles based on the MHI and CMEMS reanalysis data for 2000–2005 and climate data for 1951–1990



Р и с. 4. Профили температуры по данным реанализов и буя Argo за 2005 г.

F i g. 4. Temperature profiles based on the reanalysis and Argo float data for 2005

Изменения в величинах холодозапаса в период 2000–2005 гг. объясняются разной интенсивностью зимнего охлаждения. Так, зима 2001 г. была относительно мягкой, холодная вода с ТПМ ниже 8 °C появилась в середине января только в виде пятна в центре бассейна и ограничивалась этой частью моря вплоть до последней декады февраля. В последнюю декаду февраля холодная вода с ТПМ ниже 8 °C распространилась примерно до 38° в. д. и продержалась с периодическими сокращениями до конца марта. К середине апреля ХПС занимал почти всю площадь моря. Холодозапас ХПС держался на уровне $2 \cdot 10^{12}$ °C·м³ вплоть до конца октября 2001 г. Однако затем этот слой начал нагреваться и к концу года частично потерял сплошность. Вместе с тем декабрь 2001 г. был достаточно холодным. Уже к 20 декабря холодная вода и зона конвекции занимали не только северо-западный шельф и мелководное западное побережье, но также и центральную часть моря. Зона холодной воды с ТПМ менее 8 °C расширялась, и к середине января более теплая вода осталась только в полосе вдоль Кавказского побережья и Южного берега Крыма.

Такая картина продержалась до конца января 2002 г., но потом с зимним усилением ОЧТ к середине февраля более теплая вода переместилась вплоть до Анатолийского побережья. Площадь поверхностных холодных вод посте-

ленно сокращалась, и в начале апреля ХПС был полностью отсечен от поверхности, заняв всю глубоководную часть Черного моря. Сплошной ХПС в глубоководной части продержался до последней декады декабря 2002 г., а затем начал эродировать у берегов Анатолии и Крыма. Одновременно в центрах восточного и западного круговоротов стала накапливаться холодная вода, которая затем поступает в ХПС так, как это описано в работе [16]. К концу января 2003 г. теплая вода осталась только на востоке моря и у Крымского побережья.

Зима в 2003 г. была продолжительной, и к 20 марта на всей поверхности моря наблюдалась ТПМ ниже 8°C . Существенное сокращение площади поверхности, занятой холодной водой, и полное отсечение ХПС началось только во второй декаде апреля 2003 г. Характерной особенностью обновленного ХПС явилось накопление вод с температурой в ядре ниже 8°C в квазистационарных антициклонах и у берегов.

В течение мая – июля холодозапас ХПС, занимающего всю глубоководную часть моря, продолжал расти за счет субдукции холодных вод с мелководья. Сплошность ХПС сохранялась до конца декабря 2003 г., но его холодозапас падал с конца июля. В последнюю декаду декабря 2003 г. и до последней декады января 2004 г. наблюдалась небольшая эрозия ХПС у Анатолийского побережья.

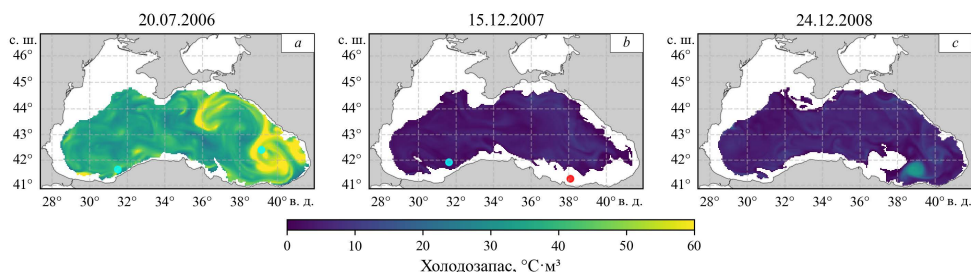
В 2004 г. ТПМ ниже 8°C наблюдалась на значительной части моря, начиная с конца первой декады февраля, и продержалась с кратковременными потеплениями до второй декады марта. К концу марта произошло полное отсечение ХПС, и до середины октября он занимал всю глубоководную часть моря. Затем началась небольшая эрозия этого слоя, но в основном он сохранил свою сплошность до периода охлаждения. В декабре 2004 г. холодная вода накапливается только на северо-западном шельфе и начинает распространяться на юг вдоль западного мелководья. В конце третьей декады января 2005 г. область холодной воды продвигается на восток. Примерно с 10 февраля вода с ТПМ менее 8°C занимает всю западную часть моря и половину восточной, за исключением полосы более теплых вод вдоль Кавказского побережья.

В конце марта 2005 г. наступило похолодание и вода с ТПМ ниже 8°C заняла всю поверхность моря. В итоге отсечение ХПС на всей глубоководной части произошло во второй декаде апреля. Сплошной ХПС продержался до конца ноября 2005 г., оставаясь хорошо выраженным по данным реанализов и наблюдений на буях (рис. 4).

В начале второго периода половина января 2006 г. была теплой и вода с ТПМ всюду превышала 8°C . С середины января вода с ТПМ менее 8°C продвигалась с запада на восток. К началу февраля и до конца марта только узкая полоса вдоль Кавказа была занята водой с ТПМ выше 8°C .

К середине апреля ХПС отсекается от поверхности во всей глубоководной области моря. Интегральный холодозапас после обновления ХПС во время длительной конвекции в 2006 г. достиг величин, сопоставимых со значениями 2003 г. Далее ХПС сохраняет сплошность с повышенным холодозапасом у берегов и в антициклонах. Отметим, что значительный объем холодной воды в ХПС вдоль Анатолийского побережья в феврале и марте поступал от холодной струи, которая располагалась вдоль западного берега Черного моря.

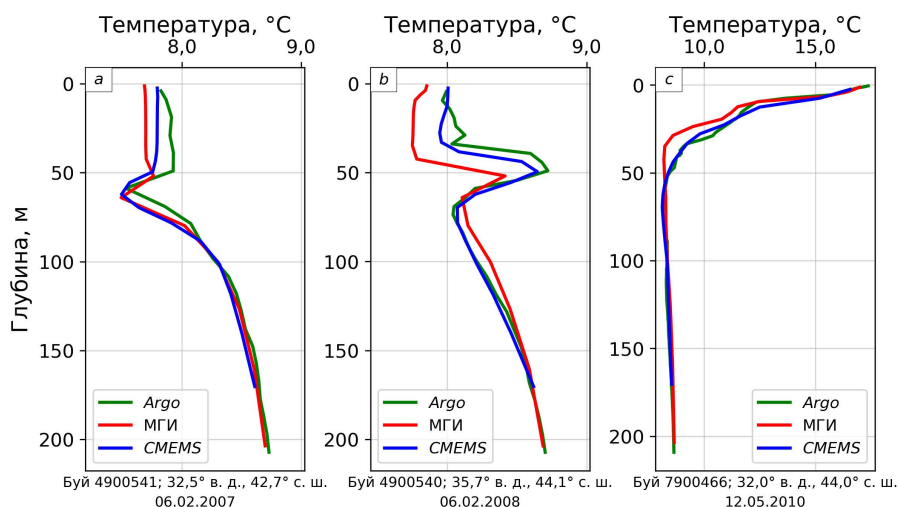
В течение лета происходило интенсивное вторжение вод ХПС от берега в центральную часть бассейна (рис. 5, *a*). Затоки вод от берега в глубоководную часть и их дальнейшее перемешивание гомогенизируют ХПС в пределах глубоководной части бассейна. В итоге начиная с середины июля ХПС прогревается, а его холодозапас падает.



Р и с. 5. Холодозапас ХПС по данным реанализа МГИ за указанные даты. Точками показано положение буев *Argo*: голубым цветом выделены буй, которые зафиксировали ХПС по результатам измерений, красным цветом – буй без фиксации ХПС

F i g. 5. CIL cold content based on the MHI reanalysis data for the specified years. Position of *Argo* floats are shown by dots: the buoys which recorded CIL from the measurement results are highlighted in blue, and the buoys with no records of CIL – in red

Начиная с середины ноября холодозапас ХПС стал сокращаться значительно быстрее в связи с эрозией этого слоя у побережья Анатолии. Несмотря на теплый декабрь 2006 г., ХПС полностью сохранил свою сплошность в течение всего месяца.



Р и с. 6. Профили температуры по данным реанализов и буев *Argo* за 2007, 2008, 2010 гг.

F i g. 6. Temperature profiles based on the reanalysis and *Argo* float data for 2007, 2008, and 2010

Большую часть февраля вдоль Анатолии, Кавказа и у Крыма сохранялась вода с ТПМ выше 8 °С. Даже там, где ТПМ стала ниже 8 °С, конвекция не достигала ядра ХПС, и поэтому не происходило его обновление (рис. 6, *a*).

К концу февраля теплая поверхностная вода осталась только в юго-восточном углу, и там располагался ХПС, который не обновился в результате конвекции. К концу марта теплая вода занимала практически всю глубоководную часть моря, и в апреле произошло полное отсечение ХПС от поверхности.

Холодный промежуточный слой после отсечения от поверхности в апреле был практически сплошным. Его холодозапас после завершения периода конвекции в силу относительно теплой зимы сравним с наблюдавшимся в 2002 г., но был заметно меньше, чем в 2003–2006 гг. Отметим также, что контраст между плотностью холодозапаса у южного берега бассейна и в открытой части моря был меньше, чем в отдельные предыдущие годы.

Несмотря на существенное сокращение холодозапаса, ХПС сохранял свою сплошность все лето. Он был хорошо выражен, а температура воды в его ядре составляла примерно 7,5 °С. Только начиная с октября незначительная эрозия ХПС распространилась на запад вдоль побережья Анатолии и дошла до Кавказа в декабре (рис. 5, *b*). В декабре 2007 г. вода с ТПМ ниже 8 °С наблюдалась только вдоль западного берега моря, распространившись к концу месяца восточнее устья Босфора. В итоге холодозапас ХПС к концу месяца заметно сократился (рис. 2).

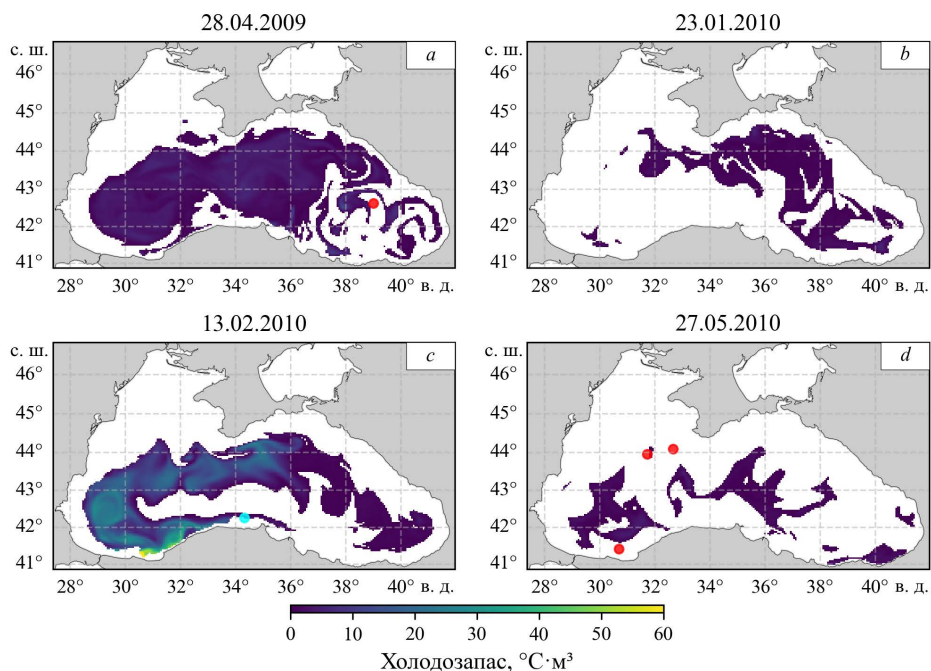
В январе 2008 г. погода над Черным морем была изменчивой, в силу чего область, занятая водой с ТПМ менее 8 °С, постоянно менялась. Лишь к концу месяца холодная вода заняла почти всю поверхность моря, за исключением узкой полосы вдоль Кавказа, Крыма и свала глубин на северо-западном шельфе, а также его продолжения у западного берега моря вдоль струи ОЧТ. К середине февраля вода с ТПМ менее 8 °С заняла практически всю поверхность моря, к концу марта полоса вод с такой температурой сохранялась только вблизи западного берега моря.

С конца января зона конвекции, где происходило обновление ХПС, согласно рассчитанным вертикальным распределениям температуры морской воды, занимала большую часть глубоководной области моря. Однако в широкой полосе вдоль Кавказского побережья ХПС не наблюдался. Отметим также формирование «экзотических» профилей температуры с теплой прослойкой над ХПС у берегов Крыма и на свале глубин северо-западного шельфа (рис. 6, *b*), что, по-видимому, связано с относительно слабым конвективным перемешиванием.

Карты ТПМ показывают, что к концу февраля 2008 г. уже вся поверхность глубоководной части моря была охвачена конвекцией, но слабое обновление ХПС, согласно рис. 2, произошло только во второй декаде месяца.

К концу первой декады марта ХПС оказался полностью отсеченным от поверхности моря, занимая всю глубоководную часть бассейна. Отметим вместе с тем, что, согласно рассчитанным профилям температуры морской воды, ядро ХПС на значительной части бассейна располагалось на глубине менее 50 м, а его толщина составляла около 10 м. Близость ядра ХПС к поверхности и его малая толщина приводят к эпизодической эрозии на периферии глубоководной части моря уже в марте. Вместе с тем в районе Батумского антициклона наблюдается подтвержденный данными измерений на буях слой ХПС большой толщины. Холодозапас в апреле вышел на плато с величиной слегка меньшей, чем в 2007 г. Это значение холодозапаса продержалось до октября 2008 г. (рис. 2).

Соответственно, сплошность ХПС почти сохранялась вплоть до начала второй декады октября с незначительными эпизодами ее нарушения. В декабре 2008 г. область холодной воды с ТПМ ниже 8°C наблюдалась только на северо-западном шельфе и вдоль мелководья на западе моря. По этой причине эрозия ХПС расширялась (рис. 5, с).



Р и с. 7. Холодозапас ХПС по данным реанализа МГИ за указанные даты. Точками показано положение буев (пояснение см. на рис. 5)

F i g. 7. CIL cold content based on the MHI reanalysis data for the specified years. Float positions are shown by dots (see Fig. 5 for an explanation)

В январе 2009 г. наблюдалось похолодание и холодная поверхностная вода стала появляться в центре моря переменными во времени пятнами. Поскольку на востоке моря и вдоль Анатолийского побережья расположились теплые поверхностные воды, в этих местах продолжалась эрозия ХПС. Такая тенденция продлилась до последней декады февраля. Затем область холодной воды продвинулась почти до 38° в. д., но на востоке и юго-востоке, где на поверхности моря была относительно теплая вода, ХПС отсутствовал. Далее холодная поверхностная вода периодически сокращала свое распространение и только в отдельные дни марта занимала существенную долю глубоководной части бассейна, поэтому ХПС отсутствовал почти на всей периферии этого района. К концу марта холодная поверхностная вода сохранилась только вдоль западного побережья примерно до Бургаса и период обновления ХПС завершился. Интегральный холодозапас ХПС в силу слабой конвекции к апрелю 2009 г. существенно сократился по сравнению с предыдущими годами (рис. 2). Эрозия ХПС усилилась особенно в восточной части бассейна, где наблюдался процесс интенсивного горизонтального перемешивания (рис. 7, а).

В мае 2009 г. происходило дальнейшее сокращение площади, занятой ХПС. К концу мая этот слой отсутствует во всей области, лежащей восточнее сечения от Синопа до Потти, но еще существует как единая область в западной и центральной частях моря до конца июня. В июле – августе общая площадь ХПС почти не меняется, но конфигурация ее основной области становится все более изрезанной. В результате интенсивность прогрева ХПС увеличивается, что приводит к сокращению его интегрального холодозапаса. Как итог, в конце сентября и начале октября ХПС начал фрагментироваться, но занятая им площадь и холодозапас примерно сохранялись до декабря. В декабре появились два дополнительных буя на западе моря, данные измерений которых вместе с данными восточного буя подтверждают конфигурацию области ХПС. Величина холодозапаса значительно сократилась с начала апреля до конца декабря 2009 г., достигнув самого низкого значения.

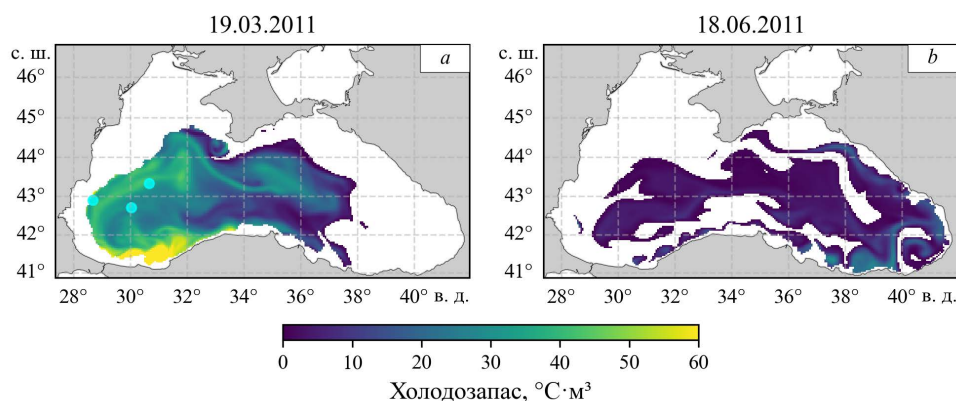
2010 г. начался необычно теплой погодой. Во всей глубоководной части моря ТМП была выше 8°C вплоть до 21 января. Холодная вода располагалась вдоль западного побережья, не достигнув немного устья Босфора. В результате во всей глубоководной части моря до середины третьей декады января сохранялся старый ХПС, который имел такую же конфигурацию и занимал такую же площадь, как и в декабре (рис. 7, *b*). После 21 января область холодных вод начинает распространяться на восток, продвинувшись примерно до 30° в. д. к 26 января, а на севере восточного круговорота, южнее восточного Крыма, появляется почти круговое пятно воды с ТПМ ниже 8°C и радиусом около 50 км.

К концу января область холодных поверхностных вод шириной около 100 км распространяется на восток в центр моря. В конце первой декады февраля она расширяется на юг до побережья Анатолии, продвинувшись на восток до 34° в. д. Одновременно область теплых вод, которая концентрировалась ранее на севере восточного круговорота, распространилась вплоть до южного берега Черного моря. Резкий градиент цвета на траверзе Керченского пролива на карте холодозапаса в феврале 2010 г. (рис. 7, *c*) разделяет область распространения старого ХПС на востоке и зону конвекции, достигающую ядра ХПС, на западе. На указанном рисунке видно, что переносившаяся вдоль западного берега моря холодная вода к середине февраля достигла побережья Анатолии. Данные реанализа и непосредственные измерения на расположенном (дрейфующем) в том районе буе-профилемере показывают, что вода с температурой менее 8°C наблюдалась до глубин около 90 м. Формирование такого глубокого слоя холодных вод у Анатолии, возможно, отчасти связано с зимним заглублением пикноклина у берегов моря, вызванным усилением циклонической завихренности трения ветра над морем в зимний сезон [17].

Холодная вода на поверхности моря, начиная с последней декады февраля, сосредоточилась на западе и в центре бассейна, оказавшись отрезанной от западного берега «языком» более теплой воды, переносимой ОЧТ. Граница области холодной поверхностной воды с ТПМ ниже 8°C вплоть до конца второй декады марта претерпевала быстрые изменения, то распадаясь на небольшие пятна, то собираясь в единое целое. Соответственно, конвекция то усиливалась, то ослабевала, и ХПС вентилировался только в отдельных районах, периодически отсекаясь от поверхности моря. К концу марта холодная поверхностная вода осталась только у западной границы бассейна, а ХПС был полно-

стью отсечен от поверхности моря в его глубоководной части. Быстрые изменения во времени распределения холодной воды на поверхности моря показывают, что конвекция в феврале – марте 2010 г. слабо вентилировала ХПС. Это привело к резкому сокращению интегрального холодозапаса в апреле 2010 г. (рис. 2). Кроме того, согласно данным наблюдений и реанализов, наблюдается ступенчатая структура профилей температуры (рис. 6, с), которая явилась следствием смены фаз охлаждения и прогрева.

В апреле площадь, занятая ХПС, начала сокращаться. К концу мая эта область эродировала и стала разбиваться на фрагменты, что подтверждается наблюдениями на буях *Argo* (рис. 7, d). К концу июня сохранились только отдельные области, занятые ХПС. Все буи *Argo*, проводившие наблюдения в июне, оказались вне зоны ХПС, и на всех профилях измеренная температура была выше 8 °С. В июле – ноябре площадь, занятая ХПС, продолжала сокращаться. К концу ноября остались только отдельные пятна с температурой ниже 8 °С. В декабре 2010 г. над всей акваторией моря, кроме северной части северо-западного шельфа, стояла теплая погода. Поэтому холодная вода сформировалась только вблизи Днепро-Бугского лимана и затем к концу декабря растеклась вдоль западной границы моря южнее Варны. Вследствие этого области вод, где наблюдался ХПС, еще больше сократились в размере. Холодозапас к концу декабря достиг минимального значения по сравнению со всеми предыдущими годами.



Р и с. 8. Холодозапас ХПС по данным реанализа МГИ за указанные даты. Точками показано положение буев (пояснение см. на рис. 5)

F i g. 8. CIL cold content based on the MHI reanalysis data for the specified year. Float positions are shown by dots (see Fig. 5 for an explanation)

В январе 2011 г. теплая погода сохранялась до конца месяца. Поэтому области существования ХПС стали совсем незначительными, и к концу месяца он сохранился только в районе Батумского антициклона. В период 2–5 февраля наблюдалось вторжение холодных вод северо-западного шельфа в глубоководную часть моря и их распространение вдоль Анатолийского побережья. К середине февраля развилось вторжение поверхностной воды с ТПМ ниже 8 °С с запада на восток сначала в центре моря, а затем, в начале третьей декады февраля, и по всей ширине бассейна. К концу февраля область холодной воды

продвинулась до 34–35° в. д., в марте – до 36–37° в. д., затем ОЧТ начинает переносить теплую воду на запад на севере, холодную – на восток на юге. Конвекция в марте усилилась в западной и центральной областях глубоководной части Черного моря, но не в восточной (рис. 8, *a*).

Однако даже в западной части моря конвекция неглубокая (рис. 9, *a, b*). Местами началось отсечение ХПС. В итоге в конце марта в области залива теплых поверхностных вод наблюдается узкий ХПС, ядро которого располагалось выше 50 м.

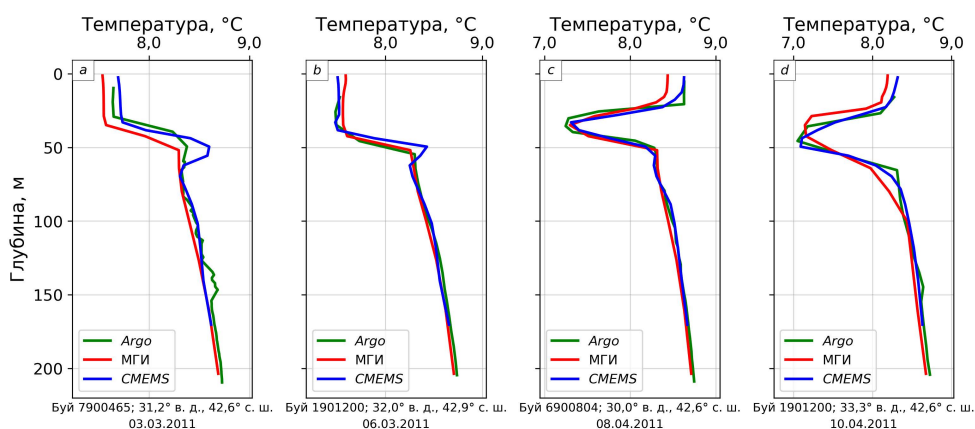


Рис. 9. Профили температуры по данным реанализов и буев *Argo* за 2011 г.

Fig. 9. Temperature profiles based on the reanalysis and *Argo* float data for 2011

Относительно холодная вода на поверхности моря сохранилась местами в центре бассейна до середины апреля 2011 г. Однако ХПС в глубоководной части бассейна уже отсечен от поверхности, оставаясь в центре моря мелким и узким, как показано на рис. 9, *c*. В то же время ближе к Анатолийскому побережью толщина ХПС увеличивается (рис. 9, *d*). Конфигурация занятой этим слоем области сохраняет сплошность, но ХПС не распространяется на всю глубоководную часть моря. Его холодозапас в конце апреля достигает уровня 2009 г.

В мае область ХПС вытягивается на восток, при этом ее граница стала более изрезанной. В июне эта область распространяется вдоль струй ОЧТ (рис. 8, *b*). В дальнейшем с июля по октябрь она перемещается по бассейну, все более фрагментируясь и медленно сокращая площадь и холодозапас. В ноябре сокращение площади и холодозаписа ускорилось. По пространству почти так же, как и в 2010 г., сохраняются только отдельные небольшие пятна ХПС. К концу декабря холодозапас немного превышает уровень 2010 г. Значительное сокращение площади и холодозаписа ХПС объясняется мелкоствью и узостью слоя к моменту его отсечения от поверхности моря, а также горизонтальным перемешиванием, которое привело к увеличению границы соприкосновения холодной воды в пределах ХПС и более теплых окружающих вод.

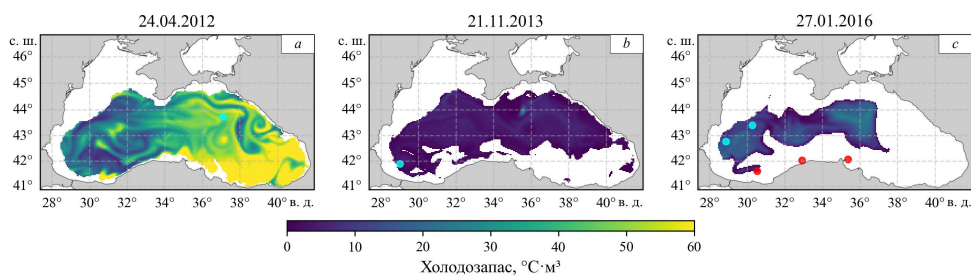
Третий период начался с теплой погоды в течение первых двух декад января 2012 г. Температура поверхности моря ниже 8 °C в это время наблюдалась только на северо-западе и вдоль мелководья у западной границы бассейна. В итоге конвекция не пробивала теплую прослойку выше ХПС, так же как и в 2008 г. (рис. 6, *b*).

В третью декаду января 2012 г. появилось пятно холодной воды на севере восточного круговорота, но конвекция в нем развилась только до глубины 40 м, несмотря на то, что ТПМ падала до 7,2–7,3 °С. К концу января вода с ТПМ менее 8 °С распространилась по центру моря от западного берега до 38° в. д.

В феврале область холодной поверхностной воды и зона конвекции продолжили движение на восток. К 10 февраля теплая вода осталась только в продержавшейся до 17 февраля полосе вдоль всего Кавказского побережья. В отличие от неглубокой конвекции в центре моря, где нижняя граница верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) достигала 40–50 м, на северо-востоке и юго-востоке бассейна, а также у Анатолийского побережья холодная вода распространилась до глубин более 100 м. Самая высокая плотность холодозапаса в середине февраля наблюдалась вдоль Анатолии и у побережья Крыма, где произошел заток холодных вод с северо-западного шельфа.

К 23 февраля 2012 г. практически вся поверхность глубоководной части моря была занята водой с ТПМ ниже 8 °С, конвекция распространилась на все море. Вода с указанной ТПМ занимала всю глубоководную часть моря вплоть до 22 марта, пока вдоль струи ОЧТ от Варны до устья Босфора не образовалось теплое пятно. Несмотря на длительное охлаждение, в центре моря глубина ВКС не превышала 50 м. В то же время в связи с поступлением холодной воды к Анатолии со струей вдоль западного побережья и заглублением пикноклина у берега в зимний период холодная вода с температурой ниже 8 °С распространилась там до глубин порядка 100 м. К третьей декаде марта, несмотря на наличие холодной воды на поверхности моря, начинается отсечка ХПС, поскольку температура в его ядре опустилась почти до 6 °С.

Отсечка ХПС от поверхности продолжилась в апреле, и к середине месяца он заполнял всю глубоководную часть моря. При этом ХПС в открытом море был относительно мелким, а у берегов и в прибрежных антициклонах его глубина доходила до 100 м. Такое распределение холодозапаса этого слоя сохранилось весь апрель (рис. 10, а).



Р и с. 10. Холодозапас ХПС по данным реанализа МГИ за указанные даты. Точками показано положение буев (пояснение см. на рис. 5)

F i g. 10. CIL cold content based on the MHI reanalysis data for the specified years. Float positions are shown by dots (see Fig. 5 for an explanation)

В мае в открытом море сплошность ХПС сохраняется, а его ядро слегка заглубляется, по-видимому, в результате сезонного опускания пикноклина в открытом море. В июне происходит интенсивный водообмен открытого моря

с прибрежной частью (аналогично рис. 5, *a*), что приводит к пространственной гомогенизации распределения глубин и толщин ХПС. Нижняя граница ХПС в открытом море в июне доходит до 60–65 м, а ядро располагается в окрестности 50 м.

В июле – ноябре различие между характеристиками ХПС у берега и в открытом море сглаживается в силу перемешивания вод, но их полная гомогенизация не была достигнута. Холодозапас ХПС, который значительно увеличился к концу апреля, в ноябре – декабре слегка уменьшился и примерно соответствовал уровню 2006 г.

В декабре 2012 г. вода с ТПМ ниже 8 °С к концу месяца занимала только часть северо-западного шельфа Черного моря и узкую полосу вдоль западного берега, примерно до границы Болгарии и Турции. Несмотря на относительно высокую ТПМ, ХПС по-прежнему занимал всю глубоководную часть моря. Вместе с тем в силу заглупления ВКС происходило сужение ХПС, так как конвекция вовлекала в ВКС его верхнюю часть (рис. 11, *a, b*). В результате слой воды с температурой ниже 8 °С сужался, а его ядро заглуплялось.

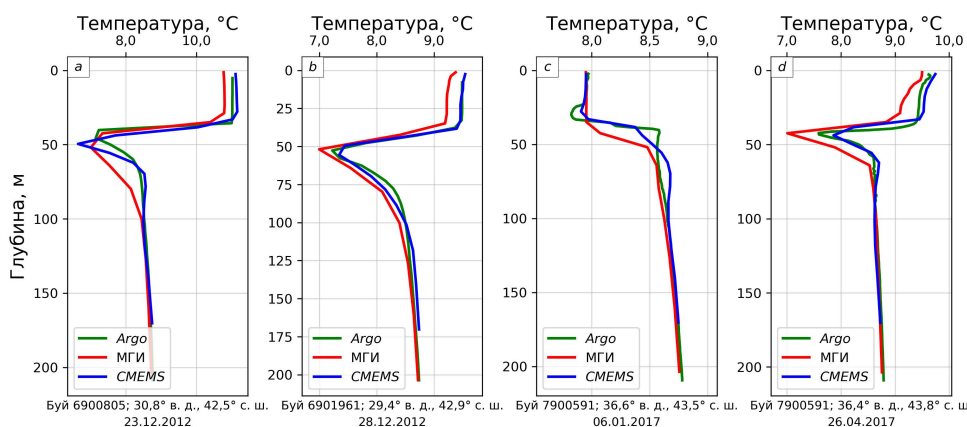


Рис. 11. Профили температуры по данным реанализов и буев *Argo* за 2012 и 2017 гг.

Fig. 11. Temperature profiles based on the reanalysis and *Argo* float data for 2012 and 2017

Теплая погода сохранилась и в январе 2013 г. Холодная вода на поверхности моря к концу месяца распространилась вдоль побережья почти до Синопа. В открытой части моря пятна воды с ТПМ менее 8 °С возникали лишь эпизодически. Тем не менее тонкий ХПС занимал всю глубоководную область моря в течение всего месяца. В то же время вдоль Анатолийского побережья ХПС был достаточно мощным, с заглупленным ядром, однако его холодозапас заметно сократился по сравнению с весной 2012 г. в результате перемешивания прибрежных вод и вод открытого моря. Холодные воды ХПС, расположенного у берегов Анатолии, переносились ОЧТ вдоль Кавказского побережья. Существование ХПС на северо-востоке моря поддерживалось под влиянием притока холодной воды через Керченский пролив. Заглупленный ХПС, по-видимому, транспортировался ОЧТ вдоль побережья Кавказа и также наблюдался на северо-востоке моря вследствие притока холодной воды через Керченский пролив.

К середине февраля 2013 г. область холодной поверхностной воды продвинулась на восток примерно до 31° в. д. На севере восточного круговорота на непродолжительное время образовывались пятна холодной воды южнее устья Керченского пролива. В третью декаду февраля на западе вдоль струи ОЧТ сформировался «язык» теплой воды. На юге западного круговорота, в центре моря и на севере восточного круговорота продолжали эпизодически появляться пятна воды с ТПМ ниже 8°C . В итоге зона постоянной конвекции с температурой воды на поверхности моря ниже 8°C была сосредоточена в области западнее 32° в. д., однако ВКС не заглублялся до ядра ХПС.

В начале марта 2013 г. вода с ТПМ менее 8°C еще обнаруживалась на периферии западного круговорота, но уже к 13 марта «язык» холодной воды опять прижался к западному берегу бассейна вдоль свала глубин. В последнюю декаду марта он на короткое время распространился на восток в центре моря до $37\text{--}38^{\circ}$ в. д. Однако краткосрочное похолодание не привело к обновлению ХПС в районе восточного круговорота. Неглубокая конвекция в районе расположения вод с ТПМ ниже 8°C не привела к обновлению ХПС и в пределах западного круговорота. В итоге после окончательного формирования ХПС к началу апреля его холодозапас оказался на уровне конца 2012 г. Тем не менее этот слой занимал всю глубоководную область бассейна в марте, апреле и даже в мае. В июне началась слабая эрозия ХПС у Кавказского побережья, однако в остальном он сохранял сплошность во всей глубоководной части бассейна в июне, июле и августе. Холодозапас ХПС в это время систематически снижался за счет его прогрева.

В сентябре – октябре эрозия ХПС усилилась, и к ноябрю он пропал уже на значительной площади (рис. 10, *b*). Дальнейшее сокращение площади ХПС, которое сопровождалось сокращением холодозапаса, наблюдается в декабре, чему способствовала теплая погода в этом месяце.

Январь 2014 г. также был теплым вплоть до середины последней декады. Температура поверхности моря ниже 8°C была только на северо-западном шельфе, к концу месяца она распространилась вдоль западного мелководья до Бургаса. К началу февраля 2014 г. область холодных вод вдоль западного берега расширилась и сформировался «язык» холодных вод вокруг Крыма. Проникновение поверхностных холодных вод в феврале временами отмечалось до 32° в. д. В отдельные моменты возникали пятна холодной воды, но ввиду краткосрочности их существования конвекция ограничивалась. Соответственно погодным условиям происходило дальнейшее сокращение площади ХПС и его холодозапаса в связи с прогревом его ядра как в центре моря, так и у побережья. В конце февраля наблюдались охлаждение поверхностных холодных вод вдоль западного берега и их заток вдоль Анатолийского побережья вплоть до Синопа, что привело к небольшому увеличению интегрального холодозапаса.

Март 2014 г. был теплым, и вода с ТПМ ниже 8°C сохранялась только вдоль западного берега моря и вдоль Анатолии. Площадь ХПС и его холодозапас в марте продолжали убывать. Такая же тенденция наблюдалась и в последующие месяцы. В апреле – мае 2014 г. ХПС еще существует как единая область в центре моря, но в июне он фрагментируется, и к концу июля остается только линза ХПС на северной периферии восточного круговорота, которая

исчезает в начале сентября; до января 2015 г. ХПС отсутствует на картах реанализа, интегральный холодозапас при этом упал до нуля. Отметим, что начиная с апреля вода с температурой ниже 8°C уже не фиксируется буями вплоть до января 2015 г. В то же время ХПС как таковой не пропадает, только температура в его ядре превышает 8°C .

В декабре 2014 г. и последующей половине января погода была теплой и «язык» холодных вод вдоль западного берега не дошел до Бургаса. С середины января в центре моря стали появляться перемежающиеся пятна воды с ТПМ менее 8°C . По этой причине местами в глубоководной части моря стал появляться мелкий ХПС, отсеченный от поверхности моря. Такая погода продержалась до начала второй декады февраля.

Во вторую и третью декады февраля 2015 г. зона конвекции с ТПМ ниже 8°C охватила западный круговорот и центральную часть моря. В марте происходило периодическое распространение холодных вод широкой полосой вдоль Анатолии, которые замещались затем более теплыми водами. В итоге к концу марта сформировался мелкий ХПС, ядро которого располагалось на глубине 30–40 м. Площадь и холодозапас этого слоя начали сокращаться, и в апреле уже остались только отдельные пятна ХПС, продержавшиеся до конца июня, когда диффундировало последнее пятно. Столь быстрое исчезновение ХПС объясняется его мелкостью и незначительной толщиной. Между тем ХПС с более высокой температурой ядра (выше 8°C) еще проявлялся в декабре 2015 г.

Декабрь 2015 г. был необычно теплым. В итоге вода с ТПМ ниже 8°C появилась только в небольшом количестве на северо-западном шельфе моря. В январе 2016 г. холодная вода распространялась только вдоль западного берега моря вплоть до устья Босфора. Затем вода с температурой ниже 8°C появилась в виде пятна в центре восточного круговорота, на восточной периферии западного круговорота и напротив Болгарии. В этих местах началась конвекция, область которой расширилась к концу января (рис. 10, с). Несмотря на низкую ТПМ, нижняя граница ВКС находилась примерно на глубине 50 м. При понижении ТПМ в начале февраля нижняя граница ВКС при этом заглубляется незначительно. К концу первой декады февраля холодная вода на поверхности моря распространилась на западе до 31° в. д. и в виде «языка» в центре моря – до 37° в. д., так что конвекция вод с температурой ниже 8°C проявилась и в восточной части моря. Однако конвекция проникала только до глубины 50 м.

К середине февраля 2016 г. область холодной поверхностной воды вернулась к западному мелководью, и в конце месяца на востоке ХПС уже начал отсекаться от поверхности. К концу февраля ареал распространения ХПС и его холодозапас значительно сократились (рис. 2).

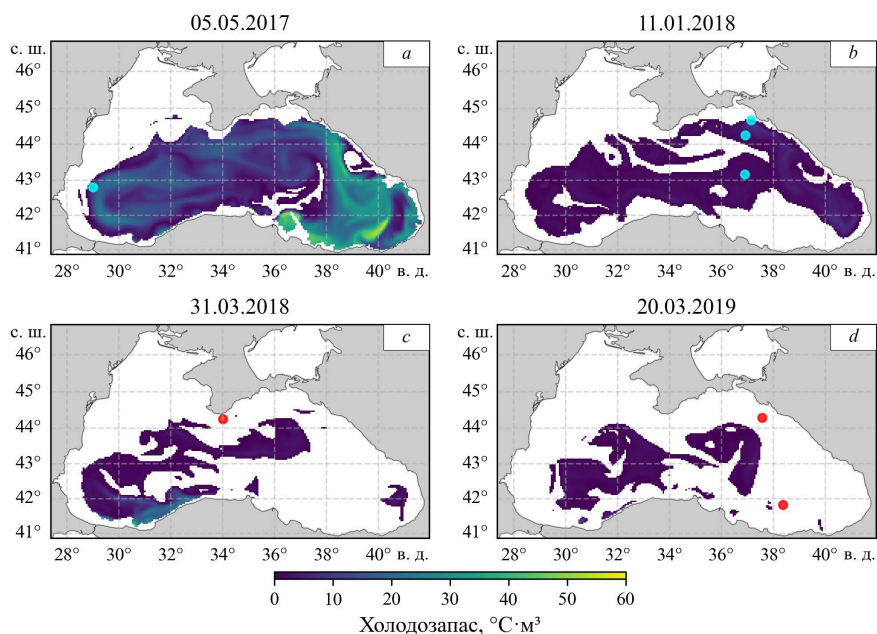
К концу февраля – началу марта 2016 г. ХПС отсечен от поверхности, поскольку с 5 марта здесь находится только вода с ТПМ выше 8°C , за исключением полосы вдоль западного берега. Далее площадь, занятая ХПС, смещается на восток и еще более сокращается, ХПС при этом уже не только сужается, но и поднимается ближе к поверхности. Дальнейшее сокращение зоны ХПС в апреле сопровождается его фрагментацией. К концу мая 2016 г. уже осталось только одно пятно с ХПС примерно в центре восточного круговорота, которое исчезло в конце августа.

Последний, четвертый этап начался с продвижения на восток области холодной поверхностной воды в первую декаду января 2017 г. Однако затем сохранялись только пятна холодной воды на поверхности моря в восточном и западном круговоротах, а также «язык» холодной воды вдоль побережья Анатолии до 30° в. д. Соответственно, стала расширяться область конвекции с ТПМ менее 8 °С. В профилях температуры появилась температурная инверсия (рис. 11, *с*), в силу изменчивости погодных условий на измеренном профиле на глубине около 30 м появился даже минимум температуры. Однако глубина конвективного перемешивания, согласно этому рисунку, оказалась небольшой.

К концу января теплая вода осталась только в расположенной вдоль берега полосе, начинающейся примерно в районе Трабзона, затем продолжающейся вдоль Кавказа и Крыма и заканчивающейся на свале глубин северо-западного шельфа. При этом конвекция активно развивалась как на западе, так и на востоке бассейна. Течение, которое распространялось вдоль западного берега моря, сформировало большой объем холодной воды у побережья Анатолии в слое от поверхности до глубин 80–100 м.

К середине третьей декады января зона конвекции охватывает весь западный круговорот и доходит до 38° в. д. на востоке. Температура поверхности моря на востоке достаточно низкая, 6,5–7,5 °С, но нижняя граница ВКС в февралю находится на глубине примерно 50 м как на западе, так и на востоке.

Как уже отмечалось выше, значительная масса холодной воды сосредоточилась у Анатолийского побережья. Отмеченный ранее «язык» теплых вод от Трабзона до северо-западного шельфа в середине февраля начал разрушаться, однако полностью не исчез, то усиливаясь, то ослабевая. В начале марта он распространился вдоль ОЧТ до побережья Анатолии, что привело к отсечке от поверхности ХПС, ядро которого находилось на глубинах 50–60 м. Расширение зоны теплой воды у восточного побережья привело также к отсечке ХПС в юго-восточном углу моря. К концу марта теплая поверхностная вода заполнила всю глубоководную часть бассейна. При этом ХПС полностью отделялся от поверхности, но его ядро в центральной части моря располагалось выше 50 м. К этому времени у Анатолийского побережья по-прежнему располагался мощный ХПС с большим объемом холодной воды. Кроме того, глубокий ХПС с большим холодозапасом наблюдался у устья Керченского пролива, что связано с поступлением холодных вод из Азовского моря. Однако, несмотря на распространение ХПС почти на всей площади моря, накопленный к концу марта интегральный холодозапас оказался заметно меньше, чем в 2012 г., и сократился еще больше к концу апреля вследствие уменьшения толщины слоя (рис. 11, *д*). Кроме того, с середины апреля местами началась эрозия ХПС у побережья Анатолии, Кавказа и на свале глубин северо-западного шельфа. В мае эрозия ХПС продолжилась (рис. 12, *а*). На карте видно, что наиболее интенсивный ХПС сосредоточен в восточной части моря вдоль Анатолии, в районе Батумского антициклона и вдоль Кавказского побережья.



Р и с. 12. Холодозапас ХПС по данным реанализа МГИ за указанные даты. Точками показано положение буев (пояснение см. на рис. 5)

F i g. 12. CIL cold content based on the MHI reanalysis data for the specified years. Float positions are shown by dots (see Fig. 5 for an explanation)

В мае – сентябре 2017 г. распределение ХПС по пространству практически не менялось. Он по-прежнему занимал почти всю глубоководную часть моря, и местами происходила его локальная эрозия. В результате переноса вод течениями распределение холодозаписа по пространству становилось более однородным, но при этом его величина слегка уменьшалась с середины сентября. К концу октября интенсифицируется эрозия ХПС у берегов Анатолии и Крыма. Интегральный холодозапас постепенно уменьшается вследствие сокращения толщины ХПС, увеличения температуры в его ядре и интенсификации эрозии на его границах. Еще одной причиной сокращения холодозаписа был прогрев ХПС снизу за счет увеличения температуры воды под его нижней границей. Потепление ниже ХПС отмечено в работе [10], но при этом требуются дополнительные исследования. В итоге к концу декабря холодозапас сократился до уровня конца 2013 г.

Январь 2018 г. был теплым. Вода с ТПМ ниже 8 °С располагалась только вдоль западного и южного берегов с загоном за устье Босфора. Интегральный холодозапас в январе продолжал сокращаться, что в значительной степени связано с продолжением процесса горизонтального перемешивания (рис. 12, *b*). Наряду с продолжающимся поступлением тепла от вод выше и ниже ХПС этот процесс привел к значительному сокращению его вертикального размера и дальнейшему повышению температуры в ядре слоя.

Теплая погода держалась и в феврале, так что область холодной поверхностной воды начинает слабое движение на восток только с середины февраля, отступив примерно на 120 км от западного берега. В итоге площадь ХПС

к концу первой декады февраля заметно сократилась. Только к середине третьей декады этого месяца вода с ТПМ ниже 8°C распространилась «языком» в середине моря почти до долготы устья Керченского пролива. При этом стала развиваться конвекция, которая к началу марта накрыла весь западный круговорот и заняла северную часть моря до широты $36,5^{\circ}$ в. д. Однако конвекция проникала только на глубину порядка 40 м.

К середине марта потеплело, область воды с ТПМ менее 8°C вернулась на западное мелководье, и в открытом море началась отсечка ХПС от морской поверхности. В начале третьей декады марта слегка похолодало, граница холодной поверхностной воды немного отступила от западного берега и появилось пятно холодной воды в центре западного круговорота. Однако к концу марта граница воды с ТПМ ниже 8°C вернулась к берегу и в основной части моря произошло отсечение ХПС. В марте 2018 г. довольно явно проявился механизм формирования глубокого ХПС за счет затока холодных вод вдоль западного побережья до Анатолии и далее по направлению ОЧТ.

Ввиду довольно высоких значений ТПМ зимой 2018 г. ХПС к концу марта занимает небольшую площадь (рис. 12, с). Интегральный холодозапас при этом остался на уровне начала 2018 г. В апреле площадь ХПС и интегральный холодозапас меняются незначительно. Однако в открытом море холодозапас невелик в связи с повышением температуры ядра ХПС, а наиболее мощный слой холодной воды сохраняется вдоль Анатолии.

Полоса глубокого ХПС вдоль Анатолийского побережья в мае отошла от берега, по-видимому, в результате смены зимнего типа циркуляции на летний [17]. После этого глубокий ХПС начал смешиваться с окружающей водой, и холодозапас по этой причине стал резко сокращаться. К концу июня остались только отдельные пятна ХПС с температурой в ядре менее 8°C , которые практически исчезли в середине августа. С начала второй декады августа и до конца года температура ниже 8°C обнаруживалась только на одном бугре при проведении наблюдений вблизи Анатолийского побережья.

Начало января 2019 г. было теплым. Только во второй декаде месяца появилась ТПМ ниже 8°C , которая прослеживалась в узкой полосе в западном круговороте и в центре моря. К концу месяца область с ТПМ ниже 8°C начала быстро сокращаться, сокращение продолжилось и в начале февраля, причем температура воды в ядре отсеченного ХПС вследствие изменчивости погодных условий была лишь слегка меньше 8°C . На севере бассейна, где конвекция была более продолжительной, температура в ядре ХПС падала до $7,7^{\circ}\text{C}$.

Во второй декаде февраля похолодало и область с ТПМ ниже 8°C расширилась на западе и в центре моря. Однако, несмотря на низкую ТПМ, согласно реанализам, конвекция проникала только до глубины около 30 м. В юго-западном углу вторая волна конвекции привела к заглублению ВКС до 50 м. К середине марта вода на поверхности моря потеплела и к 20 марта ХПС сформировался на очень ограниченной площади (рис. 12, d). В апреле – мае происходило растягивание зон ХПС (с температурой в ядре менее 8°C) течениями и быстрое сокращение площади и его интегрального холодозаписа. В начале июня традиционный ХПС полностью пропал. Однако подповерхностный слой с выраженным минимумом температуры в 2019 г. еще сохранялся в некоторых ме-

стах, что подтверждалось наблюдениями на буйах, но более частым было появление профиля с очень широким минимумом температуры без выраженного ядра.

Холодная вода на поверхности моря с ТПМ ниже 8°C в 2020 г. появилась только в середине февраля. Согласно вертикальным профилям температуры, рассчитанным в реанализах, в северной части восточного круговорота еще выделялась область конвекции. Однако после 20 марта вода с температурой менее 8°C не обнаруживается ни на поверхности, ни в глубине моря.

В 2021 г. вода с ТПМ ниже 8°C эпизодически появлялась в середине февраля и в середине марта. Однако ввиду краткосрочности эпизодов охлаждения ХПС не сформировался. Более того, в 2021 г. практически исчез ХПС с выраженным минимумом температуры.

Заключение

Результаты настоящей работы, так же как и предыдущих публикаций, основанных на данных численного моделирования циркуляции Черного моря, убедительно показывают, что основным механизмом ежегодного обновления ХПС в бассейне является зимняя конвекция, проникающая от поверхности как минимум до ядра слоя. Наблюдавшаяся в течение длительного времени типичная мощность ХПС поддерживалась зимней конвекцией, которая распространялась по всей площади бассейна. В итоге холодозапас ХПС и температура его ядра изменялись от года к году в зависимости от интенсивности зимнего охлаждения на поверхности моря. Приведенные выше результаты показывают, что в течение 2000–2005 гг. ХПС качественно и количественно был близок к его среднеклиматическому состоянию, поскольку зимняя конвекция в эти годы развивалась по всей площади бассейна.

Однако значительное зимнее потепление в регионе в последующие годы привело к существенному сокращению площади зимней конвекции и ее временной продолжительности, что привело к снижению интенсивности обновления ХПС. В отдельные холодные зимы ХПС существенно обновлялся, но при последующем ослаблении зимней конвекции он достаточно быстро разрушался.

Реанализы также показали, что вторым по важности механизмом обновления ХПС является поступление вод северо-западного шельфа вдоль западного мелководья до Босфора и далее – вдоль Анатолии и даже до Кавказа с формированием глубокого ХПС, в том числе в областях антициклонов. При этом оказывается существенным развитие интенсивного горизонтального перемешивания, обеспечивающего поступление холодных прибрежных вод в центр бассейна. Этот механизм обновления ХПС эффективен лишь в отдельные годы, но, как было отмечено выше, он продлил существование привычного ХПС.

Традиционно важным с точки зрения обновления ХПС считается механизм субдукции холодных вод с шельфовых районов Черного моря. Согласно результатам реанализов, это действительно постоянно действующий механизм, причем не только на свале северо-западного шельфа. На шельфах вероятность эпизодического появления ХПС с температурой в ядре менее 8°C высока даже в последние годы, когда в открытом море он уже исчез. Однако даже субдукция вод с северо-западного шельфа оказывается незначительной с точки

зрения обновления ХПС в масштабе всего моря. Любопытным оказалось эпизодическое формирование залива холодных вод через Керченский пролив, которое, однако, было также незначительным с точки зрения поддержания ХПС.

Реанализы показывают также, что причиной ускорения деградации ХПС в последние 10 лет за счет сокращения его вертикального размера и смещения к поверхности является потепление вод основного пикноклина на нижней границе слоя. Количественные оценки влияния этого процесса требуют дополнительного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
2. *Белокопытов В. Н.* Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 33–41. EDN TOERWX.
3. *Ostrovskii A. G., Zatsepin A. G.* Intense ventilation of the Black Sea pycnocline due to vertical turbulent exchange in the Rim Current area // Deep-Sea Research Part 1: Oceanographic Research Papers. 2016. Vol. 116. P. 1–13. EDN WVZLUZ. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.07.011>
4. *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. EDN VLXBEL. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
5. *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.
6. Climate Signals in the Black Sea From a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis / L. Lima [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. 710973. EDN NSIDIK. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
7. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993–2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1. С. 33–48. EDN VTPCZH. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-33-48>
8. *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. <https://doi.org/10.7868/S0205961416010073>
9. *Staneva J. V., Stanev E. V.* Water mass formation in the Black Sea during 1991–1995 // Journal of Marine Systems. 2002. Vol. 32, iss. 1–3. P. 199–218. EDN XNUMNX. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00038-6)
10. Acceleration of Climate Change in the Upper Layer of the Black Sea / G. K. Korotaev [et al.] // Doklady Earth Sciences. 2024. Vol. 518, iss. 1. P. 1550–1555. EDN ICHYUN. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602797>
11. Тенденции ускорения климатических изменений термохалинной структуры верхнего слоя Черного моря / Г. К. Коротаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 264–278. EDN RHKLY.
12. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели / А. И. Мизюк [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 496–510. EDN XHZXAR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-496-510>

13. *Dobricic S., Pinardi N.* An oceanographic three-dimensional variational data assimilation scheme // *Ocean Modelling*. 2008. Vol. 22, iss. 3–4. P. 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.oceanmod.2008.01.004>
14. Assimilating Along-Track Altimetric Observations through Local Hydrostatic Adjustment in a Global Ocean Variational Assimilation System / A. Storto [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2011. Vol. 139, iss. 3. P. 738–754. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3350.1>
15. *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.
16. *Ovchinnikov I. M., Popov Yu. I.* Evolution of the Cold Intermediate Layer in the Black Sea. *Oceanology*. 1987. Vol. 27, iss. 3. P. 555–560.
17. *Korotaev G. K., Saenko O. A., Koblinsky C. J.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C1. P. 917–933. EDN XKTZMP. <https://doi.org/10.1029/2000JC900120>

Об авторах:

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

Холод Антон Леонидович, научный сотрудник, зав. отделом морских информационных и прогностических систем, лаборатория численного моделирования динамики физических и биогеохимических процессов в морских средах, ФГБУН ФИЦ МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **SPIN-код: 3978-3077**, **Scopus Author ID: 55632951600**, **WoS ResearcherID: ABA-3482-2020**, antonholod@mail.ru