АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.465
EDN: MLRHZP

Термохалинная структура вод и содержание кислорода в холодном промежуточном слое в прибрежных акваториях Крыма (Черное море)

Е. Е. Совга ✉, Т. В. Хмара, С. К. Коновалов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ *esovga@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2025;
принята к публикации 10.09.2025.

Аннотация
Цель. Оценены изменения термохалинной структуры вод и содержания кислорода в холодном промежуточном слое вод прибрежной шельфовой акватории Южного берега Крыма в 1986–2000 и 2007–2023 гг.
Методы и результаты. Использован массив экспедиционных данных о температуре, электропроводности и гидростатическом давлении (всего 13 286 измерений), полученных на двух полигонах (Голубой залив, включая океанографическую платформу в Кацивели, и Ялтинский залив) в 1986–2000 и 2007–2023 гг. с помощью *CTD*-зонда *Sea-Bird* 911*plus* (*Sea Bird Electronics*, США), а в 2022–2023 гг. – и гидролого-химического зондирующего *CTD*-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN* 320*Plus M*. Впервые для шельфовых акваторий Крыма на основе осредненных данных за два периода (~ 40 лет) выявлено увеличение содержания растворенного кислорода в границах холодного промежуточного слоя на фоне роста температуры и условной плотности вод за последние 15 лет. В 1986–2000 гг. средняя температура в ядре холодного промежуточного слоя не превышала 8 °С, тогда как в 2022–2023 гг. диапазон ее значений составил 8,1–8,9 °С. Усредненная плотность на глубине 100 м увеличилась с 14,57 до 15,25 кг/м³.
Выводы. Впервые для шельфовых акваторий Крыма охарактеризована многолетняя динамика растворенного кислорода в холодном промежуточном слое. Установлено, что реакция экосистемы шельфовой зоны Южного берега Крыма на внешние воздействия (климатические изменения) оказалась более выраженной по сравнению с глубоководной частью моря. Незначительный абсолютный рост температуры и плотности вод сопровождается существенной перестройкой гидрологической структуры и аномалиями формирования холодного промежуточного слоя. Причины выявленных аномалий именно для шельфовой зоны Южного берега Крыма требуют отдельного изучения.

Ключевые слова: холодный промежуточный слой, многолетняя динамика, термохалинная структура, условная плотность, растворенный кислород, шельфовая зона, Южный берег Крыма

Благодарности: работа была выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0001 «Океанологические процессы» и FNNN-2024-0016 «Прибрежные исследования».

Для цитирования: *Совга Е. Е., Хмара Т. В., Коновалов С. К.* Термохалинная структура вод и содержание кислорода в холодном промежуточном слое в прибрежных акваториях Крыма (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 719–731. EDN MLRHZP.

Original article

Thermohaline Structure of Waters and Oxygen Content in the Cold Intermediate Layer in the Coastal Water Areas of Crimea (Black Sea)

E. E. Sovga ✉, T. V. Khmara, S. K. Konovalov

Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, *Sevastopol*, *Russia*
✉ *esovga@mhi-ras.ru*

Abstract
Purpose. The purpose of the study is to assess the changes in water thermohaline structure and oxygen content in the cold intermediate layer of coastal shelf water areas of the Southern Coast of Crimea in 1986–2000 and 2007–2023.
Methods and Results. The data array (based on a total of 13286 measurements) on temperature, electrical conductivity and hydrostatic pressure was used. The measurements were done at two polygons (Goluboy Bay including the Katsiveli oceanographic platform, and Yalta Bay) by means of the Sea-Bird 911plus CTD probe (Sea Bird Electronics, USA) in 1986–2000 and 2007–2023, and by the IDRONAUT OCEAN SEVEN 320Plus M hydro-chemical sounding CTD complex in 2022–2023. For the first time, an increase in the dissolved oxygen content within the cold intermediate layer against the background of water temperature and relative density increase over the last 15 years has been revealed for the Crimea shelf water areas, based on the data averaged for two periods (~ 40 years). In 1986–2000, average temperature in the core of cold intermediate layer did not exceed 8 °C, whereas in 2022–2023, the range of its values was 8.1–8.9 °C. Average density at the 100 m depth increased from 14.57 to 15.25 kg/m^3.
Conclusions. For the first time, the long-term dynamics of dissolved oxygen in the cold intermediate layer has been characterized for the Crimea shelf water areas. It is found that the response of shelf ecosystem of the Southern Coast of Crimea to the external impacts (climatic changes) is more pronounced than that in the deep sea. A slight absolute increase in water temperature and density is accompanied by a significant reconstruction in the hydrological structure and anomalies in the formation of cold intermediate layer. The reasons for the anomalies identified specifically for the shelf water areas of the Southern Coast of Crimea require a particular study.

Keywords: cold intermediate layer, long-term dynamics, thermohaline structure, conditional density, dissolved oxygen, shelf area of the Southern Coast of Crimea

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on themes FNNN-2024-0001 “Oceanological Processes” and FNNN-2024-0016 “Coastal Research”.

For citation: Sovga, E.E., Khmara, T.V. and Konovalov, S.K., 2025. Thermohaline Structure of Waters and Oxygen Content in the Cold Intermediate Layer in the Coastal Water Areas of Crimea (Black Sea). *Physical Oceanography*, 32(6), pp. 743-754.

Введение

Холодный промежуточный слой (ХПС) является важным структурным элементом гидрологии Черного моря: как слой с минимальной температурой воды он расположен между сезонным и постоянным пикноклином. В качестве общепринятого критерия границ ХПС [1] принята изотерма 8 °C. В зимний период этот слой обновляется, насыщается кислородом и оказывает значитель-

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

ное влияние на формирование верхнего деятельного слоя, динамику гидрохимических параметров и компонентов морской экосистемы. В глубоководной части моря ХПС служит своеобразным барьером, который ограничивает поступление анаэробных глубинных вод в верхний деятельный слой моря, обеспечивая транспорт кислорода в более глубокие слои вод на границе с анаэробной зоной.

В большинстве публикаций, посвященных исследованиям ХПС, обсуждается роль различных географических районов (центры основных циклонических круговоротов, северо-западная часть моря) в его формировании. Многие исследователи считают, что ХПС формируется в центрах циклонических круговоротов и в северо-западной части моря (в основном на континентальном склоне) [1–3] в пропорции, которая зависит от метеорологических условий и термохалинных характеристик поверхностного слоя в зимний период. Последние 15 лет в связи с глобальными климатическими изменениями, когда теплые зимы стали климатической нормой для Черного моря, при незначительном в абсолютном выражении росте температуры и солености воды наблюдаются существенная перестройка гидрологической структуры вод и аномалии формирования ХПС [4, 5].

В работе [2] впервые показано, что «при наблюдаемом потеплении поверхностных вод моря снижение физического потока кислорода в холодный промежуточный слой и нижерасположенные слои вод определяется физическими процессами вентиляции ХПС в зимний период и вертикальным потоком кислорода из слоя ядра ХПС», что, по мнению автора, определило «системный сдвиг» в биогеохимической структуре вод Черного моря.

В публикациях [1–5] представлены также данные о межгодовой изменчивости интенсивности обновления ХПС в глубоководной части Черного моря в последние десятилетия. В прибрежные области, согласно существующей точке зрения [6, 7], воды ХПС центральной части моря проникают ограниченно, и ХПС формируется из охлажденных вод, адвективно поступающих из зоны антициклонических вихрей на континентальном склоне северо-западной части моря. Механизм образования ХПС здесь предполагает зимнее выхолаживание вод на северо-западном шельфе, их погружение и стекание по наклонному дну к свалу глубин, где они вовлекаются Основным Черноморским течением (ОЧТ) и распространяются по всему бассейну [8].

В ряде публикаций приведена количественная оценка вкладов различных источников в формирование ХПС в западном, восточном циклонических круговоротах и северо-западной части моря, которая составила 60, 15 и 25 % вод ХПС соответственно [3] [9]. Так, в монографии [10] показано, что на шельфе формируется от 16 до 26 % всего объема ХПС Черного моря. В шельфовой склоновой зоне северо-восточной части моря (глубины 0–100 м) выявлен тренд роста температуры и солености [11, 12]. В работе [13] изучены особенности формирования ХПС за 2019–2022 гг. и показано, что в данной акватории слой минимальной температуры не соответствовал классическому критерию

[2] *Масевич А. В.* Динамика кислорода в основном пикноклине Черного моря : автореф. дис. … канд. геогр. наук. Севастополь, 2022. С. 6.

[3] *Белокопытов В. Н.* Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря : автореф. дис. … канд. геогр. наук. Севастополь, 2004. 24 с.

ХПС (8 °С), так как его минимальная температура превышала это значение. Однако ХПС как структурный элемент с минимумом температуры в толще вод все же формировался, но в другом температурном диапазоне ядра (8,6–8,7 °С). По мнению авторов работы [12], температура верхнего слоя ХПС начиная с 2009 г. росла поступательно с двумя перерывами, вызванными холодными зимами 2011/12 и 2016/17 гг.

Актуальность оценки изменений температурного режима в шельфовой зоне Южного берега Крыма (ЮБК) в весенне-летний период обусловлена высокой рекреационной значимостью этих акваторий. При этом анализ литературы показывает, что в последние годы данный вопрос для региона изучен фрагментарно без сравнения с данными предыдущих исследований.

Изучению структуры и условий формирования ХПС в шельфовой зоне ЮБК посвящено значительно меньшее, по сравнению с открытым морем и его восточным побережьем, количество публикаций. Следует отметить работы Морского гидрофизического института (МГИ) РАН [14, 15], в которых анализируются результаты конкретных экспедиций 2016–2021 гг., проведенных в акватории, охватывающей южнобережную область Крыма, с глубинами более 120 м. Согласно полученным результатам, основная масса ХПС располагается в стрежне ОЧТ и его правой части со стороны берега, а классическая граница этого слоя (изотерма 8 °С) фиксировалась только в экспедициях 2017 г., когда после холодной зимы произошло обновление вод ХПС. Максимальная толщина ХПС составила ~ 60 м, положение его ядра по вертикали соответствовало диапазону глубин 40–100 м.

Следует отметить некоторые особенности гидродинамического режима шельфовой зоны ЮБК, исследуемой в данной работе, которые могут в определенной степени оказывать влияние на структуру ХПС. Так, в осенней экспедиции 2021 г. [16] в прибрежно-шельфовой зоне у ЮБК на фоне интенсивного потока ОЧТ (30–40 см/с) зафиксировано направленное в противоположную ОЧТ сторону мощное вдольбереговое течение со скоростью до 40 см/с. При этом направление течения, противоположное ОЧТ, сохранялось во всей толще вод. В работе [17] рассмотрена продолжительность существования бимодальной структуры направлений прибрежного течения у ЮБК.

Еще одной характерной особенностью гидродинамического режима шельфовой зоны ЮБК является прибрежный апвеллинг [18], который способствует подъему водных масс ХПС ближе к поверхности. При интенсивном апвеллинге отмечался даже выход ядра ХПС на поверхность, в этих случаях температура поверхностных вод снижалась до 8 °С.

Цель работы – на основе анализа информации из Банка океанографических данных (БОД) МГИ за два периода исследований (1986–2000 и 2007–2023 гг.) оценить изменения термохалинной структуры вод и кислородного режима ХПС прибрежных шельфовых акваторий ЮБК.

Материалы и методы

В работе использовалась база данных БОД МГИ [19] за два периода: 1986–2001 и 2007–2023 гг., на основе которой сформирована выборка по двум полигонам: Голубому (включая океанографическую платформу (ОП) в Кацивели) и Ялтинскому заливам. По морфоструктурным характеристикам в прибрежной

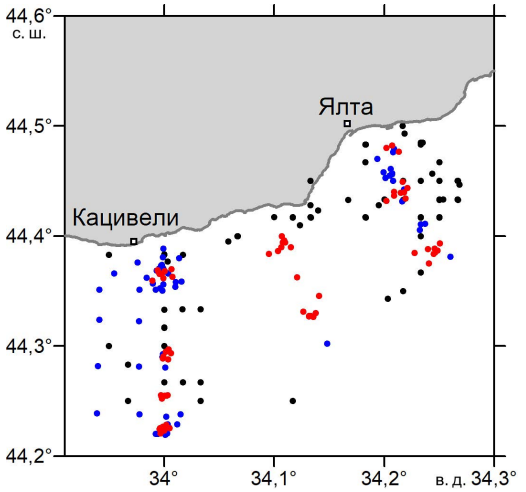
зоне Крыма выделяют западную область (от м. Тарханкут до б. Ласпи и м. Сарыч), южнобережную (от м. Сарыч до м. Меганом) и восточную, включающую район Феодосийского залива и Керченско-Таманский шельф [20].

Шельфовая зона ЮБК как объект исследований настоящей работы включает береговую полосу и пятимильную прибрежную акваторию от м. Кикинеиз на западе до м. Аю-Даг на востоке. Ширина зоны меняется от 6–10 км на западе до 20–30 км на востоке. Изобата 100 м расположена в 2–10 км от берега, изобата 50 м – в 400–500 м [18].

В 1986–2000 и 2007–2021 гг. измерения температуры, электропроводности и гидростатического давления проводились *CTD*-зондом *Sea-Bird* 911*plus* (*Sea Bird Electronics*, США). В 2022–2023 гг. для анализа термохалинной структуры вод у берегов Крыма дополнительно использовался гидролого-химический *CTD*-комплекс *IDRONAUT OCEAN SEVEN* 320*Plus M*. В соответствии с описанием приборов измерения температуры имеют начальную точность 10^{-3} °С, а солености – 10^{-3} ЕПС. Концентрация кислорода определялась датчиком в составе этих комплексов, калиброванным по методу Винклера в модификации Карпентера [21].

Использованная в работе шкала условной плотности позволяет устранить влияние пространственно-временно́й неоднородности массивов экспедиционных данных; преимущества такой шкалы подробно описаны в работе [22]. Анализ данных из БОД МГИ за два указанных выше периода выявил неравномерное распределение измерений. В мае – октябре 1986–2000 гг. выполнено 7282 измерения, в мае – октябре 2007–2023 гг. – 6004 измерения. Из выборки исключены аномальные значения концентрации кислорода, не соответствующие распределению других гидрологических и гидрохимических параметров. Анализ такого большого массива экспедиционных данных по шельфовой зоне ЮБК выполнен впервые.

Схема расположения станций за указанные периоды представлена на рис. 1.

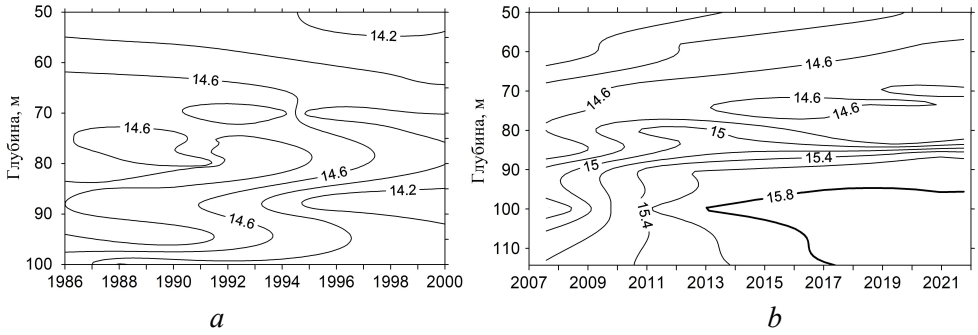


Р и с. 1. Расположение станций отбора проб на двух полигонах (черными кружками обозначены станции, выполненные в 1986–2001 гг., синими – в 2007–2021 гг., красными – в 2022–2023 гг.)
F i g. 1. Map of sampling station locations at two polygons (black circles indicate the stations completed in 1986–2001, blue circles – in 2007–2021, and red ones – in 2022–2023)

Для периода 2022–2023 гг. построены вертикальные профили температуры, солености и концентрации кислорода относительно шкалы условной плотности в шельфовой зоне ЮБК (акватории Ялтинского и Голубого заливов).

Результаты и обсуждение

Исходя из установленных в последние 15 лет изменений таких параметров ХПС, как температура и условная плотность вод, в работе [12] для шельфово-склоновой зоны восточной части Черного моря, а в настоящей работе – для прибрежной зоны ЮБК были изучены многолетние изменения условной плотности воды за два периода: 1986–2000 (рис. 2, *a*) и 2007–2023 гг. (рис. 2, *b*).



Р и с. 2. Многолетние изменения положения изопикн (кг/м^3) в зависимости от глубины в ХПС в 1986–2000 (*a*) и 2007–2023 гг. (*b*) для прибрежной акватории ЮБК

F i g. 2. Long-term changes in the isopycn (kg/m^3) positions in the coastal water areas of Southern Coast of Crimea depending on the CIL depth in 1986–2000 (*a*) and 2007–2023 (*b*)

Анализируя данные об изменении плотности морских вод шельфовых акваторий ЮБК на глубинах залегания ХПС за исследуемые периоды (1986–2000, 2007–2023 гг.), можно сделать следующее заключение. В 2007–2021 и 2022–2023 гг. наблюдается явное увеличение плотности вод на глубинах регистрации ХПС (рис. 2, *b*), которое проявилось в появлении изопикны 15,8 кг/м^3 на глубине 100 м и изопикн 15 и 15,4 кг/м^3 на глубине 90 м. В 1986–2000 гг., согласно данным, представленным на рис. 2, *a*, такие изопикны вообще не были обнаружены, а максимальные значения на тех же глубинах составляли 14,8 и 14,7 кг/м^3 соответственно. Увеличение солености вод было обнаружено в шельфово-склоновой зоне восточной части Черного моря [12]. По мнению авторов работы [12], это увеличение может быть связано с возросшим притоком вод нижнебосфорского течения в слой воды с условной плотностью 14,6–16,2 кг/м^3 и, возможно, в более глубоко лежащие слои. Однако данная гипотеза, вероятно, неприменима к шельфовым акваториям Крыма. Для точного объяснения причин роста температуры и плотности, очевидно, потребуются дополнительные данные.

Сравнительные оценки параметров вод ХПС (глубина, температура, содержание кислорода и плотность) по всему массиву данных за исследуемые периоды для шельфовых вод ЮБК (Голубой и Ялтинский заливы) представлены в таблице.

Изменение параметров вод ХПС за исследуемые периоды в шельфовых акваториях ЮБК (Голубой и Ялтинский заливы)
Changes in the CIL water parameters during the study periods in shelf water areas of the Southern Coast of Crimea (Goluboy and Yalta Bays)

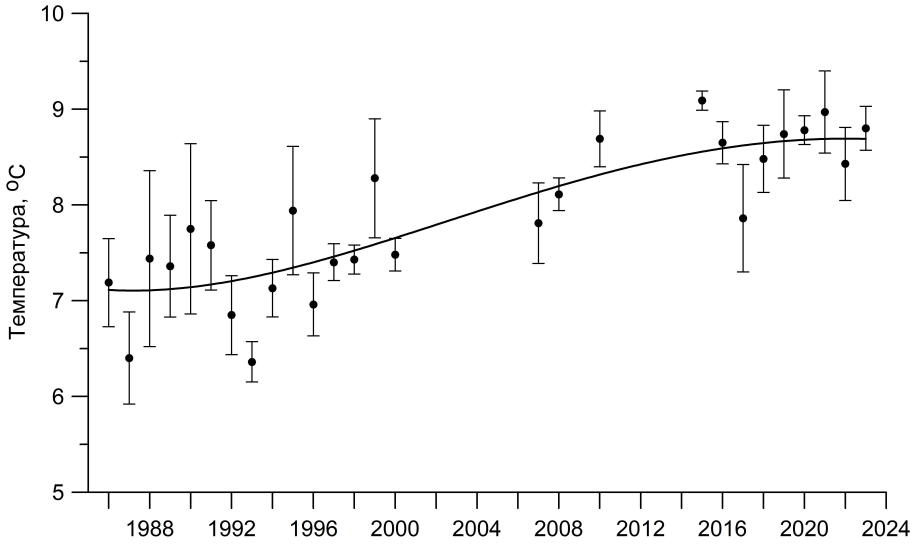
Глубина, м / Depth, m	Температура, °С / Temperature, °С		Содержание кислорода, мл/л / Oxygen content, ml/l		Плотность, кг/м^3 / Density, kg/m^3	
	Пределы изменения / Variation limits	Среднее / Mean	Пределы изменения / Variation limits	Среднее / Mean	Пределы изменения / Variation limits	Среднее / Mean
			1986–2000			
50	6,06–7,80	7,13	4,19–7,67	5,97	13,80–14,70	14,17
75	5,82–7,63	7,30	3,07–6,86	5,16	14,19–15,07	14,52
80	6,20–7,95	7,23	2,28–5,21	4,16	13,96–14,99	14,44
100	6,12–7,48	6,94	2,12–4,91	3,51	14,17–14,99	14,57
			2007–2021			
50	7,12–9,06	8,39	5,43–6,62	6,12	13,97–14,61	14,34
75	7,63–8,90	8,38	4,51–6,29	5,85	14,30–14,92	14,50
80	7,72–8,79	8,34	1,11–6,07	4,53	14,31–15,27	14,73
100	7,68–8,79	8,28	0,11–5,32	1,54	14,53–15,76	15,21
			2022–2023			
50	8,29–9,32	8,75	6,58–7,68	7,31	14,23–14,63	14,44
75	8,10–8,89	8,45	4,22–7,45	6,66	14,34–15,05	14,65
80	8,04–8,92	8,44	3,10–7,02	6,41	14,38–15,28	14,74
100	8,15–8,84	8,46	1,35–6,65	5,15	14,86–15,82	15,25

Согласно данным, представленным в таблице, в 1986–2000 гг. характеристики ХПС соответствовали классическим представлениям: среднегодовые температуры в ядре ХПС не превышали 8 °С (максимальное значение составило 7,95 °С). При толщине слоя ХПС 50 м его ядро, согласно средним значениям, располагалось на глубинах от 50 до 100 м в диапазоне условной плотности от 14,17 до 14,57 кг/м^3.

Похожие параметры ХПС представлены в работе [14], основанной на данных экспедиции в шельфовой зоне ЮБК после холодной зимы 2017 г., когда произошло обновление ХПС. Согласно этим данным, минимальная средняя температура ядра ХПС составляла 7,2 °С при плотности 14,5 кг/м^3. Верхняя граница слоя (определенная по изотерме 8 °С) соответствовала плотности ~ 14,3 кг/м^3, нижняя – плотности ~ 15,0 кг/м^3. Максимальная толщина ХПС достигала ~ 60 м, при этом его ядро находилось в диапазоне глубин 40–100 м.

В следующий период наблюдений (2007–2023 гг.) осредненные данные свидетельствуют об увеличении температуры в слое ХПС, что выражается в росте как экстремальных, так и средних значений. Наиболее ярко эта тенденция проявилась в 2022–2023 гг., для которых был обработан массив из 2340 определений. Как следует из таблицы, в этот период температура вод в ядре ХПС уже не опускалась ниже 8 °С, варьируясь в диапазоне от 8,46 до 8,75 °С, в то время как условная плотность выросла от 14,44 до 15,25 кг/м^3.

Информация об изменениях температур в ядре ХПС за два исследуемых периода с 1986 по 2023 г. представлена на рис. 3.



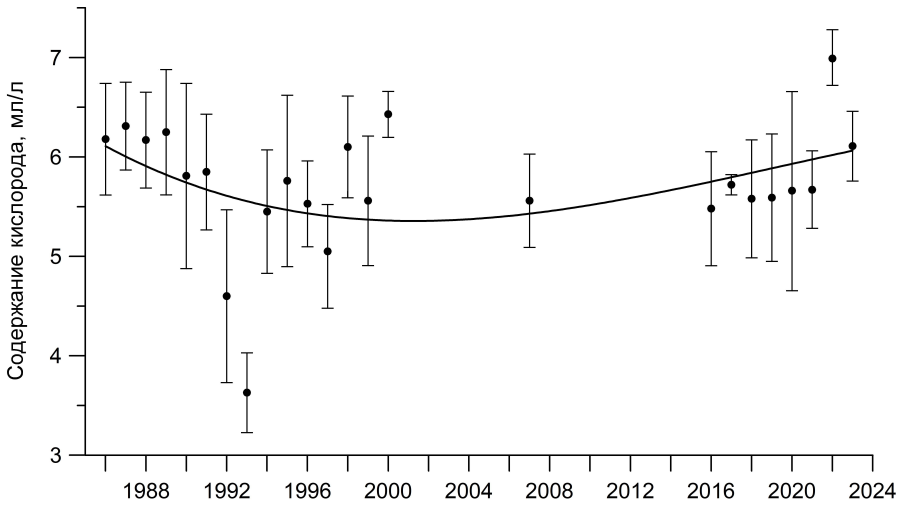
Р и с. 3. Временной ход температуры в ядре ХПС, по осредненным данным экспедиционных измерений (май – сентябрь 1986–2023 гг.). Вертикальными отрезками показано стандартное отклонение. Линия соответствует полиноминальной аппроксимации

F i g. 3. Temporal variation of temperature in the CIL core based on average expeditionary data (May – September, 1986–2023). Vertical segments show standard deviation. The line corresponds to a polynomial approximation

Сравнение временно́го хода температуры вод в ядре ХПС [2] глубоководной части Черного моря за более длительный промежуток времени (около 100 лет) с собственными данными (рис. 3) показало, что выявленная тенденция к увеличению температуры в ядре ХПС прослеживается и в прибрежных акваториях ЮБК. Наблюдаемое потепление в прибрежной зоне в некоторые периоды было даже более выраженным: температура достигала ~ 9 °С, тогда как в глубоководной части моря ее значения не превышали 8,5 °С.

Анализ данных, представленных в таблице, не выявил однозначной зависимости содержания кислорода ни от изменения температуры в слое ХПС, ни от периода наблюдений. При этом амплитуда значений содержания кислорода от минимального до максимального варьировала от одного периода к другому. Если в 1986–2000 гг. этот разброс составлял 3,0–3,8 мл/л O_2, то в 2007–2023 гг. диапазон расширился до 2,0–5,0 мл/л O_2. В то же время, несмотря на потепление вод ХПС, среднее содержание кислорода в слое увеличилось. Причины возникновения данной аномалии именно в шельфовой зоне ЮБК требуют отдельного изучения. Сравнить полученные результаты с данными других авторов не представляется возможным, поскольку в ключевых работах, посвященных исследованию ХПС в шельфовой зоне ЮБК [14, 16] и шельфово-склоновой зоне восточной части Черного моря [11, 13] содержание кислорода не оценивалось.

Межгодовая динамика содержания кислорода в ХПС в годы с минимальными температурными значениями для двух рассматриваемых периодов представлена на рис. 4.



Р и с. 4. Содержание кислорода в ХПС в годы с минимальной температурой его ядра. Осреднение за летние сезоны 1986–2023 гг. Вертикальными отрезками показано стандартное отклонение. Линия соответствует полиноминальной аппроксимации

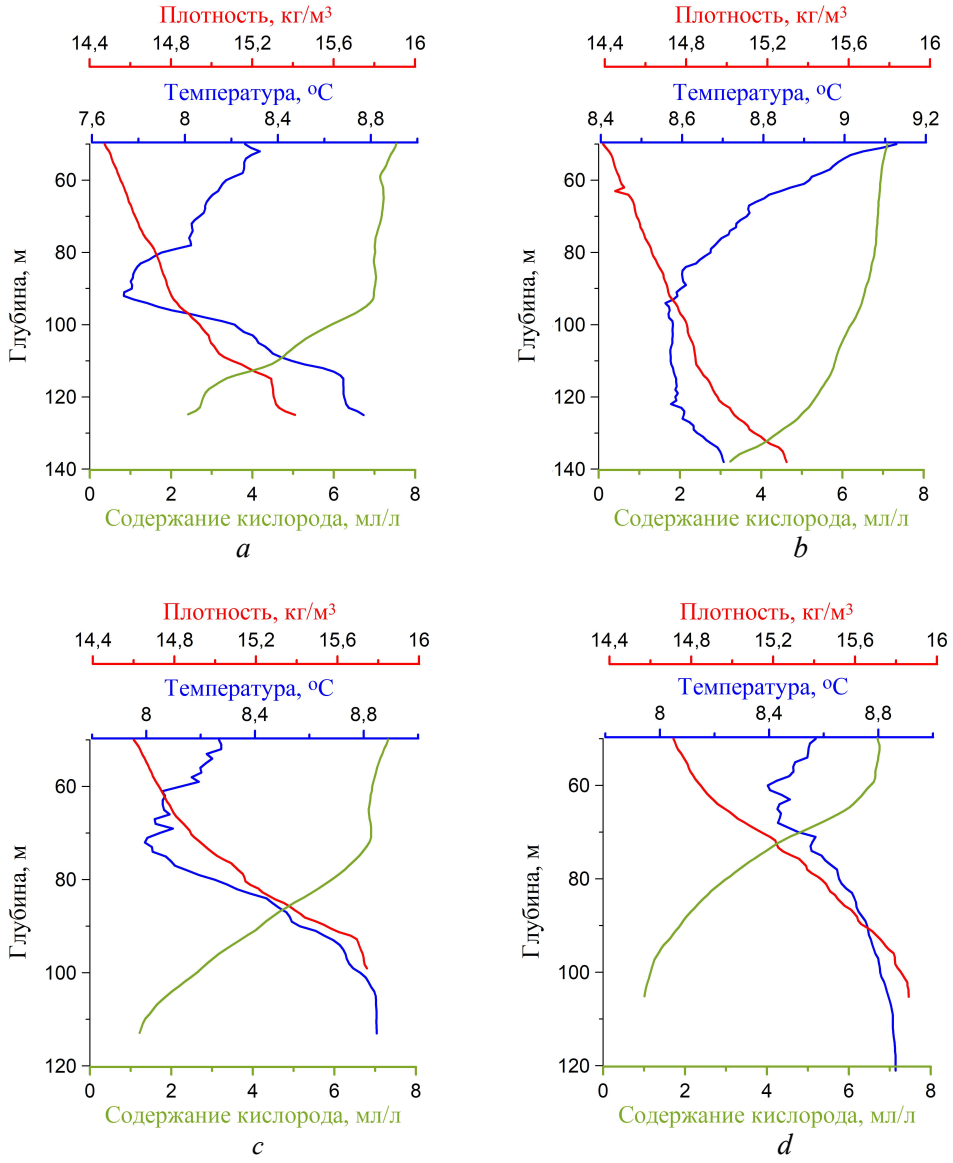
F i g. 4. Oxygen content in CIL during the years of minimum temperature in its core. Averaging is done over the summer seasons in 1986–2023. Vertical segments show standard deviation. The line corresponds to a polynomial approximation

Анализ данных на рис. 3 и 4 показывает: температура в ядре ХПС устойчиво растет (см. рис. 3), тогда как в содержании кислорода (рис. 4) четкая тенденция отсутствует – наблюдается как его снижение, так и увеличение. При этом в 2022–2023 гг. даже при росте температуры отмечено некоторое увеличение содержания кислорода (см. таблицу), причины которого неясны. В прибрежной шельфовой зоне ЮБК на содержание кислорода могут существенно влиять процессы различной природы, в первую очередь биологические, способствующие увеличению содержания кислорода (фотосинтез) и его убыли (окисление органического вещества и дыхание водных организмов), а также связанные с прибрежными апвеллингами особенности неустойчивого гидродинамического режима, особенно проявляющиеся в весенне-летний период. Как отмечено в работах [18, 23], продолжительность и интенсивность прибрежных апвеллингов акватории ЮБК способствуют не только поднятию верхней границы ХПС, но и существенному увеличению содержания кислорода в поверхностных водах.

Чтобы сформировать представление о характерных чертах вертикальной структуры ХПС в шельфовой зоне ЮБК в 2022–2023 гг., построены вертикальные профили распределения температуры, содержания кислорода и условной плотности по 26 станциям с глубинами 100 м и более в мае, июне, августе и сентябре 2022 г. и 9 станциям в июне и июле 2023 г. Часть профилей за июнь 2022–2023 гг. представлена на рис. 5.

Анализ вертикальных профилей выявил межгодовые различия параметров ХПС между летними сезонами 2022 и 2023 гг. В 2023 г. зафиксировано увеличение температуры в слое ХПС по сравнению с 2022 г., наиболее значительное на глубине 50 м: в Ялтинском заливе температура выросла с 8,3 до 8,8 °С (рис. 5, *a*, *b*), тогда как в Голубом заливе рост был менее выраженным – с 8,3

до 8,5 °С (рис. 5, *c*, *d*). Согласно рис. 5, в 2023 г. повышение температуры сопровождалось увеличением концентрации кислорода в ХПС. При этом содержание кислорода снижается почти до нуля только на глубинах 120 м, преимущественно в акватории Голубого залива (рис. 5, *c*, *d*).



Р и с. 5. Вертикальные профили распределения температуры, кислорода и условной плотности в шельфовых акваториях ЮБК (глубины до 120 м) для Ялтинского залива 9 июня 2022 г. (*a*), 15 июня 2023 г. (*b*) и Голубого залива 17 июня 2022 г. (*c*), 14 июня 2023 г. (*d*)

F i g. 5. Vertical profiles of the temperature, oxygen and conditional density distributions in the shelf water areas of the Southern Coast of Crimea (depths up to 120 m) for Yalta Bay on June 9, 2022 (*a*) and June 15, 2023 (*b*), as well as for Goluboy Bay on June 17, 2022 (*c*) and June 14, 2023 (*d*)

Сравнение вертикальных профилей ХПС между заливами в июне 2022 и 2023 гг. выявило также существенные различия. В Голубом заливе ХПС четко выражен по температуре с минимумом 8,0 °С на глубине 75 м (2022 г.) и 8,4 °С на глубине 60 м (2023 г.) при условной плотности 15,2–15,4 кг/м^3. В Ялтинском заливе динамика более заметная: в 2022 г. ядро ХПС с минимальной температурой 7,8 °С наблюдалось на глубине 90 м при условной плотности 14,5–14,6 кг/м^3; тогда как в июне 2023 г. ХПС структурно проявился в других температурных границах и глубина залегания его ядра изменилась: минимум температуры наблюдается на глубине 95 м (8,5 °С) и 120 м (8,6 °С) при условной плотности 14,8–15,2 кг/м^3. Содержание кислорода в границах ХПС оставалось стабильным (6,41–7,12 мл/л), несмотря на рост температуры, и постепенно снижалось с глубиной в интервале плотности 15,0–15,2 кг/м^3.

Сопоставление полученных данных с результатами работы [13], посвященной исследованию условий формирования ХПС в шельфово-склоновой зоне восточной части моря в 2019–2022 гг., позволяет сделать следующие выводы. В шельфовой зоне ЮБК, несмотря на 15-летний тренд роста температуры и плотности ХПС, в редких случаях сохранялись условия для формирования слоя с классическими значениями его температурных пределов, например в июне 2022 г. в Ялтинском заливе. Однако в следующем году в этой же акватории ХПС формировался при более высоких температурных границах. В то же время данные работы [13] указывают на полное отсутствие слоя в его классическом понимании в шельфово-склоновой зоне восточной части моря. Сам процесс образования ХПС при этом наблюдался, только с более высокой температурой границ. В 2022 г. ХПС продолжал существовать, но как слой инверсии, ограниченный изотермами 8,8 °С. Причины столь значительных различий в параметрах ХПС двух шельфовых зон Черного моря в 2022 г. пока неясны и, вероятно, обусловлены различиями в источниках и механизмах его формирования. Для точного объяснения выявленной неоднородности требуются дополнительные данные, которые предполагается получить в ходе дальнейших исследований.

Заключение

На основе анализа базы многолетних данных БОД МГИ за периоды 1986–2000 и 2007–2023 гг. (13 286 измерений ХПС за ~ 40 лет) оценены изменения параметров ХПС (плотности, температуры, содержания кислорода) в шельфовых акваториях ЮБК. Установлено, что в 2007–2023 гг. в районе исследований произошло увеличение плотности вод на глубинах залегания ХПС. Это проявилось в смещении изопикн: на глубине 100 м появилась изопикна 15,8 кг/м^3, а на глубине 90 м – изопикны 15 и 15,4 кг/м^3. Для сравнения: в 1986–2000 гг. максимальные значения плотности на соответствующих глубинах не превышали 14,8 и 14,7 кг/м^3.

Для шельфовых акваторий ЮБК на примере Голубого и Ялтинского заливов за периоды 1986–2000 и 2007–2023 гг. установлены изменения температуры, условной плотности и содержания растворенного кислорода. При этом количественные характеристики динамики растворенного кислорода в границах ХПС для шельфовых акваторий Крыма получены впервые.

Установленное впервые для шельфовых акваторий ЮБК увеличение содержания растворенного кислорода в ХПС на фоне одновременного роста температуры пока не объяснено. Проверка гипотез о причинах этого явления требует дополнительных исследований.

Полученные данные подтверждают, что шельфовая экосистема реагирует на внешние воздействия сильнее, чем глубоководная: даже при незначительном в абсолютном выражении росте температуры воды наблюдаются существенная перестройка гидрологической структуры вод и аномалии в формировании ХПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А.*, *Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : НАНУ Украины, 2011. 212 с.
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. https://doi.org/101007/s11110-011-9090-x
3. *Овчинников И. М.*, *Попов Ю. И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 739–746.
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. https://doi.org/10.1029/2019JC015076
5. *Масевич А. В.*, *Коновалов С. К.* Динамика содержания кислорода в период дистрофикационных процессов в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 1. С. 89–104. EDN WHFJRJ. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-1-89-104
6. *Ivanov L. I., Beşiktepe Ş., Özsoy E.* The Black Sea Cold Intermediate Layer // Sensivity 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
7. On the ADCP-derived Rim Current structure, CIW formation and the role of mesoscale eddies on the CIW transport in the Black Sea: Results from April 1993 observations / T. Oguz [et al.] // NATO TU-Black Sea Project: Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea. Environmental Security / Eds. L. I. Ivanov, T. Oguz. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 93–118. (NATO ASI Series ; vol. 47).
8. *Oguz T.*, *Beşiktepe Ş.* 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
9. Control of Black Sea intermediate water mass formation by dynamics and topography: Comparison of numerical simulations, surveys and satellite data / E. V. Stanev [et al.] // Journal of Marine Research. 2003. Vol. 61, iss. 1. P. 59–99. https://doi.org/10.1357/002224003321586417
10. *Полонский А. Б.*, *Попов Ю. И.* Условия формирования вод холодного промежуточного слоя Черного моря. Севастополь : НАНУ, 2011. 54 с.
11. *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
12. *Подымов О. И.*, *Зацепин А. Г.*, *Очередник В. В.* Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. EDN GVAYYQ. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-279-287
13. *Куклев С. Б.*, *Куклева О. Н.* Особенности формирования холодного промежуточного слоя шельфовой склоновой зоны северо-восточной части Черного моря в период 2019–2022 гг. // Экология гидросферы. 2023. № 1 (9). С. 26–33. EDN YMQEAT. https://doi.org/10.33624/2587-9367-2023-1(9)-26-33

14. *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

15. *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

16. *Морозов А. Н.*, *Маньковская Е. В.* Пространственно-временная изменчивость гидрофизических параметров вод северной части Черного моря по данным измерений 2021 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 6–18. EDN QEZCBF.

17. *Кузнецов А. С.*, *Иващенко И. К.* Особенности формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 189–204. EDN GNXBSC. https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-2-189-204

18. *Иванов В. А.*, *Михайлова Э. Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 91 с.

19. Банк океанографических данных Морского гидрофизического института: информационные ресурсы для поддержки исследований прибрежной зоны Черного моря / А. Х. Халиулин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 1. С. 82–89. EDN VUYZPJ.

20. Геофизические и геоморфологические исследования шельфа Крыма / В. И. Мысливец [и др.] // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». 2–4 марта 2021 г. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2021. Т. II. С. 244–247. EDN EHHTNQ.

21. *Carpenter J. H.* The Accuracy of the Winkler Method for Dissolved Oxygen Analysis // Limnology and Oceanography. 1965 Vol. 10, iss. 1. P. 135–140. https://doi.org/10.4319/lo.1965.10.1.0135

22. Regional Peculiarities of Physical and Chemical Responses to Changes in External Conditions within the Black Sea Pycnocline: Cooling Phase / L. I. Ivanov [et al.] // NATO TU-Black Sea Project: Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea. Symposium on Scientific Results / Eds. L. I. Ivanov, T. Oguz. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 53–68. (NATO ASI Series ; vol. 2).

23. *Совга Е. Е.*, *Хмара Т. В.*, *Мезенцева И. В.* Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 96–111. EDN VKPHBI.

Об авторах:

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **Scopus Author ID: 7801406819**, **ResearcherID: A-9774-2018**, **SPIN-код: 8675-2443**, science-mhi@mail.ru

Хмара Татьяна Викторовна, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-4699-6600**, **Scopus Author ID: 6506060413**, **ResearcherID: C-2358-2016**, **SPIN-код: 3382-0644**, xmara@mhi-ras.ru

Коновалов Сергей Карпович, директор, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, член-корреспондент РАН, **ORCID ID: 0000-0002-5200-8448**, **Scopus Author ID: 7103125868**, **ResearcherID: F-9047-2014**, **SPIN-код: 9309-4775**, sergey_konovalov@yahoo.com