

Основные закономерности многолетних изменений экосистемы Черного моря

В. В. Мельников^{1*}, А. Н. Серебренников², А. В. Масевич³,
Е. С. Чудиновских¹

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

³ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: sevlin@ibss-ras.su

Аннотация

Анализируются многолетние изменения экосистемы Черного моря, выражающиеся, кроме прочего, в потеплении вод на фоне антропогенного загрязнения и эвтрофикации. Цель работы заключается в описании структурных изменений водных масс, биотопов, а также в оценке изменений ключевых компонентов экосистемы. На основе анализа многолетних массивов данных о гидрологии, математического моделирования и гидробиологических исследований показано, что для полного понимания изменений экосистемы Черного моря необходимо учитывать не только потепление климата, антропогенное загрязнение и эвтрофикацию, но и хронические изменения структуры водных масс и связанных с ними биотопов. Продолжающаяся деоксигенация сокращает слой обитания холодноводных видов, а потепление уже привело к тому, что холодный промежуточный слой, с которым эти виды ассоциированы, исчез и растворился в окружающих водах при температуре около 9 °С. Дальнейшее потепление поверхностных вод может привести к деградации комплекса холодноводных видов, создающих трофическую основу современной экосистемы Черного моря. Следует ожидать ее существенной трансформации вследствие увеличения роли тепловодных и эвритермных видов.

Ключевые слова: Черное море, экосистема, изменения климата, деоксигенация, водные массы, биотопы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий ФИЦ ИнБЮМ РАН по теме 124030100137-6, ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2025-0001 и ФГБУН ИПТС № 124020100120-9.

Для цитирования: Основные закономерности многолетних изменений экосистемы Черного моря / В. В. Мельников [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 19–35. EDN SUIYJB.

© Мельников В. В., Серебренников А. Н., Масевич А. В.,
Чудиновских Е. С., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

The Main Patterns of the Black Sea Ecosystem Long-Term Changes

V. V. Melnikov^{1*}, A. N. Serebrennikov², A. V. Masevich³,
E. S. Chudinovskikh¹

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia

² Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

³ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: sevlin@ibss-ras.su

Abstract

This study examines long-term changes in the Black Sea ecosystem, including the warming of its waters amid anthropogenic pollution and eutrophication. The aim of the study is to describe structural shifts in water masses and biotopes, as well as to assess alterations in key ecosystem components. Through the analysis of multi-year hydrological datasets, mathematical modelling, and hydrobiological studies, it has been demonstrated that a comprehensive understanding of the Black Sea's ecosystem changes requires consideration not only of climate warming, anthropogenic pollution, and eutrophication but also of chorological changes in water mass structure and associated biotopes. Ongoing deoxygenation is reducing the habitat layer for cold-water species, while warming has already caused the disappearance of the cold intermediate layer – with which these species are associated – dissolving it into surrounding waters at temperatures around 9 °C. Further warming of surface waters may lead to the degradation of cold-water species assemblages that form the trophic foundation of the Black Sea's current ecosystem. A significant transformation is expected due to the increasing dominance of warm-water and eurythermic species.

Keywords: Black Sea, ecosystem, climate change, deoxygenation, water masses, biotopes

Acknowledgements: The research is performed under state assignment on IBSS RAS topic no. 124030100137-6, on MHI RAS topic no. FNNN-2025-0001, and on IPTS topic no. 124020100120-9.

For citation: Melnikov, V.V., Serebrennikov, A.N., Masevich, A.V. and Chudinovskikh, E.S., 2025. The Main Patterns of the Black Sea Ecosystem Long-Term Changes. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 19–35.

Введение

Около 130 лет назад Н. И. Андрусов¹⁾ впервые показал, что Черное море (ЧМ) представляет собой двухслойную систему, состоящую из тонкого (80–200 м) «живого» кислородного слоя и сероводородной зоны. До конца XX в. считалось, что между этими двумя слоями имеется слой сосуществования кислородных и сероводородных вод или С-слой. Первые публикации об отсутствии этого слоя [1] были восприняты очень осторожно. Однако использование новых методик в конце XX в. показало, что представления об С-слое были ошибочными [1–3]. Выяснилось, что между кислородной зоной и серо-

¹⁾ Андрусов Н. И. Предварительный отчет об участии в черноморской глубоководной экспедиции // Известия Русского географического общества. 1890. Т. 26, № 5. С. 398–409.

водородным слоем находится водная масса (30–50 м) трансформированной средиземноморской воды ($O_2 < 10$ мкМ, $H_2S < 3$ мкМ), или субкислородный слой (СКС) [1, 2]. Положение этого слоя в толще воды зависит от интенсивности вертикального водообмена и обилия растворенного органического вещества. Увеличение поступления питательных веществ в р. Дунай, Днепр и Дон в 10 раз с 1960-х по 1990-е гг. привело к антропогенной эвтрофикации с образованием большого количества опускающегося органического вещества [2]. Вертикальный водообмен не обеспечивал достаточной аэрации, чтобы компенсировать потребление кислорода для окисления этой массы органического вещества, и кислородный слой моря стал «обмелевать» [2, 4]. Глубина проникновения кислорода к верхней границе СКС изменилась со 130 м в 1955 г. до 90 м в 2013 г. [5]. К началу XX в. эвтрофикация моря уменьшилась [6], но из-за повышения температуры поверхностных вод деоксигенация глубин продолжилась [7].

Таким образом, в последние годы в глубоководной зоне ЧМ произошли значительные изменения структуры биотопов, которые существенно повлияли на условия жизни планктона и рыб. Поэтому для полноценного понимания современных изменений экосистемы ЧМ необходимо учитывать не только такие факторы, как изменение климата, антропогенное загрязнение и эвтрофикация, но и такие, как значительные изменения гидролого-гидрохимических и хорических свойств водных масс и биотопов. (Хорические изменения водных масс (от греч. *chora* – «место») наблюдаются в тех случаях, когда водная масса меняет свое пространственное положение и под воздействием другого сочетания внешних факторов в новом местоположении приобретает иные экологические свойства [8].)

Существующие гидролого-гидрохимические представления о структуре поверхностных водных масс в глубоководных районах ЧМ можно представить следующим образом:

1. Верхняя черноморская водная масса (ВЧВМ): $T > 20^\circ C$, $S = 18.0 \dots 18.4$ ЕПС, $\sigma_t < 14^{2), 3)}$.
2. Холодный промежуточный слой (ХПС): $T < 8^\circ C$, $S = 18.0 \dots 19.0$ ЕПС, $\sigma_t = 14.0 \dots 14.8^{2), 3)}$.
3. Субкислородный слой (СКС): $T > 8^\circ C$, $\sigma_t = 15.8 \dots 16.2$ [2, 3].
4. Промежуточная черноморская водная масса (ПЧВМ): $T > 8^\circ C$, $S > 20$ ЕПС, $\sigma_t = 16.2 \dots 17.9^{2), 3)}$. (Прибрежная и глубинная водные массы в данной работе не обсуждаются, поскольку речь идет только о поверхностных водах глубоководной зоны.)

Структуру биотопов в глубоководных районах ЧМ можно представить следующим образом:

1. Биотоп поверхностной пленки (аэроконтур): сообщество аэробных организмов поверхностной пленки – нейстон. Состав – постоянные или времен-

²⁾ Безносков В. Н. Экологические последствия нарушения стратификации моря : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Москва : МГУ, 2000. 42 с.

³⁾ Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : дис. ... д-ра геогр. наук. Севастополь : МГИ РАН, 2017. 377 с.

ные обитатели слоя 0–5 см: бактерии и простейшие, фитопланктон, зоопланктон, икра и личинки беспозвоночных и рыб [9, 10].

2. Биотоп ВЧВМ (аэробная зона): сообщество аэробных организмов над сезонным термоклином – эпибиота. (Термины «эпибиота» и «батибиота» мы использовали вслед за Т. С. Петипа⁴⁾, впервые описавшей эпи- и батипланктон.) Состав – теплолюбивые и эвритермные виды, населяющие верхнюю водную массу: фитопланктон, эпипланктон, макропланктон и основная масса рыб (*Engraulis encrasicolus* Linnaeus, 1758 и пр.)⁴⁾ [6, 11].

3. Биотоп ХПС (аэробная зона): сообщество аэробных организмов под сезонным термоклином – батибиота⁴⁾. Состав – батипланктон и холодноводные рыбы (*Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758) и др.), эвритермные виды планктона^{4), 5)} [11–14].

4. Биотоп СКС (анаэроконтур): сообщество аэробных и анаэробных микроорганизмов субкислородного слоя. (Термин «анаэроконтур» впервые введен В. В. Мельниковым [14].) Состав – аэробные и анаэробные виды цианобактерий, денитрифицирующих бактерий, метанотрофы, метаногены, бактерии, восстанавливающие железо, бактерии, восстанавливающие марганец [14].

5. Биотоп ПЧВМ (анаэробная зона): сообщество анаэробных микроорганизмов сероводородной зоны. Состав – тионовые бактерии (до 40 % биомассы от всего бактериопланктона), пурпурные и ферментирующие бактерии, метанотрофы, метаногены, марганецредуцирующие бактерии, анаммоксибактерии и различные археи⁶⁾ [14]. Прибрежная и глубинная водные массы не обсуждаются, поскольку речь идет только о поверхностных водах глубоководной зоны.

В последние годы описанные выше представления о структуре водных масс и биотопов уже не соответствуют реальному положению дел из-за продолжительного потепления поверхностных вод⁷⁾. К настоящему времени в результате деоксигенации концентрация кислорода в глубинах моря сократилась на 44 % [5]. Температура ХПС начала повышаться, и к 2019 г. эта водная масса исчезла [15]. Информация об этом катастрофическом для экосистемы ЧМ событии, безусловно, требует неоднократной проверки на разных рядах данных. Дальнейший нагрев поверхностных вод может вызвать каскадные изменения всей экосистемы ЧМ, поскольку, например, холодноводные копеподы составляют основную часть кормового зоопланктона, основу рациона мелких планктоноядных рыб ЧМ [12–16]. Кроме того, остается нерешенным один из основополагающих вопросов о том, как сокращение общей толщины кислородного слоя в глубоководных районах моря повлияло на хори-

⁴⁾ Петипа Т. С. О жизненных формах пелагических копепод и к вопросу о структуре трофических уровней в структуре и динамике водных сообществ и популяций. Киев : Наукова думка, 1967. С. 108–119.

⁵⁾ Флинт М. В. Вертикальное распределение массовых видов мезопланктона в нижних слоях аэробной зоны в связи со структурой поля кислорода // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря. Москва : Наука, 1989. С. 187–212.

⁶⁾ Сорокин Ю. И. Черное море. Природа. Ресурсы. Москва : Наука, 1982. 216 с.

⁷⁾ Масевич А. В. Динамика кислорода в основном пикноклине Черного моря : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Севастополь : МГИ РАН, 2022. 24 с.

ческие изменения структуры биотопов пелагиали. Настоящее исследование в какой-то степени восполняет этот пробел.

Целью работы является анализ базовых процессов долгосрочных изменений экосистемы ЧМ под воздействием потепления, антропогенного загрязнения, эвтрофикации и изменений структуры водных масс и оценка изменений ключевых компонентов экосистемы.

Материалы и методы

Гидродинамический анализ был основан на модели океанской циркуляции *NEMO* версии 3.6⁸⁾. Эта модель была реализована в регионе ЧМ с разрешением по горизонтали $0.037^\circ \times 0.028^\circ$ и 31 неравномерно расположенным вертикальным уровнем. Онлайн-модель связана со схемой ассимиляции *OceanVar* [17, 18]. Наблюдения, включенные в *BS-REA*, содержат профили температуры/солености (*T/S*), полученные на месте с помощью *SeaDataNet* и *CMEMS INS TAC*, а также аномалии уровня моря. Обобщаются все доступные данные наблюдений с судов (*SYNOP SHIP*), полученные с батитермографов (*BATHY*), с дрейфующих буев (*DRIBU*), а также данные, извлеченные из оперативного архива *ECMWF*.

В этой статье мы рассмотрели пространственно-временные колебания температуры ХПС и окружающих его вод за последние 30 лет. Долгопериодные и пространственные изменения температуры поверхности моря (ТПМ) были рассчитаны на основе ежедневных спутниковых карт с разрешением $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, охватывающих 40-летний период с 1982 по 2021 г. Вся информация была получена из службы мониторинга морской среды *Copernicus* (<https://www.copernicus.eu>)⁹⁾. Кроме того, мы использовали новые данные, полученные в ходе последних крупномасштабных экспедиций Центра коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Института биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН в 2017–2023 гг. (с использованием *CTD*-зонда *Idronaut Ocean Seven 320Plus M*).

Для исследования многолетних изменений вертикального положения плотностных границ СКС были использованы материалы из западно-центральной части Черного моря. Распределение гидрохимических параметров в глубоководной части моря носит квазипостоянный изопикнический характер [7], поэтому оценка многолетних изменений вертикального положения границ СКС проводилась в шкале условной плотности. Эти границы в среднем соответствуют изопикническим поверхностям: $\sigma_t = 15.8$ – верхняя граница и $\sigma_t = 16.2$ – нижняя [2, 3]. Использование такого подхода решает две важные методические проблемы:

1) дефицит гидрохимических данных – данных по гидрохимии западной глубоководной зоны явно недостаточно для оценки их многолетних изменений (гидрологических станций почти на порядок больше);

⁸⁾ NEMO ocean engine / M. Gurvan [et al.]. France : IPSL, 2016. 412 p. (Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>

⁹⁾ SST_BS_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_022 / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00160>

2) влияние случайных факторов на точность оценки – использование плотностных характеристик позволяет нивелировать действие случайных процессов и получать более достоверные количественные оценки эволюции экологической структуры вод ЧМ.

Западная часть моря была выбрана, поскольку сезонная динамика вертикального положения изопикн в этом круговороте незначительна (около 5 м) по сравнению с восточным круговоротом, где она достигает 20 м. Если учесть, что межгодовая изменчивость также больше в восточном круговороте, то плотностные характеристики для определения долгосрочных изменений в западно-центральной части моря более статистически надежны.

Данные для расчетов были собраны в океанографических рейсах научных судов СССР, России, Украины, Турции, Болгарии, Румынии. Для реанализа были использованы массивы информации из баз данных *WOD18*¹⁰⁾, *SeaDataNet*, *Coriolis Ocean Dataset*, Морского гидрофизического института и Института биологии южных морей, а также других источников. Границы центральной и западной зон высокой солености приняты следующими: 42.5–43.5° с. ш., 30–32.5° в. д. Всего было отобрано 1453 гидрологических станции, выполненных исследовательскими судами в 154 рейсах и семью буями *Argo* в летний период с 1957 по 2021 г. (июнь – август). Наибольшее ежегодное количество наблюдений относится к 1980-м гг. (до 120 в летний сезон). В последнее время количество летних наблюдений в западной части открытого Черного моря не превышает 20, как в 1960-е гг. Данные каждой экспедиции были проверены на достоверность, заведомо ложные значения (с выбросами значений, не соответствующих аналогичным особенностям в распределении остальных параметров среды) были отбракованы.

На основании этого были рассчитаны средние профили условной плотности. Осреднение проводили методом обратных расстояний с последующим дополнительным сглаживанием методом низкочастотной фильтрации. Вертикальные профили плотности (формулы *EOS-80*) были интерполированы с разрешением по глубине 1 м методом, описанным в работе [19], затем был проведен поиск заданного изопикнического уровня на основе минимального отклонения. Перед вычислением изопикнических уровней выполняется контроль качества, включая скачки фильтрации и инверсии вертикальной плотности. Дальнейшие временные ряды рассчитанных изопикнических уровней были отфильтрованы с использованием статистического критерия 3σ и затем усреднены в течение летних периодов каждого года. Процедура усреднения служит определенным фильтром нижних частот для уменьшения внутрисезонной изменчивости, которая присуща этому слою из-за влияния мезомасштабных вихрей. Вертикальная дискретизация необработанных данных значительно возросла с 1990-х гг., поэтому эта часть временных рядов имеет более надежные значения изопикнических уровней и проявляет меньше мезомасштабного «шума». Мезомасштабная изменчивость, оцениваемая как стан-

¹⁰⁾ World Ocean Database 2018 / T. P. Boyer [et al.]. NOAA, 2018. 207 p. (NOAA Atlas NESDIS 87). URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (дата обращения: 16.08.2024).

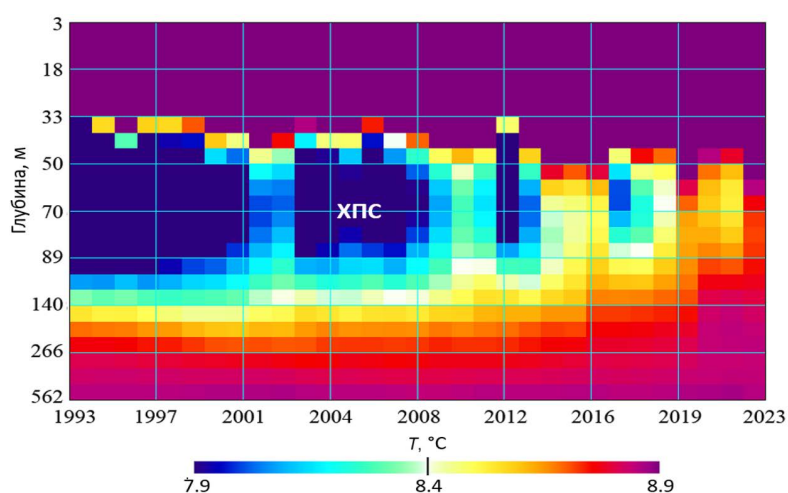
дартные отклонения, рассчитанные в течение летних периодов за последние 30 лет, почти в два раза меньше общей межгодовой изменчивости, что улучшает оценки текущего линейного тренда.

Прогнозный анализ проводился с помощью функций прогнозирования *MS Excel* с использованием AAA-версии алгоритма экспоненциального сглаживания (*ETS*), которое в *Excel* основано на версии AAA (аддитивная ошибка, аддитивный тренд и аддитивная сезонность) алгоритма экспоненциального тройного сглаживания (*ETS*), который сглаживает незначительные отклонения в тенденциях прошлых данных путем выявления закономерностей сезонности и доверительных интервалов. Этот метод прогнозирования лучше всего подходит для нелинейных моделей данных с сезонными или другими повторяющимися закономерностями.

Результаты и обсуждение

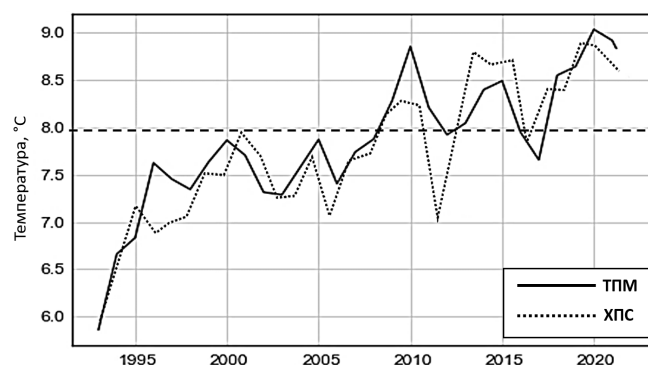
Изменения структуры водных масс

Усредненные данные о многолетней изменчивости вертикальной структуры ХПС во всей глубоководной зоне моря с июня по октябрь в 1993–2023 гг. приведены на рис. 1. Он показывает, что в 2019 г. верхняя и нижняя границы ХПС объединились на средней глубине около 70 м и эта водная масса, обеспечивающая условия существования реликтовых бореальных видов кормового зоопланктона и рыб-планктонофагов ЧМ, исчезла. Этот процесс произошел не одномоментно, а в результате постепенного прогрева ядра ХПС за последние 20 лет. Обновление вод его ядра уменьшалось из-за наступления череды теплых зим (рис. 2), которые повторялись примерно через каждые пять лет: в 1996, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 гг. (если оценивать зимы по ТПМ, вычисляемой как среднее за декабрь – февраль).



Р и с . 1 . Многолетняя изменчивость ХПС

F i g . 1 . Long-term variability of the cold intermediate layer (CIL)



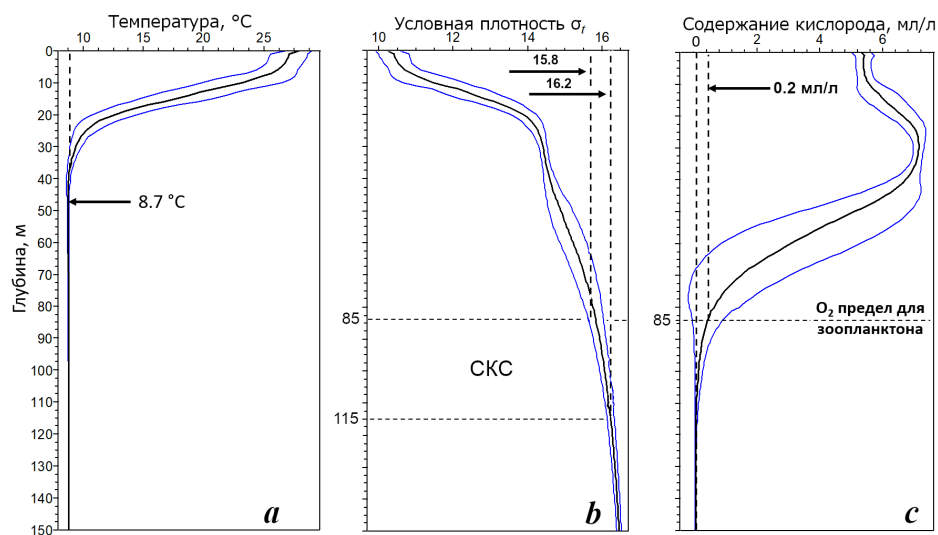
Р и с . 2. Среднезимние значения ТПМ, рассчитанные как средние значения за январь, февраль и декабрь, и базовое значение ХПС в августе за 1993–2022 гг.

Fig. 2. Average seasonal (winter) values of sea surface temperature, calculated as the average values for January, February and December, and the base value of the CIL in August for 1993–2022

Об этом убедительно говорит высокий коэффициент ранговой корреляции по Спирману [20] между ежегодными значениями ТПМ и ХПС, который равен ~ 0.85 (по Пирсону ~ 0.89). Непараметрический метод ранговой корреляции применен здесь, так как ТПМ и ХПС распределены не по нормальному закону согласно тесту Шапиро – Уилка [20]. Смыкание верхней и нижней границ ХПС привело также к повышению солёности поверхностного слоя. В 2023 г. на глубине 50 м, которая обычно соответствует положению ядра ХПС, солёность достигла максимального значения 19 ЕПС, что прежде наблюдалось только в слое 60–70 м, т. е. у среднего положения нижней границы в летнее время.

Таким образом, к 2021 г. по всей глубоководной зоне моря установилась новая стратификация водных масс и связанных с ними биотопов. Анализ данных 84 гидрологических профилей по всей глубоководной зоне в слое 0–150 м показал, что под термоклином на всех глубинах вплоть до сероводородной зоны наблюдалась изотермия с температурой около $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, а).

Распределение плотностных характеристик воды в этом же слое свидетельствовало о том, что СКС и связанный с ним биотоп анаэроконтура находился в слое 85–115 м. Его верхняя граница соответствовала середине основного пикноклина ($\sigma_t = 15.8$). Средние плотностные границы СКС приводятся в соответствии с [2, 3]. Над ним в кислородной зоне располагалась область обитания планктона и рыб (рис. 3, б) в слое 0–85 м (ВЧВМ и ХПС). Предельная глубина нахождения зоопланктона с концентрацией⁵⁾ 10 мкМ, или 0.2 мл/л, четко соответствовала верхней границе анаэроконтура по изобате 85 м (рис. 3, с). На глубине 115 м (при плотности воды $\sigma_t = 16.2$) полностью исчезли следовые концентрации кислорода и начинался слой хемоклина при концентрации H_2S около 3 мкМ.



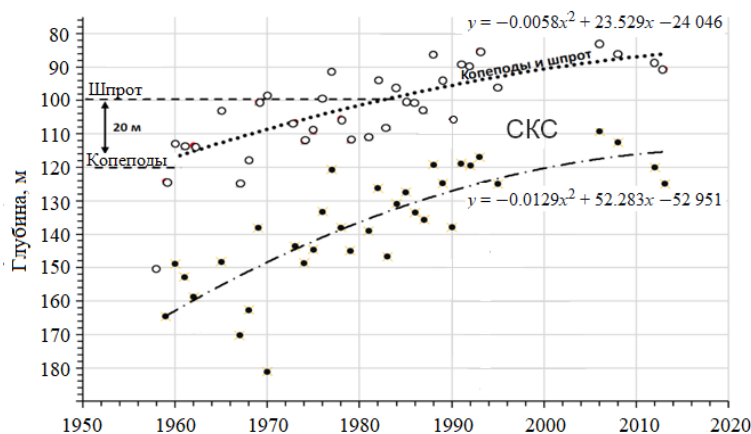
Р и с . 3 . Средний вертикальный профиль температуры (а), условная плотность (b) и содержание кислорода (с) в слое 0–150 м в июле – августе 2021 г. в центральных глубоководных районах Черного моря по данным 117-го рейса ЦКП «НИС Профессор Водяницкий». Синие линии – СКО, черные линии – среднее

Fig. 3. Average vertical profile of temperature (a), density anomaly (b) and oxygen content (c) in the 0–150 m layer in July and August 2021 in the central deep regions of the Black Sea, according to data from the 117th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Blue lines are SD, black lines are mean values

Изменения структуры биотопов

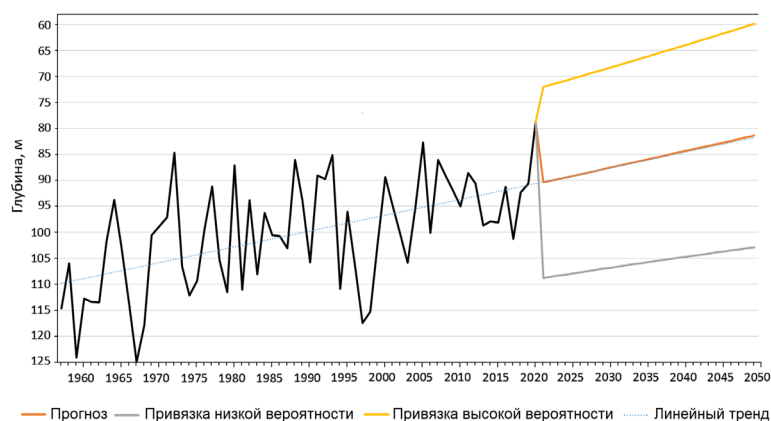
Из рис. 3, b следует, что зона дневных скоплений батипланктона в 2021 г. соответствовала верхней границе биотопа [12] анаэроконтура, которая находилась на глубине 85 м. Основанием для исследования многолетней динамики вертикального положения анаэроконтура в 1957–2021 гг. послужило то, что среднее положение этой контактной зоны соответствует верхней границе СКС при условной плотности $\sigma_t = 15.8$ [2, 3].

Результаты исследования (рис. 4) свидетельствуют о том, что верхняя граница этого биотопа ($\sigma_t = 15.8$) за 60 лет приблизилась к поверхности на 35 м, а нижняя граница ($\sigma_t = 16.2$) поднялась с глубины 165 до 115 м. Это означает, что в 1983 г. верхняя граница анаэроконтура (белые кружки на рис. 4) поднялась до изобаты 100 м, которая является предельной глубиной обитания черноморского шпрота *S. sprattus*. С этого момента глубинные скопления холодноводного (кормового) зоопланктона, концентрирующиеся у верхней границы анаэроконтура, оказались в зоне скоплений холодноводных рыб-планктонофагов. Подъем нижней границы анаэроконтура (черные кружки на рис. 4) свидетельствует о подъеме хемоклина, т. е. сероводородной зоны, на 50 м вверх.



Р и с . 4 . Динамика подъема анаэроконтура к поверхности за 1957–2021 гг. в западно-центральной зоне ЧМ летом: белые кружки – верхняя граница анаэроконтура ($\sigma_t = 15.8$), черные – нижняя граница ($\sigma_t = 16.2$). Усредненные данные по годам: пунктирная линия – верхняя контактная зона, штрих-пунктирная линия – нижняя контактная зона; штриховые линии представляют собой полиномиальные тренды второй степени

Fig . 4 . Dynamics of the anaerocontour rise to the surface for 1957–2021, in summer in the western central deep-sea zone of the Black Sea: white circles are the upper anaerocontour boundary ($\sigma_t = 15.8$), black circles are the lower one ($\sigma_t = 16.2$). Average data by year: dotted line – upper contact zone; dashed-dotted line – lower contact zone; dashed lines – second-degree polynomial trends



Р и с . 5 . Динамика положения верхней границы СКС до 2050 г. ($\sigma_t = 15.8$) в центре западной части ЧМ (42.5–43.5° с. ш., 30–32.5° в. д.)

Fig . 5 . Dynamics of the upper limit of the Suboxic Layer until 2050 ($\sigma_t = 15.8$) in the center of the western Black Sea (42.5–43.5° N, 30–32.5° E)

Зная динамику изменчивости плотностных границ СКС, можно рассчитать приблизительное положение границ анаэроконтура на ближайшие 25 лет. Анализ гидрологических данных из центральной части западного циклонического круговорота за 1957–2021 гг. показал: верхняя граница анаэроконтура, регистрируемая по изопикне $\sigma_t = 15.8$ ($O_2 = 10$ мкМ), характеризовалась устойчивой тенденцией к подъему к поверхности (рис. 5). В 1959 г. среднее положение верхней границы анаэроконтура соответствовало глубине 124 м. В 1982 г. эта контактная зона поднялась на глубину 91 м, то есть почти на 33 м выше (по сравнению с 1959 г.), а в настоящее время верхняя граница СКС в центре западного круговорота расположена на глубине 79 м, что почти на 50 м выше наблюдаемого уровня в 1959 г. Расчет предполагаемых изменений положения верхней границы СКС до 2050 г. (пунктирная линия на рис. 5) показал, что через 25 лет она может подняться еще на 9 м.

Обсуждение

Тенденции изменений экологических свойств водных масс

1. *ВЧВМ*. Установлено, что в конце прошлого века зимняя ТПМ в глубоководной зоне моря была около 5.8°C , сейчас ее среднее значение поднялось почти до 9°C (см. рис. 2). Скорость роста ТПМ в ЧМ равна около $0.6^\circ\text{C}/10$ лет. Это соответствует данным авторов работы [21] о том, что повышение ТПМ в 1982 и в 2020 гг. составило 0.40 ± 0.21 и $0.71 \pm 0.19^\circ\text{C}/10$ лет соответственно. Моделирование [22] показало, что с 1980–1999 по 2080–2099 г. ТПМ повысится еще на 3.7°C . Согласно нашим расчетам, в последние годы в ВЧВМ стала повышаться соленость: от 18.0–18.4 ЕПС³⁾ [8] до 18.61–18.8 ЕПС.

2. *ХПС*. Мы подтверждаем информацию Э. В. Станева с соавторами [15] о том, что к 2019 г. потепление вызвало исчезновение ХПС. В слое воды между серединой сезонного термоклина и серединой пикноклина существенно изменились основные параметры среды (рис. 1, 6). В период 1993–2023 гг. температура изменилась от 6.0 – 7.8 до 9°C , соленость – от 18.0–19.0 до 18.8–20.4 ЕПС, условная плотность σ_t – от 14.0–14.8 до 14.3–15.8.

3. *СКС*. За последние 60 лет наблюдается устойчивая тенденция к подъему субкислородного слоя к поверхности (рис. 4, 6). Его верхняя граница ($\sigma_t = 15.8$) в глубоководной зоне моря в 1957 г. была на глубине 115 м, а к 2021 г. она поднялась до 85 м; нижняя граница ($\sigma_t = 16.2$) в 1957 г. была на глубине 165 м, а к 2021 г. она поднялась до 115 м.

4. *ПЧВМ*. Верхняя граница этой водной массы – это хемоклин, от которого вглубь до самого дна простирается сероводородный слой. Результаты настоящей работы (рис. 6) свидетельствуют о том, что за 60 лет сероводородный слой поднялся приблизительно на 50 м вверх.

Тенденции основных изменений структуры биотопов

1. *Биотоп поверхностной пленки* (нейстон [9]). В настоящее время численность нейстонных копепод семейства Pontellidae сократилась на 50–70 %. Их встречаемость снизилась настолько, что они были включены в *Black Sea Red Book* [10]. Дальнейшее повышение ТПМ почти на 4°C [22] к концу этого столетия может не только привести к смене таксономического состава традиционных видов нейстона, но и повлиять на биологию организмов мерогиопнейстона.

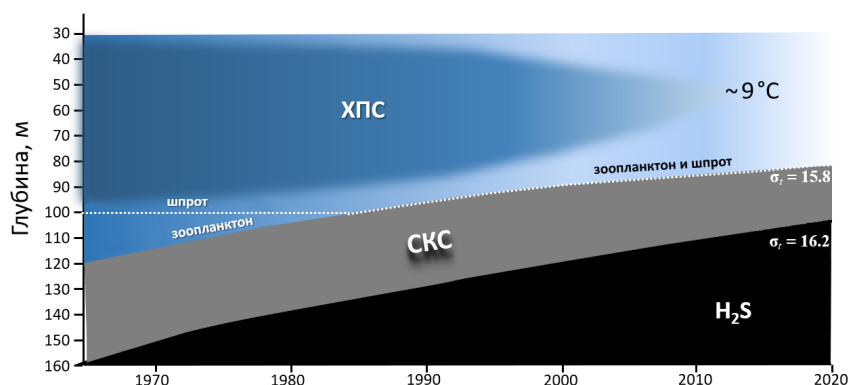


Рис. 6. Изменения структуры водных масс, биотопов и вертикального распределения скоплений зоопланктона и рыб у нижней границы кислородного слоя в центральных глубоководных районах ЧМ в 1960–2020 гг. (днем в летний сезон) в слое 30–160 м

Fig. 6. Changes in the structure of water masses, biotopes and vertical distribution of zooplankton and fish aggregations at the lower boundary of the oxygen layer in the central deep waters of the Black Sea in 1960–2020 (day-time, in summer) in the 30–160 m layer

2. *Биотоп ВЧВМ* (эпибионты). Основная масса работ об антропогенных и климатических изменениях экосистемы ЧМ была опубликована преимущественно на основе данных об изменениях биоты этого слоя [6, 11, 23, 24]. Поэтому лишь отметим, что в условиях потепления за последние несколько десятилетий биота ВЧВМ начала существенно меняться из-за появления тепловодных видов, их преднамеренной или непреднамеренной интродукции. Сейчас в ЧМ зарегистрировано более 300 видов вселенцев, появление которых ускорилось, особенно в последние годы [25]. Сначала было описано 26 новых видов вселенцев [26], затем их число возросло до 59. К 2009 г. было описано 156 некоренных видов, причем большинство из них было из Средиземноморья [27]. В 2017 г. был описан 261 вид вселенцев [28].

3. *Биотоп ХПС* (батибионты). Повышение температуры более 8 °C уже приводит к серьезным нарушениям фенологии нереста умеренно холодноводных видов рыб, которые начинают нереститься не в декабре, а в конце сентября и заканчивают нерест в мае. В последние годы цикл онтогенетического развития шпрота *S. sprattus* от икры до выклева сократился почти в два раза (с 7 до 2–3 дней), уменьшился средний размер личинок при выклеве и их переходе на внешнее питание [29].

Очевидно, что это происходит и с другими холодноводными видами. Известно, что время развития калянуса *Calanus euxinus* Hulsemann, 1991 при температуре 8 °C составляет до 66 дней (от яйца до взрослой особи), а при температуре 18 °C этот срок сокращается почти в два раза [30]. Сжатие слоя обитания этого вида из-за деоксигенации глубин привело к нарушению трофических связей. В 1960–1970-х гг. стадия (объем среды, занятый популяцией [30]) *C. euxinus* в летнее время занимала всю толщину водной массы

ХПС до глубины 130 м, где находилась изооксигена 10 мкМ [5], в то время как стация черноморского шпрота *S. sprattus* занимала только верхнюю часть ХПС до глубины 100 м. Черноморский шпрот питается копеподами только днем в зоне их вертикальных миграций или в гипоксической зоне, где они скапливаются у верхней границы субкислородного слоя.

Чем глубже находится слой концентрации копепод у нижней границы анаэроконтура, тем меньше рыб способно в него опуститься для питания [12]. В 1960–1970-х гг. черноморский шпрот мог перехватывать копепод только во время их суточных вертикальных миграций (рис. 6). В последние годы вся популяция *C. euxinus* (включая особей в диапаузе) по всей глубоководной зоне ЧМ находится в слое обитания черноморского шпрота. Объединение их стаций¹¹⁾ произошло в 1985 г. (см. рис. 4), что могло вызвать десятикратный рост запасов шпрота при его максимальной жирности [31]. Именно в эти годы *C. euxinus* стал преобладать в составе пищевых комков этих рыб. В ближайшей перспективе из-за исчезновения ХПС количество холодноводного зоопланктона в центральных глубоководных районах может существенно сократиться, поскольку такие виды, как *Oithona similis* Claus, 1866 и *Pseudocalanus elongatus* (Brady, 1865) предпочитают температуру менее 8 °C [31].

4. *Биотоп СКС* (анаэроконтур). Изменения положения вертикальных границ этого биотопа являются главным медиатором климатических изменений экосистемы ЧМ. Результаты настоящего исследования показали, что за последние десятилетия верхняя граница анаэроконтура с концентрацией кислорода 0.2 мл/л и плотностью $\sigma_t = 15.8$ поднялась почти на 40 м (см. рис. 4). К 2050 г. слой обитания планктона и рыб может сократиться в глубоководных районах еще на 10 м (см. рис. 5).

5. *Биотоп ПЧВМ*. В ближайшие 25 лет в глубоководных районах ЧМ может произойти дальнейший подъем сероводородной зоны к поверхности еще на 10 м (см. рис. 5). В перспективе это может привести к выбросам анаэробных вод к поверхности, что может нанести серьезный ущерб экосистеме, рыболовству, рекреационным и биоклиматическим ресурсам побережья Черного моря.

Заключение

Таким образом, результаты настоящего исследования статистически достоверно показали, что за последние десятилетия произошли существенные изменения в структуре водных масс и в связанных с ними биотопах гидробионтов пелагиали Черного моря. Особенно усложнились условия обитания холодноводных видов в ХПС, который под влиянием потепления смешался с окружающими более теплыми водами. Вполне вероятно, что эта водная масса может вновь появиться под действием многолетних гидрологических циклов и холодноводные организмы не исчезнут.

Огромную роль в этом играет изменчивость интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, которая влияет на баланс между поступлением высокосоленных водных масс из Средиземного моря (около

¹¹⁾ Беклемишев К. В. Экология и биогеография пелагиали. Москва : Наука, 1969. 291 с.

170 км³ в среднем за год) и речным стоком в море (около 370 км³ в среднем за год). Этот баланс находится в зависимости от разности уровней между морями, от течений, в том числе дрейфовых, вызываемых ветровым воздействием, а значит может зависеть и от атмосферной циркуляции, изменений климата. Соответственно, и СКС, представленный трансформированной средиземноморской водой, также связан с изменениями климата.

Изменения объемов речного стока также являются одним из важных следствий климатических изменений, определяющих интенсивность обновления вод ХПС. Установлено, что численность молоди, биомасса и уловы черноморского шпрота *S. sprattus* находятся в прямой зависимости от динамики объемов стока Дуная и Днепра. По-видимому, увеличение стока приводит к выносу больших объемов растворенного органического вещества (особенно в районе северо-западного шельфа), обеспечивающих развитие фито- и зоопланктона. Это может создавать благоприятные условия для питания молоди пелагических видов рыб либо приводить к гиперэвтрофикации и обширным заморам. Показано, что рост температуры воды ЧМ, по всей вероятности, оказывает неблагоприятное влияние на размножение и уловы таких холодолюбивых рыб-хищников, как шпрот, мерланг, ставрида, и придонных бентофагов – палтуса и кефали. Описанный в данной работе процесс исчезновения ХПС, биотопа обитания холодноводных видов пелагиали ЧМ под влиянием потепления может служить предвестником масштабных экологических изменений в других регионах Мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea / J. W. Murray [et al.] // Nature. 1989. Vol. 338. P. 411–413. <https://doi.org/10.1038/338411a0>
2. Konovalov S., Murray J., Luther G. Basic processes of Black Sea biogeochemistry // Oceanography. 2005. Vol. 16, iss. 2. P. 24–35. EDN XLNELH. <https://doi.org/0.5670/oceanog.2005.39>
3. Еремеев В. Н., Коновалов С. К. К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 3. С. 5–29. EDN SHTVWD.
4. Investigating hypoxia in aquatic environments: diverse approaches to addressing a complex phenomenon / J. Friedrich [et al.] // Biogeosciences. 2014. Vol. 11, iss. 4. P. 1215–1259. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014>
5. Decline of the Black Sea oxygen inventory / A. Capet [et al.] // Biogeosciences. 2016. Vol. 13, iss. 4. P. 1287–1297. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1287-2016>
6. Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Chasovnikov V. K. Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // Journal of Marine Systems. 2013. Vol. 117–118. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.012>
7. Видничук А. В., Коновалов С. К. Изменение кислородного режима глубоководной части Черного моря за период 1980–2019 годы // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 195–206. EDN UMVMXM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-195-206>
8. Мамаев О. И., Архипкин В. С., Тужилкин В. С. Т,S-анализ вод Черного моря // Океанология. 1994. Т. 34, № 2. С. 178–192.

9. Зайцев Ю. П. О контурной структуре гидросферы // Гидробиологический журнал. 2015. Т. 51, № 1. С. 3–27.
10. Abundance and distribution of the hyponeustonic copepods *Anomalocera patersonii* and *Pontella mediterranea* in the south-western part of the Black Sea / G. E. Harcotă [et al.] // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2022. Vol. 22, iss. 5. TRJFAS18987. <https://doi.org/10.4194/TRJFAS18987>
11. Юнев О. А. Коновалов С. К., Великова В. Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долгосрочные тенденции, механизмы, последствия. Москва : ГЕОС, 2019. 164 с. EDN YBSYCD.
12. Distribution of *Sprattus sprattus phalericus* (Risso, 1827) and zooplankton near the Black Sea redoxcline / V. Melnikov [et al.] // Journal of Fish Biology. 2021. Vol. 99, iss. 4. P. 1393–1402. <https://doi.org/10.1111/jfb.14848>
13. Губарева Е. С., Аннинский Б. Е. Состояние популяции *Calanus euxinus* (Copepoda) в открытой пелагиали и зоне Крымского шельфа Черного моря осенью 2016 г. // Морской биологический журнал. 2022. Т. 7, № 3. С. 17–27. EDN AONIDN. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.3.02>
14. Мельников В. В. Анаэроконтур Черного моря // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25, № 5. С. 203–218. EDN NJMWPW. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-5-203-218>
15. 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>
16. Овен Л. С., Шевченко Н. Ф., Володин С. В. Питание шпрота в разных районах Черного моря // Современное состояние ихтиофауны Черного моря : сборник научных трудов. Севастополь : ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского, 1996. С. 34–38.
17. 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.ocemod.2008.01.004>
18. Strongly coupled data assimilation experiments with linearized ocean-atmosphere balance relationships / A. Storto [et al.] // Monthly Weather Review. 2018. Vol. 146, iss. 4. P. 1233–1257. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0222.1>
19. Reiniger R. F., Ross C. K. A method of interpolation with applications to oceanographic data // Deep-Sea Research. 1968. Vol. 15, iss. 2. P. 185–193. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90040-5)
20. Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika. 1965. Vol. 52, iss. 3–4. P. 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
21. Mohamed B., Ibrahim O., Nagy H. Sea surface temperature variability and marine heatwaves in the Black Sea // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 10. 2383. <https://doi.org/10.3390/rs14102383>
22. Climatic controls on biophysical interactions in the Black Sea under present day conditions and a potential future (A1B) climate scenario / H. Cannaby [et al.] // Journal of Marine Systems. 2015. Vol. 141. P. 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.08.005>
23. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydrometeorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // Journal of Marine Systems. 2006. Vol. 60, iss. 3–4. P. 235–254. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.011>

24. Öztürk B. Non-indigenous species in the Mediterranean and the Black Sea. Rome : FAO, 2021. 106 p. (Studies and reviews (General Fisheries Commission for the Mediterranean) ; no. 87). <https://doi.org/10.4060/cb5949en>
25. Zaitsev Y., Mamaev V. Marine biological diversity in the Black Sea. A study of change and decline. New York : United Nations Publications, 1997. 208 p. (Black Sea Environmental Series ; no. 3).
26. Zaitsev Y., Öztürk B. Exotic species in the Aegean, Marmara, Black, Azov and Caspian Seas. Istanbul : Turkish Marine Research Foundation, 2001. 261 p.
27. Shiganova T., Öztürk B. Trend on increasing Mediterranean species arrival into the Black Sea // Climate forcing and its impacts on the Black Sea marine biota / ed. by F. Briand. Monaco : CIESM, 2009. P. 75–91. (CIESM Workshop Monographs ; no. 39).
28. Alexandrov B., Minicheva G., Zaitsev Y. Black Sea network of Marine Protected Areas: European approaches and adaptation to expansion and monitoring in Ukraine // Management of Marine Protected Areas: A Network Perspective / ed. P. D. Goriup. Chichester : John Wiley and Sons, 2017. P. 227–246. <https://doi.org/10.1002/9781119075806.ch12>
29. Влияние некоторых абиотических и биотических факторов на нерест европейского шпрота *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758) в Черном море в ноябре 2016–2017 гг. / Т. Н. Климова [и др.] // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 67–78. EDN YEQENK. <https://doi.org/10.31857/S0030157421010081>
30. Сажина Л. И. Рост массовых копепод Черного моря в лабораторных условиях // Биология моря. 1973. Т. 28. С. 41–51.
31. Воздействие глобальных климатических и региональных факторов на мелких пелагических рыб Черного моря / Г. Е. Шульман [и др.] // Морской экологический журнал. 2007. Т. 6, № 4. С. 18–30. EDN UIQKNH.

Поступила 29.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 05.03.2025 г.; принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Мельников Виктор Владимирович, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 2593-7958**, **ORCID ID: 0000-0001-6856-0467**, **Researcher ID: N-9219-2014**, **Scopus Author ID: 57197396948**, sevlin@ibss-ras.su

Серебренников Александр Николаевич, научный сотрудник, Институт природно-технических систем (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Ленина д. 28), **SPIN-код: 6224-3640**, **ORCID ID: 0000-0002-8650-8168**, **Researcher ID: K-4059-2018**, **Scopus Author ID: 57203430266**, swsilv@gmail.com

Масевич Анна Владимировна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 3687-0399**, **ORCID ID: 0000-0002-0889-020X**, **Researcher ID: AAO-2592-2020**, **Scopus Author ID: 58544083700**, anna_vidnichuk@mhi-ras.ru

Чудиновских Елена Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 6961-9768**, **ORCID ID: 0000-0003-4962-7333**, **Researcher ID: HQZ-6164-2023**, **Scopus Author ID: 57895036400**, chudhel@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Мельников Виктор Владимирович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, написание текста статьи

Серебренников Александр Николаевич – получение натурных данных, обработка данных измерений, подготовка графического материала

Масевич Анна Владимировна анализ литературы по проблеме исследования, сбор и систематизация данных, обсуждение результатов работы

Чудиновских Елена Сергеевна – получение и обработка натурных данных обсуждение результатов, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.