


## Изменение кислородного режима глубоководной части Черного моря за период 1980–2019 годы

А. В. Видничук , С. К. Коновалов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 [anna\\_vidnichuk@mhi-ras.ru](mailto:anna_vidnichuk@mhi-ras.ru)

Поступила в редакцию 27.08.2020 г.

*Цель.* Оценка изменений кислородного режима глубоководной части Черного моря под действием климатических и антропогенных факторов за последние 40 лет – цель данной работы.

*Методы и результаты.* Для анализа были использованы экспедиционные данные (за период 2015–2019 гг.), а также массив данных из Банка данных Морского гидрофизического института РАН (за период 1980–2013 гг.). Из массива были отобраны данные для глубоководной части Черного моря (глубины более 200 м). Гидрофизические и гидрохимические параметры подвергались экспертной оценке, из массива были отбракованы данные, включающие случайные ошибки значений. Далее были построены средние профили температуры, солёности, концентрации кислорода, процента насыщения вод кислородом, концентрации нитратов в шкале условной плотности ( $\sigma_t$ ). Осреднение проводилось методом обратных расстояний с последующим дополнительным сглаживанием методом низкочастотной фильтрации.

*Выводы.* На фоне тенденции увеличения температуры верхних слоев водной толщи и снижения интенсивности зимнего конвективного перемешивания наблюдается снижение запаса кислорода во всех слоях аэробной зоны Черного моря. Проведенный анализ данных за период 1980–2019 гг. показал, что на современном этапе в экосистеме глубоководной части Черноморского бассейна произошел «системный» сдвиг, обусловленный совместным действием климатических изменений и антропогенной нагрузки. Снижение степени насыщения вод кислородом по всей толще аэробной зоны показывает, что влияние процесса эвтрофирования Черноморского бассейна является значительным фактором, определяющим динамику кислорода в водах Черного моря.

**Ключевые слова:** кислородный режим, насыщение вод кислородом, эвтрофикация, холодный промежуточный слой, Черное море


**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования», а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90062.

**Для цитирования:** 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. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-195-206

# Changes in the Oxygen Regime in the Deep Part of the Black Sea in 1980–2019

A. V. Vidnichuk , S. K. Konovalov

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

 *anna\_vidnichuk@mhi-ras.ru*

*Purpose.* Assessing changes in the oxygen regime of the deep-water part of the Black Sea under the influence of climatic and anthropogenic factors over the past 40 years is the goal of the work.

*Methods and Results.* For the analysis, the expedition data (2015–2019) and those from the Databank of the Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, (1980–2013) were used. The data for the deep-water part of the Black Sea (the depths exceeding 200 m) were selected from the array. The data on hydrophysical and hydrochemical parameters were subjected to expert assessment, and those including random errors in the values were excluded from the array. Then the average profiles of temperature, salinity, oxygen concentration, oxygen saturation, and nitrates concentration were plotted in the density scale ( $\sigma_t$ ). Averaging was carried out by the inverse distance method followed by additional smoothing by the low-frequency filtering method.

*Conclusions.* Against the background of the tendency of temperature increase in the upper layers of the water column and decrease of winter convective mixing intensity, the oxygen supply diminishes in all the layers of the Black Sea aerobic zone. Having been analyzed, the data for the 1980–2019 period showed that at the present stage, a “regime shift” resulting from the joint effect of climate changes and anthropogenic load took place in the ecosystem of the deep-water part of the Black Sea. Decrease in the oxygen saturation of water throughout the entire thickness of the aerobic zone shows that the process of the Black Sea basin eutrophication constitutes a significant factor affecting oxygen dynamics in the Black Sea waters.

**Keywords:** oxygen regime, oxygen saturation, eutrophication, cold intermediate layer, Black Sea

**Acknowledgements:** The investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0004 “Fundamental studies of oceanological processes which determine the state and evolution of the marine environment influenced by natural and anthropogenic factors, based on observation and modeling methods”, and at the RFBR support within the framework of research project No. 19-35-90062.

**For citation:** Vidnichuk, A.V. and Konovalov, S.K., 2021. Changes in the Oxygen Regime in the Deep Part of the Black Sea in 1980–2019. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 180–190. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-180-190

## Введение

Черное море является водным объектом с ограниченным водообменом с другими морями, в который поступают  $\sim 255 \text{ км}^3/\text{год}$  соленых мраморноморских вод с нижнебосфорским течением [1] и близкий по величине объем пресных речных вод в поверхностный слой ( $\sim 338\text{--}355 \text{ км}^3/\text{год}$ ) [1, 2], а поступление атмосферных осадков уравнивается их испарением. Это обуславливает наличие постоянной устойчивой вертикальной стратификации вод, в результате чего в гидрологической структуре присутствуют такие характерные элементы, как постоянный галоклин и пикноклин. Наличие постоянного пикноклина ограничивает вертикальный обмен между поверхностным и глубинным слоями вод, что является одной из причин возникновения анаэробных условий ниже основного пикноклина на глубинах более 100–200 м. Именно поэтому необходимо изучение динамики распределения кислорода в водах Черного моря, процессов различной природы, которые определяют данную динамику на различных пространственно-временных масштабах.

В 1980-е годы Черное море подвергалось интенсивной антропогенной нагрузке [3–8]. В результате интенсификации хозяйственной деятельности человека в период 1980–1990-х гг. поток биогенных веществ в море увеличился практически вдвое по сравнению с предыдущими десятилетиями. Это привело к эвтрофированию Черноморского бассейна и более интенсивному расходованию кислорода на окисление увеличившегося потока органического вещества. Однако в период с середины 1990-х гг. интенсивность сельскохозяйственной деятельности была снижена, что способствовало переходу экосистемы Черного моря в относительно стабильное состояние в постэвтрофикационный период [8]. При этом было отмечено, что возврата системы к состоянию до начала эвтрофикации не произошло, что оставляет открытым вопрос о механизмах и процессах, определяющих содержание, потоки и динамику кислорода в водах Черного моря.

Изучению вопроса эвтрофикации Черного моря и происходящих изменений гидрохимической структуры в результате усилившегося антропогенного воздействия на экосистему моря посвящено много исследований [3–7], однако рассмотрение постэвтрофикационного периода оканчивается серединой 2000-х гг. Отдельные публикации последних лет [9] указывали лишь на снижение содержания кислорода в результате наблюдаемого потепления.

Целью данной работы является оценка изменений кислородного режима глубоководной части Черного моря под действием климатических и антропогенных факторов за последние 40 лет (1980–2019 гг.).

### **Материалы и методы**

Современные данные о содержании и распределении кислорода в водах Черного моря за период 2015–2019 гг. были получены в экспедициях Морского гидрофизического института (МГИ) РАН в северо-западной, северной и северо-восточной частях Черного моря (рис. 1, *b*). Для более раннего периода 1980–2013 гг. данные были взяты из Банка данных МГИ [10] (рис. 1, *a*).

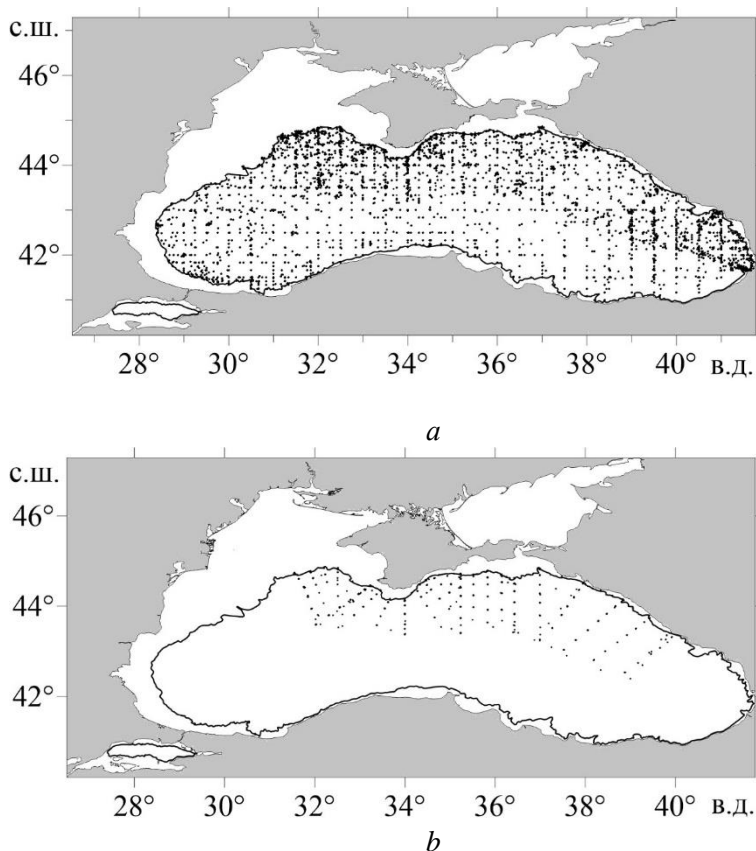
Содержание растворенного кислорода в пробах определяли методом объемного титрования по Винклеру в модификации Карпентера [11].

Для анализа были отобраны данные для глубоководной части Черного моря (с глубинами более 200 м). Пространственное распределение данных за период 1980–2019 гг. показано на рис. 1, количество измерений растворенного кислорода за исследованный период – на рис. 2.

Поскольку распределение гидрохимических параметров в глубоководной части является изопикническим в течение всего года, за исключением особых случаев интенсивной зимней вентиляции пикноклина [12], это дает возможность проводить осреднение гидрохимических данных по всей площади моря и временным интервалам при использовании шкалы условной плотности вместо шкалы глубин.

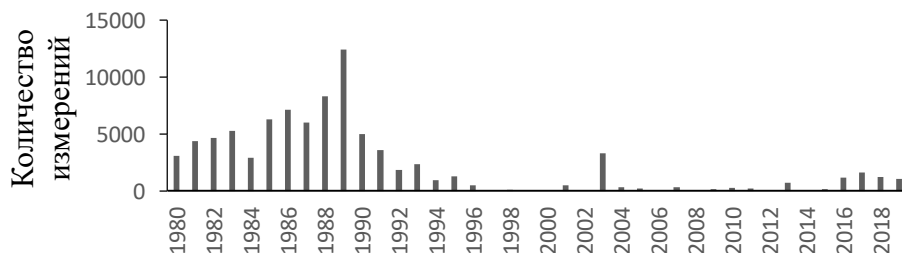
Из данных каждой экспедиции были отбракованы заведомо ложные значения концентрации кислорода, которые характеризовались случайными выбросами значений и не соответствовали аналогичным особенностям в распределении остальных гидрологических и гидрохимических параметров. Далее были рассчитаны средние профили температуры, солености, концентрации кислорода, процента насыщения вод кислородом, концентрации нитратов

в шкале условной плотности. Осреднение проводилось методом обратных расстояний с последующим дополнительным сглаживанием методом низкочастотной фильтрации [13].



**Рис. 1.** Расположение дрейфовых океанографических станций за периоды исследований 1980–2013 гг. (a) и 2015–2019 гг. (b). Линией показана изобата 200 м

**Fig. 1.** Location of drift oceanographic stations for the periods 1980–2013 (a) and 2015–2019 (b). The line shows the 200 m isobath



**Рис. 2.** Количество измерений растворенного кислорода в отдельные годы за период 1980–2019 гг.

**Fig. 2.** Number of the dissolved oxygen measurements in the selected years within the period 1980–2019

## Результаты и обсуждения

Чтобы исключить пространственные различия в вертикальном распределении химических характеристик, связанные с изменением глубины залегания основного пикноклина и холодного промежуточного слоя (ХПС), были проанализированы вертикальные профили кислорода и нитратов относительно условной плотности [14–19].

В исследованиях долговременных изменений уровня эвтрофирования Черного моря [3–8] выделяется три периода состояния черноморской экосистемы: первый – доэвтрофикационный (1960–1970-е гг.); второй – интенсивной эвтрофикации (вторая половина 1980-х – начало 1990-х гг.); третий – постэвтрофикационный (вторая половина 1990-х – первая половина 2000-х гг.). В каждый из этих периодов гидрохимическая структура Черного моря переходила из одного устойчивого состояния, для которого характерны обратимые межгодовые, сезонные и более короткопериодные колебания структуры системы, в другое, которое отличается только характером обратимых колебаний. Это явление получило название «системных сдвигов», т. е. относительно быстрых изменений между контрастными, устойчивыми состояниями экосистемы, вызванными природным воздействием и/или антропогенной активностью [20].

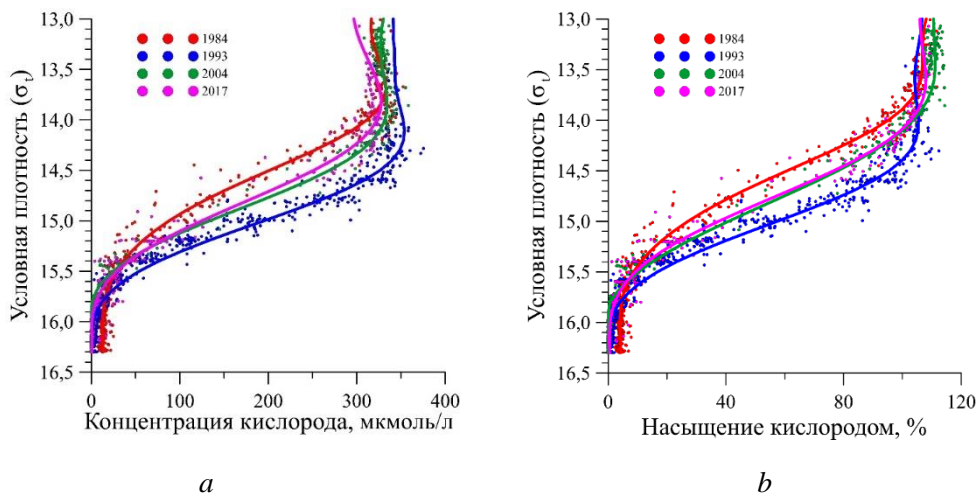
В вертикальном распределении кислорода можно выделить три зоны: верхнюю, хорошо вентилируемую и насыщенную кислородом; зону окликлина, где концентрация кислорода резко снижается с глубиной; и нижнюю, в которой концентрация кислорода уменьшается от ~25 мкмоль/л до его исчезновения (рис. 3, *a*).

Концентрация кислорода в верхнем слое обусловлена газообменом на границе с атмосферой, интенсивностью фотосинтеза и потребления в процессах дыхания и окисления органического вещества, растворимостью кислорода, которая зависит от температуры и солености воды. В слой окликлина кислород поступает в результате физического переноса и расходуется в основном на окисление оседающего взвешенного органического вещества (ВОВ).

На рис. 3 показано вертикальное распределение кислорода и степени насыщения им вод по данным экспедиций, которые проводились в разные периоды состояния экосистемы – эвтрофикационный, постэвтрофикационный и современный. В период активной эвтрофикации концентрация кислорода в слое окликлина, например, на глубине залегания изопикнической поверхности  $\sigma_t = 14,8$  была в 3 раза меньше (рис. 3, *a*, красная линия) по сравнению с началом постэвтрофикационного периода (рис. 3, *a*, синяя линия), что отражает снижение расходования кислорода на окисление ВОВ, поток которого сократился в период постэвтрофикации [6, 8]. Средние профили для 2004 и 2017 гг. (рис. 3, *a*, зеленая и сиреневая линии соответственно) отражают изменение состояния экосистемы. Аналогичная тенденция наблюдается и в распределении степени насыщения вод кислородом (рис. 3, *b*), что может быть вызвано как климатическими изменениями, так и интенсификацией антропогенной активности.

В гидрологической структуре верхнего слоя моря выделяется слой подповерхностного минимума температуры – холодный промежуточный слой, который образуется в результате зимнего конвективного перемешивания в центрах циклонических круговоротов и в шельфовых районах Черного моря [1]. Запас кислорода аэробной зоны обусловлен интенсивностью зимней конвекции

и скоростью его потребления в окислительно-восстановительных биогеохимических и биологических процессах.



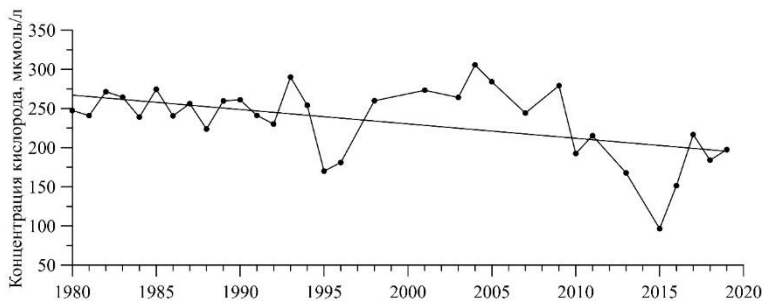
**Р и с. 3.** Вертикальное распределение концентрации кислорода (*a*) и степени насыщения вод кислородом (*b*) в глубоководной части Черного моря (линиями обозначены средние профили для каждой экспедиции)

**F i g. 3.** Vertical distribution of the oxygen concentration (*a*) and the oxygen saturation (*b*) in the deep-water part of the Black Sea (the lines indicate average profiles for each expedition)

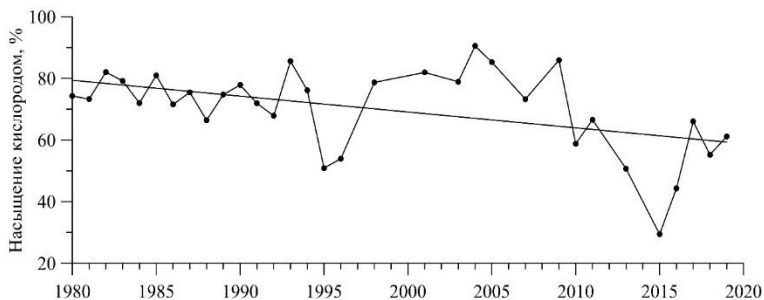
В работе [9] приводится анализ изменчивости содержания кислорода и температуры верхнего слоя вод Черного моря. Главный вывод, к которому приходят авторы работы, следующий: в поверхностном слое вод глубоководной части Черного моря происходят синхронные среднедекадные изменения температуры и концентрации кислорода. Авторами показано, что в период 1970–1994 гг. температура вод поверхностного слоя снизилась на  $1,5^{\circ}\text{C}$ , а содержание кислорода при этом увеличилось более чем на  $25\text{ мкмоль/л}$ . В период 1995–2004 гг. наблюдается обратная тенденция.

Нами были проанализированы многолетние изменения концентрации и степени насыщения вод кислородом на глубине залегания минимального значения температуры, т. е. в ядре ХПС (рис. 4, *a*, *b*). Корреляционный анализ показал достоверную обратную зависимость между значением температуры в ядре ХПС и значением концентрации кислорода в этом слое, коэффициент корреляции Пирсона был равен  $-0,62$ . Выявлено, что в период интенсивной эвтрофикации глубоководной части Черного моря и в постэвтрофикационный период концентрация кислорода была относительно стабильной, в среднем колебалась в пределах  $250 \pm 25\text{ мкмоль/л}$ , а степень насыщения вод кислородом составляла 70–80%. После 2005 г. наблюдается постепенное снижение концентрации кислорода в ядре ХПС, а также степени насыщения до 40–60%. Снижение запаса кислорода в ХПС связано не только с переходом гидрологической структуры в стадию потепления, для которой характерны слабая интенсив-

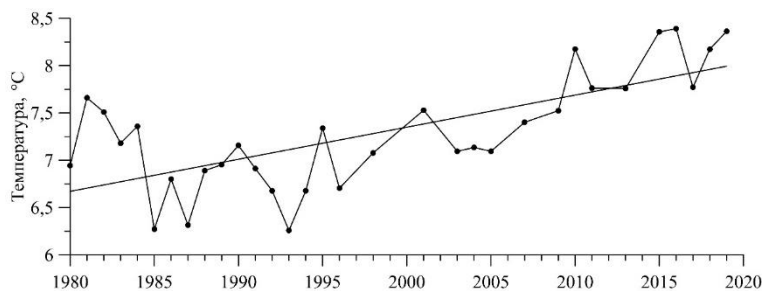
ность обновления вод ХПС (в целом ниже климатической нормы) и увеличение средней температуры в ядре до 8°C (рис. 4, *c*) [21, 22], но и с продолжающимся увеличением потребления кислорода.



*a*



*b*



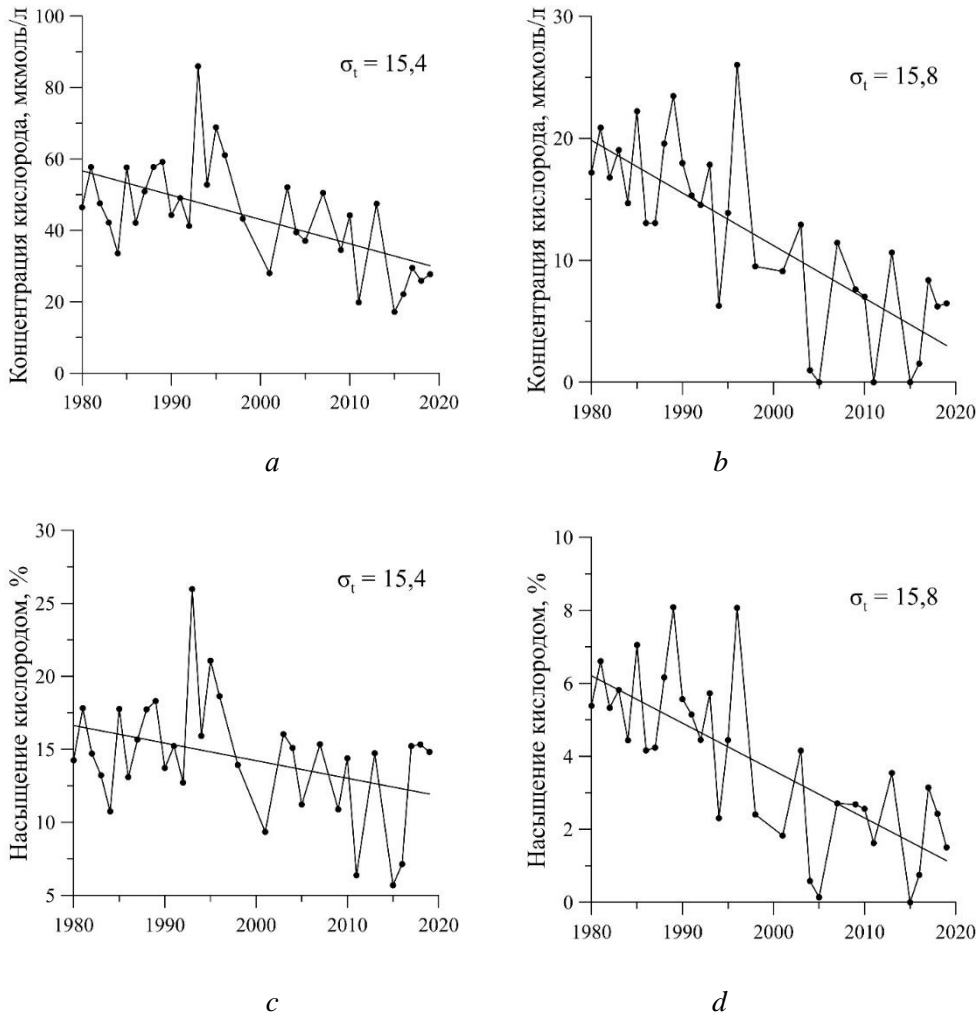
*c*

**Рис. 4.** Многолетние изменения концентрации кислорода (*a*), степени насыщения кислородом (*b*) в слое минимума температуры, а также температуры ядра холодного промежуточного слоя (*c*)  
**Fig. 4.** Multi-year changes in the oxygen concentration (*a*) and the oxygen saturation (*b*) in the layer of minimum temperature, and the temperature of the cold intermediate layer core (*c*)

Поскольку интенсивность обновления вод ХПС на современном этапе была слабой \*, это закономерно привело к снижению концентрации кислорода, сходная тенденция наблюдается и в более глубоких слоях. В слое

\* Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : дис. ... д-ра геогр. наук. Севастополь, 2017. 377 с.

оксиклина ( $\sigma_t = 15,4$ ) (рис. 5, *a, c*) и в области субкислородной зоны ( $\sigma_t = 15,8$ ) (рис. 5, *b, d*) наблюдается как сокращение концентрации кислорода в 2–3 раза по сравнению с эвтрофикационным периодом 1980–1990 гг., так и снижение степени насыщения вод кислородом, что отражает изменение интенсивности потребления кислорода в глубинных слоях.



**Рис. 5.** Многолетние изменения концентрации кислорода (*a, b*) и насыщения вод кислородом (*c, d*) в слое оксиклина (*a, c*) и в субкислородной зоне (*b, d*)

**Fig. 5.** Multi-year changes in the oxygen concentration (*a, b*) and the oxygen saturation (*c, d*) in the oxycline (*a, c*) and in the suboxic zone (*b, d*)

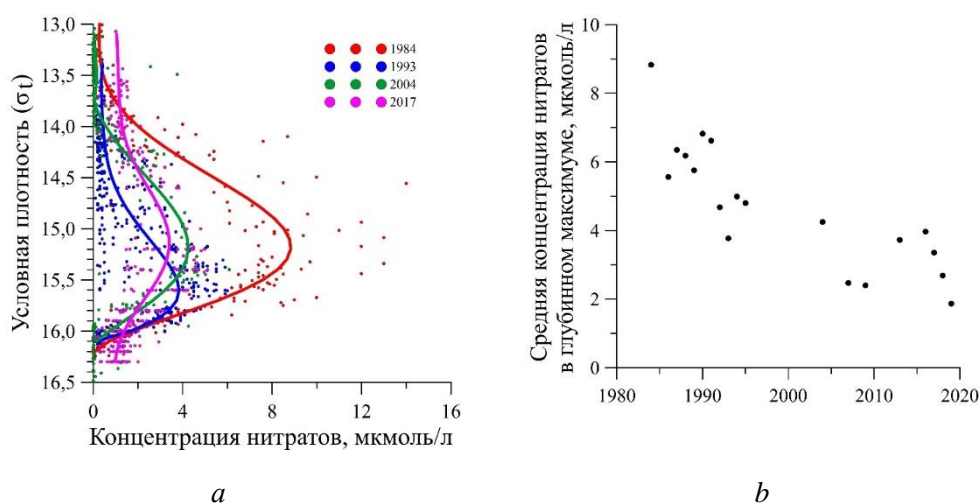
В морских экосистемах лимитирующим фактором скорости фотосинтеза является азот, что определяет уровень первичной и экспортной продукции фитопланктона. От 75 до 95% продуцируемого в эвфотическом слое ВОВ окисляется в аэробной зоне Черного моря [8]. В глубоководной части моря регенерация биогенных веществ в водной толще, а также их поступление из более



глубоких слоев ниже основного пикноклина в процессе вертикального водообмена – основные источники поступления минеральных соединений азота для развития фитопланктона [23].

Нитраты являются конечным продуктом окисления ВОВ, их максимум, как правило, расположен на глубине залегания  $\sigma_t = 15,2–15,6$ .

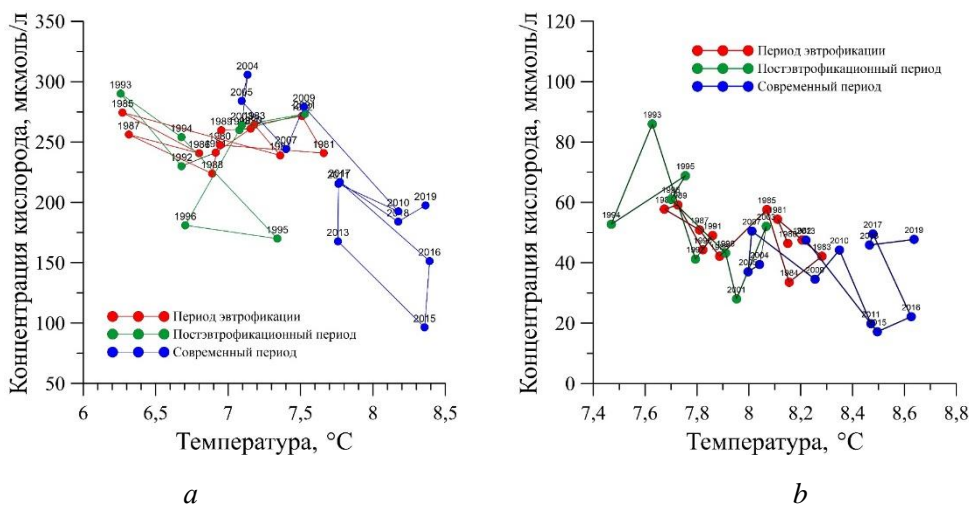
Как показано в работах [3, 4], средняя концентрация нитратов в слое их максимума увеличилась в 2–3 раза с начала 1970-х до конца 1980-х гг., затем значительно снизилась к середине 1990-х гг. По данным, полученным нами для современного периода, средняя концентрация нитратов в слое их максимума продолжает снижаться (рис. 6). Такую динамику концентрации нитратов связывают с увеличением поступления неорганического азота антропогенного происхождения из Дуная начиная с 1970-х гг., которое достигает максимума в середине 1980-х гг., затем снижается к началу 2000-х гг. [24].



**Р и с. 6.** Вертикальное распределение концентрации нитратов (*a*) и средняя концентрация нитратов в их глубинном максимуме по многолетним данным (*b*) (линиями обозначены средние профили для каждой экспедиции)

**F i g. 6.** Vertical distribution of the nitrate concentration (*a*) and the nitrate average concentration in their deep maximum based on the multi-year data (*b*) (the lines indicate average profiles for each expedition)

Кроме того, начиная с середины 1990-х гг. Черное море вступило в фазу потепления, когда средняя зимняя температура поверхности моря увеличилась от 7,5°C в 1990-х гг. до 9°C в 2000-х [22, 24]. В результате интенсивность зимнего конвективного перемешивания и растворимость кислорода в морской воде снизились, водные массы не смогли проникнуть на большие глубины, с чем связано снижение запаса кислорода в ХПС (рис. 4, *a*; 7, *a*). Также замедлился процесс перехода нитратов из слоя основного пикноклина в верхние слои, что значительно ослабило весеннее цветение фитопланктона и обусловило снижение его биомассы и концентрации хлорофилла *a* в постэвтрофикационный период [24].



**Рис. 7.**  $T$ - $O$ -диаграмма вод Черного моря на глубинах залегания ядра ХПС ( $a$ ) и средней части основного пикноклина ( $\sigma_t = 15,4$ ) ( $b$ ) по многолетним данным

**Fig. 7.**  $T$ - $O$ -diagram of the Black Sea waters at the depths of the cold intermediate layer core ( $a$ ) and the middle part of the main pycnocline ( $\sigma_t = 15.4$ ) ( $b$ ) based on the multi-year data

Концентрация кислорода в слое основного пикноклина зависит от соотношения потока кислорода из ХПС и расхода кислорода на окисление оседающего органического вещества. В [25] выделено два различных состояния экосистемы Черного моря – период до интенсивной эвтрофикации (до середины 1970-х гг.) и эвтрофикационный период (середина 1980-х гг. – начало 2000-х гг.). В эти два периода зависимость концентрации кислорода от температуры практически линейна, когда более низким значениям температуры соответствуют более высокие значения концентрации кислорода. Однако при равных температурах в слое ХПС и в слое основного пикноклина концентрация кислорода в период интенсивной эвтрофикации значительно ниже, чем до 1970-х гг. Это может быть связано с увеличением потока оседающего органического вещества в 1980-е гг., что подтверждается увеличением концентрации нитратов в слое их максимума.

На рис. 7 видно, что в современный период, начиная с 2004 г., система перешла в качественно другое состояние. Температура как в слое ХПС (рис. 4,  $c$ ; 7,  $a$ ), так и в слое основного пикноклина (рис. 7,  $b$ ) увеличилась на  $\sim 1^\circ\text{C}$  по сравнению с постэвтрофикационным периодом, а концентрация кислорода снизилась и составляет  $\sim 20$ – $50$  мкмоль/л в слое пикноклина, что несколько ниже, чем в период активной эвтрофикации Черноморского бассейна. При этом, как нами было показано выше (рис. 6), концентрация нитратов в слое их максимума продолжает снижаться.

### Выводы

На фоне тенденции увеличения температуры верхних слоев водной толщи и снижения интенсивности зимнего конвективного перемешивания наблюдается снижение запаса кислорода во всех слоях аэробной зоны Черного моря.

Проведенный анализ данных за период 1980–2019 гг. показал, что на современном этапе в экосистеме глубоководной части Черноморского бассейна произошел «системный» сдвиг, обусловленный совместным действием климатических изменений и антропогенной нагрузки. Изменения климата ведут к уменьшению концентрации кислорода в ядре ХПС, а значит, и к меньшему его потоку в оксиклин, но степень насыщения вод кислородом показывает, что влияние эвтрофирования остается достаточно важным процессом, определяющим динамику кислорода в водах моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2011. 209 с.
2. О переносе стока малых рек вдольбереговым бароклинным морским течением / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 3. С. 440–449.
3. Eutrophication: A Plausible Cause for Changes in Hydrochemical Structure of the Black Sea Anoxic Layer / S. K. Kononov [et al.] // *Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies* / Eds. S. T. Beşiktepe, Ü. Ünlüata, A. S. Bologa. Dordrecht : Springer, 1999. P. 61–74. (NATO Science Series (2. Environmental Security), Vol. 56)). [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4568-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4568-8_5)
4. *Kononov S. K., Murray J. W.* Variations in the chemistry of the Black sea on a time scale of decades (1960–1995) // *Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 217–243. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00054-9)
5. *Yunev O. A., Moncheva S., Carstensen J.* Long-term variability of vertical chlorophyll *a* and nitrate profiles in the open Black Sea: Eutrophication and climate change // *Marine Ecology Progress Series*. 2005. Vol. 294. P. 95–107. doi:10.3354/meps294095
6. *Юнев О. А.* Эвтрофикация и годовая первичная продукция фитопланктона глубоководной части Черного моря // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 4. С. 658–668.
7. *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>
8. *Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. М. : ГЕОС, 2019. 164 с. doi:10.34756/GEOS.2019.16.37827
9. *Полонский А. Б., Котолупова А. А.* Долгопериодная изменчивость растворенного кислорода и температуры верхнего слоя вод Черного моря // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 1. С. 22–32. <https://doi.org/10.31857/S0030-15745922-32>
10. Банк океанографических данных Морского гидрофизического института: информационные ресурсы для поддержки исследований прибрежной зоны Черного моря / А. Х. Халиулин [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря*. 2016. Вып. 1. С. 90–96.
11. *Eremeev V. N., Kononov S. K., Romanov A. S.* The distribution of oxygen and hydrogen sulfide in Black Sea waters during winter-spring period // *Physical Oceanography*. 1998. Vol. 9. P. 259–272. <https://doi.org/10.1007/BF02522712>
12. *Eremeev V. N., Kononov S. K., Romanov A. S.* Investigation of the formation of vertical structure of biogenic elements fields in the Black Sea, using the method of spatial isopycnic analysis // *Physical Oceanography*. 1997. Vol. 8. P. 389–402. <https://doi.org/10.1007/BF02523811>
13. *Демьянов В. В., Савельева Е. А.* Геостатистика: теория и практика / Под ред. Р. В. Арутюняна. М. : Наука, 2010. 327 с.
14. *Безбородов А. А.* Связь границы сероводородной зоны с плотностной структурой вод в Черном море // *Доклады Академии наук Украинской ССР. Серия Б*. 1990. № 12. С. 3–6.

15. *Виноградов М. Е., Налбандов Ю. П.* Влияние изменений плотности воды на распределение физических, химических и биологических характеристик экосистемы пелагиали Черного моря // *Океанология*. 1990. Т. 30, вып. 5. С. 769–777.
16. Chemical variability in the Black Sea: implications of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface / L. A. Codispoti [et al.] // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991. Vol. 38, suppl. 2. P. S691–S710. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80004-4](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80004-4)
17. *Еремеев В. Н., Коновалов С. К., Романов А. С.* Исследование формирования вертикальной структуры полей биогенных элементов в водах Черного моря методом пространственного изопокинического анализа // *Морской гидрофизический журнал*. 1996. № 6. С. 23–38.
18. Современное представление о вертикальной гидрохимической структуре редокс-зоны Черного моря / Е. В. Якушев [и др.] // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря* / Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М. : Наука, 2002. С. 119–133.
19. *Сапожников В. В., Сапожников М. В.* Вертикальное распределение и оценка максимальных концентраций основных биогенных элементов в Черном море // *Океанология*. 2002. Т. 42, № 6. С. 831–837.
20. Regime shifts in marine ecosystems: detection, prediction and management / B. deYoung [et al.] // *Trends in Ecology and Evolution*. 2008. Vol. 23, iss. 7. P. 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.008>
21. *Белокопытов В. Н.* Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 5. С. 33–41.
22. *Kononov S., Belokopytov V., Vidnichuk A.* Oxygen regime shifts in the Black Sea: climate and/or human effects // *Marine Science and Technology for Sustainable Development. The 26th International Conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019)*, July 16–19, 2019, Vladivostok, Russia. Vladivostok : POI FEB RAS, 2019. P. 23.
23. *Кривенко О. В., Пархоменко А. В.* Восходящий и регенерационный потоки неорганических соединений азота и фосфора в глубоководной области Черного моря // *Журнал общей биологии*. 2014. Т. 75, № 5. С. 394–408.
24. *Oguz T., Gilbert D.* Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960–2000: Evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2007. Vol. 54, iss. 2. P. 220–242. doi: 10.1016/j.dsr.2006.09.010
25. *Коновалов С. К., Видничук А. В., Орехова Н. А.* Пространственно-временные характеристики гидрохимической структуры вод глубоководной части Черного моря // *Система Черного моря*. М. : Научный мир, 2018. С. 106–119. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018.106

*Об авторах:*

**Видничук Анна Владимировна**, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-0889-020X**, **ResearcherID: AAO-2592-2020**, [anna\\_vidnichuk@mhi-ras.ru](mailto:anna_vidnichuk@mhi-ras.ru)

**Коновалов Сергей Карпович**, директор ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5200-8448**, **ResearcherID: F-9047-2014**, [sergey\\_kononov@yahoo.com](mailto:sergey_kononov@yahoo.com)