

## Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в глубоководной части Черного моря по экспедиционным данным 2017–2019 годов

С. И. Кондратьев ✉, А. В. Масевич

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ skondratt@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024;  
принята к публикации 18.01.2024.

### Аннотация

**Цель.** Целью данной работы является анализ особенностей вертикального распределения растворенного кислорода и сероводорода в глубоководной части Черного моря в современный период.

**Методы и результаты.** Использованы данные 11 экспедиционных исследований Морского гидрофизического института (МГИ) РАН в Черном море в пределах экономической зоны России в 2017–2019 гг. В этих съемках были выполнены более 200 глубоководных станций, на которых с помощью кассеты из 12 батометров прибора *Sea-Bird 911 plus CTD Seabird-Electronics INC* проводили отбор гидрохимических проб на определенных изопикнических поверхностях. Как правило, это был ряд значений  $\sigma_t$ , равных 16,30; 16,20; 16,10; 16,00; 15,95; 15,90; 15,80; 15,60; 15,40; 15,20; 15,00; 14,60 кг/м<sup>3</sup>. Такая схема позволила определить общее вертикальное распределение кислорода в оксиклине и с точностью до 0,05 кг/м<sup>3</sup> в шкале условной плотности – глубины появления сероводорода.

**Выводы.** Во всех съемках уменьшение содержания кислорода с глубиной (и, соответственно, возникновение оксиклина) начиналось ниже изопикнической поверхности  $\sigma_t = 14,5$  кг/м<sup>3</sup>. Положение верхней границы субкислородной зоны, определяемое по изооксигене 10 мкМ, не было строго изопикнично, а находилось в интервале изопикн  $\sigma_t = 15,7–15,85$  кг/м<sup>3</sup>, при этом связать изменение положения верхней границы с определенным гидрологическим сезоном не удалось. Например, наиболее глубокое залегание верхней границы ниже  $\sigma_t = 15,8$  кг/м<sup>3</sup> наблюдалось как в ноябре и декабре 2017 г., так и в августе 2018 г. Опускание изооксигены 10 мкМ до  $\sigma_t = 15,9$  кг/м<sup>3</sup> в районе керченского шельфа связано, видимо, с существованием более объемного и более холодного промежуточного слоя над шельфом в декабре 2017 г. Положение верхней границы сероводорода, определяемой по изосульфиде 3 мкМ, только в одной из 11 съемок, в апреле 2017 г., было приподнято почти до изопикнической поверхности, равной 16,0 кг/м<sup>3</sup>, а во всех остальных случаях (в том числе и в августе 2017 г., через полгода после поднятия) неизменно находилось в интервале изопикн  $\sigma_t = 16,10–16,15$  кг/м<sup>3</sup>. Концентрация сероводорода на глубинах 1750–2000 м остается в течение последних 25 лет неизменной и находится на уровне  $383 \pm 2$  мкМ.

**Ключевые слова:** Черное море, вертикальное распределение кислорода и сероводорода, субкислородная зона, натурные данные

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания FNNN-2024-0001 «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях».

Для цитирования: Кондратьев С. И., Масевич А. В. Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в глубоководной части Черного моря по экспедиционным данным 2017–2019 годов // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 284–297. EDN PDL SUN.

Original article

## Vertical Distribution of Oxygen and Hydrogen Sulfide in the Deep Part of the Black Sea Based on the 2017–2019 Expedition Data

S. I. Kondratev ✉, A. V. Masevich

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

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the work is to analyze the features of vertical distribution of the dissolved oxygen and hydrogen sulfide in the deep part of the Black Sea in the modern period.

**Methods and Results.** The data obtained in 11 expeditions of Marine Hydrophysical Institute (MHI) RAS in the Black Sea within the economic zone of Russia in 2017–2019 were used. These surveys included more than 200 deep-sea stations at which by means of a cassette of 12 bathometers of the *Sea-Bird 911 plus CTD Seabird-Electronics INC* device the hydrochemical samples were taken at specific isopycnal surfaces; as a rule, it was  $\sigma_t = 16.30; 16.20; 16.10; 16.00; 15.95; 15.90; 15.80; 15.60; 15.40; 15.20; 15.00$  and  $14.60 \text{ kg/m}^3$ . Such a scheme made it possible to determine both the general vertical distribution of oxygen in the oxycline and the depth of hydrogen sulfide occurrence with the accuracy  $0.05 \text{ kg/m}^3$  in the conditional density scale.

**Conclusions.** In all the surveys, a decrease in oxygen content with depth (and occurrence of oxycline, respectively) began below the isopycnal surface  $\sigma_t = 14.5 \text{ kg/m}^3$ . The position of the sub-oxygen zone upper boundary defined by the isooxygen  $10 \mu\text{mol/l}$  was not strictly isopycnal, but fell on the range of isopycns –  $\sigma_t = 15.7 – 15.85 \text{ kg/m}^3$ . However, it was not possible to identify a relation between the change in the position of the upper boundary and a certain hydrological season. For example, the deepest occurrence of the upper boundary below  $\sigma_t = 15.8 \text{ kg/m}^3$  was observed both in November and December 2017, and August 2018. The lowering of isooxygen  $10 \mu\text{mol/l}$  to  $\sigma_t = 15.9 \text{ kg/m}^3$  in the Kerch shelf area is related to a more voluminous and colder intermediate layer over the shelf in December 2017. The position of hydrogen sulfide upper boundary determined by isosulfide  $3 \mu\text{mol/l}$  was found raised almost to  $\sigma_t = 16.0 \text{ kg/m}^3$  in only one of 11 surveys in April 2017. And in all other cases (including the one in August 2017, i. e. six months after it was raised) it was invariably within the range  $\sigma_t = 16.10–16.15 \text{ kg/m}^3$ . Over the past 25 years, the concentration of hydrogen sulfide at the depths 1750–2000 m has remained unchanged at the level  $383 \pm 2 \mu\text{mol/l}$ .

**Keywords:** Black Sea, vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide, sub-oxygen zone, field data

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the theme of state assignment FNNN 0555-2021-0004 "Fundamental research of oceanological processes which determine state and evolution of marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, based on observation and modeling methods".

**For citation:** Kondratev, S.I. and Masevich, A.V., 2024. Vertical Distribution of Oxygen and Hydrogen Sulfide in the Deep Part of the Black Sea Based on the 2017–2019 Expedition Data. *Physical Oceanography*, 31(2), pp. 258-270.

### Введение

Черное море представляет собой самый крупный в мире эксинный водоем, в котором на глубине 90–150 м в зависимости от района появляется сероводород (наибольший контраст по глубинам его появления представляют центры циклонических и антициклонических круговоротов, кромка шельфа

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 2 2024 285

и континентальный склон) [1, 2]. Основной причиной образования сероводорода является ослабленный вертикальный обмен, при котором содержащий кислород поверхностные воды могут проникать вниз только до определенной глубины.

Ослабление вертикального обмена обусловлено постоянной стратификацией Черного моря по солености и плотности, при которой существуют постоянный галоклин между изогалинами 18,5–21,5 [3, 4] и пикноклин между изопикнами 14,5–16,5 кг/м<sup>3</sup>, а также холодный промежуточный слой (ХПС), температура которого < 8°C, а ядро расположено на глубине залегания изопикнической поверхности  $\sigma_t = 14,5$  кг/м<sup>3</sup> [4]. Вследствие такой структуры насыщенные кислородом поверхностные воды в процессе зимнего вентилирования могут опускаться только до определенной глубины. В последние десятилетия прошлого века зимнее вентилирование доходило, как правило, до глубин залегания изопикнической поверхности в интервале 14,2–14,5 кг/м<sup>3</sup> [5, 6], в последние годы в связи с теплыми зимами глубина проникновения постепенно уменьшилась до  $\sigma_t = 14,2$ –14,3 кг/м<sup>3</sup> [7, 8].

В такой ситуации глубже изопикны  $\sigma_t = 14,5$  кг/м<sup>3</sup> источником кислорода, необходимого для окисления взвешенного органического вещества (ВОВ), опускающегося из вышележащих вод, становятся только воды ХПС. Это приводит к тому, что содержание кислорода начинает постепенно уменьшаться с глубиной, возникает оксиклин, который постепенно переходит к так называемой субкислородной зоне. За ее верхнюю границу принимают изооксигену 10 мкМ (или, по данным некоторых исследователей, 20 мкМ) [9], за нижнюю – изопикническую поверхность, на которой кислород исчезает (т. е. его содержание становится менее определяемого минимума в 3 мкМ). Нижняя граница – это, собственно, верхняя граница появления сероводорода, ниже которой окислителем ВОВ вместо растворенного кислорода становятся сульфаты, при восстановлении последних и образуется сероводород.

Одной из важнейших задач экспедиционных исследований Черного моря в современный период является мониторинг положения верхней границы сероводородной зоны, на которой происходит смена окислителя для процесса разложения ВОВ, когда акцептором электронов вместо растворенного кислорода становится сульфат-анион. Присутствие кислорода в поверхностных водах Черного моря обеспечивает обычную трофическую цепь, характерную для любого океана: образующийся при фотосинтезе из неорганических (органические тоже участвуют) форм биогенных элементов фитопланктон служит пищей зоопланктону, а тот, в свою очередь, является кормом для более крупных морских организмов. В отсутствие кислорода в сероводородной зоне могут существовать только отдельные виды бактерий. Сдвиг границы сероводородной зоны, а именно ее подъем к поверхности грозит гибелью обитающих в поверхностных водах организмов.

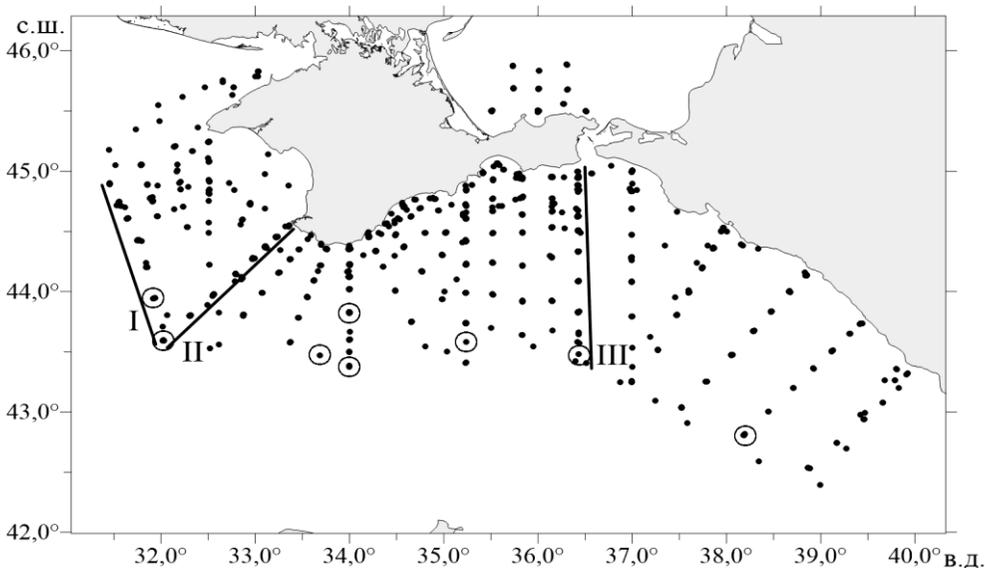
Начиная с ноября 2015 г., МГИ проводил систематические комплексные экспедиционные исследования Черного моря в пределах экономической зоны РФ, в частности мониторинг положения нижней границы субкислородной зоны. Полученные результаты позволили сравнить эти данные с результатами отдельных кратковременных экспедиций МГИ прошлых лет [10] и приступить к подробному анализу состояния этой зоны. Были рассмотрены особен-

ности положения ее верхней и нижней границ в 2015–2016 гг. [11] и причины поднятия сероводородной зоны в отдельных районах северо-западного шельфа (СЗШ) Черного моря [12].

Целью настоящей работы, которая продолжает исследования [10–12], является изучение особенностей вертикального распределения кислорода и сероводорода в толще вод Черного моря по данным 11 экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» в 2017–2019 гг.

### Материалы и методы

Схема расположения всех гидрохимических станций в 11 рейсах 2017–2019 гг., на которых проводился отбор проб на содержание кислорода и сероводорода, показана на рис. 1. Отбор глубоководных гидрохимических проб с помощью кассеты из 12 батометров *STD*-прибора *Sea-Bird 911 plus CTD Seabird-Electronics INC* проводили на определенных изопикнических поверхностях. Как правило, это был ряд изопикн со значениями  $\sigma_t$ , равными 16,30; 16,20; 16,10; 16,00; 15,95; 15,90; 15,80; 15,60; 15,40; 15,20; 15,00; 14,60 кг/м<sup>3</sup>. На 8 станциях отбор проб на сероводород и кислород проводился тремя зондированиями на 37 горизонтах: в двух первых зондированиях пробы отбирались по глубине, от максимального погружения на 2000 м (по техническим причинам зонд глубже не погружали), далее через 50 м до глубины 1800 м и затем через 100 м. В третьем зондировании пробы отбирали по ряду изопикн, приведенному выше, и с поверхности пластиковой банкой.



**Рис. 1.** Схема глубоководных станций, на которых отбирались пробы на кислород и сероводород в 2017–2019 гг. Сплошными линиями обозначены три разреза I – III, которые по возможности выполнялись в каждом рейсе. Кружочками отмечены станции, на которых пробы были отобраны с 37 горизонтов

**Fig. 1.** Map of the deep-sea stations at which the samples for oxygen and hydrogen sulfide were taken in 2017–2019. Solid lines indicate sections I – III which, if possible, were carried out in each cruise. Circles indicate the stations where the samples were taken at 37 horizons

Такая схема отбора проб после построения осредненных вертикальных профилей кислорода, полученных с помощью программ *Surfer* или *Grafer*, позволяла определить положение верхних границ субкислородного слоя и сероводородной зоны, а также толщину располагающейся между ними субкислородной зоны с дискретностью до  $0,05 \text{ кг/м}^3 \sigma_t$ , что соответствует в шкале глубин точности  $\sim 5 \text{ м}$ .

В шести экспедициях (указаны ниже) кроме отбора проб для получения вертикальных профилей кислорода использовался датчик кислорода, показания которого для каждой станции калибровались по трем пробам, отобраным на поверхности, в середине оксиклина ( $\sigma_t = 15,0 \text{ кг/м}^3$ ) и в начале субкислородной зоны ( $\sigma_t = 15,8 \text{ кг/м}^3$ ).

Содержание сероводорода определялось йодометрическим методом согласно методике <sup>1</sup>, йодопотребление на изопикне  $\sigma_t = 15,8 \text{ кг/м}^3$  принималось за нулевое. Погрешность определения сероводорода оценивается в  $\pm 3 \text{ мкмоль/л}$ . Концентрация кислорода определялась методом Винклера, модифицированным в части отбора проб с низким содержанием кислорода в соответствии с методикой [13], которая позволяет получить результаты с точностью до  $\pm 0,01 \text{ мл/л}$  [14]. В обоих случаях за 15 мин до отбора проб мерные 200 мл колбы и кислородные склянки с узким горлом продували аргоном.

Далее для каждой экспедиции были рассчитаны средние вертикальные профили распределения концентрации кислорода и сероводорода относительно шкалы условной плотности с дискретностью  $0,1 \text{ кг/м}^3$  в диапазоне условной плотности  $\sigma_t = 13,0\text{--}17,3 \text{ кг/м}^3$ . Осреднение проводилось методом обратных расстояний с последующим дополнительным сглаживанием методом низкочастотной фильтрации <sup>2</sup>.

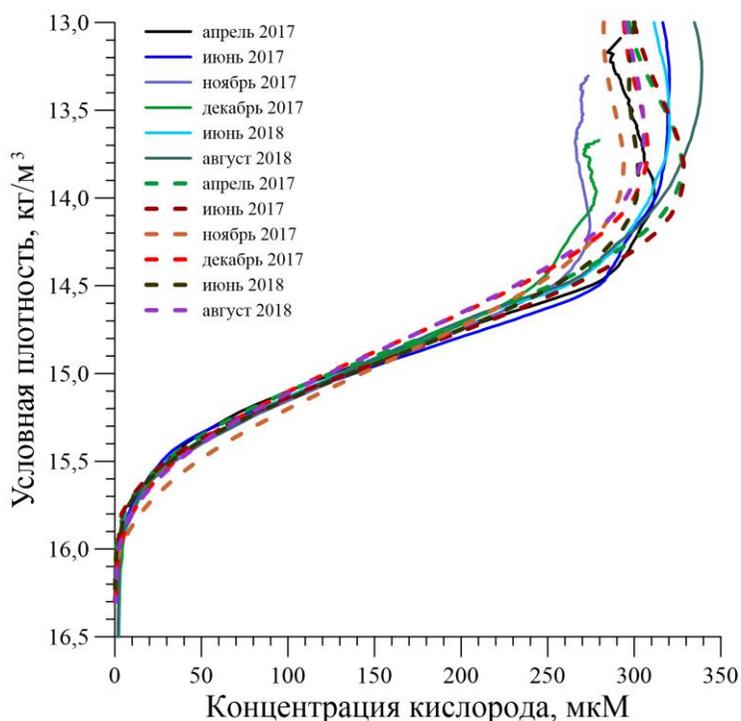
### Обсуждение результатов

*Вертикальные профили кислорода и сероводорода.* По вертикальным профилям кислорода, полученным осреднением натуральных данных шести экспедиций (штриховые линии на рис. 2), может сложиться впечатление, что во всех случаях наблюдался подповерхностный максимум кислорода, а начало оксиклина (т. е. заметное уменьшение концентрации кислорода с глубиной) поднялось до глубины залегания изопикнической поверхности  $\sigma_t = 14,0 \text{ кг/м}^3$ . Однако при анализе данных датчика кислорода (сплошные линии на рис. 2) становится понятно, что подповерхностный максимум кислорода наблюдался только в апреле 2017 г., а начало оксиклина по-прежнему располагалось возле изопикнической поверхности  $\sigma_t = 14,5 \text{ кг/м}^3$  и не было подвержено сезонным изменениям, поскольку во всех четырех съемках 2017 г. (апрель, июнь, ноябрь, декабрь) оно оставалось на одном уровне.

---

<sup>1</sup> Методы гидрохимических исследований океана / Отв. ред. О. К. Бордовский. М. : Наука, 1978. 271 с.

<sup>2</sup> Масевич А. В. Динамика кислорода в основном пикноклине Черного моря : дисс. ... канд. геогр. наук. Севастополь, 2022. 151 с.



**Р и с. 2.** Вертикальные профили кислорода в шкале плотности для шести съемок, полученные осреднением данных по методу Винклера (штриховые линии) и по датчику кислорода (сплошные)  
**Fig. 2.** Vertical distribution of oxygen in the density scale for 6 surveys obtained by the averaged Winkler (dashed lines) and oxygen sensor data (solid lines)

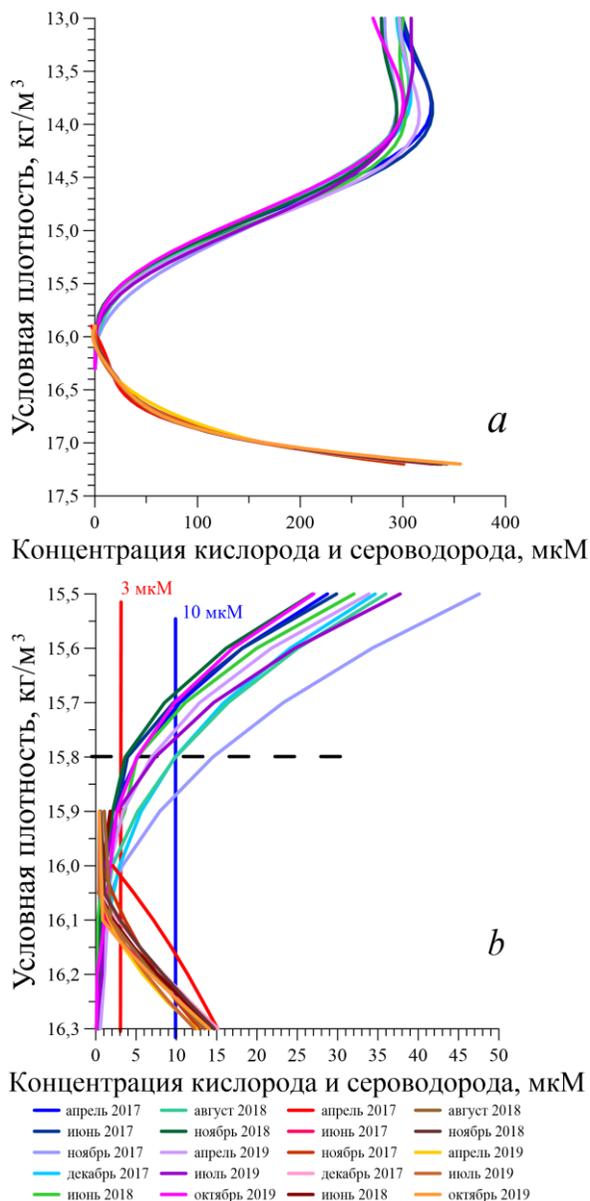
Следует отметить также совпадение всех профилей глубже изопикны  $\sigma_t = 15,0 \text{ кг/м}^3$ , когда содержание кислорода становится  $< 150 \text{ мкМ}$ . Только в ноябре 2017 г. его концентрация глубже указанной изопикны была выше, чем в остальных съемках, причем на значение, превышающее погрешность определения, которая в интервале 30–150 мкМ оценивается примерно в 1% [13].

Здесь следует принять во внимание, что в 2017 г. наблюдались условия максимального формирования ХПС для периода 2009–2019 гг. [15], в связи с чем 2017 г. выделяется относительным снижением температуры и увеличением концентрации кислорода в ХПС по сравнению с предыдущими и последующими годами [16]. Возможно, это увеличение и вызвало в ноябре 2017 г. кратковременное (в декабре оно исчезло) возрастание концентрации кислорода глубже изопикны  $\sigma_t = 15,0 \text{ кг/м}^3$ .

На рис. 3 в шкалах плотности показаны осредненные по натурным данным вертикальные профили кислорода и сероводорода, зафиксированные в 11 экспедициях МГИ.

Практическое слияние вертикальных профилей кислорода (рис. 3, *a*) при более подробном анализе (рис. 3, *b*) показывает, что расположение верхней границы субкислородной зоны, определяемой по концентрации кислорода 10 мкМ, меняется во времени, от 15,7 кг/м<sup>3</sup> до 15,9 кг/м<sup>3</sup> (что в шкале глубин соответствует интервалу 40 м), причем выявить какую-то зависимость поло-

жения верхней границы от сезона не удалось, что неудивительно, поскольку время обновления характеристик в этом слое вод существенно превышает сезон [17, 18]. Последнее косвенно подтверждается тем, что из трех случаев, когда верхняя граница субкислородной зоны располагалась ниже  $\sigma_t = 15,8 \text{ кг/м}^3$ , два случая пришлось на зимние месяцы (ноябрь и декабрь 2017 г.), но подобное заглубление наблюдалось и в августе 2018 г.



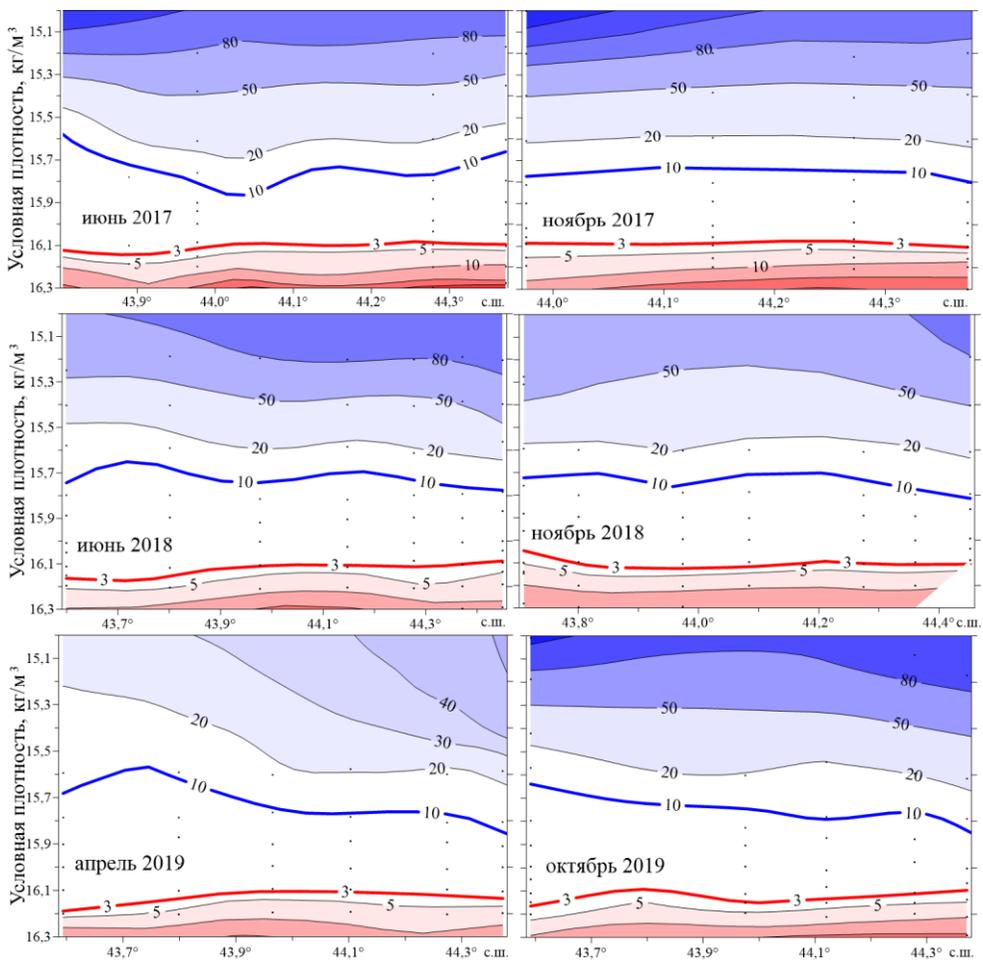
**Р и с. 3.** Вертикальные профили кислорода и сероводорода в Черном море в 2017–2019 гг. в шкале плотности во всей толще (а) и более подробно – в интервале  $\sigma_t = 15,5\text{--}16,3 \text{ кг/м}^3$  (б)

**F i g. 3.** Vertical profiles of oxygen and hydrogen sulfide in the density scale over the entire thickness (а) and in the interval  $\sigma_t = 15.5\text{--}16.3 \text{ kg/m}^3$  (b) in the Black Sea in 2017–2019

Самое низкое положение верхней границы субкислородной зоны на  $\sigma_t = 15,87 \text{ кг/м}^3$  (рис 3, *b*) наблюдалось в ноябре 2017 г., года максимального формирования ХПС за последние 10 лет [13].

Вертикальное распределение сероводорода оказалось более изопикничным, в 10 экспедициях изосульфида 3 мкМ располагалась в диапазоне изопикн 16,10–16,15  $\text{кг/м}^3$ , и только в апрельской съемке 2017 г. она заметно поднялась почти до  $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$ .

*Положение субкислородной зоны на разрезах.* Во всех проведенных съемках 2017–2019 гг. (кроме августа 2018 г.), как правило, выполнялся «вековой» разрез II (рис. 1) по линии м. Херсонес – пролив Босфор, поскольку он исторически регулярно исследовался, даже в период 1995–2015 гг., когда экспедиционные исследования глубоководной части Черного моря проводились крайне редко [10].

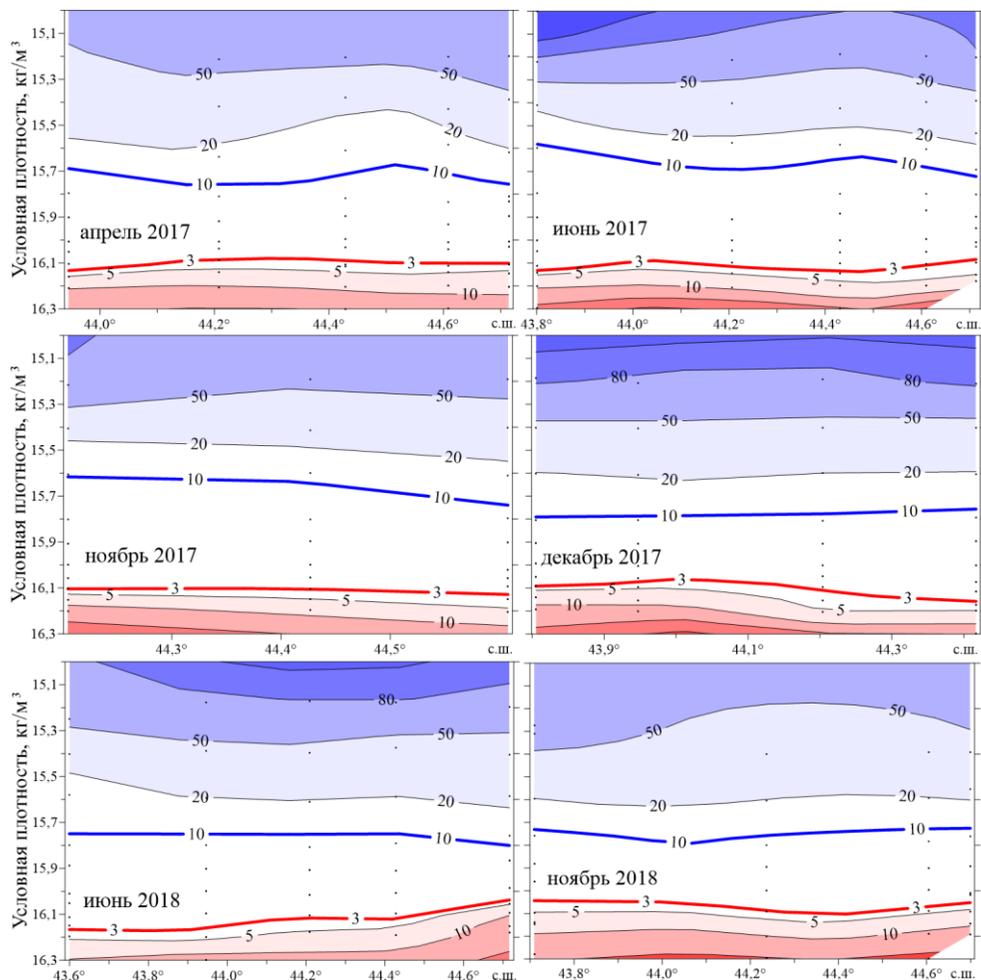


**Р и с. 4.** Положение субкислородной зоны на «вековом» разрезе II м. Херсонес – пролив Босфор в 2017–2019 гг.

**F i g. 4.** Position of suboxic zone at the "century" section II Cape Chersonesos – the Bosphorus Strait in 2017–2019

Как следует из рис. 4, изосульфида 3 мкМ постоянно располагалась в интервале изопикн 16,10–16,15 кг/м<sup>3</sup>. На фоне этой однородности изооксигена 10 мкМ изменяла свое положение в большем интервале шкалы условной плотности (15,6–15,85 кг/м<sup>3</sup>), при этом для отдельной съемки верхняя граница субкислородной зоны могла как располагаться изопикнически (апрель, ноябрь 2017 г.), так и заметно перемещаться в шкале плотности (июнь 2017 г., апрель 2019 г.).

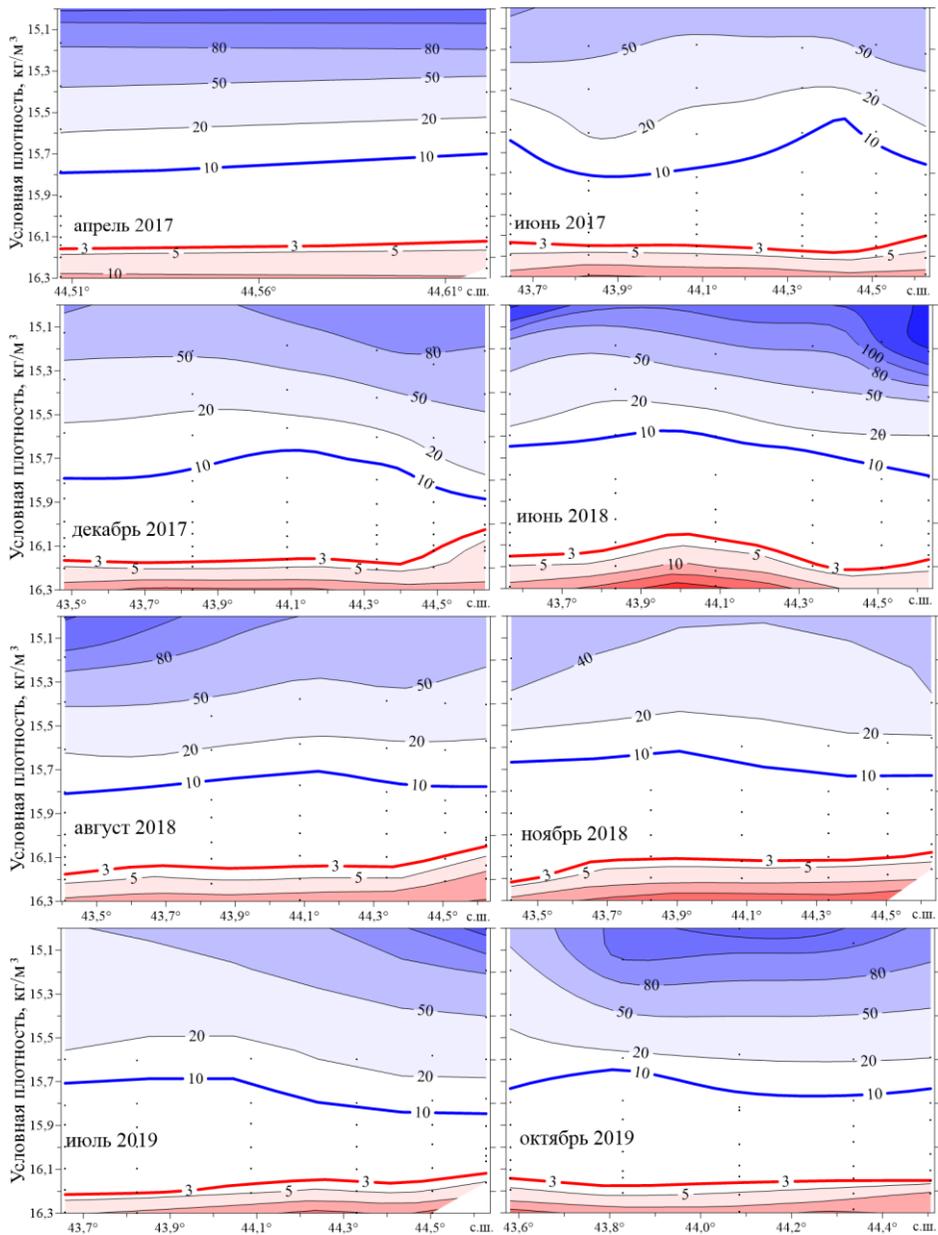
Кроме «векового» разреза в съемках 2017–2019 гг. периодически выполнялся «диагональный» разрез I (рис. 1) перпендикулярно кромке СЗШ, поскольку ранее возле нее регулярно обнаруживалось поднятие сероводородной зоны, в отдельных случаях до глубин 85–90 м [12]. Как следует из рис. 5, изооксигена 10 мкМ во всех съемках располагалась практически изопикнично, однако изменяла свое положение в интервале  $\sigma_t = 15,6–15,8$  кг/м<sup>3</sup>, а изосульфида 3 мкМ неизменно располагалась около изопикнической поверхности  $\sigma_t = 16,1$  кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 5.** Положение субкислородной зоны на разрезе I в 2017–2019 гг.

**Fig. 5.** Position of suboxic zone at section I in 2017–2019

При оценке возможного поднятия сероводородной зоны возле кромки шельфа [12] определен интерес представляет меридиональный разрез III (рис. 1) южнее Керченского пролива, положение субкислородной зоны на котором в 2017–2019 гг. показано на рис. 6. На этом разрезе практически во всех съемках наблюдалось относительно стабильное положение верхней границы субкислородной зоны в пределах 15,65–15,8 кг/м<sup>3</sup>, а верхней границы сероводорода – в пределах 16,15–16,20 кг/м<sup>3</sup>.

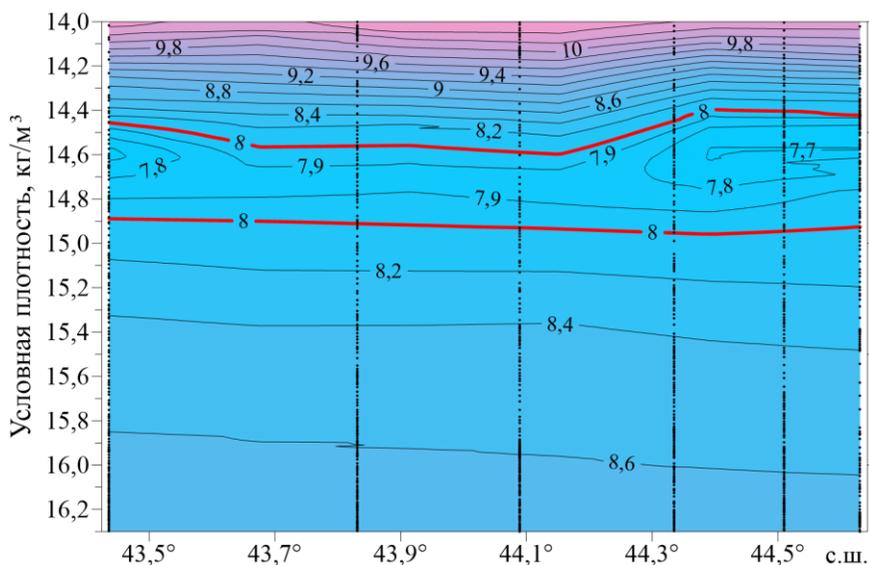


Р и с. 6. Положение субкислородной зоны на разрезе III в 2017–2019 гг.

Fig. 6. Position of suboxic zone at section III in 2017–2019

На этом фоне относительной стабильности, когда верхняя граница указанной зоны не опускалась глубже  $\sigma_t = 15,8 \text{ кг/м}^3$ , а нижняя располагалась в небольшом интервале возле изопикны  $\sigma_t = 16,1 \text{ кг/м}^3$ , выделяется съемка в декабре 2017 г. В данном случае на двух ближайших к шельфу станциях наблюдалось явное сужение субкислородной зоны как за счет опускания изооксигены 10 мкМ с  $\sigma_t = 15,7\text{--}15,8 \text{ кг/м}^3$  до  $\sigma_t = 15,9 \text{ кг/м}^3$ , так и за счет поднятия изосульфиды 3 мкМ с  $\sigma_t = 16,15 \text{ кг/м}^3$  до  $\sigma_t = 16,05 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, в шкале плотности толщина субкислородной зоны составила  $\sim 0,15 \text{ ед. } \sigma_t$ .

Опускание изооксигены 10 мкМ можно объяснить тем, что источником кислорода для субкислородной зоны может быть только ХПС, а при рассмотрении вертикального распределения температуры на керченском разрезе в декабре 2017 г. (рис. 7) становится ясно, что в районе  $44,4^\circ\text{--}44,6^\circ \text{ с. ш.}$  ХПС, определяемый по температуре  $8^\circ\text{C}$ , был как толще, так и холоднее, чем окружающие воды. Отсюда и поступило дополнительное количество кислорода, которого хватило не только для окисления ВОВ, но и для опускания изооксигены 10 мкМ до  $\sigma_t = 15,9 \text{ кг/м}^3$ .



**Р и с. 7.** Температура на разрезе III в декабре 2017 г. по датчику температуры

**Fig. 7.** Temperature at section III by a STD sensor in December 2017

Аналогичное поднятие верхней границы сероводорода на СЗШ мы объяснили особенностями рельефа дна [12], что, возможно, имеет место и в данном случае.

*Максимальные концентрации сероводорода в Черном море.* На 8 станциях, отмеченных на рис. 1, с дискретностью 50 м было определено содержание сероводорода в интервале глубин 1750–2000 м. Как известно, в придонных водах глубоководной части Черного моря глубже 1750 м благодаря конвективному перемешиванию за счет тепла, поступающего с донной поверхности, наблюдается однородное распределение гидрологических и гидрохимических

характеристик [19]. Среди них большой интерес представляет максимальное содержание сероводорода, а также тенденции его изменения. В частности, в прошлом веке наблюдалось значительное увеличение придонных концентраций сероводорода, после чего его содержание стабилизировалось на уровне 378–387 мкМ [11]. Как видно из таблицы, в которой представлены концентрации сероводорода на 8 глубоководных станциях глубже 1750 м, практически все эти значения попадают в представленный выше интервал. Объединив после статистической проверки <sup>3</sup> значения для всех станций в один массив, получим, что содержание сероводорода на глубинах > 1750 м в Черном море составляет  $383 \pm 2$  мкМ.

**Содержание сероводорода (мкМ) в Черном море на глубинах 1750–2000 м в 2017–2019 гг.**  
**Hydrogen sulfide content (μM) in the Black Sea at the 1750–2000 m depths in 2017–2019**

Период / Period	Количество измерений / Quantity of measurements	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Среднее / Average	$\sigma$
Апрель 2017 / April 2017	9	378,5	383,4	381,3	1,66
Июнь 2017 / June 2017	14	379,1	388,3	383,6	2,80
Ноябрь 2017 / November 2017	3	381,7	386,1	383,5	2,27
Декабрь 2017 / December 2017	8	381,1	387,9	384,7	2,39
Июнь 2018 / June 2018	7	379,0	386,0	382,2	2,42
Август 2018 / August 2018	4	382,4	384,8	383,8	1,03
Ноябрь 2018 / November 2018	4	377,8	385,6	380,5	3,48
Октябрь 2019 / October 2019	6	379,8	382,7	381,3	1,31

**Выводы**

По результатам 11 экспедиций Морского гидрофизического института РАН в Черное море в 2017–2019 гг. было установлено:

1. Во всех съемках уменьшение содержания кислорода с глубиной (и, соответственно, возникновение оксиклина) начиналось ниже изопикнической поверхности  $\sigma_t = 14,5$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Положение верхней границы субкислородной зоны, определяемое по изооксигене 10 мкМ, не было строго изопикнично, а находилось в интервале изопикн  $\sigma_t = 15,7$ – $15,85$  кг/м<sup>3</sup>. Наиболее глубокое залегание верхней границы ниже  $\sigma_t = 15,8$  кг/м<sup>3</sup> наблюдалось в ноябре и декабре 2017 г., а также в августе 2018 г.

<sup>3</sup> Севастьянов Б. А. Курс теории вероятностей и математической статистики. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1982. 256 с.  
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 2 2024

3. Предполагаем, что опускание изооксигены 10 мкМ до  $\sigma_t = 15,9$  кг/м<sup>3</sup> в районе керченского шельфа связано с наличием более объемного и более холодного промежуточного слоя над шельфом в декабре 2017 г.

4. Верхняя граница сероводорода, определяемая по изосульфиде 3 мкМ, только в одной из 11 съежек (апрель 2017 г.) была приподнята почти до  $\sigma_t = 16,0$  кг/м<sup>3</sup>, а во всех остальных случаях (в том числе и в августе 2017 г., через полгода после поднятия) неизменно находилась в интервале изопикн 16,10–16,15 кг/м<sup>3</sup>.

5. Концентрация сероводорода на глубинах 1750–2000 м в течение последних 25 лет остается неизменной и находится на уровне  $383 \pm 2$  мкМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Murray J. W., Izdar E.* The 1988 Black Sea Oceanographic Expedition: Overview and New Discoveries // *Oceanography*. 1989. Vol. 2, iss. 1. P. 15–21. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1989.25>
2. *Murray J. W.* The 1988 Black Sea Oceanographic Expedition: introduction and summary // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991. Vol. 38, Suppl. 2. P. S655–S661. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80002-0](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80002-0)
3. *Konovalov 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)
4. *Коновалов С. К., Еремеев В. Н.* Региональные особенности, устойчивость и эволюция биогеохимической структуры вод Черного моря // *Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / Под ред. В. Н. Еремеева, С. К. Коновалова*. Севастополь, 2012. С. 273–299. EDN ISCAYS.
5. *Akpınar A., Fach B. A., Oguz T.* Observing the subsurface thermal signature of the Black Sea cold intermediate layer with Argo profiling floats // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2017. Vol. 124. P. 140–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.002>
6. *Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations / S. Miladinova [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 7. P. 5624–5644. <https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
7. *Formation and changes of the Black Sea cold intermediate layer / S. Miladinova [et al.] // Progress in Oceanography*. 2018. Vol. 167. P. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.07.002>
8. *Титов В. Б.* Межгодовое обновление холодного промежуточного слоя в Черном море за последние 130 лет // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 10. С. 68–75. EDN PVMAJH.
9. *Spatial and temporal variability in the chemical properties of the oxic and suboxic layers of the Black Sea / S. Tuğrul [et al.] // Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 135. P. 29–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.09.008>
10. *Кондратьев С. И., Видничук А. В.* Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 422–433. EDN VLBKME. <http://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-422-433>
11. *Кондратьев С. И., Видничук А. В.* Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в Черном море в 2016 г. // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2020. № 3. С. 91–99. EDN HACWMH.
12. *Кондратьев С. И., Масевич А. В., Белокопытов В. Н.* Положение верхней границы сероводородной зоны над бровкой шельфа Крыма // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022. № 3. С. 97–107. EDN MKWBYC.

13. *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>
14. *Carpenter J. H.* The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method // *Limnology and Oceanography*. 1965. Vol. 10, iss. 1. P. 141–143. <https://doi.org/10.4319/lo.1965.10.1.0141>
15. *Capet A., Vandenbulcke L., Grégoire M.* A new intermittent regime of convective ventilation threatens the Black Sea oxygenation status // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, iss. 24. P. 6507–6525. <https://doi.org/10.5194/bg-17-6507-2020>
16. *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 UVMVMX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-195-206>
17. *Кривошея В. Г., Овчинников И. М., Скурта А. Ю.* Межгодовая изменчивость обновления холодного промежуточного слоя Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М. : Наука, 2002. С. 27–39.*
18. *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.
19. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* *Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.*

*Об авторах:*

**Кондратьев Сергей Иванович**, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2049-7750**, **ResearcherID: F-8972-2019**, **Scopus Author ID: 35784380700**, **SPIN-код: 3027-2008**, [skondratt@mail.ru](mailto:skondratt@mail.ru)

**Масевич Анна Владимировна**, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0889-020X**, **ResearcherID: AAO-2592-2020**, **Scopus Author ID: 58544083700**, **SPIN-код: 3687-0399**, [anna\\_vidnichuk@mhi-ras.ru](mailto:anna_vidnichuk@mhi-ras.ru)