

Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах

С. И. Кондратьев*, А. В. Видничук

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: skondratt@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.02.18 г., после доработки 24.05.2018 г.

Обсуждаются особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода, выявленные по результатам экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в северной части Черного моря (в пределах экономической зоны России) в 1995–2015 гг. Верхняя граница сероводородной зоны, определяемая по изосульфиде 3 мкМ, в северной части Черного моря за последние 20 лет не изменила своего положения в шкале относительной плотности и располагается на изопикне $\sigma_t = 16,10\text{--}16,15$ кг/м³. Ближе к северо-западному шельфу в районе Севастопольского антициклона изосульфида 3 мкМ приподнимается до изопикны $\sigma_t = 15,9\text{--}16,0$ кг/м³, в одном случае зафиксировано ее положение на $\sigma_t = 15,85$ кг/м³. Для положения верхней границы субкислородной зоны (изооксигена 10 мкМ) характерна пространственная и временная изменчивость. В районе северо-западного шельфа в четырех экспедициях 2009–2013 гг. изооксигена 10 мкМ независимо от сезона располагалась в пределах изопикн $\sigma_t = 15,6\text{--}15,7$ кг/м³. В глубоководной части моря в ноябре 2013 г. изооксигена 10 мкМ располагалась на изопикне $\sigma_t = 15,7$ кг/м³, тогда как в ноябре 2015 г. – значительно выше, на $\sigma_t = 15,35$ кг/м³. Наблюдаемое изменение положения изооксигены 10 мкМ за период с 1995 по 2015 гг. не дает возможности однозначно оценить изменение толщины субкислородной зоны в центральной части моря. Значительное увеличение содержания сероводорода в водах Черного моря в интервале глубин 1750–2000 м за последние 20 лет не зафиксировано.

Ключевые слова: кислород, сероводород, субокси-зона, сероводородная зона, Черное море.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдений и моделирования» (шифр «Океанологические процессы») и № 0828-2018-0009 «Физические механизмы формирования пространственно-временных структурных особенностей гидрохимических характеристик в различных районах деятельного слоя Черного моря» (в объединенном проекте «Взаимодействие физических, химических и биологических процессов в Мировом океане»), № гос. регистрации АААА-А18-118013190197-7, в соответствии с государственным заданием № 007-00080-18-00 на 2018 год и на плановый период 2019 и 2020 гг. согласно плану научно-исследовательской работы ФГБУН «Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН» на 2018–2020 гг.

Для цитирования: 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. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-422-433

Features of the Oxygen and Hydrogen Sulfide Vertical Distribution in the Black Sea Based on the Expedition Data Obtained by the Marine Hydrophysical Institute in 1995–2015

S. I. Kondratyev*, A. V. Vidnichuk

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

**e-mail: skondratt@mail.ru*

Discussed are the features of the oxygen and hydrogen sulfide vertical distribution resulted from the expedition data obtained by the Marine Hydrophysical Institute in the northern part of the Black Sea (within the economic zone of Russia) in 1995–2015. In course of the last 20 years, the upper boundary of the sulfide zone in this area defined by the hydrogen sulfide isoline 3 μM did not change its position in the scale of relative density and is located on the isopycnic surface $\sigma_t = 16.10\text{--}16.15 \text{ kg/m}^3$. Closer to the northwest shelf (in the area of the Sevastopol anticyclone), the hydrogen sulfide isoline 3 μM is slightly lifted to $\sigma_t = 15.9\text{--}16.0 \text{ kg/m}^3$; there is a single case when its position was recorded at $\sigma_t = 15.85 \text{ kg/m}^3$. Position of the sub-oxic zone upper boundary (the threshold oxygen isoline 10 μM) is characterized by spatial and temporal variability. During four expeditions in 2009–2013, in the region of the northwestern shelf the sub-oxic zone upper boundary (the oxygen isoline 10 μM) was located, regardless of the season, within the isopycnic surfaces $\sigma_t = 15.6\text{--}15.7 \text{ kg/m}^3$. In November, 2013 in the deep sea part, the threshold oxygen isoline 10 μM was located on the isopycnic surface $\sigma_t = 15.7 \text{ kg/m}^3$, whereas in November, 2015 it was considerably higher: on $\sigma_t = 15.35 \text{ kg/m}^3$. The change of location of the threshold oxygen isoline 10 μM observed in 1995–2015 provides no possibility to assess unambiguously alteration of the sub-oxic zone thickness in the central part of the sea. Thus within the depths 1750–2000 m in the Black Sea, no significant increase of the hydrogen sulfide content in 1995–2015 has been recorded.

Keywords: oxygen, hydrogen sulfide, sub-oxic zone, hydrogen sulfide zone, Black Sea.

Acknowledgments: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0003 “Fundamental studies of the oceanologic processes conditioning the marine environment state and evolution under the impact of natural and anthropogenic factors based on the methods of observations and modeling (code “Oceanological processes”) and the theme № 0828-2018-0009 “Physical mechanisms of formation of spatial-temporal structural features of hydrochemical characteristics in different areas of the Black Sea active layer” (in the joint project “Interaction of physical, chemical and biological processes in the World ocean”) state registration № AAAA-A18-118013190197-7 according to the state task № 007-00080-18-00 on 2018 and on the planning period on 2019 and 2020 according to the research plan of FSBSI “A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Researches, RAS” on 2018 – 2020.

For citation: Kondratyev, S.I. and Vidnichuk, A.V., 2018. Features of the Oxygen and Hydrogen Sulfide Vertical Distribution in the Black Sea Based on the Expedition Data Obtained by the Marine Hydrophysical Institute in 1995–2015. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(5), pp. 422–433. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-422-433 (in Russian).

Введение

Систематические исследования расположения сероводородной зоны в Черном море активно проводились отечественными океанологами в 70–90-х гг. прошлого века. Всесторонний анализ полученных результатов постепенно привел в 1990-х гг. к использованию шкалы относительных плотностей для более логичной и простой интерпретации данных [1–12].

С начала 1990-х гг. широкомасштабные экспедиции по Черному морю от устья Дуная до побережья Кавказа постепенно разделились на исследования отдельных стран в пределах их экономических зон. Для Морского гидрофизического института (МГИ) завершающей обширной экспедицией по Черному морю был 33-й рейс НИС «Профессор Колесников» весной 1995 г., по результатам которого был опубликован препринт [13]. Следующей наиболее крупной целенаправленной комплексной экспедицией в Черном море с участием большой группы сотрудников МГИ был рейс болгарского НИС «Академик» в мае 2004 г. в районе Севастопольского антициклона. По данным этого рейса

были проанализированы результаты исследований о расположении верхней и нижней границ субкислородной зоны (нижняя граница этой зоны является верхней границей сероводорода) над континентальным склоном [14].

Далее МГИ проводились лишь кратковременные эпизодические экспедиционные исследования. Основной район работ переместился на северо-западный шельф (СЗШ) Черного моря [15–17]. В глубоководной части моря относительно постоянно исследовался континентальный склон в районе Севастопольского антициклона.

Новый этап экспедиционных исследований МГИ наступил после воссоединения Крыма с Россией и перехода института в состав РАН. Осенью 2015 г. была проведена совместная экспедиция с Институтом океанологии (Москва) в районе «векового» разреза м. Херсонес – пролив Босфор. На 2016–2017 гг. были запланированы экспедиционные исследования в глубоководной части моря вдоль побережья Крыма в пределах экономической зоны России. Для выбора стратегии дальнейших гидрохимических работ, намечаемых МГИ в Черном море, требуется систематизация отдельных разрозненных результатов, полученных институтом после 2004 г., для последующего сравнения их с данными предстоящих исследований субкислородной и сероводородной зон. Данному вопросу и посвящена представленная работа.

Материалы и методы

Схема расположения гидрохимических станций, выполненных МГИ в рейсах 2009–2015 гг., представлена на рис. 1. Отбор проб для химического анализа производили с помощью кассеты из 12 батометров зондирующего комплекса (производства *Sea-Bird Electronics, Inc.*) на глубине определенных изопикнических поверхностей. Как правило, пробу на сероводород отбирали на максимальной глубине и далее по глубине залегания изопикн: $\sigma_t = 16,30$; 16,20; 16,15; 16,10; 16,05; 16,00; 15,90; 15,80; 15,60; 15,40 и 15,20 кг/м³, – которые полностью охватывали субкислородную зону. На крайней юго-западной станции на разрезе м. Херсонес – пролив Босфор отбор проб на сероводород произвели на 28 горизонтах: на максимальной глубине погружения зонда (чуть менее 2000 м), затем через каждые 100 м и в завершение по ряду изопикн, приведенному выше.

Такая схема отбора проб позволяла определить положение верхних границ промежуточного субкислородного слоя и сероводородной зоны, а также толщину субкислородного слоя с дискретностью до 0,05 ед. σ_t , что соответствует точности примерно 5 м в шкале глубин.

Содержание сероводорода определяли йодометрическим методом, принимая йодопотребление на изопикне $\sigma_t = 15,8$ кг/м³ за нулевое, концентрацию кислорода – методом Винклера, модифицированным в части отбора проб с низким содержанием кислорода в соответствии с методикой [18]. В обоих случаях за 15 мин до отбора проб мерные колбы емкостью 200 мл для фиксации сероводорода и кислородные склянки с узким горлом продували аргоном.

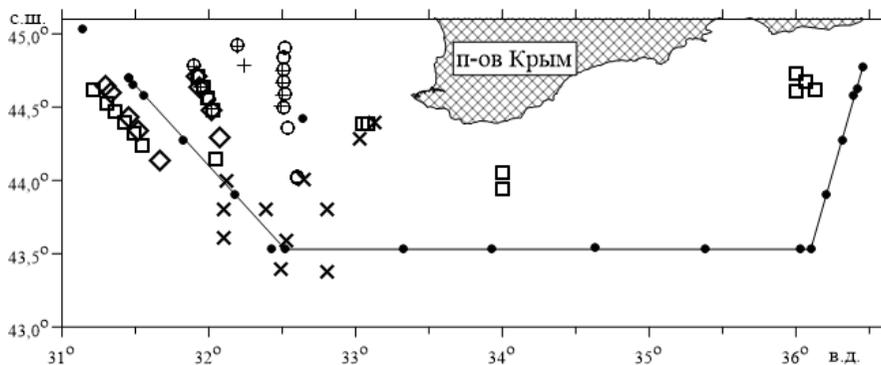


Рис. 1. Схема станций, где были выполнены вертикальные профили H_2S и O_2 : + – НИС «Сапфир», май 2009 г.; \diamond – НИС «Профессор Водяницкий», октябрь 2010 г.; \square – НИС «Профессор Водяницкий», август 2011 г.; o – НИС «Профессор Водяницкий», сентябрь 2013 г.; \bullet – НИС «Maria S. Merian», ноябрь 2013 г.; \times – НИС «Профессор Водяницкий», ноябрь 2015 г. Сплошной линией выделен разрез, выполненный в ноябре 2013 г.

Fig. 1. Scheme of the stations where the H_2S and O_2 vertical profiles were done: + is R/V “Sapfir”, May, 2009; \diamond is R/V “Professor Vodyanitsky”, October, 2010; \square is R/V “Professor Vodyanitsky”, August, 2011; o is R/V “Professor Vodyanitsky”, September, 2013; \bullet is R/V “Maria S. Merian”, November, 2013; \times is R/V “Professor Vodyanitsky”, November, 2015. Solid line marks the section carried out in November, 2013

Обсуждение результатов

Относительно подробные исследования 2004 г. на НИС «Академик» в районе квазистационарного Севастопольского антициклона показали, что в местах, где шельф переходил в континентальный склон, изосульфида 3 мкМ располагалась на изопикне $\sigma_t = 15,88 \text{ кг/м}^3$, тогда как в районе открытого моря те же концентрации сероводорода наблюдались на изопикне $\sigma_t = 16,05 \text{ кг/м}^3$ [14]. Таким образом, представляется вполне логичным отдельно рассмотреть вертикальные профили кислорода и сероводорода, полученные в районе континентального склона Севастопольского антициклона в 2009–2013 гг. и в центральной глубоководной части моря в 2013–2015 гг., представленные соответственно на рис. 2, 3.

Из рис. 2 следует, прежде всего, хорошее наложение на одну и ту же линию данных по содержанию сероводорода в различных съемках, что, собственно, и позволяет анализировать весь массив данных. В эту картину не вписываются результаты мая 2009 г., по которым концентрации сероводорода в районе континентального склона на краю СЗШ в интервале изопикн $\sigma_t = 16,0–16,4 \text{ кг/м}^3$ были несколько выше, чем во всех других районах. Это подтверждает вывод [14] о поднятии изосульфид над началом континентального склона на более высокие изопикнические горизонты, но требует более скрупулезных исследований. В частности, можно предложить в последующих исследованиях вертикальной структуры растворенного кислорода и сероводорода обязательно включать в сетку полигона несколько станций, для которых глубина места соответствовала бы расположению изопикны $\sigma_t = 16,1–16,2 \text{ кг/м}^3$ (ориентировочно на 150–170 м), и осуществлять отбор проб через интервал $\Delta\sigma_t = 0,05 \text{ кг/м}^3$ до изопикны $\sigma_t = 15,7 \text{ кг/м}^3$.

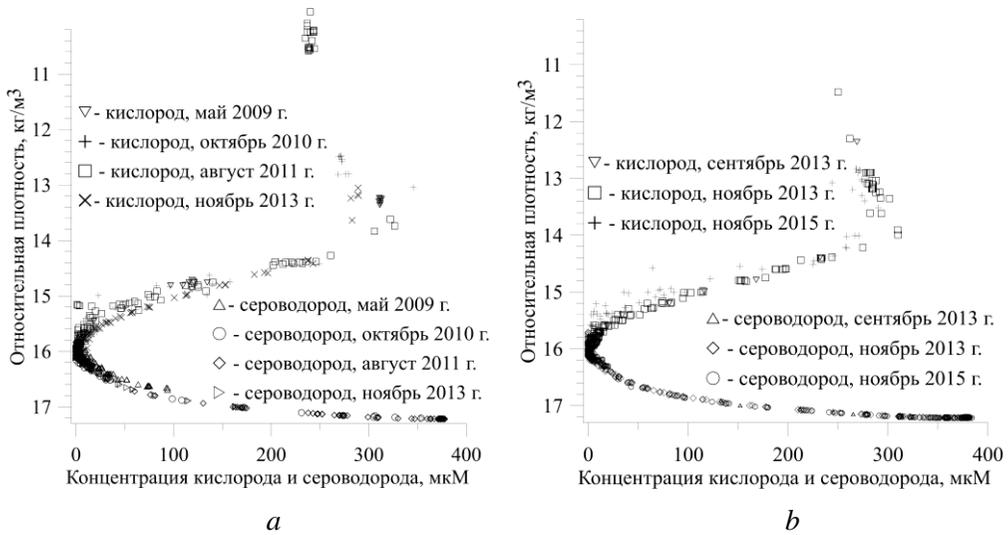


Рис. 2. Вертикальные профили кислорода и сероводорода в районе Севастопольского антициклона в 2009–2013 гг. (а) и в глубоководной части Черного моря в 2013–2015 гг. (б)
Fig. 2. Vertical profiles of oxygen and hydrogen sulfide in the region of the Sevastopol anticyclone in 2009–2013 (a) and in the deep part of the Black Sea in 2013–2015 (b)

Более детальная картина вертикального распределения кислорода и сероводорода между изопикнами $\sigma_t = 15,0\text{--}16,3 \text{ kg/m}^3$, где располагается субкислородная зона, верхняя граница которой проходит по изоксигене 10 μM (в некоторых работах 20 μM), а нижняя по изосульфиде 3 μM (в некоторых работах 5 μM), представлена на рис. 3.

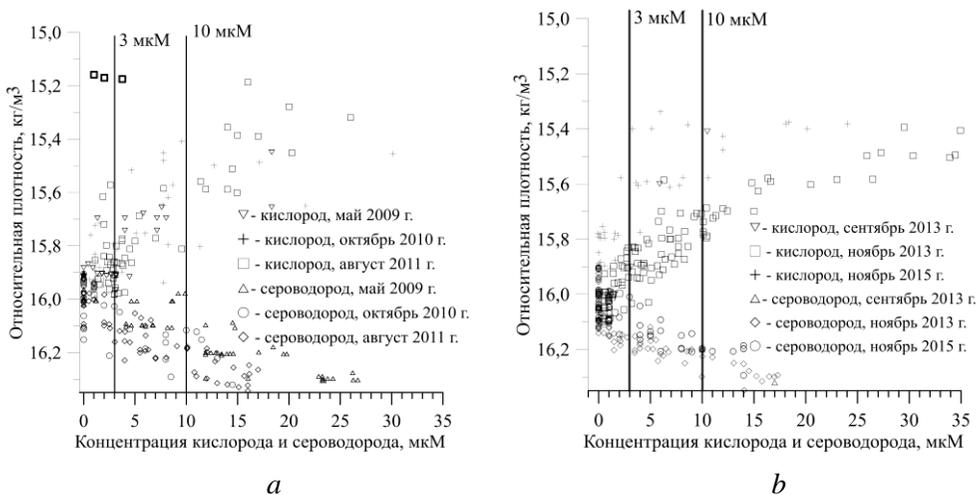


Рис. 3. Вертикальные профили кислорода и сероводорода в районе Севастопольского антициклона в 2009–2011 гг. (а) и в глубоководной части Черного моря в 2013–2015 гг. (б)
Fig. 3. Vertical profiles of oxygen and hydrogen sulfide in the region of the Sevastopol anticyclone in 2009–2011 (a) and in the deep part of the Black Sea in 2013–2015 (b)

Из рис. 3, *a* видно, что в августе 2011 г. на самой западной станции, расположенной в начале континентального склона на глубине ~ 120 м (см. рис. 1), почти нулевое содержание кислорода было зафиксировано на изопикне $\sigma_t = 15,2 \text{ кг/м}^3$, что соответствует самому высокому расположению верхней границы субкислородной зоны, обнаруженному в наших исследованиях.

Из рис. 3, кроме уже отмеченных выше повышенных концентраций сероводорода в мае 2009 г., также видно, что значения концентрации кислорода выше 10 мкМ над кромкой шельфа на изопикне $\sigma_t = 15,7 \text{ кг/м}^3$ были зафиксированы только в ноябре 2013 г., а в глубоководной части моря такие значения наблюдались регулярно. Что касается изопикн $\sigma_t \geq 15,8 \text{ кг/м}^3$, то во всех проведенных съемках содержание кислорода на них было менее 10 мкМ.

Более наглядно конфигурацию и размеры субкислородной зоны можно определить по вертикальному распределению кислорода и сероводорода на отдельных разрезах. Так, для района Севастопольского антициклона распределение этих элементов в 2009–2011 гг. на разрезах перпендикулярно кромке шельфа представлено на рис. 4. В мае 2009 г. на двух разрезах изосульфида 3 мкМ располагалась выше изопикны $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$, поднимаясь в максимальном случае до $\sigma_t = 15,85 \text{ кг/м}^3$ (рис. 4, *a*). Эти данные совпадают с результатами исследований НИС «Академик» в мае 2004 г. [14].

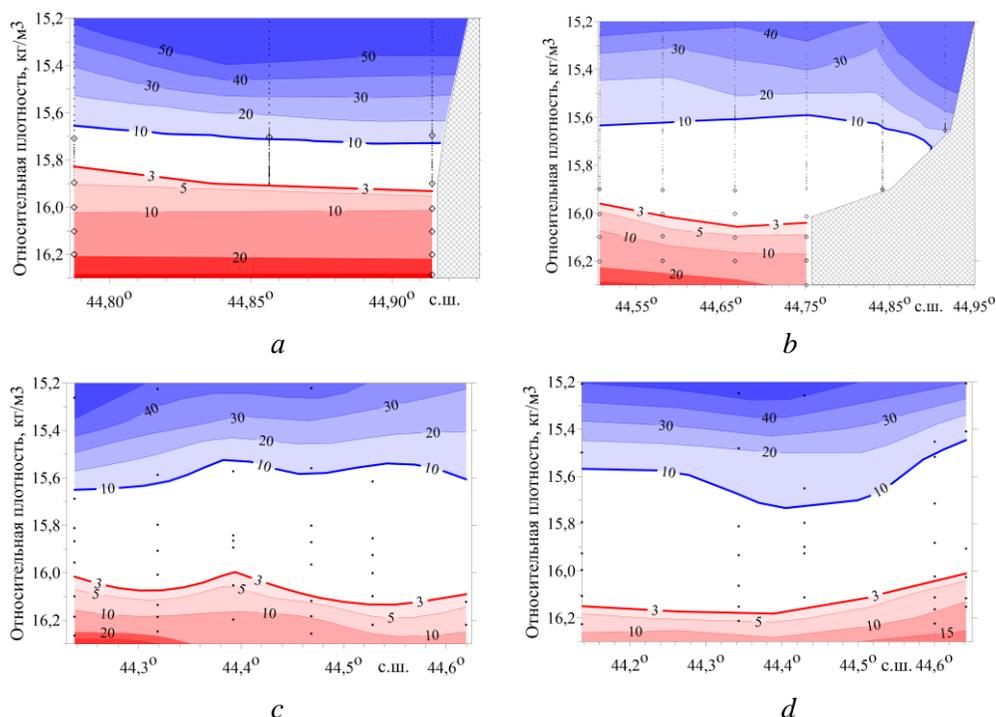


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций кислорода и сероводорода, мкМ, на разрезах в районе Севастопольского антициклона в мае 2009 г. (меридиан 32° в. д. (*a*), меридиан 32,5° в. д. (*b*)), августе 2011 г. (*c*) и октябре 2010 г. (*d*); ◇, ● – отмечают горизонты отбора проб

Fig. 4. Vertical distribution of the oxygen and hydrogen sulfide concentrations (in μM) on the Sevastopol anticyclone sections in May, 2009 (the meridian 32° E (*a*), the meridian 32.5° E (*b*)), August, 2011 (*c*) and October, 2010 (*d*); ◇ and ● denote the horizons of sampling

Вероятнее всего, отмеченное поднятие изосульфид в шкале плотностей представляет собой сезонное явление, поскольку в этом же районе летом 2011 г. изосульфида 3 мкМ располагалась ниже изопикны $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$, а осенью 2010 г. чуть ниже изопикны $\sigma_t = 16,1 \text{ кг/м}^3$, то есть наблюдается постепенное заглубление изосульфида 3 мкМ при переходе от весеннего периода к осеннему. Нельзя, однако, исключить влияние динамики вод, например различных фаз развития Севастопольского антициклона [19–21], на положение верхней границы сероводородной зоны в этом районе.

Верхняя граница субкислородной зоны (изооксигена 10 мкМ) на трех разрезах располагалась примерно на изопикне $\sigma_t = 15,6 \text{ кг/м}^3$ (рис. 4, а). На рисунках 4, а, б можно отметить увеличение содержания кислорода в северной части разрезов над континентальным склоном. Данная особенность распределения кислорода была выявлена благодаря использованию датчика кислорода, который определял концентрацию кислорода с дискретностью 0,5 м, однако после работ 2009 г. не использовался, что привело к более грубой и менее надежной картине распределения.

В центральной части Черного моря в ноябре 2015 г. был выполнен «вековой» разрез м. Херсонес – пролив Босфор, параметры субкислородной зоны которого можно сравнить с многолетними данными [6] (рис. 5).

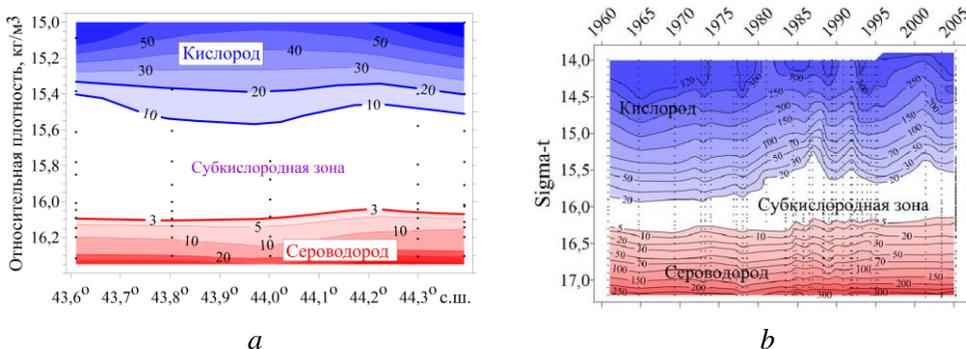


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций кислорода и сероводорода, мкМ, на «вековом» разрезе м. Херсонес – Босфор в 2015 г. (а) и по многолетним данным [6] (б)

Fig. 5. Vertical distribution of the oxygen and hydrogen sulfide concentrations (in μM) on the “century” section cape Chersonese – Bosphorus in 2015 (a) and based on the multi-year data [6] (b)

Как видно из рис. 5, в 2015 г. нижняя граница субкислородной зоны, то есть изосульфида 3 мкМ, проходит в пределах изопикн $\sigma_t = 16,10\text{--}16,15 \text{ кг/м}^3$ (разница между ними в шкале глубин составляет около 5 м). На той же изопикне нижняя граница субкислородной зоны располагалась и по многолетним данным, приводимым в работе [6] (рис. 5). Примерно на тех же изопикнах располагается изосульфида 3 мкМ в районах Черного моря к востоку и западу от исследованного «векового» разреза м. Херсонес – Босфор по литературным данным: на северо-востоке на $\sigma_t = 16,12\text{--}16,15 \text{ кг/м}^3$, на юго-западе на $\sigma_t = 16,10\text{--}16,20 \text{ кг/м}^3$ [22–24]. Подобная многолетняя и пространственная стабильность расположения нижней границы субкислородной зоны (или верхней границы сероводородной зоны) объясняется окислением сероводорода в результате притока кислородсодержащих мраморноморских

вод через пролив Босфор, тогда как вертикальный поток кислорода обеспечивает окисление лишь около 5% сероводорода, поднимающегося из глубин моря [10].

Что касается положения верхней границы субкислородной зоны, определяемой по изоксигене 10 мкМ, то для нее характерна временная изменчивость, которая подтверждается и многолетними данными (рис. 5), и результатами наблюдений МГИ 2009–2015 гг. Так, в районе Севастопольского антициклона в 2009–2011 гг. изоксигена 10 мкМ располагалась на изопикне 15,60–15,65 кг/м³ (рис. 4), а на «вековом» разрезе м. Херсонес – пролив Босфор в ноябре 2015 г. значительно выше, на изопикне 15,35–15,40 кг/м³ (рис. 5).

Наиболее подробная (содержание кислорода определяли по датчику с разрешением 0,5 м по вертикали) и охватывающая всю северную часть Черного моря от северо-западного шельфа до северо-восточного через широту 43,5° с. ш. (разрез на рис. 1 обозначен сплошной линией) картина особенностей расположения верхней и нижней границ субкислородной зоны (рис. 6, а) была получена по данным 33-го рейса НИС «Maria S. Merian» в ноябре 2013 г.

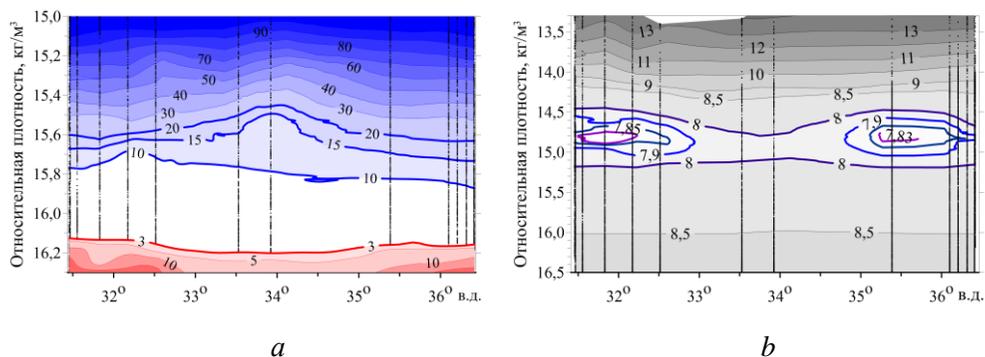


Рис. 6. Положение верхней и нижней границ субкислородной зоны (а) и ХПС (b) на разрезе от СЗШ (слева) до северо-восточного шельфа (справа) в ноябре 2013 г.

Fig. 6. Location of the upper and lower boundaries of the sub-oxic zone (a) and the cold intermediate layer on the section from the north-western shelf (on the left) in November, 2013

Как и для ранее рассмотренных разрезов, изосульфида 3 мкМ располагалась в очень узком интервале изопикнических поверхностей $\sigma_t = 16,12$ – $16,15$ кг/м³. Для изоксигены 10 мкМ в западной части разреза на $\sigma_t = 15,75$ кг/м³ было характерно более высокое расположение, чем в восточной его части на $\sigma_t = 15,85$ кг/м³. Связано это, вероятнее всего, с более интенсивным расходом кислорода на окисление взвешенного органического вещества, высокое содержание которого в водах СЗШ обеспечено пресноводным стоком, обеспечивающим биогенными элементами процесс роста (и далее отмирания) фитопланктона.

Для проверки гипотезы о зависимости положения верхней границы субкислородной зоны от запаса кислорода в холодном промежуточном слое (ХПС), представленной в работе [10], для разреза через северную часть Черного моря

был построен график вертикального распределения температуры в шкале относительной плотности (рис. 6, *b*). На нем проявляются два ядра ХПС в западной и восточной частях разреза с минимальными температурами 7,83 °С и отсутствие такого ядра (т. е. ослабление ХПС) в центральной части разреза на долготе 34° в. д. Эти особенности ХПС (содержание кислорода в нем тем больше, чем толще слой и ниже температура) не отразились на расположении изооксигены 10 мкМ, зато совершенно отчетливо проявились на положении изооксиген в интервале от 15 до 50 мкМ, приподнятых на долготе 34° в. д. по сравнению с окружением. То есть ослабление ХПС и вследствие этого ослабление подпитки кислородом нижележащих слоев привело к уменьшению в них содержания кислорода.

**Максимальные концентрации сероводорода, обнаруженные
в экспедициях МГИ в 2010–2016 гг.
Maximum hydrogen sulfide concentrations revealed
in the MHI expeditions in 2010–2016**

Период/Period	Глубина, м/ Depth, m	Относительная плотность, кг/м ³ / Relative density, kg/m ³	Концентрация, мкМ/ Concentration, μM
Октябрь 2010 г./ October, 2010	1743	17,219	378
Август 2011 г./ August, 2011	1250	17,205	354
Сентябрь 2013 г./ September, 2013	1750	17,220	379
Ноябрь 2013 г./ November, 2013	2136	17,206	382
Ноябрь 2015 г./ November, 2015	1801	17,216	384

Отдельным вопросом следует рассмотреть величины максимальных концентраций сероводорода в Черном море, обнаруженных в различных экспедициях. В таблице и на рис. 7 приведены данные, полученные при участии сотрудников МГИ в 2010–2015 гг. Из этих данных следует, что на глубинах более 1700 м, где в вертикальных распределениях величин солености, температуры и концентрации сероводорода практически отсутствует какой-либо градиент [25], следует ожидать значений концентрации на уровне 380 мкМ. Это существенно выше значений, наблюдавшихся в 1960–1970-х гг., но не отличается от величин, характерных для концентрации сероводорода на глубине около 2000 м в 1980–1990-х гг. [10]. Таким образом, можно сделать вывод, что значительного увеличения содержания сероводорода в придонных водах Черного моря за последние 20 лет не произошло.

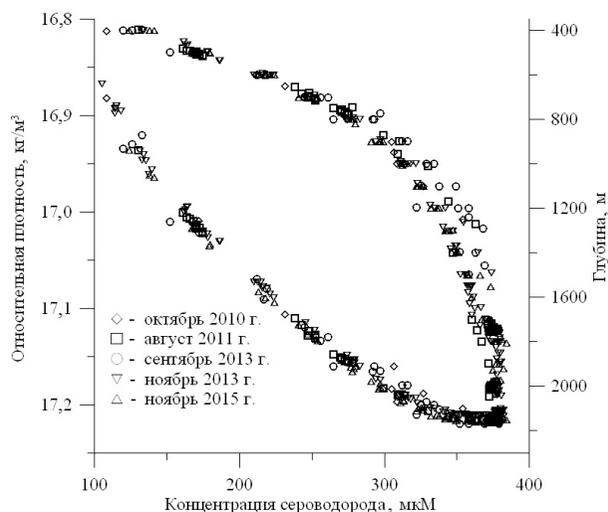


Рис. 7. Вертикальное распределение сероводорода в 2009–2016 гг. на глубинах более 400 м в шкалах относительной плотности (нижний график) и глубины (верхний график)

Fig. 7. Vertical distribution of hydrogen sulfide in 2009–2016 on the depths below 400 m using the scales of relative density (the lower graph) and depth (the upper graph)

Выводы

Верхняя граница сероводородной зоны, определяемая по изосульфиде 3 мкМ, в северной части Черного моря за последние 20 лет не изменила своего положения и по-прежнему находится на изопикне $\sigma_t = 16,10$ – $16,15$ кг/м³. Ближе к СЗШ в районе Севастопольского антициклона изосульфида 3 мкМ приподнимается до $\sigma_t = 15,9$ – $16,0$ кг/м³, в одном случае зафиксировано ее положение на $\sigma_t = 15,85$ кг/м³.

Для положения верхней границы субкислородной зоны – изооксигены 10 мкМ – характерна пространственная и временная изменчивость. В районе СЗШ, где в 2009–2013 гг. были проведены четыре экспедиции, изооксигена 10 мкМ независимо от сезона располагалась в пределах изопикн $\sigma_t = 15,6$ – $15,7$ кг/м³. В глубоководной части моря в ноябре 2013 г. изооксигена 10 мкМ располагалась на изопикне $\sigma_t = 15,7$ кг/м³, тогда как в ноябре 2015 г. – значительно выше, на изопикне $\sigma_t = 15,35$ кг/м³. Наблюдаемое изменение положения изооксигены 10 мкМ за период с 1995 по 2015 гг. не дает возможности однозначно оценить изменение толщины субкислородной зоны в центральной части моря.

Значительного увеличения содержания сероводорода в водах Черного моря в интервале глубин 1750–2000 м за последние 20 лет не произошло.

В последующих исследованиях субкислородной зоны на кромке континентального шельфа следовало бы выполнить ряд станций, на которых в придонном слое располагалась бы изопикна $\sigma_t = 16,1$ – $16,2$ кг/м³. Глубина места на таких станциях должна быть около 150–170 м. Удобным районом для такого эксперимента представляется относительно пологий континентальный склон к югу от м. Тарханкут или к югу от Керченского пролива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безбородов А. А.* Связь границы сероводородной зоны с плотностной структурой вод в Черном море // Доклады Академии Наук УССР. Серия Б. 1990. № 12. С. 3–6.
2. *Виноградов М. Е., Налбандов Ю. П.* Влияние изменения плотности воды на распределение физических, химических и биологических характеристик экосистемы пелагиали Черного моря // Океанология. 1990. Т. 30, вып. 5. С. 769–777.
3. 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, supplement 2. P. S691–S710. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80004-4](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80004-4)
4. *Murray J. W., Codispoti L. A., Friederich G. E.* Oxidation-reduction environments: The sub-oxic zone in the Black Sea // Aquatic Chemistry: Interfacial and Interspecies Processes / Eds. Chin Pao Huang, Charles R. O'Melia, James J. Morgan. Washington, DC : American Chemical Society, 1995. P. 157–176. (Advances in Chemistry Series. Vol. 244). URL: <http://bookre.org/reader?file=601612&pg=10> (дата обращения: 02.09.2018).
5. *Еремеев В. Н., Коновалов С. К., Романов А. С.* Исследование формирования вертикальной структуры полей биогенных элементов в водах Черного моря методом пространственного изопикнического анализа // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 6. С. 23–38.
6. *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)
7. 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. 119–132.
8. *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.
9. *Kononov S. K., Murray J. W., Luther III G. W.* Basic processes of the Black Sea biogeochemistry // Oceanography. 2005. Vol. 18, no. 2. P. 24–35. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.39>
10. *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. 5–30.
11. *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.
12. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.09.008>
13. Гидрохимические исследования в 33-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Колесников» / Л. В. Еремеев [и др.]. Севастополь, 1995. 42 с. (Препринт / МГИ НАН Украины).
14. *Кондратьев С. И., Романов А. С., Внуков Ю. Л.* Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 5. С. 96–106.
15. *Кондратьев С. И., Внуков Ю. Л.* Структура вертикального распределения кислорода в водах приустьевых взморья Дуная в осенний период 1997 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999. С. 125–137.

16. *Геворгиз Н. С., Еремеева Л. В., Кондратьев С. И.* Влияние апвеллинга на гидрохимический режим // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеинный: современное состояние экосистемы / Под. ред. В. А. Иванова, С. В. Гошовского. Севастополь : МГИ НАН Украины, 1999. С. 160–173.
17. *Кондратьев С. И.* Особенности пространственного распределения кислорода в водах приустьевоего взморья Дуная в 1997–2010 годах // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 3. С. 60–76.
18. Методы гидрохимических исследований океана / Отв. ред. О. К. Бордовский, В. Н. Иваненков. М. : Наука, 1978. 272 с. URL: <https://www.geo-fund.am/files/library/1/15278538607187.pdf> (дата обращения: 02.09.2018).
19. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 97. P. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>
20. *Shapiro G. I., Stanichny S. V., Stanychna R. R.* Anatomy of shelf–deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114, iss. 4. P. 867–875. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.020>
21. *Zhou F., Shapiro G., Wobus F.* Cross-shelf exchange in the northwestern Black Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014. Vol. 119, iss. 4. P. 2143–2164. <https://doi.org/10.1002/2013JC009484>
22. Изменчивость гидрохимической структуры редокс-слоя Черного моря / С. Пахомова [и др.] // Геология морей и океанов : Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 16–20 ноября 2009 г. М. : ГЕОС, 2009. Т. 4. С. 122–125.
23. Mixing in the Black Sea detected from the temporal and spatial variability of oxygen and sulfide – Argo float observations and numerical modelling / E. V. Stanev [et al.] // Biogeosciences. 2014. Vol. 11, iss. 20. P. 5707–5732. <https://doi.org/10.5194/bg-11-5707-2014>
24. Understanding the dynamics of the oxic-anoxic interface in the Black Sea / E. V. Stanev [et al.] // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, iss. 2. P. 1–8. <https://doi.org/10.1002/2017GL076206>
25. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 210 с.

Об авторах:

Кондратьев Сергей Иванович, старший научный сотрудник отдела биогеохимии моря, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2049-7750**, e-mail: skondratt@mail.ru

Видничук Анна Владимировна, старший инженер, аспирант отдела биогеохимии моря, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), e-mail: anna_vidnichuk@mhi-ras.ru