

УДК 551.465

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИСУТСТВИЯ КИСЛОРОДА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ОСАДКОВ СЕРОВОДОРОДНОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2019 г. П.А. Стунжас¹, М.Б. Гулин², А.Г. Зацепин¹, Е.А. Иванова²

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

² *Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия*
e-mail: pastunzhas@mail.ru

Поступила в редакцию 08. 11. 2017 г.

В северо-восточной части Черного моря произведен поиск в гипоксических и аноксических условиях живых организмов эукариот (микро- и мейзообентоса), а также измерение O_2 в придонном слое воды и в верхнем слое осадков. Результаты показывают наличие глубинного максимума численности зообентоса в диапазоне глубин 215–244 м. Данное скопление бентосной фауны охватывает поперечный слой в 30 м. В целом, доля активного мейзообентоса не превышала 1.5% от общего числа обнаруженных в пробе организмов. Наличие аэробного бентоса в районе верхней границы H_2S можно объяснить: сползанием осадков с меньшей глубины; квазипериодической поставкой O_2 за счет колебания положения изопикн и/или опускания вод вдоль склона в придонном экмановском слое. Также, при физическом поступлении в придонный слой кислорода, он сравнительно долго может сохраняться в верхней части зоны H_2S в виду отсутствия глубинного потока Mn^{+2} и реакции с ним.

Ключевые слова: редокс-хемоклин, сероводородная зона, аэрация донных отложений, глубинное скопление зообентоса, Чёрное море

DOI: <https://doi.org/10.31857/S 0030-157459166-169>

В июне-июле 2015 и 2017 гг. в северо-восточной части Черного моря проводились исследования возможности проникновения O_2 в верхние слои H_2S -зоны, в области контакта периферийных границ хемоклина со склоном дна. Исследования имели два направления: поиск в гипоксических и аноксических условиях живых организмов эукариот (микро- и мейзообентоса), а также измерение O_2 в придонном слое воды и в верхнем слое осадков. Оба направления при измерениях сочетались.

Бентосные съемки производились на траверзе Геленджикской бухты – в районе гидрофизического полигона ИО РАН и расположения заякоренной буйковой станции с зондом-профилографом «Аквалог» [4], с борта БПМ-74 «Ашамба». Использовался грунтоотборник (трубка) «Румолот» производства ИМБИ, снабженный прозрачной акриловой трубкой с толщиной стенок 3 мм, внутренним диаметром 54 мм и высотой 30 см. Трубка вставляется в носитель из железобетона весом 16 кг с крепежной арматурой. На верхнем торце трубки расположен

клапан с заслонкой из пластика с резиновым кольцевым уплотнителем, который имеет слабую отрицательную плавучесть. Заслонка лишена возвратной запорной пружины и закрывается при подъеме прибора под собственным весом в сочетании с напором встречного потока воды. Нижний конец трубки заострен по окружности и не содержит закупоривающего механизма, при подъеме трубки на палубу он вручную закрывается резиновой пробкой. Данная конструкция позволяет отбирать пробы преимущественно илистых грунтов. Получаемые колонки грунта сохраняют, как правило, ненарушенное строение с естественной слоистой текстурой осадка. Однако, насколько трубка предохраняет загрязнение самого осадка и воды над ним от попадания O_2 , пока остается неясным:

1) при подъеме трубки, если осадок плотно прилегает к стенке, диффузия O_2 снизу (в нашем случае на 19 см), если там отсутствуют случайные твердые включения, представляется невозможной;

Таблица. Распределение по глубине плотности поселений мейзообентоса (экз/10 см²). Курсив – данные 2017 г.

Глубина, м	112	142	145	167	175	<i>215</i>	<i>238</i>	244	260
Плотность	153.9	6.97	30.96	0.00	0.08	<i>0.49</i>	<i>5.23</i>	9.30	0.00

2) при спуске трубка заполняется легкой поверхностной водой с O₂, которая плохо оттуда вымывается;

3) при отборе пробы не вся вода с O₂ может вытесняться (а частично перемешиваться).

Численность черноморского зообентоса на больших глубинах в сравнении с верхней сублиторалью можно принять как относительно консервативный параметр. Поэтому результаты обоих съемок представлены в единой таблице. Для определения функционального состояния бентосных организмов в свежих нефиксированных образцах донных отложений на дополнительной станции с глубиной дна 240 м, в слоях грунта 0.0-0.5, 0.5-1.0 и 1-2 см (не включено в таблицу) было проведено микроскопирование осадков, что позволило выявить присутствие живых организмов в самом верхнем слое грунта — в сероводородной зоне. Главным образом, это оказались представители одноклеточных — *Ciliata* и мягкорачковинные фораминиферы — аллогромииды. Живых Metazoa на глубине 240 м не найдено. В целом, доля активного мейобентоса не превышала 1.5% от общего числа обнаруженных в пробе организмов. Мертвая компонента составляла 92.4%, определить функциональное состояние (активные живые, живые в анабиозе или мертвые организмы) остальных 6% найденных особей мейобентоса оказалось затруднительно. На иных глубинах, кроме указанной изобаты 240 м, подобные наблюдения не проводились, анализировался лишь фиксированный материал (табл.).

Результаты хорошо согласуются с данными более ранних исследований в западной части Черного моря [7, 8, 1] и показывают наличие глубинного максимума численности зообентоса в диапазоне глубин 215-244 м. Данное скопление бентосной фауны охватывает по вертикали слой в 30 м. При этом в горизонтальной проекции, с учетом относительно малых углов наклона дна, он, несомненно, является гораздо более протяженным.

Одновременно проводились гидрологические съемки зондом SBE-19-plus с кассетой батометров.

2015 г. Над склоном с глубинами 199-263 м наличие растворенного кислорода в пробах придонной воды было найдено вплоть до глубины 142 м (0.39 mg/l). Для этого сразу после подъема CTD-зонда сенсор оксиметр-оптода LDO-HACH-HQ10d опускали в нижнюю часть батометра через его приоткрытую крышку. Изопикна 16.2, обычно соответствующая глубине залегания верхней границы сероводородной зоны, располагалась сравнительно глубоко — на горизонте 166-174 м.

2017 г. Зонд SBE был дополнен оксиметром-оптодом производства ЦАГИ (г. Жуковский) [6]. Над склоном с глубинами 110-300 м нижний горизонт проникновения растворенного кислорода фиксировался на глубине 115-120 м. В то же время верхняя граница зоны H₂S (изопикны 16.2) была на глубине 136-140 м. Известно, что на склоне заглупление изопикн происходит при развитии Основном черноморском течении (ОЧТ), а их подъем, соответственно, при его ослаблении, что характерно для летних месяцев. Так что в 2015 г. съемка проходила при более развитом ОЧТ, чем в 2017 г. По данным зонда «Аквалог», в период 2013-2014 гг. вертикальные колебания глубины изопикны 16.2 происходили в интервале глубин 125-215 м, с преобладающим залеганием на горизонте 155-175 м [4].

Для анализа O₂ в осадках был апробирован новый лабораторный оксиметр-оптод PreSens производства фирмы GmbH (Германия). В нем свет возбуждения и люминесцентного отклика передаются по тонкому световоду, так что его чувствительный элемент (spot 3), представляющий тонкий кружок D=4 мм, клеится на внутреннюю поверхность сосуда (трубка «Румолот»), и определение O₂ производится без открывания трубки. В нашем случае спот был наклеен на высоте 19 см от нижнего края трубки.

Особо проверялась пригодность оптода для целей работ. По паспорту спот 3 работает с концентрациями O_2 ниже 20 мг/л, и имеет динамический диапазон 200, т.е. его точность составляет примерно 0.1 мг/л, что в нашем случае явно недостаточно. Но, так как при низком O_2 сигнал люминесценции максимальный, имелась надежда, что реальная точность будет выше. Калибровка в сосуде, заполненном аргоном чистоты 99.98%, показала, что точность спота составляет примерно ± 15 мкг/л, т.е. реальный динамический диапазон составляет примерно 600, и завышение «нуля» примерно на 25 мкг/л.

Как видно из табл. в 2017 г. удалось взять только 2 трубки с осадком с глубин 215 и 238 м. В первом случае спот оказался в осадке на глубине 2 см и показал (с учетом поправки) концентрацию O_2 25 ± 15 мкг/л, во втором – на глубине 6 см: 50 ± 15 мкг/л. С одной стороны, такой результат подтверждает данные бентосных измерений, причем в точке с более высокой концентрацией бентоса найдена более высокая концентрация O_2 . Но чисто формально первый результат (т.е. что $O_2 > 0$) недостоверен, второй – достоверен, но вызывает вопросы. Как показывают измерения O_2 в осадках Черного моря, кислород обычно наблюдают только в верхнем слое толщиной менее 1 см [1], потому присутствие его на глубине 6 см, скорее всего, является или артефактом (возможности загрязнения проб O_2 упоминались выше) или случайным. Таким образом, по нашим измерениям нельзя достоверно сказать, что мы нашли присутствие O_2 в точках отбора проб осадка.

Тем не менее, как нам кажется, наличие аэробного бентоса в районе верхней границы H_2S , причем с резко очерченной нижней границей (в интервале глубин всего 15 м; табл.), объяснить можно. Кратко упомянем разные гипотезы. **Механическая:** сползание осадков с меньшей глубины, хотя обнаруженный глубинный пик численности зообентоса – это не первый случай такого рода наблюдений [7, 1]. **Физическая:** квазипериодическая поставка O_2 за счет колебания положения изопикн [4] и/или опускания вод вдоль склона в придонном экмановском слое [2]. **Химическая:** при физическом поступлении в придонный слой кислорода, он сравнительно долго может сохраняться в верхней части зоны H_2S в виду отсутствия глубинного потока Mn^{+2} и реакции с ним.

В то же время находки мейобентоса на глубинах более 400 м (см., например, [3, 5]) противоречивы и требуют изменения устоявшихся представлений о происходящих в Черном море процессах, поэтому они пока останутся вне поля зрения наших исследований.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №17-05-00381. Также, исследования были поддержаны финансированием по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», № гос. регистрации АААА-А18-118021490093-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулин М.Б. Батиметрическое распределение живых активных форм зообентоса в хемоклине Черного моря // Морской экологический журнал. 2013. Т.12. № 1. С. 5–17.
2. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Подымов, О.И., Островский А.Г. Опускание вод в экмановском слое, образованном прибрежным даунвеллинговым течением над наклонным дном // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 531–537.
3. Зайцев Ю.П., Анципуова Л.В., Воробьева Л.В. и др. Нематоды в глубоководной зоне Черного моря // Докл. АН УССР. Сер. Б. 1987. № 11. С. 77–79.
4. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфо-склоновой зоне Черного моря // Физ. атмосф. и океанология. 2014. №1. С.16–29.
5. Сергеева Н.Г. К вопросу о биологическом разнообразии глубоководного бентоса Черного моря // Экология моря. 2000. Вып. 50. С. 57–62.
6. Стунжас П.А., Мошаров В.Е., Радченко В.Н. Возможности фотолюминесцентного метода измерения концентрации кислорода в редокс зоне Черного моря в сравнении с другими методами // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 507–516.
7. Luth U., Luth C.M. A benthic approach to determine long-term changes of the oxic/anoxic interface in the water column of the Black Sea / Proc. 30th Europ. Mar. Biol. Symp. (Southampton, UK, Sept 1995). Southampton, 1997. P. 231–242.
8. Sergeeva N.G., Gulin M.B. Meiobenthos from an active methane seepage area in the NW Black Sea // Marine Ecology an Evolutionary Perspective, Special topics volume 'Ecology and evolution of vent, seep and whalefall organisms'. 2007. V. 28. 1. P. 152–159.

On the Possible Presence of Oxygen in the Upper Sediment Layer of the Hydrogen Sulfide Zone in the Black Sea

© 2019 P. A. Stunzhas¹, M. B. Gulin², A. G. Zatsepin¹, E. A. Ivanova²

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Kovalevsky Institute of Marine Biological Research Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

e-mail: pastunzhas@mail.ru

Received November 8, 2017

In the northeastern Black Sea the search was performed for living eukaryotic organisms (micro- and meiobenthos) in hypoxic and anoxic conditions as well as measurement of O₂ in the bottom water layer and in the upper layer of sediments. The results have shown the presence of a deep maximum abundance of zoobenthos in a depth range of 215–244 m. This aggregation of benthic fauna occupies a layer of 30 m along the vertical. In general, the proportion of active meiobenthos was no greater than 1.5% of the total number of organisms recorded from the sample. The presence of aerobic benthos near the upper boundary of the H₂S zone can be explained by: sliding down of sediments from a higher depth; quasi-periodic O₂ supply due to fluctuations in the position of the isopycna and/or sinking of waters downslope in the bottom Ekman layer. Also, in the case of physical entry of oxygen into the bottom layer, it can remain for a relatively long time in the upper part of the H₂S zone due to the lack of deep Mn⁺² flux and reaction with it.

Keywords: redox-chemocline, H₂S zone, aeration of seabed sediments, deep-sea layer of zoobenthos, Black Sea