



УДК [574.587:[502.51:504.5]](262.5.04)

ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКРОЗООБЕНТОСА БУХТ КРУГЛОЙ И КАЗАЧЬЕЙ (Г. СЕВАСТОПОЛЬ)

© 2021 г. Н. А. Орехова

ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Российская Федерация

E-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ruПоступила в редакцию 09.06.2020; после доработки 26.02.2021;
принята к публикации 29.09.2021; опубликована онлайн 30.11.2021.

Отсутствие системного и экологически рационального подхода при эксплуатации бухт Севастопольского региона (бухт Круглой и Казачьей) привело к значительному их загрязнению. Комбинация ряда естественных и антропогенных факторов обусловила ухудшение условий существования бентосных сообществ. Целью данной работы было провести комплексные исследования экосистем бухт Круглой и Казачьей для изучения особенностей формирования окислительно-восстановительных условий в донных отложениях и придонном слое вод, а также их влияния на характеристики макрозообентоса. Пробы донных отложений отбирал водолаз трубками из оргстекла, герметично закрываемыми сверху и снизу, что позволило сохранить тонкую структуру донных отложений и придонного слоя вод. Для изучения бентосных сообществ в этом же месте отбирали пробы с помощью ручного пробоотборника. Для получения химического состава поровых вод с высоким вертикальным разрешением использовали полярографический метод анализа. Расчёт потока кислорода на границе и в верхней части донных отложений выполняли по данным вертикального профиля концентрации кислорода в поровых водах и геохимического анализа, используя уравнение для первого закона Фика с учётом градиента концентраций и молекулярной диффузии кислорода в поровых водах. Для анализа бентосного материала применяли стандартные гидробиологические методы. При расчёте значений индекса разнообразия Шеннона (H') использовали логарифм по основанию 2. Анализ полученных данных показал, что высокий уровень антропогенного воздействия и ограниченная динамика вод привели к заиливанию донных отложений исследуемых акваторий, что затрудняло поступление кислорода в них, а накопление в осадках органического углерода обусловили активное его расщепление. Стратификация водной толщи за счёт ограниченного водообмена, высокая температура придонного слоя вод, сопровождающаяся снижением растворимости кислорода, и мелкодисперсный характер донных отложений способствовали тому, что скорость поступления кислорода была меньше скорости его потребления на окисление органического вещества; это сопровождалось развитием зон дефицита кислорода и появлением восстановленных соединений, в частности сероводорода. Отмечено, что в верхнем слое донных отложений преобладали субкислородные условия, ниже — анаэробные. Это привело к тому, что основными формами макрозообентоса являлись виды, толерантные к дефициту кислорода и к загрязнению органическими веществами. Так, на некоторых участках бухты Казачьей присутствовали только полихеты. При этом отмечено, что в районе выхода из бухты Круглой интенсивная динамика вод и морфологические особенности дна способствуют насыщению верхнего слоя отложений кислородом. На основании данных о концентрации кислорода в поверхностном (0–5 мм) слое осадка (в поровых водах), а также данных о геохимических характеристиках (влажность, пористость) донных отложений рассчитан поток кислорода на ст. 4 (бухта Солёная); его величина составила $0,73 \text{ М} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Принимая в расчёт концентрацию

кислорода в придонном слое вод (259 мкМ), можно сказать, что время развития аноксии с учётом только биогеохимических процессов составляет около 5 месяцев. Таким образом, можно предположить, что экосистемы бухт Круглой и Казачьей находятся в стадии деградации. Дальнейшая их эксплуатация без выработанного комплексного и рационального подхода приведёт к критическому ухудшению их экосистем — к появлению и распространению зон экологического риска, что снизит рекреационную и социально-экономическую привлекательность данных районов.

Ключевые слова: донные отложения, поровые воды, кислород, сероводород, органический углерод, макрозообентос, прибрежные акватории, Чёрное море

Морские прибрежные экосистемы играют важную роль в жизни человека (Harley et al., 2006). Их эксплуатируют во всех сферах хозяйственной деятельности, они в значительной степени подвержены антропогенному воздействию, что отражается на их физико-химических и биологических характеристиках, а также на экологическом состоянии экосистемы в целом (Cabral et al., 2019 ; Ducrotoy, 2021 ; Rabalais et al., 2009). Любые воздействия извне имеют достаточно быстрый отклик. При благоприятных условиях экосистемы способны самовосстанавливаться, однако при продолжительном воздействии антропогенного и ряда естественных физических и физико-химических факторов происходит нарушение природных равновесий, и система деградирует (Rabalais et al., 2009). Среди прибрежных морских экосистем наиболее подвержены разрушению системы с ограниченным водообменом. В них при определённых условиях устанавливается стратификация вод и происходят заиливание грунта и накопление загрязняющих веществ и органического углерода в донных отложениях, что отражается на состоянии бентосных сообществ и приводит к формированию зон экологического риска (Овсяный и Орехова, 2019 ; Орехова и др., 2019а).

Бухты Севастопольского региона относятся к типу экосистем, где процессы накопления органических веществ в донных отложениях преимущественно преобладают над деструкцией (Игнатьева и др., 2008 ; Orekhova & Kononov, 2018b ; Orekhova et al., 2019b ; Osadchaya et al., 2003). Истощение кислорода на окисление органического вещества и других восстановленных соединений приводит к смещению процессов, протекающих за счёт анаэробного окисления органического вещества, ближе к поверхности отложений (Орехова и Коновалов, 2018а ; Orekhova & Kononov, 2018b). Таким образом, в верхнем слое донных осадков преобладающими становятся восстановленные формы азота, металлов и серы, формируются бескислородные зоны с анаэробными условиями. Увеличение содержания восстановленных соединений, в частности концентрации сульфидов, приводит к увеличению их потока в придонный слой воды (Orekhova & Kononov, 2018b). В этом случае анаэробные условия формируются не только в донных отложениях, но и в водной толще (Берлинский и др., 2003 ; Meysman et al., 2003). Подобные изменения физико-химических характеристик экосистем отражаются на их экологическом статусе и, как результат, на социально-экономической привлекательности региона.

Для изучения экологического состояния прибрежных акваторий г. Севастополя были выбраны бухты Казачья и Круглая, имеющие высокую социально-рекреационную значимость для региона.

Более ранние исследования этих бухт (Заика и др., 2011 ; Мионов и др., 2002, 2003 ; Мионова и Панкеева, 2019 ; Санитарно-биологические исследования, 2018 ; Соловьёва и др., 2019) показали, что за последние 10–15 лет в их экосистемах произошли изменения вследствие увеличения антропогенного прессинга. Между тем комплексных работ по изучению накопления органических веществ в донных отложениях, а также исследований окислительно-восстановительных условий среды (в том числе дефицита кислорода) в них и их влияния на бентосное сообщество не проводили. Данные работы актуальны для региона в связи с увеличением количества источников и потока органических веществ, поступающих в акватории бухт.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные анализа придонного слоя вод, поровых вод и донных отложений, отобранных в двух бухтах в сентябре 2019 г.

Бухта Казачья расположена в юго-западной части Гераклейского полуострова (рис. 1) (Миронов и др., 2002 ; Овсянный и Орехова, 2019). Эта акватория характеризуется свободным водообменом с глубоководной частью моря и относится к числу объектов природно-заповедного фонда Севастопольского региона (Миронов и др., 2003). До недавнего времени она считалась одной из самых чистых в системе севастопольских бухт (Миронов и др., 2003). В настоящее время её побережье активно используют как рекреационную зону: в вершинной части бухты расположены песчано-галечные пляжи. Однако активная застройка берегов бухты и развитие новой селитебной зоны с соответствующей инфраструктурой, площадь и население которой с каждым годом растут, привели к значительному увеличению антропогенной нагрузки на её экосистему (Соловьёва и др., 2019).

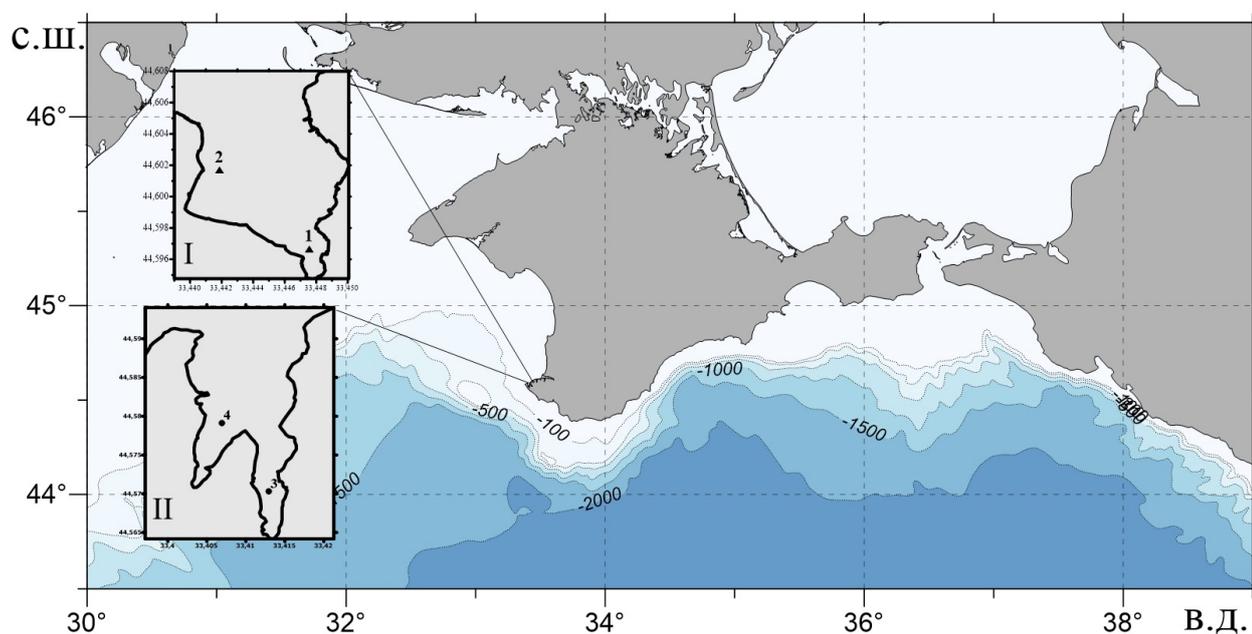


Рис. 1. Схема точек отбора проб в бухтах Севастопольского региона: I — бухта Круглая; II — бухта Казачья

Fig. 1. Scheme of sampling stations in the bays of the Sevastopol region: I, the Kruglaya Bay; II, the Kazachya Bay

Мелководная бухта Круглая расположена на северном побережье Гераклейского полуострова между Двойной и Стрелецкой бухтами (рис. 1); она относится к полуоткрытому типу (Миронова и Панкеева, 2019) с ограниченным водообменом (Заика и др., 2011). Воды бухты хорошо аэрированы в холодный период года за счёт своей динамики и вертикального конвективного перемешивания. Для тёплого периода из-за наличия сезонного термоклина, определяющего двухслойную структуру вод, характерны вертикальная стратификация вод и слабое вентилирование придонного слоя при относительно высокой температуре (Заика и др., 2011). Увеличение температуры способствует интенсивному потреблению кислорода при его вовлечении в различные биолого-химические процессы (Заика и др., 2011). Бухта Круглая также является районом рекреационного назначения с местами отдыха, городским пляжем и развлекательными центрами. При этом в неё выходит аварийный сток канализационных вод, в связи с чем в летний период

санитарно-эпидемиологические показатели часто не соответствуют нормам (Санитарно-биологические исследования, 2018). Интенсивная застройка микрорайона, обустройство пляжной зоны и увеличение числа маломерных судов на восточном берегу привели к возрастанию антропогенной нагрузки на экосистему бухты (Санитарно-биологические исследования, 2018). Всё это негативно отражается на её экологическом состоянии. Дополнительным источником поступления органического вещества и загрязняющих веществ в воды бухты вследствие водообмена с сопредельной акваторией могут являться прилегающие полузамкнутые бухты с многочисленными постоянно действующими, локальными, аварийными, несанкционированными выпусками сточных вод (Куфтаркова и др., 1999). Максимальная нагрузка на воды бухты приходится на летний период.

Пробы были отобраны водолазом трубками из оргстекла, герметично закрываемыми сверху и снизу. Глубина погружения трубки лимитировалась характером грунта. Отобранные колонки перемещали в строго вертикальном положении, что позволило сохранить тонкую структуру донных отложений и придонного слоя вод. В каждой исследуемой точке колонки донных отложений были отобраны в одной повторности. Для изучения бентосных сообществ в этом же месте отбирали пробы в двух повторностях с помощью ручного пробоотборника площадью 0,025 м². Температура воды в исследуемых образцах составляла +22...+24 °С.

В бухте Круглой колонки донных отложений были отобраны в кутовой части (ст. 1; N44.597°, E33.448°; рис. 1) и в районе выхода из бухты (ст. 2; N44.602°, E33.442°; рис. 1). Выбор точек отбора проб был обусловлен разными условиями осадконакопления и источниками поступления органического вещества. Мелководная (глубина отбора проб 0,5 м) кутовая часть бухты в наибольшей степени испытывает антропогенный прессинг, а вследствие удалённости от входа в бухту здесь достаточно часто развиваются застойные явления. Кроме того, в кутовой части бухты находятся источники загрязнения — стоки из ливневой канализации и постоянно действующие выпуски неочищенных бытовых сточных вод (Куфтаркова и др., 2008). Это способствует накоплению органического вещества и потреблению кислорода в донных отложениях и придонном слое вод. В районе выхода из бухты (ст. 2) глубина составляет 10 м, здесь расположен подводный береговой абразионный склон (Миронова и Панкеева, 2019). Активное гидродинамическое воздействие, особенности рельефа дна и отсутствие значимых и постоянных источников органического вещества способствуют насыщению придонного слоя вод и поверхности донных отложений кислородом в этом районе.

В бухте Казачьей пробы были отобраны в центральных частях восточного рукава (ст. 3; N44.570°, E33.413°; рис. 1) и западного — в бухте Солёной (ст. 4; N44.579°, E33.407°; рис. 1). Глубина отбора проб составила 3,5 и 13,6 м для ст. 3 и ст. 4 соответственно. Несмотря на отсутствие затруднённого водообмена (Миронов и др., 2003), эти районы подвержены значительному антропогенному воздействию вследствие плотного заселения берегов и расположения здесь объектов инфраструктуры (Овсяный и Орехова, 2019).

Для получения химического профиля поровых вод с высоким вертикальным разрешением (1–5 мм) использовали полярографический метод анализа с применением стеклянного Au/Hg микроэлектрода (Brendel & Luther, 1995; Orekhova & Konovalov, 2009). Метод позволяет количественно определять в поровых водах электрохимически активные соединения, в первую очередь кислород, сульфиды и другие восстановленные формы серы, восстановленные формы железа и марганца; ошибка метода не превышает 10 % (Orekhova & Konovalov, 2018b).

Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$; % сухой массы) в донных отложениях определяли кулонометрически на экспресс-анализаторе АН-7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений (Люцарев, 1986). Ошибка метода не превышает 10 % (около $\pm 0,2$ % от массы сухого вещества).

Расчёт потока кислорода на границе и в верхней части донных отложений выполняли по данным полярографического и геохимического анализа, используя уравнение для первого закона Фика с учётом градиента концентраций и молекулярной диффузии кислорода в поровых водах (Hyacinthe et al., 2001):

$$J = -\varphi D_s dC/dZ, \quad (1)$$

где J — поток, моль·(год⁻¹·м⁻²);

φ — пористость;

D_s — коэффициент молекулярной диффузии кислорода с учётом вязкости, м²·год⁻¹;

dC/dZ — градиент концентрации, моль·м⁻⁴.

Коэффициенты молекулярной диффузии кислорода в поровых водах взяты из (Meysman et al., 2003). При расчёте коэффициентов диффузии учитывали температуру придонного слоя воды, измеренную непосредственно в момент отбора проб.

С учётом высокой скорости седиментационных процессов в прибрежной зоне, короткого времени для протекания диагенетических процессов уплотнения донных отложений, высокой интенсивности внутригодовой динамики донных отложений, а также высокой скорости окислительно-восстановительных биогеохимических процессов, в расчёт не брали влияние адвективных потоков.

Бентосные пробы промывали через сито с диаметром ячеек 1 мм и фиксировали этиловым спиртом. Дальнейшую обработку фиксированного материала проводили в лабораторных условиях. Видовой состав устанавливали по (Определитель, 1968, 1969, 1972). Взвешивание двусторчатых моллюсков выполняли после их вскрытия и удаления фиксирующего раствора из мантийной полости. На каждой станции из суммарной бентосной пробы рассчитывали биомассу (г·м⁻²) и численность (экз·м⁻²) отдельного вида. Расчёт значений индекса разнообразия Шеннона (H') (использовали логарифм по основанию 2) и индекса Пиелу произвели в приложении Diverse пакета PRIMER-5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Высота колонки, отобранной в кутовой части бухты Круглой (ст. 1), составила 25 см. Осадок представлен заиленным песком серого и тёмно-серого цвета. Поверхность осадка в районе отбора проб была покрыта слоем растительности. Исходя из работ Мироновой и Панкеевой с соавторами (Миронова и Панкеева, 2019; Панкеева и др., 2019), можно предположить, что это сообщество из морских трав и зелёных водорослей, которые представлены преимущественно видами кладофор на илистых осадках.

Мелкодисперсный характер осадка и содержание органического вещества около 1,97 % способствовали активному расходованию кислорода. Так, в придонном слое вод наблюдалось 56%-ное насыщение кислородом, а непосредственно над поверхностью морских трав и на поверхности осадка значение снижалось до 19 % насыщения, что соответствует гипоксии (Зайка и др., 2011). В слое до 7 мм не было зафиксировано полярографически активных компонентов (Brendel & Luther, 1995; Orekhova & Konovalov, 2009), что может указывать на протекание в этом интервале глубин процессов с участием окисленных форм азота (Orekhova & Konovalov, 2009). Ниже появляется сероводород, его распределение неоднородно (рис. 2). В интервале глубин 8–30 мм концентрация сероводорода изменяется в пределах 9–31 мкМ. Далее следует интервал 32–40 мм, в котором содержание сероводорода ниже предела определения (3 мкМ) либо он отсутствует; потом — слой 42–140 мм, в котором концентрация сероводорода увеличивается с глубиной, достигая максимального значения 207 мкМ на 120 мм, и затем убывает. В интервале глубин 150–180 мм концентрация сероводорода постоянна и составляет 9 мкМ, а с 190 мм резко увеличивается, достигая 175 мкМ на 200 мм. Далее профилирование не выполняли.

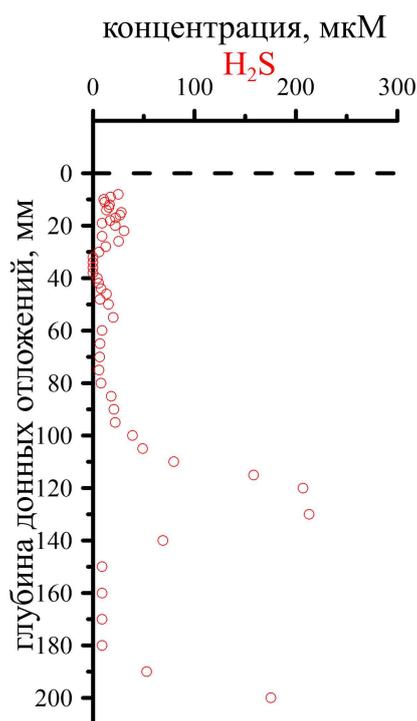


Рис. 2. Вертикальный профиль сероводорода в поровых водах донных отложений, отобранных в бухте Круглой (ст. 1)

Fig. 2. Vertical profile of hydrogen sulfide in pore waters of bottom sediments sampled in the Kruglaya Bay (st. 1)

С 1 до 20 мм не обнаружено полярографически активных компонентов (Orekhova & Kononov, 2009, 2018b), что позволяет предположить протекание биогеохимических процессов минерализации органического вещества преимущественно с участием нитратов/нитритов. Мозаичные сигналы, соответствующие восстановленному железу и марганцу с концентрацией около 2 и 3 мкМ (рис. 3a), могут указывать на протекание здесь также процессов с участием этих соединений. Ниже появляется сероводород (рис. 3a). С глубиной концентрация сульфидов изменяется в пределах 36–346 мкМ; другие компоненты не обнаружены.

Глубина отбора проб в бухте Солёной (ст. 4, рис. 1), расположенной в западном рукаве бухты Казачьей, составила 13,6 м. Высота колонки — 34 см, осадок был представлен преимущественно мелкодисперсной фракцией. Однако внешний вид отобранного осадка отличался от такового предыдущих: в верхнем 2-мм слое был обнаружен наилок, в интервале глубин 2–20 мм присутствовал серо-коричневый песок, а ниже — однородный тёмно-серый заиленный песок.

В придонном слое вод концентрация кислорода соответствует 97 % насыщения. На поверхности осадка концентрация кислорода снижается до 200 мкМ (80 % насыщения). В осадок он проникал до 4 мм (рис. 3b). С 5 мм появляется Fe(III); его интенсивность [аналитически концентрацию Fe(III) определить нельзя из-за образования коллоидных растворов (Brendel & Luther, 1995)] с глубиной увеличивается, достигая максимума на 9 мм, потом снижается; с 14 мм его сигнал исчезает. В слое 5–11 мм отмечены сигналы, соответствующие восстановленным формам железа и марганца. Концентрация Fe и Mn в среднем — 230 и 365 мкМ соответственно (рис. 3b). С 11 мм появляется сероводород, его концентрация составляет 82 мкМ; с глубиной она увеличивается до 942 мкМ. В распределении сероводорода можно выделить два «интервала глубин»: 12–110 мм (здесь концентрация сульфидов сначала увеличивается,

На ст. 2 (см. рис. 1) осадок представлен песком; высота отобранной колонки — 9 см. Хороший водообмен, особенности дна (Миронова и Панкеева, 2019) и отсутствие источников поступления органического вещества способствуют насыщению кислородом придонного слоя вод. В придонном слое вод и в верхнем слое осадка отмечено 100%-ное насыщение кислородом.

В центральной части восточного рукава бухты Казачьей (ст. 3, рис. 1) значительное преобладание илистого материала способствовало накоплению органического углерода (в настоящее время его концентрация — около 7 %). Высокое содержание органического вещества приводит к потреблению кислорода в придонном слое вод и на поверхности осадка на его окисление (Orekhova & Kononov, 2009). Концентрация кислорода в придонном слое вод (10 см над поверхностью осадка) соответствовала 65 % насыщения. Подобная концентрация кислорода при глубине отбора проб 3,5 м указывает на развитие дефицита кислорода.

На поверхности осадка концентрация кислорода снижается до 100 мкМ (40 % насыщения), ниже весь кислород исчерпан (рис. 3a).

достигая максимального значения (942 мкМ) на 70 мм, а потом снижается) и 120–200 мм (это слой незначительного роста и снижения концентрации сульфида, однако изменяется она в пределах 767–852 мкМ).

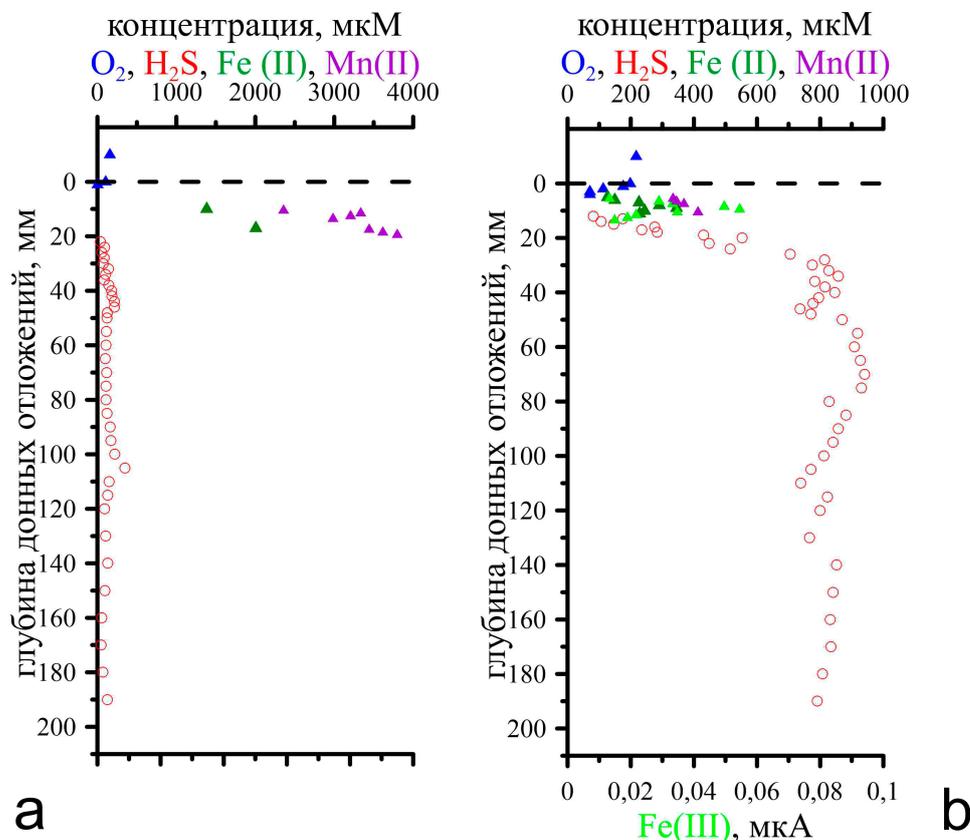


Рис. 3. Вертикальный профиль химических компонентов поровых вод донных отложений, отобранных на станциях 3 (а) и 4 (б) бухты Казачьей

Fig. 3. Vertical profile of the chemical composition of pore waters of bottom sediments sampled at stations 3 (a) and 4 (b) in the Kazachya Bay

На основании данных о концентрации кислорода в поверхностном (0–5 мм) слое осадка (поровых водах), а также сведений о геохимическом составе донных отложений был рассчитан поток кислорода на ст. 4; он составил $0,73 \text{ М}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Принимая в расчёт концентрацию кислорода в придонном слое вод (259 мкМ), можно сказать, что время полного исчерпания кислорода с учётом только биогеохимических процессов составляет около 5 месяцев.

В табл. 1 приведены данные о концентрации кислорода на поверхности осадка, глубине появления и концентрации сероводорода, количественных характеристиках бентосного сообщества в исследуемых акваториях. В табл. 2 дана характеристика макрозообентоса (численность, биомасса, индекс Шеннона, индекс Пиелу) бухт Круглой и Казачьей.

Максимальная численность макрозообентоса ($2480 \text{ экз}\cdot\text{м}^{-2}$) зарегистрирована в кутовой части бухты Круглой, в верхнем слое донных отложений которой отмечены условия гипоксии. На выходе из бухты при максимальной концентрации кислорода (238 мкМ) на поверхности отложений и при отсутствии сероводорода численность макрозообентоса была на порядок меньше ($360 \text{ экз}\cdot\text{м}^{-2}$) за счёт уменьшения обилия двустворчатых моллюсков, отсутствия брюхоногих, асцидий, насекомых и гарпактицид (табл. 2). В бухте Казачьей численность гидробионтов была существенно меньше; наименьшее значение ($40 \text{ экз}\cdot\text{м}^{-2}$) отмечено при минимальных концентрациях кислорода на поверхности донных отложений (табл. 1).

Таблица 1. Геохимические характеристики донных отложений и численности макрозообентоса
Table 1. Geochemical characteristics of bottom sediments and macrozoobenthos abundance

Станция	Концентрация кислорода на поверхности отложений, мкМ	Глубина появления сероводорода, мм	Средняя концентрация сероводорода в толще осадка \pm СКО, мкМ	Диапазон изменения концентрации сероводорода, мкМ	Численность макрозообентоса, экз. \cdot м ⁻²
Ст. 1 (бухта Круглая)	< 20	8	31 \pm 30	< ПО...213	2480
Ст. 2 (бухта Круглая)	238	–	–	–	360
Ст. 3 (бухта Казачья)	< 20	20	126 \pm 42	< ПО...346	40
Ст. 4 (бухта Казачья)	177	11	696 \pm 196	< ПО...941	80

Примечание: СКО — среднее квадратическое отклонение; < ПО — ниже предела определения (3 мкМ).

Note: СКО denotes standard deviation; < ПО is below the detection limit (3 μ M).

В бухте Круглой по численности и биомассе преобладали двустворчатые моллюски. На обеих станциях зарегистрирован *Mytilaster lineatus*, причём на ст. 2 он являлся доминирующим по численности видом среди двустворчатых моллюсков (табл. 2). По биомассе на данной станции преобладала *Chamelea gallina*, которая на ст. 1 не обнаружена. Брюхоногие моллюски не зафиксированы. В кутовой части бухты (ст. 1) доминирующим видом по численности и биомассе являлся моллюск-детритофаг *Abra segmentum*. Одинаковые показатели численности отмечены у моллюсков-фильтраторов митилястера и церастодермы *Cerastoderma glaucum*. Брюхоногие моллюски представлены двумя видами — *Tritia neritea* и *Tritia pellucida*.

Таблица 2. Характеристика макрозообентоса (численность, биомасса, индекс Шеннона, индекс Пиелу) исследуемой акватории

Table 2. Macrozoobenthos characteristics (abundance, biomass, Shannon index, and Pielou evenness index) of the water area studied

Класс	Вид	Ст. 1		Ст. 2		Ст. 3		Ст. 4	
		N	M	N	M	N	M	N	M
Bivalvia	<i>Chamelea gallina</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	40	7,52	–	–	–	–
	<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)	80	0,012	120	0,04	–	–	–	–
	<i>Abra segmentum</i> (Récluz, 1843)	1640	220,8	–	–	–	–	–	–
	<i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguère, 1789)	80	63,6	–	–	–	–	–	–
	<i>Lucinella divaricata</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	–	–	–	–	40	0,012
Gastropoda	<i>Tritia neritea</i> (Linnaeus, 1758)	40	6,68	–	–	–	–	–	–
	<i>Tritia pellucida</i> (Risso, 1826)	80	33,44	–	–	–	–	–	–

Продолжение на следующей странице...

Класс	Вид	Ст. 1		Ст. 2		Ст. 3		Ст. 4	
		N	M	N	M	N	M	N	M
Crustacea	<i>Ampelisca diadema</i> (Costa, 1853)	–	–	40	0,32	–	–	–	–
Insecta	<i>Chironomus</i> sp.	40	0,016	–	–	–	–	–	–
Наррактиоида		40	0,004	–	–	–	–	–	–
Polychaeta	<i>Capitella capitata</i> (Fabricius, 1780)	40	0,008	–	–	–	–	–	–
	<i>Heteromastus filiformis</i> (Claparède, 1864)	40	0,004	–	–	40	0,008	–	–
	<i>Notomastus lineatus</i> (Claparède, 1863)	40	0,004	–	–	–	–	–	–
	<i>Nephtys hombergii</i> Savigny in Lamarck, 1818	–	–	–	–	–	–	40	3,12
	<i>Cirriformia tentaculata</i> (Montagu, 1808)	–	–	160	3,04	–	–	–	–
	<i>Glycera alba</i> (O. F. Müller, 1776)	40	1,56	–	–	–	–	–	–
Ascidiaacea		320	17,64	–	–	–	–	–	–
Всего		2480	343,77	360	10,88	40	0,008	80	3,132
Индекс Шеннона (по log ₂)		1,93	1,56	1,75	1,06	–	–	1,0	0,04
Индекс выровненности Пиелу		0,46	0,39	0,88	0,53	–	–	1,0	0,04

Примечание: N — численность, экз.·м⁻²; M — биомасса, г·м⁻².

Note: N denotes abundance, ind.·m⁻²; M, biomass, g·m⁻².

В кутовой части бухты также зарегистрированы асцидии и четыре вида полихет с одинаковыми показателями численности: *Capitella capitata*, *Heteromastus filiformis*, *Notomastus lineatus* и доминирующий по биомассе *Glycera alba*. На выходе из бухты асцидии отсутствовали, а полихеты были представлены одним видом — *Cirriformia tentaculata*.

Результаты наших исследований демонстрируют низкие значения показателей видового разнообразия и численности моллюсков в бухте Казачьей. На ст. 4 присутствовал только двустворчатый моллюск *Lucinella divaricata*, брюхоногие моллюски не отмечены. Высокие показатели биомассы в бухте Казачьей зафиксированы у полихет (табл. 2), представленных двумя одинаковыми по численности видами — *Heteromastus filiformis* на ст. 3 и *Nephtys hombergii* на ст. 4. На ст. 3 другие представители бентосной фауны не зарегистрированы.

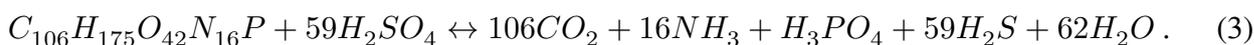
ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты геохимического анализа дают основу для понимания протекающих биогеохимических процессов (Волков, 1973; Митропольский и др., 1982; Розанов и Волков, 2009; Химия океана, 1979; Orekhova & Kononov, 2009). Неотъемлемой частью донных отложений являются поровые воды (Розанов и Волков, 2009). Изучение их характеристик позволяет оценить окислительно-восстановительные и кислотнo-основные свойства донных отложений, содержание подвижных форм металлов, возможность их связывания и перехода в твёрдую форму отложений либо в водную толщу (Куфтаркова и др., 1999; Миронов и др., 2003).

По нашим данным и по данным Соловьёвой с соавторами (2019), среднее содержание органического углерода в донных отложениях бухты Круглой составляет 1,67–1,97 %, что более чем в 2 раза превышает среднюю концентрацию органического углерода в новочерноморских отложениях (0,71 %) и в донных осадках черноморского шельфа (Митропольский и др., 1982). Такое содержание органического углерода в донных отложениях способствует активному потреблению кислорода и развитию его дефицита.

Существенное увеличение антропогенной нагрузки на акваторию бухты Казачьей и на обрамляющие её береговые территории привело к возрастанию содержания органического углерода. По данным (Овсяный и Орехова, 2019), концентрация $C_{\text{орг}}$ в 2015 г. составляла в среднем 2,74 %, что на 35 % выше значения 2002 г. К настоящему времени содержание $C_{\text{орг}}$ — около 5,8 % (диапазон изменения — 4,32–7,86 %), что сопоставимо с концентрацией органического углерода в донных отложениях Севастопольской бухты (район Инкермана, бухта Южная) — наиболее антропогенно нагруженной акватории Севастопольского региона (Orekhova et al., 2019b).

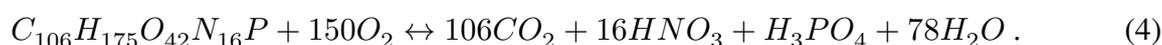
По полученным данным установлено, что в донных отложениях бухты Круглой основные процессы минерализации органического вещества, последовательность которых обусловлена термодинамическими характеристиками системы и подробно описана в работе (Orekhova & Kononov, 2009), протекали с участием окисленных форм азота (уравнение 2) в верхнем 7-мм слое и сульфатов (уравнение 3) — в слое 8–200 мм в кутовой её части (ст. 1):



Этому способствовали наличие постоянного источника органического вещества, незначительная глубина, высокая температура придонного слоя вод (+24 °C) и затруднённый водообмен.

Полученное распределение сероводорода может свидетельствовать о неоднородном накоплении органического вещества вследствие изменения уровня нагрузки в различные периоды, переотложения в результате взмучивания и пр.

В районе выхода из бухты (ст. 2) отсутствие постоянного источника органического вещества и динамика вод (Зайка и др., 2011 ; Куфтаркова и др., 2008) способствовали тому, что в исследуемый период кислорода было достаточно для окисления всего органического вещества. В верхнем слое донных отложений (0–20 мм) зафиксированы аэробные условия, а основные процессы окисления органического вещества протекали с участием кислорода (уравнение 4) (Orekhova & Kononov, 2009):



Химический состав поровых вод и геохимические характеристики донных отложений, в том числе накопление органического углерода, а также циркуляция вод отражаются на характеристиках бентосных сообществ. Известно, что бентосное разнообразие в значительной степени зависит от окислительно-восстановительных условий среды, наличия кислорода/сероводорода (Зайка и др., 2011) и содержания органического вещества.

Несмотря на состояние, соответствующее гипоксии, в придонном слое вод и на незначительное содержание кислорода (< 20 мкМ) на поверхности донных отложений, кутовая часть бухты Круглой характеризовалась наибольшим видовым разнообразием макрозообентоса. Кроме двусторчатых моллюсков, отмечены полихеты и асцидии. Вместе с тем два из пяти зафиксированных видов моллюсков в бухте Круглой — абра и церастодерма — являются устойчивыми к органическому загрязнению (Тихонова, 2010 ; Тихонова и Рубцова, 2012). Данный факт также

указывает на достаточно высокий уровень органического загрязнения. Снижение количества макрозообентоса на ст. 2 обусловлено геолого-геоморфологическим строением подводного рельефа [он представляет собой подводный береговой абразионный склон, сложенный псефитовыми отложениями с выходами коренных пород (Миронова и Панкеева, 2019)] и достаточно интенсивной циркуляцией вод в этом районе (Заика и др., 2011). Однако здесь тоже встречаются полихеты, при этом отмечены снижение количества и биомассы (почти на порядок) двустворчатых моллюсков, отсутствие брюхоногих моллюсков и присутствие ракообразных. Зарегистрированная на выходе из бухты полихета *Cirriiformia tentaculata* менее устойчива к органическому загрязнению, чем ранее отмеченные на других участках бухты. Их обнаруживают в зонах, которые находятся на некотором удалении от источника поступления органических веществ, в так называемых смешанных зонах (Dean, 2008). Отсутствие асцидий в бухте Круглой является характерным для данной акватории: в период с 2000 по 2009 г. они также не были обнаружены (Миронов и др., 2003; Санитарно-биологические исследования, 2009).

Таким образом, наибольшее разнообразие макрозообентоса в бухте Круглой приурочено к вершинной станции с илесто-песчаным донным осадком (ст. 1). По его составу этот район всегда существенно отличался от остальных участков побережья (Миронов и др., 2003). Разнообразие и количественные показатели макробентоса на песчано-галечных грунтах (ст. 2) ниже, чем в устьевой части, что также соответствует данным более ранних исследований (Миронов и др., 2003). Видовой состав на станциях соответствует таковому в более ранние периоды.

Акватория бухты Круглой характеризуется колебаниями численности и биомассы и сменой преобладающего вида. Так, на ст. 1 в 1999 и 2002–2004 гг. доминировал моллюск *C. glaucum*, в 2000 и 2004 гг. — *H. acuta*. В последний период в составе макрозообентоса зарегистрировано разнообразие ракообразных и полихет (Миронов и др., 2003). В 2001 г. на данном участке было выявлено резкое снижение обилия видов, при этом среди четырёх отмеченных видов доминировали полихеты (Миронов и др., 2003). В то время здесь наблюдалось значительное количество молоди *M. lineatus* (Миронов и др., 2003), как и в период настоящего исследования. Ранее отмечено, что на ст. 1 степень загрязнения морских грунтов нефтепродуктами ещё недостаточно высока, чтобы оказывать угнетающее воздействие на чувствительные к данному поллютанту виды (Миронов и др., 2003). Помимо загрязняющих веществ, существенное влияние на формирование сообщества оказывает волновое воздействие, однако в исследуемых точках на ст. 2 оно менее значительно, а на ст. 1 оно практически отсутствует. Последнее благоприятно сказывается на развитии малакофауны (в том числе фильтраторов), а накопление в донных отложениях иловых частиц способствует увеличению разнообразия и численности детритофагов (Миронов и др., 2003).

В бухте Казачьей, несмотря на лучший водообмен (Миронов и др., 2002), чем в бухте Круглой, наличие постоянно действующих источников органического вещества привело к значительному его накоплению. Высокие концентрации органического углерода (4,32–7,86 %) обуславливают то, что кислород не является основным компонентом при его окислении, а в донных отложениях преобладают анаэробные условия. Здесь концентрация сероводорода в донных отложениях значительно выше, чем других бухтах Севастопольского региона (Орехова и др., 2019a; Orekhova & Kononov, 2018b). Между тем различные условия осадконакопления и источники органического углерода определяют то, что на ст. 3 в верхнем слое отложений зарегистрированы субкислородные условия, а основные биогеохимические процессы протекают с участием нитратов/нитритов (уравнение 2) в 20-мм слое отложений. Ниже протекает сульфатредукция, одним из продуктов которой является сероводород (уравнение 3). В поровых водах донных отложений ст. 4 отмечены максимальные концентрации сероводорода (около 900 мкМ), однако в верхнем 4-мм слое зарегистрированы аэробные условия, что обусловлено, вероятно, поступлением «свежих» вод, обогащённых кислородом, за счёт вентиляции. Ниже преобладают

анаэробные условия, которые развились в результате протекания сульфатредукции (уравнение 3). Также для района бухты Казачьей отмечено присутствие восстановленных форм железа и марганца (рис. 3) в верхнем слое (0–20 мм), что может быть связано с локальным их поступлением, предшествующим отбору проб.

В донных отложениях бухты Казачьей дефицит кислорода в верхнем слое отложений и высокие концентрации сероводорода в толще донных отложений привели к тому, что бентосное сообщество не отличалось высокой численностью и разнообразием, а преобладающим классом были полихеты (табл. 2). По мнению (Миронов и др., 2002 ; Belan & Moshchenko, 2009), *Capitella capitata* — признанный позитивный индикатор органического загрязнения, устойчивый к дефициту кислорода и достигающий максимального обилия при сильном загрязнении среды; *Heteromastus filiformis* является индикатором эвтрофных вод (Лосовская, 2011).

За последние годы в сообществе макрозообентоса рыхлых грунтов бухты Казачьей отмечены изменения. Так, по индексу AMBI (AZTI Marine Biotic Index), в 2003 и 2009 гг. на большинстве исследуемых станций в бухте регистрировали «нечтупшенное» состояние бентосных сообществ, а в 2006 г. — «слабо нарушенное» (Тихонова и Алёмов, 2012). На песчаных грунтах было обнаружено 13 таксонов *Gastropoda* и 11 таксонов *Bivalvia*. Доля брюхоногих моллюсков составляла 55 и 75 % в 2011–2012 и 2018–2019 гг. соответственно, доля двустворок — 45 и 25 %. В 2018–2019 гг. произошло некоторое снижение численности *Mollusca*: *Gastropoda* — в два раза, *Bivalvia* — в четыре (Макаров, 2020). По численности доминировали брюхоногие моллюски *Hydrobia acuta* (Drapnaud, 1805) — 55 и 70 % в 2011–2012 и 2018–2019 гг. соответственно; по биомассе преобладали двустворчатые моллюски *Cerastoderma glaucum* (Bruguère, 1789) — 54 %. Средняя численность моллюсков уменьшилась в среднем в три раза по сравнению со значениями 2011–2012 гг., но при этом видовой состав был характерным для рыхлых песчаных грунтов (Макаров, 2020). Эти данные отличаются от показателей, полученных в данном исследовании. Выявленные различия можно связать с характером донных отложений (рыхлые песчаные грунты и илистые отложения), глубиной пробоотбора (прибрежные пробы с глубины до 0,1 м и пробы с более чем 13 м), мозаичностью распределения бентосного сообщества и разным кислородным режимом. Подобные перестройки в бентосном сообществе отмечены не только на рыхлых грунтах бухты Казачьей, но и в эпифитоне морской травы рода *Zostera*. Количество видов в 1970–1971 и 2006–2007 гг. было одинаковым — 13. Видовой состав в указанный период практически не отличался. В 2006–2007 гг. вместо *Steromphala divaricata* (Linnaeus, 1758) зарегистрирован вид из этого же рода *Steromphala adriatica* (Philippi, 1844), а вместо молодежи *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 — близкородственный вид из семейства *Mytilidae* *M. lineatus*. Однако средняя численность и средняя биомасса моллюсков значительно сократились. Так, в 1970–1971 гг. средняя численность *Mollusca* составила 6182 экз.·кг⁻¹, а в 2006–2007 гг. — всего 257 экз.·кг⁻¹, то есть уменьшилась почти в 25 раз. Средняя биомасса в начале 1970-х гг. была 44,2 г·кг⁻¹, а в начале 2000-х гг. — 8 г·кг⁻¹, то есть сократилась более чем в 5 раз. Кроме того, произошла смена доминирующего вида. По численности и биомассе в начале 2000-х гг. преобладала *Tricolia pullus* (Linnaeus, 1758). Между тем в начале 1970-х гг. явно доминировала *Rissoa membranacea* (J. Adams, 1800), а триколия была малочисленным видом (Макаров, 2018).

Можно предположить, что происходящие в сообществе макрозообентоса бухты Казачьей изменения обусловлены не только антропогенным фактором (развитием гипоксических условий за счёт увеличения в последние годы антропогенной нагрузки на акваторию вследствие массовой застройки побережья бухты), но и характерными для данного района многолетними флуктуациями численности самих видов (Макаров, 2018), а также активной динамикой вод в зимний период.

Кроме того, существует градация принадлежности того или иного вида к определённой группе по чувствительности к загрязнению — чувствительные, индифферентные и устойчивые виды (Миронов и др., 2003). К чувствительным отнесены виды, которые встречались только в донных отложениях I–III уровней загрязнения [данные уровни определены по содержанию в них хлороформэкстрагируемых веществ (Миронов и др., 2003)], либо те, для которых характерно выраженное снижение показателя встречаемости при возрастании уровня загрязнения донных осадков. Виды макрозообентоса, для которых характерна обратная тенденция (увеличение показателей встречаемости при возрастании уровня загрязнения), отнесены к экологической группе устойчивых. По данной шкале, виды, обнаруженные в акватории бухты Круглой, относятся к устойчивым (*A. segmentum*, *C. glaucum*, *T. neritea*, *T. pellucida* и *C. capitata*), чувствительным (*C. gallina* и *A. diadema*) и индифферентным (*M. lineatus* и *H. filiformis*). Для бухты Казачьей зарегистрированы только один чувствительный вид (*L. divaricata*) и два индифферентных (*H. filiformis* и *N. hombergii*).

Рассчитанные индексы Шеннона по численности в бухте Круглой составили 1,93 и 1,75 (табл. 2). Между тем в бухте Казачьей показатели были гораздо ниже — 0 и 1,0. Сравнение полученных значений индексов с таковыми предыдущих исследований указывает на то, что в бухте Круглой они соизмеримы: ранее индекс варьировал от 1,14 до 2,14 (Миронов и др., 2003). В бухте Казачьей индекс в настоящее время значительно ниже. Ранее значение составляло в среднем 2,04–2,41, а на отдельных станциях достигало 3,47 (Миронов и др., 2003). Полученные результаты могут быть связаны с мозаичностью распределения сообщества макрозообентоса по акватории бухты (в вершинной части показатели индекса ниже), с малым количеством проанализированных проб, а также с изменением условий обитания. Согласно классификации состояния сообщества макрозообентоса для рыхлых грунтов по индексу Шеннона (Water Framework Directive, 2009), для бухты Казачьей его можно оценить как бедное (bad), а для бухты Круглой — как умеренное (moderate). Индексы Шеннона по биомассе в бухтах являлись низкими: значения не превышали 1,56, а на некоторых станциях были близки к 0 (табл. 2). Индекс выровненности Пиелу был достаточно низким в бухте Круглой, что указывает на доминирование отдельных видов в бентосном сообществе (табл. 2). В бухте Казачьей отмечен один вид (ст. 3), что делает расчёт индекса невозможным. На ст. 4 индекс Пиелу равен 1.

Анализ видового разнообразия в исследуемых акваториях указывает, что на формирование бентосного сообщества, наряду с концентрацией кислорода, сероводорода и органического вещества в донных отложениях бухты, влияют также условия обитания гидробионтов — наличие кормовой базы, скорость течений, интенсивность поступления органических веществ, гранулометрический состав донных осадков, волновые процессы (Нейман и Карпинский, 2013).

Рассчитанные величины потока кислорода ($0,73 \text{ М} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) на границе вода — донные отложения и время развития гипоксии в придонном слое вод в районе бухты Солёной (ст. 4) указывают на то, что при сохранении наблюдаемого уровня антропогенной нагрузки при отсутствии динамики вод в этом районе условия аноксии в придонном слое вод могут развиваться за 5 месяцев. Это, несомненно, приведёт к появлению восстановленных форм компонентов (металлов, биогенных элементов и серы) в поверхностном слое донных отложений и ухудшит условия обитания бентосных сообществ.

Заключение. Стратификация водной толщи за счёт ограниченного водообмена, высокая температура придонного слоя вод, сопровождающаяся снижением растворимости кислорода, мелкодисперсный характер донных отложений и высокое содержание органического углерода (до 7 % в донных отложениях бухты Казачьей и до 2 % в донных отложениях бухты Круглой) способствуют тому, что скорость потребления кислорода на окисление органического вещества

превышает скорость его поступления. Это сопровождается развитием зон дефицита кислорода на поверхности донных отложений и появлением восстановленных форм соединений, в частности сероводорода, в их толще.

В верхнем слое донных отложений исследуемых районов преимущественно преобладают субкислородные условия, ниже — анаэробные. Это привело к тому, что основными формами макрозообентоса стали виды, толерантные к дефициту кислорода и загрязнению органическими веществами. Так, на исследованных участках бухты Казачьей присутствовали только полихеты. Максимальные концентрации сероводорода (до 900 мкМ) в донных отложениях бухты Солёной (бухта Казачья) обусловлены, вероятно, наличием в этом районе дополнительного источника органического вещества. Рассчитанное время полного исчерпания кислорода в верхнем слое донных отложений (где он был зафиксирован) с учётом только биогеохимических процессов на этой станции — около 5 месяцев.

Видовое разнообразие бентосного сообщества в донных отложениях исследуемых бухт свидетельствует о том, что определяющими факторами в его формировании являются не только содержание кислорода, сероводорода и органического вещества в донных осадках, но и наличие кормовой базы, скорость течений, интенсивность поступления органических веществ, гранулометрический состав донных осадков, волновые процессы и т. д.

Таким образом, можно предположить, что отсутствие системного и экологически рационального подхода при эксплуатации бухт Круглой и Казачьей привело к значительному их загрязнению, что способствовало ухудшению условий существования бентосных сообществ. Развитие условий гипоксии на поверхности отложений и появление сероводорода в верхнем их слое могут указывать на то, что экосистемы бухт Круглой и Казачьей находятся в стадии деградации.

Дальнейшая их эксплуатация без снижения уровня антропогенной нагрузки приведёт к появлению и распространению зон экологического риска. Это снизит рекреационную и социально-экономическую привлекательность данных районов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ МГИ № АААА-А18-118012690345-0 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Чёрного и Азовского морей» (химический анализ донных отложений) и проекта РФФИ № 18-45-920008 «Оценка влияния накопления органического вещества в донных отложениях на изменение окислительно-восстановительных условий бухт Севастопольского региона» (отбор проб и анализ данных).

Благодарность. Автор выражает благодарность м. н. с. отдела морской санитарной гидробиологии ФИЦ ИнБЮМ Т. В. Витер за помощь в определении видового состава бентосных моллюсков и в расчёте основных индексов, а также с. н. с. отдела морской санитарной гидробиологии ФИЦ ИнБЮМ к. б. н. Е. А. Тихоновой — за помощь и профессиональную консультацию при обсуждении полученных результатов по видовому составу и распределению бентосных организмов в бухтах Круглой и Казачьей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Берлинский Н. А., Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И. Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Чёрного моря // *Экология моря*. 2003. Вып. 63. С. 17–22. [Berlinsky N. A., Garkavaya G. P., Bogatova J. I. Anthropogenic eutrophication problems and hypoxia development in the northwestern part of the Black Sea. *Ekologiya morya*, 2003, iss. 63, pp. 17–22. (in Russ.)]
2. Волков И. И. Химические элементы в толще глубоководных осадков Чёрного моря // *Исследования по химии моря*. Москва : Наука, 1973. С. 148–171. (Труды Института океанологии им. П. П. Ширшова ; т. 63). [Volkov I. I. Khimicheskie elementy v tolshche glubokovodnykh osadkov Chernogo morya. In: *Issledovaniya po khimii morya*. Moscow : Nauka, 1973, pp. 148–171. (Trudy Instituta okeanologii im. P. P. Shirshova ; vol. 63). (in Russ.)]

3. Заика В. Е., Коновалов С. К., Сергеева Н. Г. Локальные и сезонные явления гипоксии на дне сева­стопольских бухт и их влияние на макро­бентос // *Морской экологический журнал*. 2011. Т. 10, № 3. С. 15–25. [Zaika V. E., Konovalov S. K., Sergeeva N. G. The events of local and seasonal hypoxia at the bottom of the Sevastopol bays and their influence on macrobenthos. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2011, vol. 10, no. 3, pp. 15–25. (in Russ.)]
4. Игнатъева О. Г., Овсяный Е. И., Романов А. С., Коновалов С. К., Орехова Н. А. Оценка состояния карбонатной системы вод и изменения содержания органического углерода в донных осадках Севастопольской бухты по данным наблюдений за 1998–2005 годы // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 2. С. 57–66. [Ignat'yeva O. G., Ovsyanyi E. I., Romanov A. S., Konovalov S. K., Orekhova N. A. Analysis of state of the carbonate system of waters and variations of the content of organic carbon in bottom sediments of the Sevastopol Bay in 1998–2005. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2008, no. 2, pp. 57–66. (in Russ.)]
5. Куфтаркова Е. А., Ковригина Н. П., Родионова Н. Ю. Гидрохимический режим района, прилегающего к бухте Омега, и факторы, его формирующие // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа* : сб. науч. тр. / Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь, 1999. С. 175–189. [Kuftarkova E. A., Kovrigina N. P., Rodionova N. Yu. Gidrokhimicheskii rezhim raiona, privileyushchego k bukhte Omega, i faktory, ego formiruyushchie. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* : sb. nauch. tr. / Mor. gidrofiz. in-t. Sevastopol, 1999, pp. 175–189. (in Russ.)]
6. Куфтаркова Е. А., Родионова Н. Ю., Губанов В. И., Бобко Н. И. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья // *Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии*. 2008. № 46. С. 110–117. [Kuftarkova E. A., Rodionova N. Yu., Gubanov V. I., Bobko N. I. Hydrochemical characteristics of several bays of Sevastopol coast. *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaistva i okeanografii*, 2008. no. 46, pp. 110–117. (in Russ.)]
7. Лосовская Г. В. Об индикаторных и толерантных видах полихет (на примере Северо-Западной части Чёрного моря) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. Вып. 25, т. 1. С. 327–334. [Losovskaya G. V. On indicator and tolerant species of polychaetes (in the northwestern Black Sea). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2011, iss. 25, vol. 1, pp. 327–334. (in Russ.)]
8. Люцарев С. В. Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // *Океанология*. 1986. Т. 26, № 4. С. 704–708. [Ljutsarev S. V. The determination of organic carbon in the sea bottom sediments by means of dry oxidation. *Okeanologiya*, 1986, vol. 26, no. 4, pp. 704–708. (in Russ.)]
9. Макаров М. В. Таксоцен Mollusca в эпи­фитоне морской травы *Zostera* sp. в акватории бухты Казачья (Чёрное море) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 3. С. 92–97. [Makarov M. V. The taxon of molluscs in epiphyton marine grass *Zostera* sp. in the Kazachya Bay (the Black Sea). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2018, no. 3, pp. 92–97. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-92-97>
10. Макаров М. В. Современное состояние малакофауны рыхлых грунтов в вершинной части бухты Казачьей (Чёрное море) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 1. С. 119–130. [Makarov M. V. The current state of malacofauna at soft bottoms in the Kazachya Bay head (the Black Sea). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2020, no. 1, pp. 119–130. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-119-130>
11. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. Экологическая характеристика бухты Казачьей (Черное море) // *Экология моря*. 2002. Вып. 61. С. 85–89. [Mironov O. G., Kirukhina L. N., Alyomov S. V. Ecological characteristic of Kazachya Bay (the Black Sea). *Ekologiya morya*, 2002, iss. 61, pp. 85–89. (in Russ.)]

12. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. *Санитарно-биологические аспекты экологии сева­стопольских бухт в XX веке*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. [Mironov O. G., Kirjukhina L. N., Alyomov S. V. *Sanitary-Biological Aspects of the Sevastopol Bays Ecology in XX Century*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2003, 185 p. (in Russ.)]
13. Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Пространственное распределение запасов макрофитов в бухте Круглой (Чёрное море) // *Экосистемы*. 2019. Вып. 19 (49). С. 16–26. [Mironova N. V., Pankeeva T. V. The spatial distribution of stock of macrophytes in Kruglaya Bay (the Black Sea). *Ekosistemy*, 2019, iss. 19 (49), pp. 16–26. (in Russ.)]
14. Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И. *Геохимия Чёрного моря*. Киев : Наукова думка, 1982. 144 с. [Mitropol'skii A. Yu., Bezborodov A. A., Ovsyanyi E. I. *Geokhimiya Chernogo morya*. Kyiv : Naukova dumka, 1982, 144 p. (in Russ.)]
15. Нейман А. А., Карпинский М. Г. Влияние на бентос трофических отношений в шельфовом сообществе: трофическая структура и воздействие выедания // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2013. Т. 6, № 4. С. 368–387. [Neyman A. A., Karpinsky M. G. Influence of trophic relations in the shelf communities on benthos: Trophic structure and the effects of grazing pressure. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2013, vol. 6, iss. 4, pp. 368–387. (in Russ.)]
16. Овсяный Е. И., Орехова Н. А. Накопление органического вещества в донных отложениях бухты Казачья (Чёрное море) как следствие антропогенной нагрузки // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 5. С. 85–93. [Ovsyanyi E. I., Orekhova N. A. Accumulation of organic carbon in bottom sediments of the Kazach'ya Bay (the Black Sea) resulting from anthropogenic load. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 5, pp. 85–93. (in Russ.)]
17. Орехова Н. А., Овсяный Е. И., Тихонова Е. А. Органическое вещество и окислительно-восстановительные условия в донных отложениях Балаклавской бухты // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2019а. Т. 5 (71), № 3. С. 49–64. [Orekhova N. A., Ovsyanyi E. I., Tikhonova E. A. Organic carbon and redox conditions in bottom sediments of the Balaklava Bay. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, 2019a, vol. 5 (71), no. 3, pp. 49–64. (in Russ.)]
18. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сероводород в верхнем слое донных отложений Чёрного моря // *Система Чёрного моря*. Москва : Научный мир, 2018а. С. 542–559. [Orekhova N. A., Konovalov S. K. Oxygen and hydrogen sulfide in the upper layer of the Black Sea bottom sediments. In: *The Black Sea System*. Moscow : Nauchnyi mir, 2018a, pp. 542–559. (in Russ.)]
19. *Определитель фауны Чёрного и Азовского морей. Свободноживущие беспозвоночные*. Киев : Наукова думка, 1968. Т. 1. 437 с. [Opre­delitel' fauny Chernogo i Azovskogo morei. Svobodnoz­hivushchie bespozvonochnye. Kyiv : Naukova dumka, 1968, vol. 1, 437 p. (in Russ.)]
20. *Определитель фауны Чёрного и Азовского морей. Свободноживущие беспозвоночные*. Киев : Наукова думка, 1969. Т. 2. 536 с. [Opre­delitel' fauny Chernogo i Azovskogo morei. Svobodnoz­hivushchie bespozvonochnye. Kyiv : Naukova dumka, 1969, vol. 2, 536 p. (in Russ.)]
21. *Определитель фауны Чёрного и Азовского морей. Свободноживущие беспозвоночные*. Киев : Наукова думка, 1972. Т. 3. 340 с. [Opre­delitel' fauny Chernogo i Azovskogo morei. Svobodnoz­hivushchie bespozvonochnye. Kyiv : Naukova dumka, 1972, vol. 3, 340 p. (in Russ.)]
22. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков Б. А. Картографирование донной растительности бухты Круглая (г. Севастополь, Чёрное море) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. Вып. 3. С. 61–71. [Pankeeva T. V., Mironova N. V., Novikov B. A. Mapping of bottom vegetation of Kruglaya Bay (the Black Sea, Sevastopol). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2019, iss. 3, pp. 61–71. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-61-71>
23. Розанов А. Г., Волков И. И. Донные осадки Канда­лакшского залива Белого моря: марганцевый феномен // *Геохимия*. 2009. № 10. С. 1067–1085. [Rozanov A. G., Volkov I. I. Bottom sedi­ments of Kandalaksha Bay in the White Sea:

- The phenomenon of Mn. *Geokhimiya*, 2009, no. 10, pp. 1067–1085. (in Russ.)]
24. Санитарно-биологические исследования в прибрежной акватории региона Севастополя / под ред. О. Г. Миронова ; ИнБЮМ НАН Украины. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 192 с. [*Sanitary-Biological Investigations in Coastal Area of Sevastopol Region* / O. G. Mironov (Ed.) ; InBYuM NAN Ukrainy. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2009, 192 p. (in Russ.)]
 25. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / под ред. О. Г. Миронова, С. В. Алёмова ; Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН. Симферополь : АРИАЛ, 2018. 276 с. [*Sanitary and Biological Studies of the South-Western Crimea Coastal Waters at the Beginning of XXI Century* / O. G. Mironov, S. V. Alyomov (Eds) ; Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS. Simferopol : ARIAL, 2018, 276 p. (in Russ.)]
 26. Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Клименко Т. Л., Скрыпник Г. В., Вотинова Т. В. Органические вещества донных отложений в условиях урбанизации побережья // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 2. С. 234–242. [Soloveva O. V., Tikhonova E. A., Klimentko T. L., Skrupnik G. V., Votina T. V. Organic substances of sea bottom sediments in conditions of the coast urbanization (for example Kazachiya Bay, the Black Sea). *Okeanologiya*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 234–242. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592234-242>
 27. Тихонова Е. А. Исследование накопления и выведения нефтяных углеводородов моллюсками *Abra segmentum* в экспериментальных условиях // *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: біологія*. 2010. № 3 (44). С. 280–282. [Tikhonova E. A. Issledovanie nakopleniya i vyvedeniya neftyanykh uglevodorodov mollyuskami *Abra segmentum* v eksperimental'nykh usloviyakh. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: biolohiia*, 2010, no. 3 (44), pp. 280–282. (in Russ.)]
 28. Тихонова Е. А., Алёмов С. В. Характеристика донных осадков и макрозообентоса б. Казачья в первой декаде XXI века // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2012. Вып. 26, т. 1. С. 88–94. [Tikhonova E. A., Alyomov S. V. The characteristics of bottom sediments and macrozoobenthos of the Kazachya Bay in the first decade of the XXI century. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2012, iss. 26, vol. 1, pp. 88–94. (in Russ.)]
 29. Тихонова Е. А., Рубцова С. И. Процессы накопления и выведения нефтяных углеводородов двустворчатými моллюсками в экспериментальных условиях // *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: біологія*. 2012. № 2 (51). С. 280–282. [Tikhonova E. A., Rubtsova S. I. Protsessy nakopleniya i vyvedeniya neftyanykh uglevodorodov dvustvorchatymi mollyuskami v eksperimental'nykh usloviyakh. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: biolohiia*, 2012, no. 2 (51), pp. 280–282. (in Russ.)]
 30. *Химия океана. Геохимия донных осадков* / под ред. И. И. Волкова. Москва : Наука, 1979. Т. 2. 536 с. [*Khimiya okeana. Geokhimiya donnykh osadkov* / I. I. Volkov (Ed.). Moscow : Nauka, 1979, vol. 2, 536 p. (in Russ.)]
 31. Belan T. A., Moshchenko A. V. Pollution indicator species in the communities of soft bottom macrozoobenthos in Amursky Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan). In: *Ecological Studies and the State of the Ecosystem of Amursky Bay and the Estuarine Zone of the Razdolnaya River (Sea of Japan)*. Vladivostok : Dal'nauka, 2009, vol. 2, pp. 147–172.
 32. Brendel P. J., Luther G. W. Development of a gold amalgam voltammetric microelectrode for the determination of dissolved Fe, Mn, O₂, and S(–II) in porewaters of marine and freshwater sediments. *Environmental Science & Technology*, 1995, vol. 29, iss. 3, pp. 751–761. <https://doi.org/10.1021/es00003a024>
 33. Cabral H., Fonseca V., Sousa T., Costa Leal M. Synergistic effects of climate change and marine pollution: An overlooked interaction in coastal and estuarine areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,

- 2019, vol. 16, iss. 15, art. no. 2737 (17 p.). <https://doi.org/10.3390/ijerph16152737>
34. Dean H. K. The use of polychaetes (Annelida) as indicator species of marine pollution: A review. *Revista de Biologia Tropical*, 2008, vol. 56, suppl. 4, pp. 11–38.
35. Ducrottoy J.-P. Threats to the coastal zone. In: *Coastal Wiki* : [site]. 2021. URL: http://www.coastalwiki.org/wiki/Threats_to_the_coastal_zone [accessed: 27.10.2021].
36. Harley C. D. G., Hughes A. R., Hultgren K. M., Miner B. G., Sorte C. J. B., Thornber C. S., Rodriguez L. F., Tomanek L., Williams S. L. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 2006, vol. 9, no. 2, pp. 228–241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>
37. Hyacinthe C., Anschutz P., Carbonel P., Jouanneau J.-M., Jorissen F. J. Early diagenetic processes in the muddy sediments of the Bay of Biscay. *Marine Geology*, 2001, vol. 177, iss. 1–2, pp. 111–128. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00127-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00127-X)
38. Meysman F. J. R., Middelburg J. J., Herman P. M. J., Herman P. M. J., Heip C. H. R. Reactive transport in surface sediments. I. Model complexity and software quality. *Computers & Geosciences*, 2003, vol. 29, iss. 3, pp. 291–300. [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00006-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00006-2)
39. Orekhova N. A., Konovalov S. K. Polarography of the bottom sediments in the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 111–123. <https://doi.org/10.1007/S11110-009-9038-6>
40. Orekhova N. A., Konovalov S. K. Oxygen and sulfides in bottom sediments of the coastal Sevastopol region of Crimea. *Oceanology*, 2018b, vol. 58, no. 5, pp. 679–688. <https://doi.org/10.1134/S0001437018050107>
41. Orekhova N. A., Konovalov S. K., Medvedev E. V. Features of inorganic carbon regional balance in marine ecosystems under anthropogenic pressure. *Physical Oceanography*, 2019b, vol. 26, iss. 3, pp. 225–235. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-3-225-235>
42. Osadchaya N. S., Ovsyanyi E. I., Kemp R., Romanov A. S., Ignatieva O. G. Organic carbon and oil hydrocarbons in bottom sediments of Sevastopol Bay (the Black Sea). *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2003, vol. 2, no. 2, pp. 94–101.
43. Rabalais N. N., Turner R. E., Díaz R. J., Justić D. Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, vol. 66, iss. 7, pp. 1528–1537. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047>
44. *Water Framework Directive Intercalibration Technical Report. Part 3: Coastal and Transitional Waters* / A. Carletti, A. S. Heiskanen (Eds). Luxembourg : Office for official publications of the European communities, 2009, 240 p. (JRC Scientific and Technical Reports.) <http://dx.doi.org/10.2788/19561>

**REDOX CONDITIONS OF BOTTOM SEDIMENTS
AND MACROZOOBENTHOS CHARACTERISTICS
IN THE KRUGLAYA AND KAZACHYA BAYS (SEVASTOPOL)**

N. A. Orekhova

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru

A lack of systemic and environmentally efficient approach to exploitation of the Kruglaya and Kazachya bays (Sevastopol) resulted in their severe pollution. The conjunction of natural and anthropogenic factors led to deterioration of habitat conditions of benthic communities. The aim of this work was to carry out complex research of Kruglaya and Kazachya bays' ecosystems to study peculiarities of formation of redox conditions in bottom sediments and bottom water layer, as well as their effect on macrozoobenthos characteristics. Bottom sediments were sampled by diver in plexiglass tubes hermetically sealed at the top and bottom; it helped in preserving a fine structure of bottom sediments and bottom water layer. To study benthic communities, samples were taken in the same spot with a manual sampler. To obtain chemical composition of pore waters with high vertical resolution, the voltammetry

analysis was carried out. Calculation of an oxygen flux at the boundary and in the upper layer of bottom sediments was performed according to the vertical profile of oxygen concentration in pore waters and geochemical analysis with applying the equation for the Fick's first law and considering concentration gradient and molecular diffusion of oxygen in pore waters. Standard hydrobiological methods were applied for the analysis of benthic material. When calculating the values of the Shannon diversity index (H'), the binary logarithm was used. The data analysis showed as follows: a high level of anthropogenic load and restricted water dynamics resulted in siltation of bottom sediments in the studied water areas, which obstructed oxygen penetration; the accumulation of organic carbon contributed to its active consumption. Stratification of a water column due to limited water exchange, high temperature of bottom water, accompanied by a decrease in oxygen solubility, and finely dispersed nature of bottom sediments contributed to the fact that the rate of oxygen input was lower than the rate of oxygen consumption for organic matter oxidation. This was followed by the development of oxygen deficiency zones and emergence of reduced compounds, in particular hydrogen sulfide. Importantly, suboxic conditions prevailed in the upper sediment layer, and anaerobic conditions prevailed below. Due to this, the main forms of macrozoobenthos were species tolerant to oxygen deficiency and organic pollution. Specifically, in some spots of the Kazachya Bay, polychaetes alone were recorded. At the same time, in the Kruglaya Bay mouth area, intense water dynamics and morphological peculiarities of bottom sediments contribute to saturation of the upper sediment layer with oxygen. Based on oxygen concentration data for the surface (0–5 mm) sediment layer (pore waters) and on geochemical peculiarities of bottom sediments (moisture and porosity), the oxygen flux at st. 4 (the Solenaya Bay) was calculated; the value was $0.73 \text{ M}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$. Considering oxygen concentration in bottom water layer ($259 \mu\text{M}$), the time for complete depletion of oxygen or its renewal is about 5 months if taking into account biogeochemical processes alone. Hence, it can be assumed that the ecosystems of the Kruglaya and Kazachya bays are in the stage of degradation. Their further exploitation without a developed systemic and rational approach will result in a critical deterioration of the ecosystems – the emergence and spread of environmental risk zones. It will reduce the recreational and socioeconomic attractiveness of these areas.

Keywords: sediments, pore water, oxygen, hydrogen sulfide, organic carbon, macrozoobenthos, coastal waters, Black Sea