



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Геоэкология / Geoeology

Оригинальная статья / Original article

УДК 574.5:628.193(262.5)

DOI: 10.18470/1992-1098-2018-3-55-70

МАСШТАБНОЕ РАЗВИТИЕ ГИПОКСИИ МОРСКОЙ БЕНТАЛИ В ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ ЗАЛИВАХ-ФЬОРДАХ КРЫМА С РАЗЛИЧНОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

¹Максим Б. Гулин*, ²Игорь В. Масберг, ¹Екатерина А. Иванова

¹Институт морских биологических исследований

имени А.О. Ковалевского РАН,

Севастополь, Россия, m_gulin@mail.ru

²Научно-производственное предприятие «Аквамарин»,

Евпатория, Россия

Резюме. Цель. Сравнительный анализ особенностей аэрации придонных вод Севастопольской бухты и Донузлава, в том числе в различные сезоны года, как схожих по конфигурации полузамкнутых морских водоёмов черноморского бассейна, несущих неодинаковую техногенную нагрузку. **Материал и методы.** Изучены Севастопольская бухта и залив Донузлав, располагающиеся в западной части Крымского полуострова. Концентрацию и общее потребление растворённого кислорода в водной толще и придонном слое определяли *in situ* с помощью цифрового LDO-анализатора. Окислительно-восстановительный потенциал в донных осадках измеряли с использованием платинового измерительного электрода. **Результаты.** Аэрация водной толщи на сева-стопольском взморье является пригодной для нормальной жизнедеятельности пелагических и эпи-бентосных организмов. Вместе с тем, в Севастопольской бухте и Донузлаве обнаружено обширное распространение анокии в поверхностном слое донных отложений. Также, илистые грунты ложа Севастопольской бухты могут представлять собой кислород-дефицитный экстремальный биотоп большую часть года, минимальные концентрация O₂ в придонной воде регистрируются не выше 0.11-0.36 мг/л. И только в конце ноября бенталь Бухты оказалась хорошо аэрированной. **Заключение.** В схожих по контурным очертаниям берегах и строению современного морского дна в бухте Севастопольская и заливе Донузлав выявлены и общие закономерности донной гипоксии. Бенталь обоих изученных заливов-фьордов можно причислить к высокоградиентным гипоксическим биото-пам, находящимся в единой общности локальных кислород-дефицитных местообитаний морских водоёмов – эстуарных зон, районов газовых сипов и т.п., где постоянно или периодически сосущест-вуют высокая трофность осадков наряду с острым недостатком кислорода и токсичным серово-дородным заражением.

Ключевые слова: черноморские заливы-фьорды, донная гипоксия, сезонная динамика аэрации бентали.

Формат цитирования: Гулин М.Б., Масберг И.В., Иванова Е.А. Масштабное развитие гипоксии морской бентали в геоморфологически подобных заливах-фьордах Крыма с различной техногенной нагрузкой // Юг России: экология, развитие. 2018. Т.13, N3. С.55-70. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-3-55-70



LARGE-SCALE EXPANSION OF HYPOXIA AT MARINE BENTHAL ZONE IN GEOMORPHOLOGICALLY COMPARABLE BAYS-FJORDS OF CRIMEA PENINSULA UNDER DIFFERENT TECHNOGENIC LOADS

¹Maksim B. Gulin*, ²Igor V. Masberg, ¹Ekaterina A. Ivanova

¹A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS,
Sevastopol, Russia, m_gulin@mail.ru

²R&D company "Aquamarine", Evpatoriya, Russia

Abstract. Aim. Comparative analysis of the aeration features of the bottom waters during the different seasons of the year between the Sevastopol and Donuzlav Bays as geomorphological similar in configuration semi-closed sea reservoirs of the Black Sea under different anthropogenic loads. **Material and methods.** Sevastopol and Donuzlav Bays, located in the Western part of the Crimean Peninsula, were studied. The concentration and total consumption of dissolved oxygen in the water column and the bottom layer were determined in situ using a digital LDO analyzer. The redox potential in bottom sediments was measured using a platinum electrode. **Results.** Aeration of the water column in the Sevastopol seaside is suitable for normal life of pelagic and epibenthic organisms. At the same time, in the Sevastopol and Donuzlav Bays the large-scale anoxia in the surface layer of bottom sediments was found. Also, the muddy sediments of the Sevastopol Bay' bed can be an oxygen-deficient extreme biotope for most of the year, the minimum concentration of O₂ in the bottom water is not higher than 0.11-0.36 mg/l. The benthal zone here was well aerated only at the end of November. **Conclusion.** The general patterns of benthic hypoxia were identified for such coast objects as Sevastopol and the Donuzlav Bays, which are similar by their contours and recent seabed structures. Benthal zones of both investigated bays-fjords can be attributed to hypoxic high-gradient habitats, that have a whole generality with oxygen-deficient marine waters habitats – estuarine zones, areas of gas seeps, etc. Strong oxygen deficiency, toxic H₂S contamination coupled with organic enrichment a typically benthic environment for such biotopes.

Keywords: Black Sea bays-fjords, bottom hypoxia, seasonal dynamics of benthal zone' aeration.

For citation: Gulin M.B., Masberg I.V., Ivanova E.A. Large-scale expansion of hypoxia at marine benthal zone in geomorphologically comparable bays-fjords of Crimea peninsula under different technogenic loads. *South of Russia: ecology, development*. 2018, vol. 13, no. 3, pp. 55-70. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2018-3-55-70

ВВЕДЕНИЕ

Преобладающая часть экологически и экономически значимых биологических ресурсов Чёрного моря представлена, как и в Мировом океане в целом, оксибионтными эукариотными организмами – планктонными, nektonными и бентосными. По этой причине, очевидную актуальность имеет контроль кислородного режима не только в водной толще, но и в бентали данного морского бассейна.

Бактериальные ценозы, напротив, выполняют в Чёрном море, главным образом, средообразующую функцию, например, формирование глубинной сероводородной зоны водоёма. Важная роль принадлежит микроорганизмам-прокариотам и в прибрежных районах.

Подъём уровня вод Мирового океана в Голоцене [1] служит одним из ключевых драйверов формирования современного облика биосферы. Помимо глобального потепления и, как следствие, таяния ледников в приполярных районах и высокогорных массивах, изменение вертикального местоположения поверхности Океана обусловлено также перманентным «твёрдым стоком» – смывом с территории водосборных бассейнов взвешенных веществ и более крупных фракций грунта. Мировой океан, включая большинство составляющих его морских водоёмов, служит конечным депо поступающих в него водных масс и взвешенных веществ. Он не имеет стока, в отличие от речных и множества озёрных систем. Накопление твёрдых осадков на дне морских водоё-



мов неизбежно ведёт к вытеснению водных масс и, соответственно, к подъёму их уровня, затоплению прибрежных участков суши [2].

Описанные процессы в полной мере затронули и Чёрное море. Так, в течение IX–XX веков повышение уровня вод достигло в этом полузамкнутом водоёме 1.3–3.7 мм·год⁻¹. Приведенные оценки схожи с таковыми в Мировом океане [2; 3]. Затопление морскими водами прибрежных участков суши имело неравномерный, ступенчатый характер, береговые линии прослеживаются на сублиторали в виде отдельных уступов и террас [1]. Вероятно, это позволило сохраниться некоторым фрагментам реликтового сухопутного рельефа, в том числе таким, как палеорусли и палеodelьты рек. Таким образом, затопленные речные системы, как и старые береговые террасы на современном морском шельфе – это, в первую очередь, индикаторы подъёма уровня вод и Чёрного моря, и Мирового Океана в целом.

Аналогично палеорусли на морском шельфе, в раннем Голоцене образовались и современные бухты Чёрного моря – морские воды заполняли не только первородные устьевые участки речных систем, но долины малых рек Крыма в их нижнем течении. Наиболее крупными черноморскими заливами являются бухты Севастополя и Донузлав – протяжённые, глубоко вдающиеся в сушу полузамкнутые водоёмы.

В настоящее время наиболее изученным природным реликтовым объектом в прибрежной зоне Чёрного моря является палеорусли реки Чёрная, располагающиеся на морском шельфе в территориально-административных границах Севастополя [4; 5]. По имеющимся данным, палео-Чёрная залегает как непосредственно в Севастопольской бухте, так и на прилегающем внешнем участке шельфа.

Подтверждением общности геологической истории палеорусли реки Чёрная в пределах Севастопольской бухты и на возмо-

рье севастопольского побережья служат результаты бурений, проведенных в 2013 г. в средней части Бухты. Исследования показали, что ложе данного водоёма, изолированного в высокой степени от Чёрного моря, заполнено четвертичными отложениями мощностью 36–40 м. При этом, толща илов с повышенной солёностью поровых вод и реликтовыми остатками морской фауны составляет только 14–25 м. Принято, что наиболее вероятной причиной нахождения пресноводных моллюсков отложениях бухты является река Чёрная, палео-устье которой в голоцене было значительно ближе к центральной части бухты [6; 7].

Комплексные исследования экологии бентосных поселений на внешнем участке палеорусли р. Чёрная, расположенном на шельфе открытого моря, показали, что из-за влияния повышенной концентрации органических веществ, сосредоточенных как в ископаемых речных наносах, так и современных осадках, накапливающихся в ложбине русла, имеется тенденция к образованию на данном участке бентали кислород-дефицитных зон, неблагоприятных для развития донной фауны [4; 5; 8].

Черноморский залив Донузлав изучен до настоящего времени не так подробно, как побережье в районе Севастополя. Вместе с тем, данный морской водоём Крыма интересен также в качестве объекта сравнения с бухтой Севастопольская, поскольку он, с одной стороны, имеет очень схожее с ней геоморфологическое строение, а с другой, – гораздо менее подвержен техногенному воздействию.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ особенностей аэрации придонных вод Севастопольской бухты и Донузлава, в том числе в различные сезоны года, как схожих по конфигурации полузамкнутых морских водоёмов черноморского бассейна, но несущих неодинаковую техногенную нагрузку.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оба исследуемых объекта – Севастопольская бухта и залив Донузлав располагаются в западной части Крымского полуострова (рис. 1). Согласно картографическим материалам российского интернет-сайта Яндекс-Карты [9] протяжённость Се-

вастопольской бухты от её внешних защитных молов до кутовой части в Инкермане составляет около 7.5 км, а максимальная ширина в центральной части варьирует от 500–1100 м. Донузлав, расположенный в северо-западной части Крыма, в 31 км к запа-



ду от Евпатории, имеет значительно большие линейные размеры: примерно 30 км в длину, а ширину в своей срединной части – вплоть до 4.8 км. Вместе с тем, по конфигурации оба перечисленных водоёма схожи между собой – они глубоко и практически перпендикулярно врезаются в сушу, связь этих заливов с открытым морем крайне ограничена: Донузлав отделён от моря пересыпью с узким проходом искусственного происхождения посредине, а Севастопольская бухта аналогичным образом защищена от внешней акватории южным и северным молами, между которыми также существует неширокий проход для нужд судоходства. Наиболее важно, что соотношение максимальной протяжённости и наибольшей ширины как в основной бухте Севастополя, так и в заливе Донузлав имеет близкие и при

этом высокие величины: от 6 до 26. Это позволяет отнести оба указанных водоёма к морским заливам, имеющим схожие черты с фьордами Норвегии, Исландии и некоторых других районов мира [10]. В наиболее известных фьордах отношение «длина-ширина» находится в диапазоне 6-58. Таким образом, геоморфологически Донузлав и Севастопольскую бухту можно отнести к малым морским фьордам. Основным отличием от, например, скандинавских фьордов служат лишь сравнительно невысокие берега бухты Севастопольская и особенно на Донузлаве. Вместе с тем, данная особенность не имеет прямого отношения к предмету рассмотрения настоящей работы – особенностям снабжения кислородом зооценозов бентали обоих указанных водоёмов.

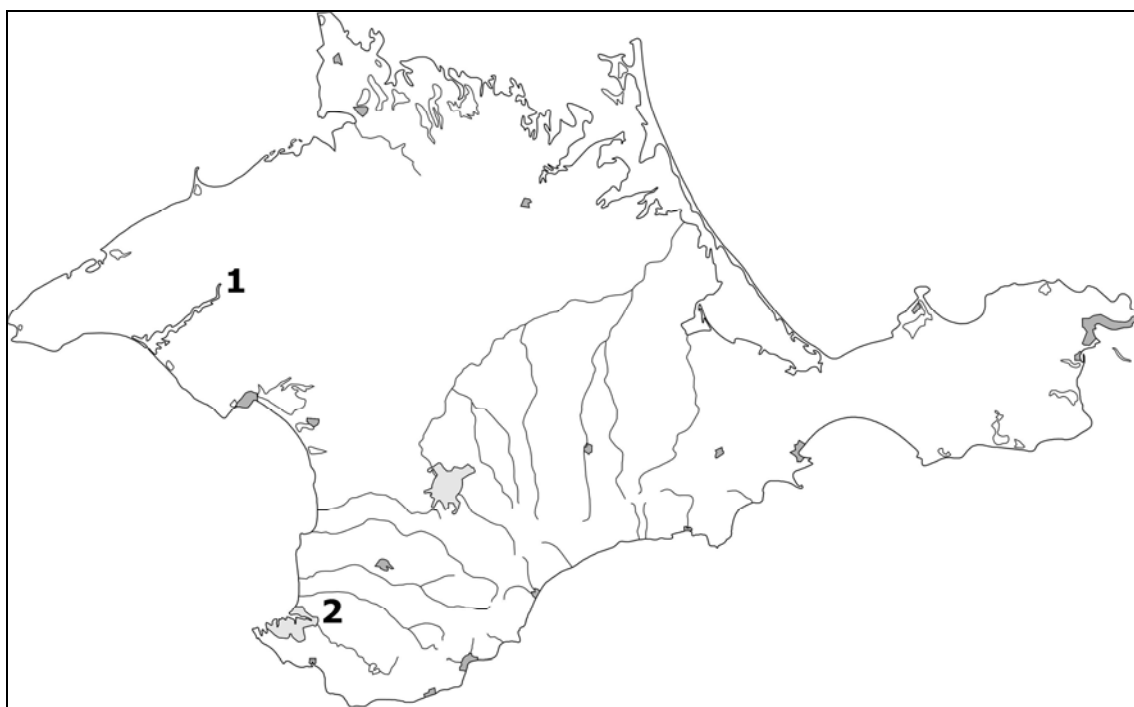


Рис.1. Местоположение исследованных объектов: залива Донузлав (1) и бухты Севастопольская (2) в западной части Крымского полуострова, Чёрное море
Fig.1. Location of studied areas: Donuzlav (1) and Sevastopol (2) bays in the Western part of Crimean Peninsula, Black Sea

Натурные исследования в Севастопольской бухте были проведены в различные сезоны 2013-2014 гг. Первичные оценочные определения выполнялись в 2009 и 2010 гг. В Донузлаве измерения производились в июле 2015 г. Измерения осуществляли с борта маломерных судов. На мелководных прибрежных участках использовался

шлюпочный ял, а не моторные плавсредства, что позволило избежать искусственной аэрации вод и неизбежных в этом случае искажений получаемых результатов по содержанию в них растворённого кислорода.

Для промера глубин дна и определения местоположения судна использовали GPS-эхолот Garmin-178. Полученная ин-



формация обрабатывалась картографическим программным обеспечением MapSource.

Концентрацию растворённого кислорода и температуру в водной толще и придонном слое определяли *in situ* с помощью цифрового LDO-анализатора HACH-NQ40d (США-Германия), снабжённого погружным блоком датчиков. Вертикальные зондирования осуществляли на якорных станциях (или в дрейфе в случае слабого течения и ветра) – послойно, с шагом 1 м. Специальное защитное ограждение погружных сенсоров позволило выполнять измерения не только в толще воды, но и непосредственно на поверхности грунта. Данная конструкция представляла собой металлическую решётку с наружными габаритами 40 x 40 см и с ячейками размером 2 x 2 см, опускавшуюся в воду горизонтально благодаря четырём растяжкам одинаковой длины, закреплённым на 30-метровом кабель-тросе измерительных датчиков оксиметра. Датчики устанавливали на верхней стороне решётки, что при погружении прибора на дно обеспечивало их нахождение непосредственно у поверхности грунта. Покладку на грунт описанной металлической рамы и блока датчиков осуществляли аккуратно, медленно опуская решётку с сенсорами,

стремясь не допустить взмучивания ила при касании дна.

Общее потребление кислорода измеряли также с применением оптода HACH-NQ40d в изолированных пробах придонной воды при температуре, близкой таковой *in situ* в зимний, весенне-летний и осенний сезоны года. Для инкубации использовалась цилиндрическая камера из оргстекла ёмкостью 400 см³, с газонепроницаемыми стенками толщиной 1.5 см.

Потенциометрические измерения в донных отложениях проводили с применением иономера РН150М (ГЗИП, Гомель, Беларусь) в комплекте с платиновым измерительным электродом (Corning Glass Works, Корнинг – Нью-Йорк, США) и встроенным в него хлорсеребряным электродом сравнения. Перед измерениями Eh-электрод калибровали по эталону HI7021 (HANNA Instruments, Сегед, Венгрия).

Всего в рамках настоящей работы в Севастопольской бухте и Донузлаве было выполнено соответственно 2 и 3 поперечных гидрохимических разреза, на которых измерения проведены на 72 станциях, включая повторные при межсезонной съёмке. Дополнительно тестировались участки дна на выходе из Севастопольской бухты и на её внешнем рейде (5 станций).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кислородный режим бентали на взморе Севастополя

Первоначально мониторинг уровня содержания кислорода в палеорусле р. Чёрная был выполнен нами на внешней акватории Севастополя, на реперной станции с глубиной дна 20 м. Это позволило сравнить кислородный режим в двух пространственно сопряжённых экотопах – открытом море и непосредственно в бухтах, в значительной мере от него изолированных, имеющих режим водообмена более близкий к стоячим водам.

Измерения 2012 г. показали, что в придонном слое воды и непосредственно на границе «водная толща – дно» содержание растворённого кислорода было наибольшим в середине летнего сезона – около 9,5 мг/л. Затем, в августе и первой половине осени в придонной воде регистрировалось постепенное уменьшение концентраций O₂. Ми-

нимальные значения [O₂] обнаружены вблизи дна палеоруслу в октябре – 7.6 мг/л.

Указанная сезонная динамика аэрации придонного слоя была обусловлена, очевидно, особенностями вертикальной плотностной стратификации водных масс, а также ограниченным водообменом с открытым морем. В июле термоклин располагался на глубине 12-13 м. Однако, в конце августа толщина верхнего квазигомогенного слоя (ВКС) значительно увеличилась, достигнув глубины около 19-20 м, т.е. непосредственно придонного слоя воды. В октябре 2012 г. эта тенденция сохранилась и весь наблюдаемый диапазон водной толщи (0-20 м) оказался в пределах ВКС. С одной стороны, при исчезновении вертикальных градиентов плотности ускоряется перемешивание водных масс и это должно способствовать аэрации бентали атмосферным кислородом. Вместе с тем, с ростом температуры, наоборот, снижается растворимость



газов. На исследуемой реперной станции температура в придонном слое воды последовательно возрастала в период с июля по октябрь от +10 до +19 °С. Также, на мелководье определённое значение в снабжении кислородом верхнего слоя донных отложений должна иметь и вариабельность интенсивности фотосинтеза фитопланктона и фитобентоса, в зависимости от времени года и от текущего состояния водной среды.

В общем можно отметить, что за наблюдаемый период (лето-осень 2012 г.) в реперной точке в палеорусле р. Чёрная концентрация кислорода у дна не опускалась ниже 7.5 мг/л.

Результаты, подтверждающие данную закономерность, были получены и годом позже, в конце августа 2013 г. Место проведения измерений располагалось в этом случае несколько ближе к входу в Севастопольскую бухту и на меньшей глубине – 18 м. Содержание O_2 *in situ* на границе «придонный слой вод – поверхность дна» на присутствующих здесь илистых донных отложениях не превышало 4.38 мг/л. Тем не менее, этот участок бентали также следует отнести к достаточно хорошо аэрированным местообитаниям.

Таким образом, аэрация водной толщи на севастопольском взморье может быть признана достаточной для нормальной жизнедеятельности пелагических и эпибентосных организмов, обитающих на поверхности грунта.

Вместе с тем, как было показано ранее [4; 5] для ложа палеореки Чёрная характерны повышенные скорости накопления взвешенных органических веществ (ОВ), его содержание в поверхностных осадках достигало 164,3 г/кг сухого веса, что в примерно в 3 раза выше, чем в прилегающих песках.

Внутренняя акватория заливов, связь распределения кислорода с рельефом дна

Прежде всего, с использованием гидроакустической аппаратуры были проанализированы и сопоставлены между собой основные особенности батиметрии обоих изучаемых морских заливов – бухты Севастопольская и Донузлава.

В современной литературе наиболее подробные сведения о пространственных характеристиках Севастопольской бухты содержатся в публикации Стокозова [11],

Столь высокая концентрация органики способна, вероятно, влиять на кислородный режим биотопа через активизацию процессов её гетеротрофной минерализации. Это подтверждается, в частности, обнаружением существенных отличий окислительно-восстановительного потенциала (Eh) на дне палеоруsla р. Чёрная в сравнении с его береговыми склонами. На обоих склонах затопленной части реки – северном и южном Eh имел положительные значения, тогда как на наиболее глубоком участке русла залегали восстановленные илы [4]. Это даёт основание ожидать определённую кислороддефицитную обстановку в придонном слое вод и, соответственно, некоторую специфику донной фауны, населяющей затопленные участки описанной речной системы.

Таким образом, условия среды существования бентосной инфауны, населяющей не поверхность донных грунтов, а непосредственно толщу осадков складываются несколько иначе, чем у эпибентосных поселений. Подтверждением этого могут быть полученные нами материалы визуальных наблюдений с помощью буксируемой подводной телекамеры. Проведенные в феврале 2010 г. на глубинах 20-25 м, они показали, что ровное илистое дно ложа палео-Чёрной повсеместно изрыто норами крупных представителей донной инфауны. При этом, однако, наружные отверстия таких ходов были найдены лишь на вершинах волновой ряби на поверхности дна. В ложбинах между гребнями ила какие-либо отверстия и ходы, производимые роющим макрозообентосом, отсутствовали. Можно предположить, что описанная особенность жизнедеятельности бентосных животных является их адаптацией, одним из способов избегания гипоксии.

который подробно описал конфигурацию берегов бухты, оценил объём её водной толщи, представил морфометрическую модель рельефа дна. В наши задачи не входили столь детальные геоморфологические исследования. На основе указанной работы нами были намечены и выполнены два поперечных гидроакустических разреза, располагавшихся в центральной части Бухты. Одновременно измерению глубины дна, на серии станций вдоль указанных трансект производилось определение концентрации

растворённого кислорода в непосредственной близости от границы «водная толща – дно». Результаты представлены на рис. 2. Проведенные зондирования подтвердили уже имеющиеся литературные данные о ко-

робчатом типе строения дна Севастопольской бухты, имеющей крутые, почти отвесные береговые скальные склоны до глубин 13-17 м и практически плоское ложе, заполненное илесто-песчаными грунтами [11].

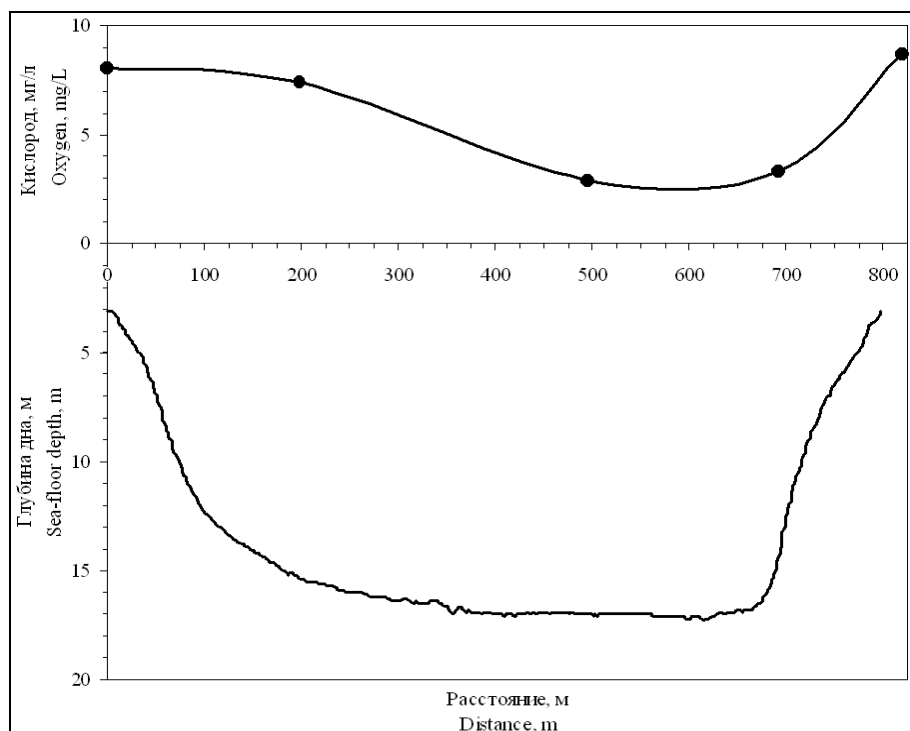


Рис.2. Профиль дна на поперечном разрезе в центре Севастопольской бухты (внизу) и содержание растворённого кислорода у дна (вверху), август 2013 г.

Fig.2. Sea-floor profile at the cross section through the center of Sevastopol Bay (below) and dissolved oxygen content within the near-bottom layer (above), August 2013

Аналогичные результаты, вернее – даже значительно больший гипоксический эффект наблюдался во внутренней акватории залива Донузлав, где измерения проводились также во второй половине летнего сезона – в конце июля 2015 г. (рис. 3).

Первая «кислородная» трансекта была проложена на обширной отмели в кутовой части залива. Дно здесь плотно покрыто зарослями макрофитов, преимущественно zostеры (*Zostera marina* L., 1753). Глубина дна не превышает в данном месте 1.9-2.5 м.

Как и следовало ожидать, придонный слой бентали в верховье Донузлава хорошо аэрирован, содержание растворённого кислорода не опускалось ниже 5.27 мг/л, а в среднем по всем 10 станциям данного поперечного разреза составляло 6.21 мг/л.

Трансекта, результаты измерений на которой представлены на рис. 3, была вы-

полнена в значительно более глубоководной части Донузлава – в районе бухты Известковая (база отдыха «Степная гавань»). Максимальная глубина дна, где производилось определение концентрации O_2 у дна, составила 19.5 м. Протяжённость разреза – более 1 км.

Обнаружено, что в ложе залива, практически на всём протяжении данного батиметрического разреза, кислород в придонной воде отсутствует. Существенные величины $[O_2]$ были зарегистрированы лишь на береговых склонах: 7.26-7.74 мг/л (глубины дна 3.6-6.7 м) у западного побережья и 7.59 мг/л (дно – 4.5 м) у противоположного восточного берега, где располагается бухта Известковая (левая и правая стороны графика на рис. 3, соответственно).

Столь обширное распространение аноксии в поверхностном слое донных отложений Донузлава было найдено и на дру-

гом поперечном разрезе (табл. 1), расположенном значительно мористее трансекты,

выполненной вблизи б. Известковая.

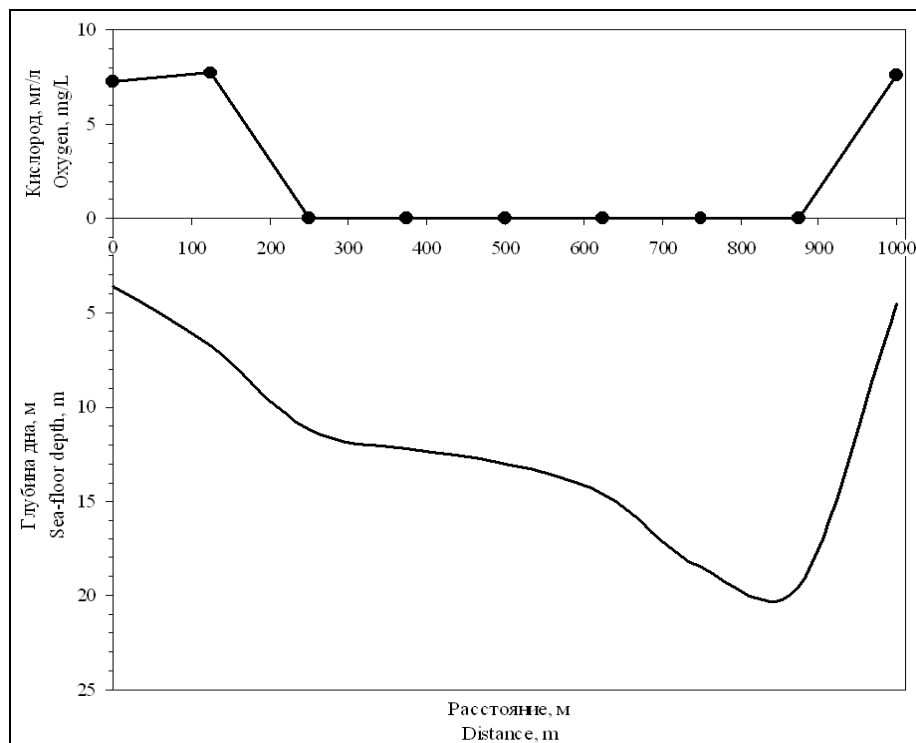


Рис.3. Рельеф дна на поперечном разрезе в центральной части залива Донузлав (внизу) и концентрация кислорода на границе водной толщи с дном (вверху), июль 2015 г.

Fig.3. Cross-section of seabed relief at the central location of the Donuzlav Bay (below) and oxygen concentration beside the water column – bottom boundary (above), July 2015

В данном случае отсутствие кислорода у дна было обнаружено на существенно меньшей площади, чем на трансекте от бухты Известковая (рис. 3) и зарегистрировано лишь в самой глубоководной части этого разреза. Можно предположить, что близость обследованного участка дна к месту соединения залива Донузлав с открытым морем формирует более интенсивную циркуляцию водных масс и, соответственно, способствует лучшей аэрации донной

поверхности. Тем не менее, присутствие выраженных аноксических условий в бентали на участках обоих исследованных разрезов (рис. 3 и табл. 1), удалённых, к тому же, друг от друга не менее чем на 2.2 км, позволяет заключить, что значительная площадь дна в глубоководной части Донузлава подвержена, как минимум в летний период, стагнации вод и возникновению острого дефицита кислорода на дне.

Таблица 1

Содержание растворённого кислорода в придонном слое на поперечном разрезе в глубоководной части залива Донузлав

Table 1

Content of dissolved oxygen in the near-bottom layer at the transect of Donuzlav Bay deep-water part

Глубина дна, м Sea-floor depth, m	4.5	12.2	14.7	19.6	6.5
Концентрация кислорода, мг/л Dissolved oxygen concentration, mg/L	2.29	7.83	0.00	0.00	6.89



Анализ формы поперечного сечения срединной части как Севастопольской бухты, так и залива Донузлав, свидетельствует в пользу того, что изначально оба этих водоёма могли иметь форму каньонов, т.е. глубоких речных долин с крутыми склонами и узким дном, а не коробчатый тип строения, как в настоящее время. Лишь в процессе интенсивного накопления донных отложений ложе Севастопольской бухты приобрело вид плоской равнины. В Донузлаве современный рельеф дна сохранил больше признаков первичного каньонного происхождения, возможно, по причине существенно меньшей водности рек, впадающих в данный залив (Старый Донузлав, Бурнук и Чернушка) в сравнении с р. Чёрная в Севастополе. Вместе с тем, характер осадконакопления – аллохтонных и особенно автохтонных взвесей имеет, вероятно, общие тенденции в обоих изучаемых заливах.

Очевидно, что столь мощный слой морских иловых отложений на дне, например, Севастопольской бухты, где они достигают толщины более 25 м, а всей массы четвертичных отложений – до 40 м [6; 7], способен, за счёт протекающих в них микробиологических процессов деструкции органики, служить источником значительного потока сероводорода и лабильных сульфидных соединений в придонный слой. Это, в свою очередь, может стать основной причиной поглощения кислорода, поступающего на дно из поверхностных горизонтов водной толщи за счёт диффузионных процессов и волнового перемешивания.

Отмеченная закономерность действительно подтверждается проведенными

in situ измерениями концентрации кислорода у дна (рис. 2). На данном рисунке достаточно наглядно проявляется положительная корреляция распределения O_2 с батиметрией донного рельефа. К примеру, минимальное содержание растворённого кислорода в придонном слое было зафиксировано на самом глубоководном участке разреза (17.6 м), его величина не превышала 2.91 мг/л или, в пересчёте, 2.04 мл/л. Данный факт свидетельствует о неблагоприятных условиях снабжения дна кислородом в Бухте, непосредственно приближающихся к гипоксическим, т.е. губительных для жизнедеятельности большинства бентосных эукариотных гидробионтов – менее 2 мл O_2 /л [12].

Таким образом, схожие в основных чертах контуры и батиметрия обоих указанных морских заливов – Донузлава и бухты Севастопольская сочетаются и с фактически одинаковым режимом снабжения кислородом их бентали. Главными характеристиками при этом служат близкое к фьордам геоморфологическое строение обоих морских заливов, чрезвычайно глубоко врезающихся в сушу в виде узких, затопленных морем долин и, вероятно, связанная с этим стагнация вертикального водообмена во внутренней акватории изучаемых водоёмов. Одновременно здесь отмечается интенсивное накопление осадков на дне, включая аллохтонную и автохтонную органику [6]. Как следствие, в глубоководной части, в экотопе рыхлых грунтов и Севастопольской Бухты, и Донузлава могут формироваться обширные заморные зоны (рис. 2, 3).

Внутригодовая динамика аэрирования бентали в Севастопольской бухте

Как уже было отмечено, рельеф дна основной бухты Севастополя имеет в сечении коробчатое строение – крутые скальные береговые склоны и плоское илистое дно (рис. 2). Также, данный водоём, в отличие от Донузлава, можно признать техногенно стрессовым местобитанием, поскольку он является внутренней акваторией крупного городского поселения. Воды бухты, в частности, подвержены круглогодичному загрязнению нефтепродуктами, а также неконтролируемому смыву загрязняющих веществ с территории города ливневыми водами.

Напротив, водная среда Донузлава, по санитарно-микробиологическим показателям, полученным в зимний и весенний период (усреднённые данные 2011-2013 гг.) и по титру бактерий группы кишечных палочек, характеризуется как «очень чистая». По сапробности она относится к бета-мезасапробной зоне, о чём свидетельствует наличие относительно высоких показателей плотности популяций органотрофных микроорганизмов.

По указанным причинам, в 2014 г. в акватории Севастопольской бухты был осуществлён более детальный мониторинг кислородного режима, охватывавший различ-



ные сезоны года (рис. 4). Как и в предыдущем исследовании (рис. 2), на поперечных разрезах в Бухте, на границе «водная толща

– поверхность дна», были произведены определения содержания растворённого кислорода.

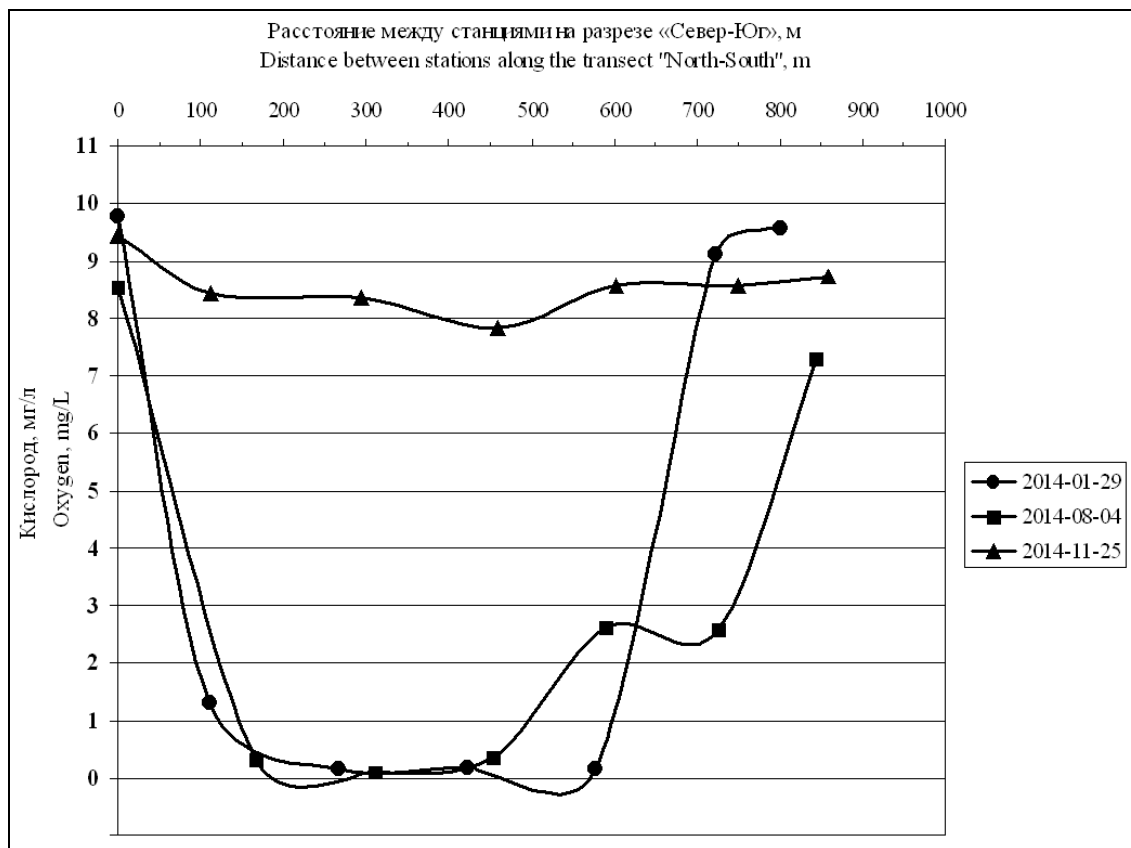


Рис.4. Годовой ход содержания *in situ* растворённого кислорода на границе «придонный слой – дно» на поперечном разрезе в центральной части бухты Севастопольская (2014 г.)

Fig.4. One-year dynamics of dissolved oxygen *in situ* content at the "near-bottom layer - seabed" boundary along the transect in the central part of Sevastopol Bay (2014)

Установлено, что большую часть года илистые грунты ложа Севастопольской бухты могут представлять собой кислород-дефицитный экстремальный биотоп. Так, в конце января 2014 г. минимальные значения концентрации O_2 в придонной воде были не выше 0.15-0.18 мг/л, в середине мая 0.14-0.16 (на рис. 4 не представлено из-за малого количества выполненных станций), в начале августа 0.11-0.36 мг/л. И только в конце ноября придонный слой центральной части Севастопольской бухты оказался хорошо аэрирован: $[O_{2 \text{ мин.}}] = 7.84-8.58$ мг/л.

В противоположность этому, концентрация кислорода вблизи прибрежных склонов дна соответствовала уровням нормоксии, изменяясь от 3.32 до 10.60 мг/л, в

обратной зависимости от сезонного хода температуры воды. Здесь же, потребление кислорода (включая биологическое – БПК) в придонном слое в зимний период составляло 0.19-0.25 мг O_2 /л/сут., а в летний сезон этот показатель был в 5-6 раз выше, достигая 1.24 мг O_2 /л/сут.

Полученные нами в Севастопольской бухте результаты хорошо согласуются с итогами более ранней работы Ореховой и Коновалова [13], проведенной в 2006-2008 гг. Полярографические данные позволили выделить районы в Севастопольской бухте в зависимости от распределения кислорода и сероводорода в придонном слое воды и толще осадков: устье залива, где кислород присутствует в придонном слое воды и на



поверхности осадков, а сероводород отсутствует в толще (0-10 мм) осадков; центральная часть бухты, для которой характерно отсутствие кислорода на поверхности осадков и отсутствие сероводорода в слое 0-10 мм; район Инкермана – верховье залива, где наблюдается отсутствие кислорода на поверхности осадков и близкая к поверхности осадков (2-4 мм) граница появления сероводорода.

Очевидно, что основную часть 2014 г., включая зимний период, когда вертикальная плотностная стратификация водных масс должна быть ослаблена, илистые грунты ложа Севастопольской бухты, тем не менее, могут быть отнесены к кислород-дефицитным местообитаниям «пустынного» типа, неблагоприятным для развития донных зооценозов.

Известно, что гипоксия снижает плотность и биомассу бентоса [8; 14; 15]. По этой причине следует ожидать существенно

угнетённый характер экологического состояния бентосных поселений в гипоксических биотопах ложа описанных заливов – Севастопольской бухты, Донузлава. В ряде случаев данное предположение уже имеет своё фактическое подтверждение. Так, недавние, пусть и фрагментарные исследования показали, что основные скопления донной фауны в Севастопольской бухте сосредоточены на скальных склонах по бортам водоёма [4; 14; 15], биомасса макрозообентоса на единицу площади прибрежных участков дна может в 13-47 раз превышать таковую на илистых грунтах глубоководной части Бухты [16]. Описанный характер лимитирования жизнедеятельности донной фауны рыхлых грунтов низкой концентрацией кислорода может иметь общий порядок и оказаться справедливым в отношении значительного количества подобных водоёмов, глубоко вдающихся в сушу и значительно изолированных от основной части морского бассейна.

Динамика развития донной гипоксии в эксперименте

В дополнение к описанным натурным наблюдениям уровней содержания растворённого кислорода в бухте Севастопольская и заливе Донузлав, величины потенциальной скорости развития гипоксических и заморных явлений в поверхностном слое осадков изучаемых полужамкнутых морских заливов были изучены в экспериментальных условиях. Для этого пробы песка, взятые в прибрежной зоне центральной части Севастопольской бухты, поместили в 2 плоские стеклянные чаши (так называемые «кристаллизаторы»). Предварительно на дно обоих сосудов были уложены листы фильтровальной бумаги в качестве дополнительного источника органического вещества (целлюлозы). Толщина слоя песка в каждом кристаллизаторе составляла примерно 2 см. Сверху его заливали морской водой – также из бухты, при этом следя, чтобы её слой над осадком составлял не менее 2-3 см. Ёмкости закрывали тонкой полиэтиленовой плёнкой, используемой обычно для упаковки и хранения пищевых продуктов, причём, один из сосудов был покрыт лишь одним слоем плёнки, а второй – двумя. Это создавало разные условия газообмена образцов песка и воды с атмосферным воздухом через данные наружные мембраны. Инкубация проб про-

извлеклась длительное время в термостатированном помещении, при температуре от +20 до +25 °С. Периодически в поверхностном слое песка проводили замеры величины редокс-потенциала (Eh), использовавшегося в качестве интегрального показателя окислительно-восстановительных условий среды. Результаты представлены на рис. 5. Измерения в каждой временной точке производились однократно, чтобы минимизировать нарушения структуры осадка датчиком Eh-метра и сократить время контакта проб с атмосферным воздухом.

Целлюлоза – стойкое природное органическое соединение – полисахарид с формулой $(C_6H_{10}O_5)_n$, термодинамически малоприспособленный для непосредственного потребления сульфатредуцирующими бактериями при осуществлении ими так называемого «сульфатного дыхания». Такие условия были приняты нами как достаточно близкие природным.

Можно предположить, что в начале эксперимента (рис. 5), то есть в течение первых 15-40 сут. инкубации целлюлозных образцов в песчаном грунте, в опытных сосудах происходило преимущественное развитие целлюлозоразрушающего микробного сообщества, с последовательной сукцессией от аэробных к анаэробным формам. И лишь затем, по мере формирования бескислород-

ной среды поровых вод в песчаных осадках, а также накопления легкоусваиваемых форм органики, наступала стадия быстрой активизации процесса бактериальной сульфатредукции. По этой причине, переход от аэробных к восстановительным условиям среды имел скачкообразный характер и происходил интенсивно, в течение 10 дней, максимум двух недель. Очевидно, что при разви-

тии подобных процессов на дне водоёмов в природных бентосных зооценозах должны наблюдаться заморные явления.

При дальнейшей инкубации показания ОВП во всех опытных ячейках стабилизировались. Например, на 130 сут. наблюдений они практически не отличались от значений крайней точки на графике рис. 5 (77-й день экспозиции).

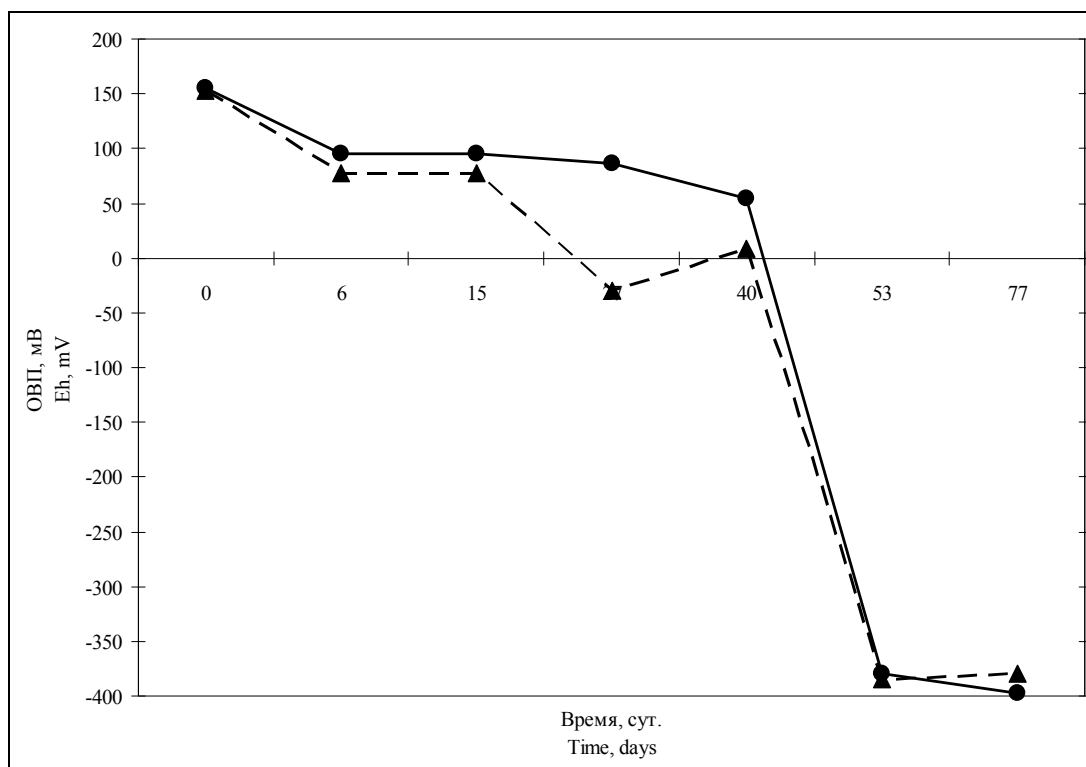


Рис.5. Кинетика развития восстановительных условий среды в экспериментальной ячейке «морской песок – надосадочный слой воды», взятых в срединной части Севастопольской бухты; сплошная линия – опыт с однослойной мембраной, пунктирная – с двухслойной

Fig.5. Kinetics of development of both high-sulfidic and oxygen depleted environment conditions within the experimental cells “sea sand – nearbottom water layer”, taken from the central part of the Sevastopol Bay; unbroken line it's experiment with single-layer membrane, dotted – with two-layer membrane

Обращает внимание, что различающаяся в два раза толщина полиэтиленовых мембран в экспериментальных сосудах не оказала, вероятно, сколь-либо заметного влияния на газообмен проб с атмосферой и на интенсивность развития в них гипоксии и сероводородного заражения.

Описанные выше результаты инструментальных измерений величины ОВП в пробах песка при инкубации их в присутствии дополнительного источника органики (целлюлоза и продукты её разложения мик-

роорганизмами), с одновременным наблюдением условий чрезвычайно слабой циркуляции воды и газообмена в экспериментальных ячейках, подтверждают и результатами визуальных наблюдений. Первые три недели эксперимента песок в обоих экспериментальных сосудах сохранял природную окраску и представлял собой однородный слой осадка. Затем, примерно на 25-27 сут. экспозиции, нижний 4-мм слой песка окрасился в чёрный цвет, что свидетельствует о появлении сероводорода и его производных



– сульфидов металлов. Данный процесс стал интенсивно развиваться и через 50 сут. от начала опыта на поверхности песчаных отложений образовались сульфидные пятна пепельно-серого и чёрного цвета. На 77 сутки эти поверхностные сульфуретты достигли большого размера, а по прошествии 127 сут. эксперимента они охватили почти всю поверхность песка в закрытых плёнкой кристаллизаторах. Редокс-потенциал на поверхности одного из сосудов снизился до -400 мВ. При этом, фоновые участки без выраженных сульфидных пятен также продолжали деградировать, песок здесь приобрёл тёмно-коричневую окраску, а значения Eh уменьшились в различных его точках до +10

мВ и даже до -95 мВ против +155 мВ в начале эксперимента.

Поскольку описанные опыты с морскими осадками проводились при температуре около +25 °С, т.е. в условиях, близких к природным, в прибрежных участках акватории Чёрного моря в течение летнего сезона, можно предположить, что полученные результаты в целом достоверно иллюстрируют динамику развития гипоксии в черноморских полузамкнутых водоёмах в период их наибольшего прогрева и стагнации вод, подтверждая возможность быстрого наступления заморных явлений в бентосных биоценозах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате перманентного подъёма вод в черноморском бассейне в продолжающемся и в настоящее время голоценовом периоде, в прибрежной зоне сформировались локальные местообитания, нормальный кислородный режим в которых нарушен.

В схожих по контурным очертаниям берегов и строению современного морского дна бухте Севастопольская и заливе Донузлав выявлены и общие закономерности формирующейся здесь донной гипоксии. Установлено, что кислород-дефицитные условия в бентали, на границе «придонный слой водной толщи – поверхность донных осадков», могут охватывать значительную площадь плоского ложа обеих бухт, причём не только в летний период, обычно характеризующийся выраженной плотностной стратификацией водных масс, но и в другие сезоны. При этом, различия техногенной нагрузки на данные водоёмы мало сказываются на характере развития в них заморных явлений. Более того, в Севастопольской Бухте наблюдается даже несколько более благоприятный кислородный режим придонных вод в сравнении с Донузлавом. В первом случае, более интенсивное поступление аэрированных поверхностных вод в придонный слой может быть объяснено меньшими размерами бухты, воздействием стока реки Чёрная, а также интенсивным движением крупнотоннажного, с низкой осадкой моторного транспорта на внутреннем рейде Севастополя.

Очевидно, тем не менее, что определяющим экологическим фактором интенсивного развития гипоксических явлений в обеих бухтах служит высокая степень изолированности таких узких морских заливов, подобных фьордам, от открытого моря. Замедленный водообмен – как горизонтальный, как и вертикальный, а также повышенные скорости осадконакопления, включая органические вещества, могут быть признаны ключевыми драйверами формирования кислород-дефицитного газового режима бентали обеих исследованных бухт Крыма. Можно предположить также, что не только современные донные осадки, но и реликтовые речные наносы палеорусел, богатые органическим веществом, способны влиять на формирование параметров среды обитания сообществ донных организмов.

Бенталь обеих изученных заливов-фьордов можно причислить к высокоградиентным гипоксическим биотопам и, соответственно, они находятся в единой общности локальных кислород-дефицитных местообитаний морских водоёмов – эстуарных зон, районов газовых сипов и т.п., где также постоянно или периодически сосуществуют высокая трофность осадков наряду с острым недостатком кислорода и токсичным сероводородным заражением.

Оксифильная бентосная фауна в описанных заливах-фьордах вынуждена обитать в пространстве донного ландшафта с высоко-градиентными гидрохимическими условиями среды, что требует специальных адаптаций, но в целом – неблагоприятно для



развития фито- и зооценозов. Подобные местообитания могут быть отнесены к экстремальным биотопам «пустынного» типа. Это необходимо учитывать при организации мониторинга и оценке экологического состояния исследованных и им подобных прибрежных полужамкнутых водоёмов.

В целом, изученные объекты имеют важное значение для изучения влияния изменчивости уровня моря в историческом прошлом на формирование биогеохимических параметров среды обитания современных бентосных сообществ. В дальнейших исследованиях донных ландшафтов Чёрного

моря необходимо изучение не только мега- и макроформ бентали, но и объектов меньших масштабов. Например, к таким мезоморфам рельефа дна относятся подводные хребты и террасы, а также уже упоминавшиеся затопленные морем бывшие речные долины. Именно такой подход позволит осуществлять по-настоящему популяционные исследования биоценозов Чёрного моря, выявлять экстремальные экотопы, в которых формируются поселения организмов с локально высокой либо, напротив, угнетённой биологической продуктивностью формируемых ими сообществ.

Благодарности: 1. Работа подготовлена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», номер гос. регистрации АААА-А18-118021490093-4.

2. Авторы также выражают большую признательность М. В. Коваленко и В. П. Чекалову (ФГБУН ИМБИ) за помощь в проведении экспедиционных исследований.

Acknowledgments: 1. The work has been carried under support of the Russian Academy of Sciences reaserch grant № АААА-А18-118021490093-4 "Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physico-chemical regimes".

2. The authors also appreciate to M. V. Kovalenko and V. P. Chekalov (IMBR, Sevastopol) for their assistance during the field studies.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Möner N.A. Eustatic changes during the last 20000 years and a method of separating the isostatic and eustatic factors in an uplifted area // *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoeology*. 1971. V. 9, N 3. P. 153-181. DOI: 10.1016/0031-0182(71)90030-7
2. Гулин М.Б. О роли перманентного осадконакопления в эволюции и судьбе морских водоёмов // *Морской экологический журнал*. 2013. Т.12, N 3. С. 48.
3. Конилов Е.Г., Лиходедова О.Г. Глобальные и региональные факторы колебаний уровня Чёрного моря как основа геодинамической модели береговой зоны // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. N 1(19). С. 84-93.
4. Гулин М.Б., Тимофеев В.А., Коваленко М.В., Чекалов В.П., Бондаренко Л.В., Аннинская И.Н., Иванова Е.А. Трансформация затопленных морем фрагментов речных систем в морские биогеоценозы // *Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона»*, Керчь, 26-27 июня, 2013. С. 30-38.
5. Gulin M., Ivanova K., Timofeev V., Kovalenko M. Black Sea hot-spot environments and ecosystems: Future of deltas and riverbeds flooded by sea // *Proceedings of International Symposium "Effects of Climate Change on the World's Oceans"*, Yeosu, Korea, 13-20 May, 2012. P. 248.
6. Бондарев И.П. Комплекс моллюсков рода *Theodoxus* (Gastropoda, Neritidae) в голоценовых отложениях Севастопольской бухты // *Морской экологический журнал*. 2014. Т. 13, N 3. С. 32.
7. Бондарев И.П. *Theodoxus fluviatilis* (Gastropoda, Neritidae) как экологический фактор // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, N 2. С. 18-26. DOI: 10.21072/mbj.2016.01.2.02
8. Newton A., Icely J., Cristina S., Brito A., Cardoso A., Colijn F., Dalla Riva S., Gertz F., Hansen J., Holmer M., Ivanova K., Leppäkoski E., Melaku Canu D., Mocennim C., Mudge S., Murray N., Pejrup M., Razinkovas A., Reizopoulou S., Pérez-Ruzafa A., Schernewski G., Schubert H., Seeramu L., Solidoro C., Pierluigi Viaroli, Zaldivar J.-M. An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, vol. 140, pp. 95-122. Doi: 10.1016/j.ecss.2013.05.023
9. Яндекс-Карты. URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 20.05.2018).
10. Holtedahl H. Notes on the Formation of Fjords and Fjord-Valleys // *Geografiska Annaler*. 1967, vol. 49, no. 2/4, pp. 188-203. doi:10.2307/520887



11. Стокозов Н.А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. вып. 23. С. 198-208.
12. Rosenberg R. Effect of oxygen deficiency on benthic macrofauna // Freeland et al. Fjord oceanography. N.Y.: Plenum Publ., 1980. P. 499-514.
13. Орехова Н.А., Коновалов С.К. Кислород и сероводород в донных осадках Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. Вып. 18. С. 48-56.

14. Гулин М.Б. К изучению роли гипоксии и аноксии в жизни морских эукариот // Морской экологический журнал. 2012. Т. 11, N 1. С. 81-98.

15. Иванова Е.А., Кошелева Т.Н. Сравнительный анализ таксоцено нематод севастопольских бухт // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. Вып. 7. С. 209-216.

16. Субботин А.А., Губанов В.И., Трощенко О.А., Болтачев А.Р., Ревков Н.К. Современное состояние отдельных элементов экосистемы бухты Александровская (район Севастополя) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 89-93.

REFERENCES

1. Möner N.A. Eustatic changes during the last 20000 years and a method of separating the isostatic and eustatic factors in an uplifted area. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, 1971, vol. 9, no. 3, pp. 153-181. DOI: 10.1016/0031-0182(71)90030-7
2. Gulin M.B. The role of permanent sedimentation in the evolution and destiny of marine basins. *Morskoi ekologicheskii zhurnal* [Marine ecological journal]. 2013, vol. 12, no. 3, p. 48. (In Russian)
3. Konikov E.G., Lihodedova O.G. Global and regional factors of Black Sea level fluctuations as the basis of the geodynamic model of the coastal zone. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* [Geology and minerals of the World Ocean]. 2010, no. 1(19), pp. 84-93. (In Russian)
4. Gulin M.B., Timofeev V.A., Kovalenko M.V., Chekalov V.P., Bondarenko L.V., Anninskaya I.N., Ivanova E.A. Transformatsiya zatoplennykh morem fragmentov rechnykh sistem v morskii biogeotsenozy [Transformation of the river systems fragments flooded by sea in marine ecosystems]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye rybnokhozyaistvennye i ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo regiona»*, Kerch', 26-27 iyunya, 2013 [Materials of the VIII International scientific and practical conference "Modern fisheries and environmental problems of the Azov-black sea region", Kerch, 26-27 June 2013]. Kerch, 2013, pp. 30-38. (In Russian)
5. Gulin M., Ivanova K., Timofeev V., Kovalenko M. Black Sea hot-spot environments and ecosystems: Future of deltas and riverbeds flooded by sea. *Proceedings of International Symposium "Effects of Climate Change on the World's Oceans"*, Yeosu, Korea, 13-20 May, 2012, p. 248.
6. Bondarev I.P. Complex of mollusks genus *Theodoxus* (Gastropoda, Neritidae) in Holocene sediments of Sevastopol Bay. *Morskoi ekologicheskii zhurnal* [Marine ecological journal]. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 32. (In Russian)
7. Bondarev I.P. *Theodoxus fluviatilis* (Gastropoda, Neritidae) as environmental marker. *Marine biological journal*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 18-26. (In Russian) DOI: 10.21072/mbj.2016.01.2.02
8. Newton A., Icely J., Cristina S., Brito A., Cardoso A., Colijn F., Dalla Riva S., Gertz F., Hansen J., Holmer M., Ivanova K., Leppäkoski E., Melaku Canu D., Mocennim C., Mudge S., Murray N., Pejrup M., Razinkovas A., Reizopoulou S., Pérez-Ruzafa A., Schernewski G., Schubert H., Seeramu L., Solidoro C., Pierluigi Viaroli, Zaldivar J.-M. An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, vol. 140, pp. 95-122. Doi: 10.1016/j.ecss.2013.05.023
9. *Yandex-Karty* [Yandex-Maps]. Available at: <https://yandex.ru/maps> (accessed: 20.05.2018).
10. Holtedahl H. Notes on the Formation of Fjords and Fjord-Valleys. *Geografiska Annaler*, 1967, vol. 49, no. 2/4, pp. 188-203. doi:10.2307/520887
11. Stokozov N.A. Morphometric characteristics of both Sevastopol and Balaklava bays. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelf'a* [Environmental safety of the coastal and shelf zones and integrated use of the resources of the shelf]. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics Publ., 2010, vol. 23, pp. 198-208. (In Russian)
12. Rosenberg R. Effect of oxygen deficiency on benthic macrofauna. In: Freeland et al. Fjord oceanography. N.Y., Plenum Publ., 1980, pp. 499-514.
13. Orekhova N.A., Konovalov S.K. Oxygen and hydrogen sulfide in bottom sediments of Sevastopol Bay. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelf'a* [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]. 2009, vol. 18, pp. 48-56. (In Russian)
14. Gulin M.B. Studying the role of hypoxia and anoxia in the life of marine eukaryotes. *Morskoi ekologicheskii zhurnal* [Marine ecological journal]. 2012, vol. 11, no 1, pp. 81-98. (In Russian)



15. Ivanova E.A., Kosheleva T.N. Comparative analysis of nematodes taxocene in Sevastopol bays. *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana* [Ecosystems, their optimization and protection]. 2012, iss. 7, pp. 209-216. (In Russian)
16. Subbotin A.A., Gubanov V.I., Troshchenko O.A., Boltachev A.R., Revkov N.K. The current state of se-

lected elements of the ecosystem of Alexandrovskaya Bay (Sevastopol region). In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelf'ovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]. 2007, vol. 15, pp. 89-93. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Принадлежность к организации

Максим Б. Гулин* – к.б.н., старший научный сотрудник, Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН. Тел. +7(8692) 54-47-85. 299011, пр. Нахимова 2, г. Севастополь, Российская Федерация, e-mail: m_gulin@mail.ru

Игорь В. Масберг – к.б.н., научный сотрудник, Научно-производственное предприятие «Аквамарин», г. Евпатория, Россия.

Екатерина А. Иванова – младший научный сотрудник, Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, Россия.

Критерии авторства

Максим Б. Гулин собрал материалы о геоморфологическом строении залива Донузлав и бухты Севастопольская, о рельефе дна, а также о содержании растворённого кислорода и окислительно-восстановительном потенциале среды в придонном слое указанных водоёмов, проанализировал данные, написал рукопись. Игорь В. Масберг и Екатерина А. Иванова собрали материалы о рельефе дна, а также о содержании растворённого кислорода и редокс-потенциале на границе «водная толща – дно» в заливе Донузлав и Севастопольской Бухте, работали над текстом рукописи. Все авторы в равной степени несут ответственность за плагиат и самоплагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.06.2018

Принята в печать 17.07.2018

AUTHORS INFORMATION

Affiliations

Maksim B. Gulin* – Candidate of Biology, Associate Professor, The A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS. Tel. +7(8692) 54-47-85. 299011, Nakhimov Av., 2, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: m_gulin@mail.ru

Igor V. Masberg – Candidate of Biology, Scientist, Scientific-Technological Company «Aquamarine», Evpatoria, Russia.

Ekaterina A. Ivanova – Associate Scientist, The A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, Russia.

Contribution

Maksim B. Gulin has been collected literature data and also field materials regarding the geomorphological structure of both Donuzlav and Sevastopol fjord-like bays, on the seabed relief, as well as content of dissolved oxygen and redox-potential of environment within the near-bottom layer of these water basins, analyzed the data, wrote the manuscript. Igor V. Masberg and Ekaterina A. Ivanova collected materials on the sea-floor relief, as well as content of dissolved oxygen and redox-potential at the “water column – seabed” interface in the Gulf of Donuzlav and Sevastopol Bay, worked together on the text of the manuscript. All authors are equally responsible for avoiding the plagiarism, self-plagiarism or any other unethical issues.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.06.2018

Accepted for publication 17.07.2018