

ЗООБЕНТОС В МИКРОБИОТОПАХ МЕТАНОВЫХ СИПОВ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ КРЫМСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

М.Б. Гулин, В.А. Тимофеев,
Л.В. Бондаренко

Институт биологии южных морей
НАН Украины
г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
эл.почта: m_gulin@mail.ru

В статье приводятся данные о количественных параметрах и видовом разнообразии зообентоса, преимущественно Crustacea, в локальных зонах острой гипоксии и сероводородного заражения донных осадков в районе метановых газовыделений со дна (прибрежная акватория п-ва Тарханкут, с.-з. Крым).

Введение. В 1980 г. в Каламитском заливе Чёрного моря, вблизи побережья полуострова Тарханкут были обнаружены многочисленные выходы газообразного метана из донных отложений (сипы). Целенаправленные исследования данного природного объекта проводятся с 2000 г. [1, 2, 4]. Метан газовых сипов служит первичным источником органического углерода, поддерживающим продуцирование большой биомассы бактериобентоса и формирование т.н. бактериальных матов.

Особый интерес представляет изучение возможности обитания бентосных оксифилов-эукариот, в т.ч. Metazoa, в микробиотопах газовых сипов - в условиях острого дефицита кислорода или при его полном отсутствии в среде.

В совокупности с биологическими исследованиями важной задачей является изучение глубины залегания границы "гипоксия/аноксия" и уровней сероводородного заражения в толще микробных матов.

Принято считать, что гипоксия развивается, когда концентрация кислорода становится менее 63 μM (2 мг/л) [3, 5]. Однако это допущение следует признать условным, т.к. важными факторами для дыхания гидробионтов являются также гидростатическое давление и температура среды. Последний фактор – темпера-

тура и особенно её динамические характеристики наиболее важны для мелководных объектов, таких как, например, газовые сипы Тарханкута.

Целью настоящей работы являлось изучение экологии зообентоса Чёрного моря в прибрежных локальных зонах острой гипоксии и критического заражения донных осадков сероводородом.

Материалы и методы. Исследования проведены в районе с. Окунёвка (Тарханкут, северо-западный Крым). Экспедиционные работы выполнялись в 2009-2010 гг. в различные сезоны: апрель, начало сентября и ноябрь 2009 г.; март, июнь и август 2010 г.

Основной объём материала был собран водолазами, что обеспечило высокое качество полученных проб и позволило провести исследования в условиях, приближённых к таковым в природе.

Изучение количественных характеристик макрозообентоса выполнено в двух экспедициях – в сентябре и ноябре 2009 г. Пробы отбирали ручным дночерпателем ($S=0,04 \text{ м}^2$) в пятне наиболее активного газового сипа, расположенного на глубине 3,5-4,0 м, а также, для сравнения, на прилегающем участке чистого песка (фон). Сбор материала из каждой точки осуществляли в одной повторности. Далее пробы промывали фильтрованной морской водой через ряд сит с минимальным диаметром ячеек 0,5 мм. Фиксировали 75% раствором спирта.

Исследования микро- и мейзозообентоса выполнены в сентябре 2009 г., июне и августе 2010 г. Отбор проб выполнялся с помощью пластиковых поршневых трубок длиной 11 см и с внутренним диаметром 26 мм. Трубки были снабжены резиновыми пробками и герметично закупоривались под водой сразу после пробоотбора. Исследования проводились с использованием свежего, нефиксированного материала, в условиях, близких *in situ*. Учёт живых организмов и их мёртвых остатков производился в прозрачной газонепроницаемой камере с использованием микроскопа МБИ-1, оснащённого объективами $\times 8$ или $\times 10$, в проходящем свете. Вместо окуляра была использована специальная цифровая телекамера ICM532A (Germany), соединённая с компьютером.

Комплекс процедур описанной выше методики позволил осуществить прижизненные наблюдения и диагностику состояния микро- и мейобентоса, обитающего в специфических биотопах метановых сипов.

В апреле 2009 и марте 2010 гг. пробы зообентоса не брали, были проведены только визуальные наблюдения и гидрохимические измерения.

Распределение растворённого кислорода и температуры в водной толще над сипами изучали *in situ* - с помощью оксиметра "Nash HQ40d" (США-ФРГ) оборудованного погружным люминисцентным датчиком с 30-метровым кабель-тросом. Точность измерений $[O_2]$ данным прибором составила $\pm 0,1$ мг/л.

Для исследований вертикального распределения кислорода и сероводорода в микробных матах газовых сипов был использован полярографический метод с Au/Hg-микроэлектродом. Пределы обнаружения O_2 и H_2S оказались равны в данном случае $5 \mu M$ и $0,5 \mu M$, соответственно. Измерения в придонной воде и толще грунта были сделаны с шагом $0,5-1,0$ мм.

Указанные гидрохимические анализы проводили в колонках бактериальных матов, взятых вместе с придонной водой с помощью трубок из прозрачного акрила, снабжённых герметичными крышками. Пробы были отобраны таким образом, чтобы структура осадков и окислительно-восстановительные условия в них сохранялись максимально приближенными к естественным. Вместе с тем следует обратить внимание, что в данном случае использовался не *in situ* метод, в отличие от описанного выше оксиметра для водной толщи. Следовательно, по причине чрезвычайно интенсивных микробиологических процессов в сульфуреттах сипов некоторая эмиссия сероводорода из колонок матов в придонный слой и поглощение определённых количеств кислорода были возможны в изолированных пробах за время их транспортировки на берег и подготовки для измерений (около получаса). Тем не менее, авторы считают, что это не могло существенно исказить полученные результаты и в целом удалось достаточно надёжно различать поверхностные слои

донных осадков с гипоксическими условиями среды и залегающую глубже зону аноксии. Технические процедуры и измерения выполнялись при участии Н.А. Ореховой и М.В. Коваленко.

Результаты и обсуждение. Прежде всего следует отметить, что акватория южного побережья п-ва Тарханкут достаточно хорошо защищена от антропогенного воздействия. Трёхмильная полоса вдоль берега – это рыбоохранная зона с особым режимом природопользования. Также, данный район пока ещё малонаселён и сравнительно редко посещается туристами. Таким образом, находящееся здесь поле метановых сипов является естественным природным образованием.

Наиболее активные сипы в данном районе были обнаружены на глубинах 3–7 м при удалении от берега 100–170 м [1].

Важным свойством исследуемого района является высокая биологическая продуктивность метанооксиляющих бактерий в местах высачиваний газов. Вблизи сипов образуются массивные, толщиной до 12-17 сантиметров бактериальные обрастания - маты, а содержание органического вещества значительно превышает таковое на прилегающих фоновых станциях, примерно в 7-50 раз, в зависимости от сезона, погодных и температурных условий.

Также, среда микробиотопов газовых сипов имеет критически высокие уровни сероводородного заражения. Значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) могут снижаться здесь до -460 мВ [4].

В ноябре 2009 г., при температуре воды $+14^\circ C$ поверхностный слой микробного мата в пятне сипа был более окисленным, светло-коричневым в контрасте с сентябрьскими наблюдениями, когда температура в придонном слое составляла $+22^\circ C$, а поверхность мата была тёмно-серого цвета. Вместе с тем, в обоих случаях содержание растворённого кислорода у дна было заметно меньшим, чем в вышележащих слоях водной толщи, что свидетельствует об активном химическом и биологическом потреблении кислорода вблизи и непосредственно на поверхности донных осадков. Например, в ноябре-2009 значения концен-

трации O_2 в поверхностных водах были примерно в 3 раза более высокими, чем в придонном слое.

В зимний период и ранней весной, т.е. в сезоны сильных штормов, гипоксическая среда, а также микробные сульфуретты вблизи метановых сипов могут разрушаться, происходит максимальная аэрация бентали. Это наблюдалось в апреле 2009, а также в марте и мае 2010 г. В частности, сильный шторм 11 марта 2010 г. смыл бактериальные маты сипов, при этом концентрация растворённого кислорода у дна составляла 11,33 мг/л ($T_{\text{воды}} +4,7^\circ\text{C}$). В других случаях после штормов наблюдали не только размытие микробных отложений, но и отсутствие каких-либо газовыделений со дна.

Осенью 2009 г. концентрация кислорода в придонном слое над метановым сипом не опускалась ниже 2,7 мг/л. Следовательно, аэрация среды на границе "вода-дно" была здесь на уровне, достаточном для нормальной жизнедеятельности эпибентоса.

Для инфауны, обитающей внутри осадков, оценки состояния среды в микробных матах были сделаны с помощью Au/Hg-микроэлектродов. Оказалось, что в колонках матов и придонной воде, отобранных в сентябре 2009 г., растворённый кислород отсутствовал уже в непосредственной близости от поверхности сульфуретты сипа (2 мм выше границы "вода - дно"), вернее концентрация O_2 в данном случае была ниже предела чувствительности использовавшегося метода (аналитическое отсутствие кислорода). Напротив, поздней осенью - в конце ноября 2009 г. кислород на поверхности мата был обнаружен, хотя его содержание резко снижалось в толще осадков и на горизонте 4 мм он уже не определялся. При этом, в ноябре концентрация другого газа - сероводорода, антагониста O_2 , значительно уменьшилась в пятне сипа: в сентябре максимальные значения $[H_2S]$ достигали 3 мМ, тогда как в конце осени они оказались ниже примерно на 2 порядка. Вместе с тем, летом 2010 г. содержание сероводорода в сульфуреттах сипов снова возросло. Так, в июне-2010 концентрация H_2S регистрировалась на уровне 1,5 мМ.

Таким образом, можно предположить наличие межсезонной динамики развития сероводородного заражения дна в зоне сипов Тарханкута с максимумом в тёплый период года.

Несомненно, слабая диффузия кислорода из воды в толщу бактериальных матов в совокупности с интенсивными процессами бактериального окисления метана и гетеротрофной респирацией являются причиной возникновения описанных выше гипоксических и анаэробных явлений, а также высоких уровней сероводородного заражения донных осадков вблизи сипов. По результатам проведенных гидрохимических анализов можно заключить, что присутствие растворённого кислорода в микробных обрастаниях сипов наблюдается лишь в самом верхнем слое матов, толщиной 0–4 мм. Это согласуется с данными по другим биотопам верхней сублиторали морских водоёмов. Так, в "активных" илах глубина проникновения кислорода обычно не превышает 1 мм [3].

Вместе с тем, в сентябре 2009 г. при промывке на ситах содержимого матов, взятых в центре пятна сипа, наблюдали живых, активно передвигающихся животных, прежде всего ракообразных и полихет.

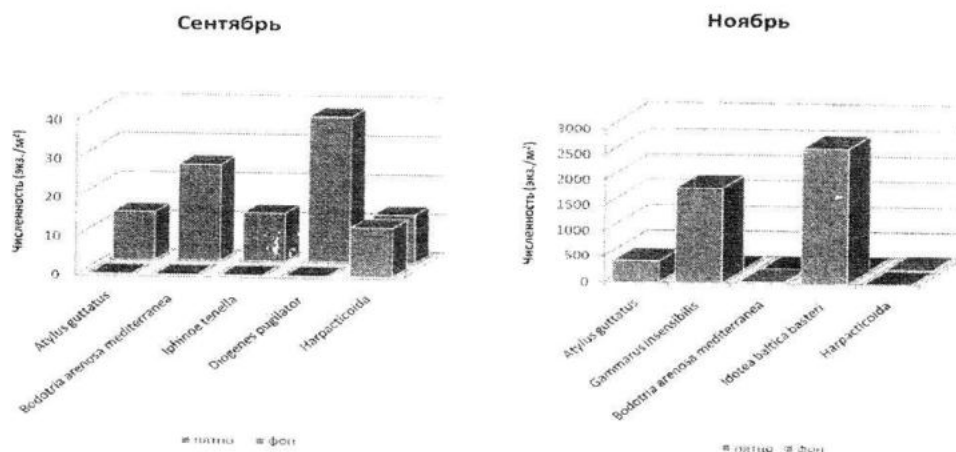
Таким образом, основываясь на данных гидрохимических анализов и биологических наблюдениях, было установлено, что в высокопродуктивных, но агрессивных средах микробных матов газовых сипов возможно чередование неблагоприятных и благоприятных периодов для проникновения и пребывания донной фауны – зообентоса.

На рис. 1 показана численность видов ракообразных - Malacostraca и Harpacticoida в районе исследования в разные периоды времени. На графиках видно, что во время активных выделений метана (сентябрь 2009 г.) в центре сульфуретт газовых сипов найдены только Harpacticoida (12 экз./м²), в то время как фон характеризовался присутствием не только гарпактицид, но также Malacostraca - таких видов, как *Diogenes pugilator*, *Iphinoe tenella*, *Bodotria arenosa mediterranea* и *Atylus guttatus*. При этом наибольшей численности дос-

тигает рак-отшельник *Diogenes pugilator* (37 экз./м²).

В ноябре, когда выделение газа отсутствовало, наблюдалась обратная зависимость: в пятне были найдены Malacostraca *Gammarus insensibilis*, *Idotea baltica basteri*, *Bodotria arenosa mediterranea*, *Atylus guttatus*, тогда как в

фоновых пробах – только Harpacticoida (25 экз./м²). Наибольшая численность отмечена у *Idotea baltica* (2650 экз./м²) и *Gammarus insensibilis* (1850 экз./м²) (рис.1). Также, из приведенных данных следует, что в позднее-осенний период произошла сезонная смена видового



Р и с. 1. Численность *Malacostraca* и *Harpacticoida* в районе метановыделений (пятно) и на чистом песке (фон) у побережья м. Тарханкут в разные периоды времени.

состава и общей численности Malacostraca в пятне сипа и его окрестностях.

Одним из предположений о причинах обнаруженной пространственно-временной динамики макрозообентоса в сипах может быть то, что во время наиболее интенсивных газовыделений и, соответственно, максимального развития донной гипоксии (сентябрь-2009), бентосные животные избегают агрессивных условий, возникающих в зоне сипов, и сосредотачиваются на прилегающих участках дна. Напротив, при активизации гидрологических процессов и повышенной аэрации придонного слоя (ноябрь-2009) зообентос мигрирует в богатые органикой сульфуретты сипов.

По биомассе Crustacea наблюдается та же картина за исключением того, что в ноябре 2009 г. наибольшая биомасса была отмечена не у идотей, а у *Gammarus insensibilis* (1,663 г/м²) (рис.2), в отличие от приведенных выше данных по численности ракообразных (рис. 1).

Следует добавить также, что в сентябре 2009 г., июне и августе 2010 г. в верхнем слое центральной части сульфуретт тарханкутских сипов были обнаружены не только ракообразные и поли-

хеты, но также живой микро- и мейобентос: Ciliata, мелкие Harpacticoida и Nematoda. Наиболее важно, что обнаруженные представители бентосной инфауны были способны обитать только в самом верхнем слое бактериальных матов. Прижизненные наблюдения показали, что даже наиболее адаптированные к гипоксии и сероводороду особи могут проникать в толщу микробного мата на глубину не более 1-2 мм. Глубже были найдены только остатки погибших животных, обитавших в сипе, видимо, на более ранних стадиях формирования микробного мата.

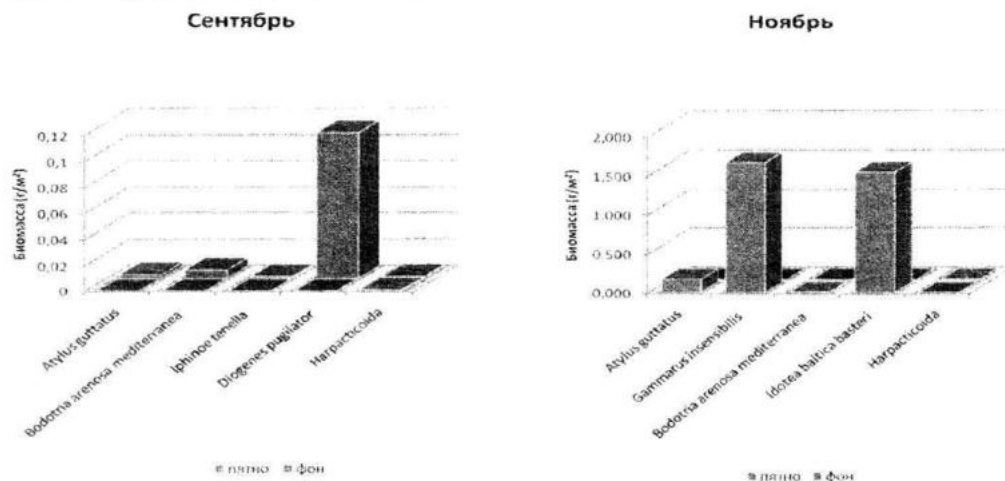
Вертикальные миграции бентосных организмов в перманентно аноксическую зону ограничены, вероятно, отсутствием акцепторов электронов, пригодных для дыхания эукариот, а также острым дефицитом лабильных форм органического вещества.

Заключение. Феномен активных высачиваний газообразного метана со дна в районе п-ва Тарханкут наблюдается авторами с 1980 г., из чего можно заключить, что гипоксия и аноксия являются постоянной характеристикой данной природной системы. Несомненно, пре-

имущественное развитие они получают в летний и осенний периоды, во время пониженной гидродинамики вод. Важную роль имеет также температурный режим в районе сипов. Наиболее окисленные условия среды в матах характерны для холодного периода года, тогда как анок-

сия возникает при прогреве водной толщи и донных отложений.

В зонах выделений метана, а вернее - в верхнем слое сульфуретт сипов, присутствует живой, активно мигрирующий зообентос. Однако, его локализация на



Р и с. 2. Биомасса *Maëacostraca* и *Harpacticoida* в районе метановыделений (пятно) и на фоновой станции.

поверхности пятен сипов и проникновение в толщу бактериальных матов ограничивается определёнными пороговыми уровнями $[O_2]$ и $[H_2S]$. Количественные и качественные характеристики донной фауны зависят от условий обитания в микробиотопах сипов. Так, в периоды активизации газовыделений со дна видовое разнообразие зообентоса, найденного в пятнах сульфуретт, значительно беднее по сравнению с фоновым районом. Это, вероятнее всего, зависит не только от сезонного развятия, а также от типа питания и, главное, устойчивости обнаруженных видов бентоса к дефициту кислорода и токсическому действию H_2S .

Исследования выполнены при поддержке российско-украинского проекта – тема №14-ИнБИОМ, проекта ЕС Нурох-226213, а также за счёт личных средств авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gulin M.B. Dependence of location and intensity of the methane cold seeps on geophysical factors: the Black Sea near-

shore shallow-water seeps, underwater video-materials. Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 2004.- EGU04-A-05394.

2. Laier, T., Jensen, J.B., Ion, G., Gulin, M. & Fritsche, U. Digital maps of free gas distribution in marine sediments. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport. – 78, 2005. – 49 pp.
3. Middelburg J. J., Levin L. A. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences. – 6, 2009. – P. 1273–1293.
4. Gulin M. Observation of alive benthos under a sharp hypoxia and high H_2S concentrations inside the microbial mats (methane seeps in the shallows of Black Sea). Geophysical Research Abstracts. - 11, 2009. - EGU2009-8302.
5. Orekhova N.A., Sergeeva N.G., Gulin M.B., Kononov S.K. Events of hypoxia and anoxia in the Crimean coastal waters. Int. Conf. INQUA 501-IGCP 521. - Rhodes, Greece, 27.09-05.10.2010 (in press).