

УДК 547.211:579(262.5)

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА МИКРОБНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ МОРСКОЙ АКВАТОРИИ

© 2018 г. Т. В. Малахова^{1,*}, Т. А. Канапацкий², И. Г. Сидоров¹, И. И. Русанов²,
Л. В. Малахова¹, В. Ю. Проскурнин¹, Н. В. Пименов²

¹Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

²Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва, Россия

*e-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru

Поступила в редакцию 27.07.2017 г.

После доработки 06.02.2018 г.

Принята к публикации 08.02.2018 г.

Проведены сезонные исследования микробных процессов метаноокисления (МО) и сульфатредукции (СР) в донных отложениях на 5 станциях эстуарного района Севастопольской акватории, которые отличались седиментационным и геохимическим режимами. Установлено, что на станциях с высокой концентрацией органического углерода $C_{орг}$ наблюдались большие концентрации метана в осадках и соответственно высокие скорости МО. Зависимость этих величин имела экспоненциальный характер, тогда как для СР количество органического углерода не являлось лимитирующим параметром. Диапазон интегральных значений скоростей СР на исследованных станциях находился в пределах от 1.9 до 11.3 ммоль $m^{-2} сут^{-1}$. Установлены разнонаправленные тренды скорости СР в открытом море и закрытой части акватории: в центре бухты в течение исследованного периода СР снижалась, тогда как в открытом море — повышалась. Диапазон значений МО изменялся в широких пределах от 0.0001 до 3.6 ммоль $m^{-2} сут^{-1}$, наиболее высокие скорости МО определены в обогащенных органическим веществом осадках центральной части бухты. Показано, что только на одной станции, где среднегодовое содержание $C_{орг}$ в осадках достигало 3.39%, концентрация метана в поровой воде осадков превысила рассчитанную величину растворимости.

DOI: 10.1134/S0030157418070031

Ранний диагенез в морских осадках является комбинацией различных биогеохимических реакций, в процессе которых осаждающееся органическое вещество минерализуется и частично преобразуется в биогенные газы: CH_4 , CO_2 , H_2S и др. Микробная сульфатредукция и метаногенез имеют особое значение в связи с их доминирующей ролью в процессе реминерализации органического вещества в анаэробных условиях морских осадков [18, 19]. Согласно [20], в прибрежных мелководных районах более 50% от осажденного органического вещества попадает в зону метаногенеза. Часть метана, синтезируемого в анаэробной зоне, окисляется аэробными микроорганизмами — метанотрофами, населяющими как поверхностный окисленный слой донных осадков, так и водную толщу [17]. В анаэробной зоне осадочных отложений метан также окисляется при участии консорциума метанотрофных архей и сульфатредуцирующих бактерий в т.н. зоне перехода от сульфатных к метановым илам (SMT-зона) [11, 16]. По данным многих исследователей в обогащенных органическим веществом морских водоемах SMT-зона выполняет важнейшую барьерную функцию, препятствуя поступлению метана в водную толщу и атмосферу [25]. Тем не ме-

нее, в серии работ показано, что значительная часть метана, продуцируемого в мелководных осадках высокопродуктивных прибрежных районов, в виде флюидных и струйных газовыделений выходит в водную толщу и затем в атмосферу, где присоединяется к пулу парниковых газов [26].

Скорость микробной деструкции осаждающегося органического вещества зависит от скорости его накопления и реакционной способности [9]. Реакционная способность органических веществ определяется комбинацией многих факторов: природой органических соединений, физической доступностью субстрата, геополимеризацией, окислительно-восстановительными свойствами осадков и др. [12, 13, 21]. На глубину залегания SMT-зоны влияет несколько основных факторов: относительное количество осажденного органического вещества, скорость седиментации и концентрация сульфат-иона в придонной воде [9]. Изменение этих параметров влияет на скорость проникновения сульфат-иона в донные отложения, на интенсивность бактериальной сульфатредукции, и, как следствие, на глубину залегания зоны метаногенеза. Интенсификация седиментационных процессов и увеличение вклада органического углерода создает условия, способствующие формированию газонасыщенных осадков. Такие усло-

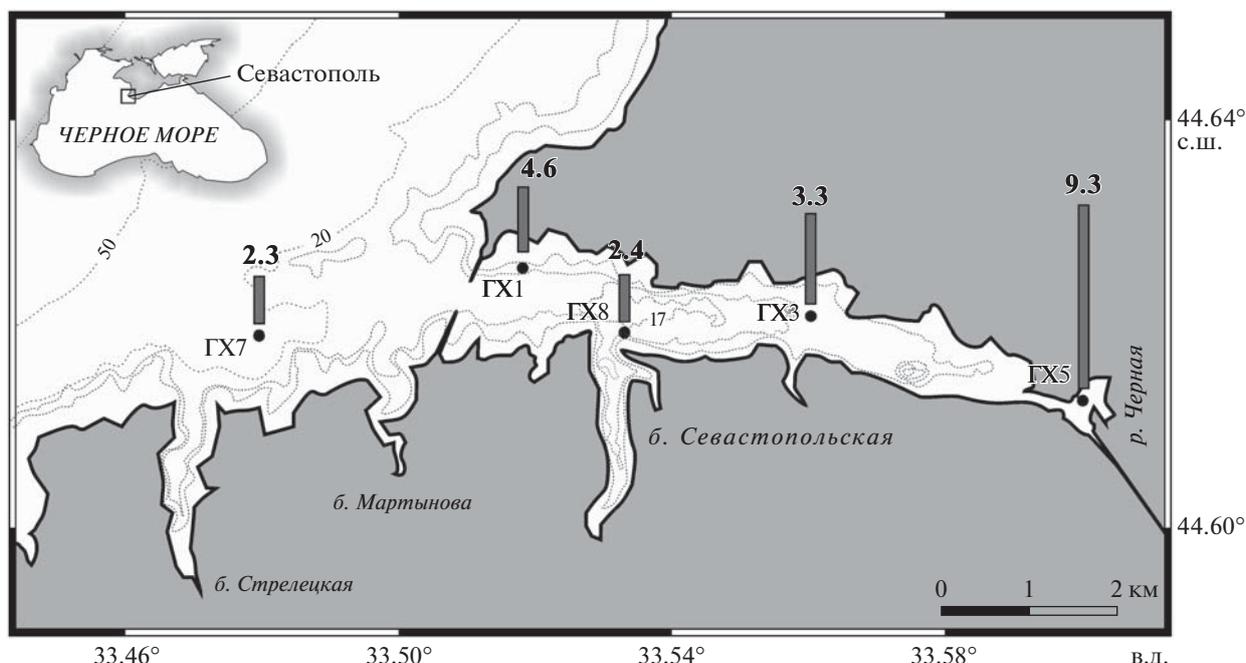


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб. Численные значения над столбиками соответствуют среднегодовой скорости седиментации (мм год^{-1}), определенной по ^{137}Cs [14].

вия наблюдаются в приустьевых районах и палеоруслих рек. По современным данным, древние дельты черноморских рек, таких как Днепр, Дунай, Дон и Чорох являются районами наиболее активных метановых газовыделений [2]. Считается, что они в первую очередь связаны с выделением газа биогенной природы, который накапливается в осадках в процессе деструкции интенсивно депонируемого осадочного материала [4, 5, 10, 26, 27].

Предыдущие исследования показали, что метан струйных газовыделений прибрежных районов Севастопольской акватории также имеет преимущественно биогенное происхождение [3, 22, 24]. Известно, что в Севастопольской бухте седиментационный поток формируется за счет поступления в ее акваторию многочисленных городских стоков, обогащенныхalloхтонным органическим веществом и биогенными элементами. Это приводит к эвтрофикации и гиперэвтрофикации отдельных районов бухты, а также к интенсивному захоронению органического вещества в донных осадках.

В этой связи целью наших исследований было установить биогеохимические закономерности распределения метана и его микробной трансформации в донных осадках Севастопольской акватории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проводились в феврале, мае и октябре 2016 г. с маломерного судна. Для опробований были выбраны 5 станций в прибрежной акватории г. Севастополя, отличающихся скоростями седиментации (рис. 1, табл. 1). Ранее было показано, что минимальная среднегодовая скорость седимен-

тации 2.3 мм год^{-1} отмечена в открытой части акватории на станции GX7, а максимальная, составляющая 9.3 мм год^{-1} , на станции GX5, в приустьевой зоне р. Черная [15]. Оценка скорости седиментации в этих районах была проведена с использованием радиотрассерного метода датировки осадков по профилям вертикального распределения ^{137}Cs в донных отложениях, подробно изложенного в работе [14].

Отбор проб донных осадков и придонной воды проводили акриловой грунтовой трубкой с вакуумным затвором, позволяющей отбирать поверхностный слой донных осадков до 50 см без нарушения структуры. Для усреднения данных отбирали три колонки донных отложений, затем с помощью поршневого экструдера от каждой колонки отделяли верхний 0–1 см слой и тщательно смешивали. Доля биогенного вещества в донных отложениях определялась по содержанию в них долгоживущего природного радионуклида ^{40}K с помощью высокопрецизионного полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC GMX-10 (США) в соответствии с методикой [15]. Содержание метана в придонной воде и донных отложениях измеряли методом фазово-равновесной дегазации на газовом хроматографе HP 5890 с пламенно-ионизационным детектором [1]. Иловые воды получали центрифугированием осадков при 5000 об мин^{-1} в течение 10 мин. Содержание сульфат-иона в поровых водах осадков измеряли на ионном хроматографе “Стайер” (Россия). Скорость СР и МО измеряли радиоизотопным методом по описанным ранее методикам [24].

Элементный анализ на содержание органического углерода в верхнем 1-см слое выполняли на

Таблица 1. Координаты станций, сезонные и среднегодовые значения: в числителе – доля биогенного вещества (% сухой массы); в знаменателе – доля органического углерода ± СКО (% сухой массы) в верхнем 1-см слое донных отложений Севастопольской морской акватории

Станция	Координаты, с.ш., в.д.	H, м	Доля биогенного вещества			Среднегодовые значения доли биогенного вещества/ Среднегодовые значения C _{орг}
			C _{орг}			
			29.02.2016	24.05.2016	11.10.2016	
ГХ7	44°37.1 33°28.9	20	$\frac{77}{1.20 \pm 0.06}$	$\frac{58}{1.19 \pm 0.06}$	$\frac{50}{1.02 \pm 0.05}$	$\frac{62}{1.14}$
ГХ1	44°37.5 33°31.3	14	$\frac{77}{1.72 \pm 0.09}$	$\frac{75}{1.54 \pm 0.08}$	$\frac{45}{1.92 \pm 0.10}$	$\frac{66}{1.73}$
ГХ8	44°37.1 33°32.1	14	$\frac{70}{2.57 \pm 0.13}$	$\frac{57}{2.46 \pm 0.12}$	$\frac{23}{2.56 \pm 0.13}$	$\frac{50}{2.53}$
ГХ3	44°37.2 33°33.7	11	$\frac{26}{3.28 \pm 0.16}$	$\frac{59}{3.56 \pm 0.18}$	$\frac{5}{3.32 \pm 0.17}$	$\frac{30}{3.39}$
ГХ5	44°36.4 33°36.0	5	$\frac{60}{2.66 \pm 0.13}$	$\frac{55}{2.57 \pm 0.13}$	$\frac{23}{2.81 \pm 0.14}$	$\frac{46}{2.68}$

CHNS-элементном анализаторе Elementar Analysensysteme (Germany) модели Vario El Cube в ЦКП “Новые материалы и ресурсосберегающие технологии” (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)”.
 Растворимость метана в поровых водах оценивали из расчета коэффициента растворимости Бунзена [28], который зависит от температуры и солености окружающей среды (1):

$$\ln \beta = A_1 + A_2 \frac{100}{T} + A_3 \ln \frac{T}{100} + S \left[B_1 + B_2 \frac{T}{100} + B_3 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где β – коэффициент Бунзена, мл мл⁻¹; T – температура воды, К; S – соленость воды, ‰; A и B – эмпирические коэффициенты.

В расчет растворимости метана также была введена поправка на давление *in situ* в соответствии с первым законом Генри, согласно [8]. Соленость и температуру поровой воды для всех слоев исследованных колонок принимали равной значениям в придонной воде на соответствующих станциях.

Для сравнения с растворимостью метана в поровой воде (C_{CH₄pw}) его концентрация в донных осадках (C_{CH₄sed}) была пересчитана на объем поровой воды по формуле (2):

$$C_{CH_4pw} = C_{CH_4sed} / \varepsilon. \quad (2)$$

Для этого была рассчитана пористость осадка ε (3):

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_T}{\rho_T V_{oc}}, \quad (3)$$

где M_T – масса твердой фазы осадка, г; ρ_T – плотность твердой фазы осадка, г дм⁻³; V_{oc} – объем, занимаемый осадком, дм⁻³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Донные отложения районов исследования в основном были представлены алевроито-пелитовыми илами с песчаной фракцией, включающими битые створки моллюсков. На станциях ГХ3 и ГХ8 осадки имели мазутно-сероводородный запах. Пористость донных осадков отличалась незначительно и в среднем составила 0.72 ± 0.04.

Сравнение профилей CH₄ в толще донных осадков в феврале 2016 г. (рис. 2, 3) позволило выделить 2 группы станций с низким и высоким содержанием метана. К первой группе относятся станции ГХ1, ГХ5, ГХ7, где концентрации не превышали 10 мкмоль дм⁻³. Ко второй группе относятся станции ГХ3 и ГХ8, расположенные в центральной части Севастопольской бухты, где концентрации метана были на три порядка значений выше. Максимальная концентрация CH₄ была обнаружена в феврале на станции ГХ3 в слое 25–28 см и составляла 3.4 ммоль дм⁻³. SMT-зона на этой станции располагалась ближе всего к поверхности осадка, на глубине около 5 см (рис. 2). Важно отметить, что значения сульфатов на ст. ГХ3 в феврале и на ст. ГХ8 в мае имели нетипичный характер распределения. Минимальные значения на этих станциях фиксировались в поверхностных слоях осадка (рис. 2).

Нетипичные профили распределения сульфатов могут быть результатом их более интенсивного микробного потребления в верхних слоях осадка или контакта с пресными сточными водами в районах исследования. Однако ни в распределении хлоридов, ни в профилях сульфатредукции не обнаружилось каких-либо аномалий, однозначно подтверждающих одну из причин (рис. 2, 3). Порядок значений коэффициентов диффузии Cl⁻ и SO₄²⁻ совпадает (2.03 × 10⁵ и 1.08 × 10⁵ см² с⁻¹ соответственно), и после распреснения поровой воды

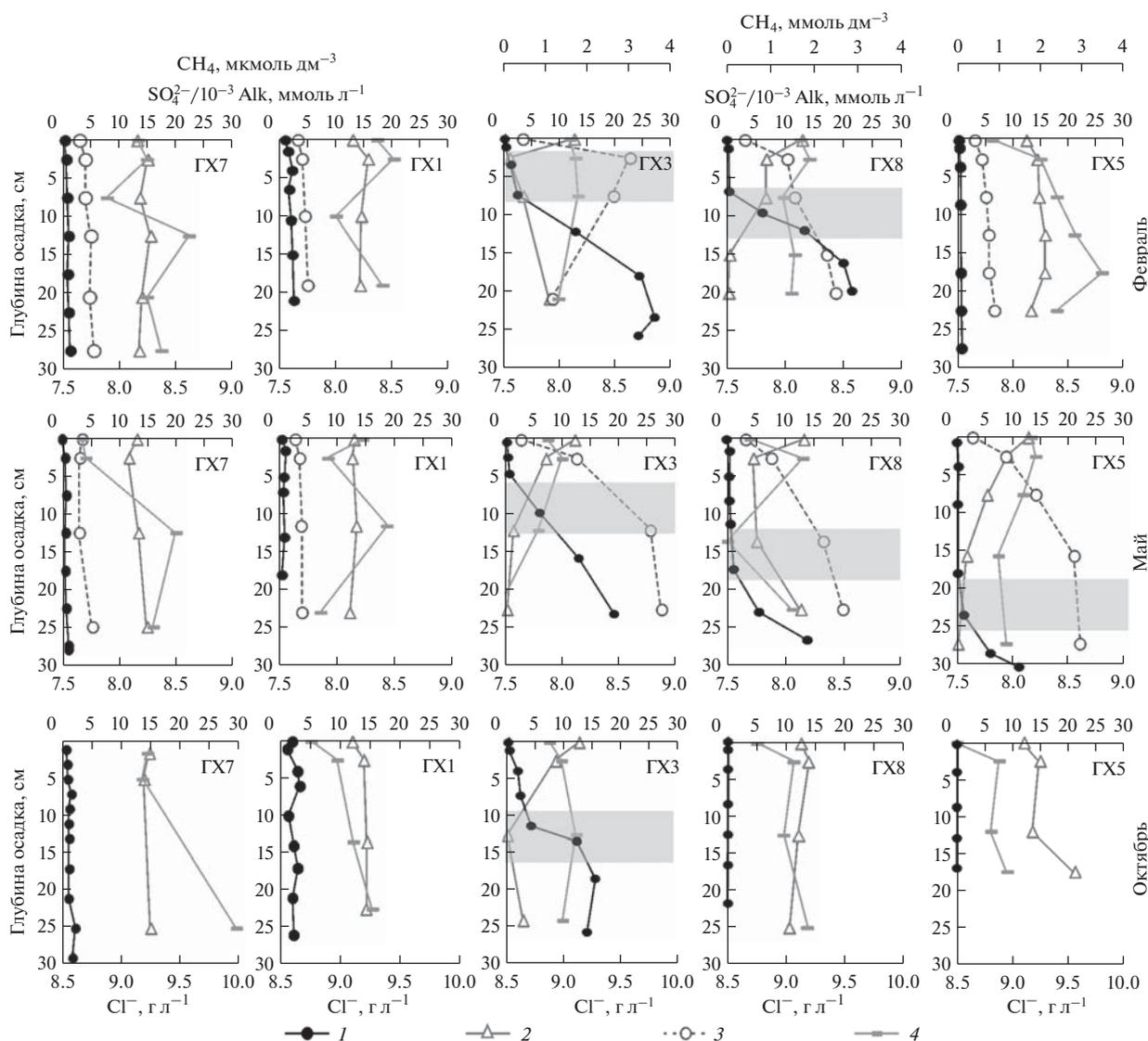


Рис. 2. Профили распределения CH_4 (1), SO_4^{2-} (2), Cl^- (3), Alk (4) в толще донных осадков на 5 прибрежных станциях Севастопольской акватории в феврале, мае и октябре 2016 г. Серым цветом отмечены SMT-зоны. Значения, лежащие на оси абсцисс, соответствуют величинам, измеренным в придонной воде. Станции расположены с запада на восток — от открытой части к кутовой.

сточными водами характер распределения этих ионов в осадках был бы одинаковым. Вероятно, что низкие значения SO_4^{2-} в верхнем слое осадков на станциях GX3 в феврале и GX8 в мае являются следствием высоких интенсивностей сульфатредукции, протекавших за некоторое время до пробоотбора.

Профили распределения интенсивности СР и МО в донных осадках в феврале, мае и октябре 2016 г. на исследованных станциях Севастопольской акватории представлены на рис. 3. Скорость сульфатредукции в осадках изменялась в диапазоне от 0.4 до 86 мкмоль дм⁻³ сут⁻¹. Установлен различный характер профилей распределения СР в толще осадка: с максимумом скорости СР в поверхностном горизонте и с максимумом, находя-

щимся в более глубоких слоях. При этом характер профилей отличался не только на различных станциях, но и в течение 3 сезонов менялся на одной станции, как, например, на станции GX3 (рис. 3).

Скорости МО в осадках большинства станций закономерно увеличивались при углублении в осадочную толщу, за исключением станции GX5, на которой в верхнем слое осадка обнаружен локальный максимум (рис. 3). Максимальные скорости МО относительно других станций во все сезоны измерены на станции GX3.

Биогенное осадконакопление в Севастопольской акватории

Полученные данные показали, что в течение всего периода наблюдений значительное количество биогенного вещества в донных осадках было

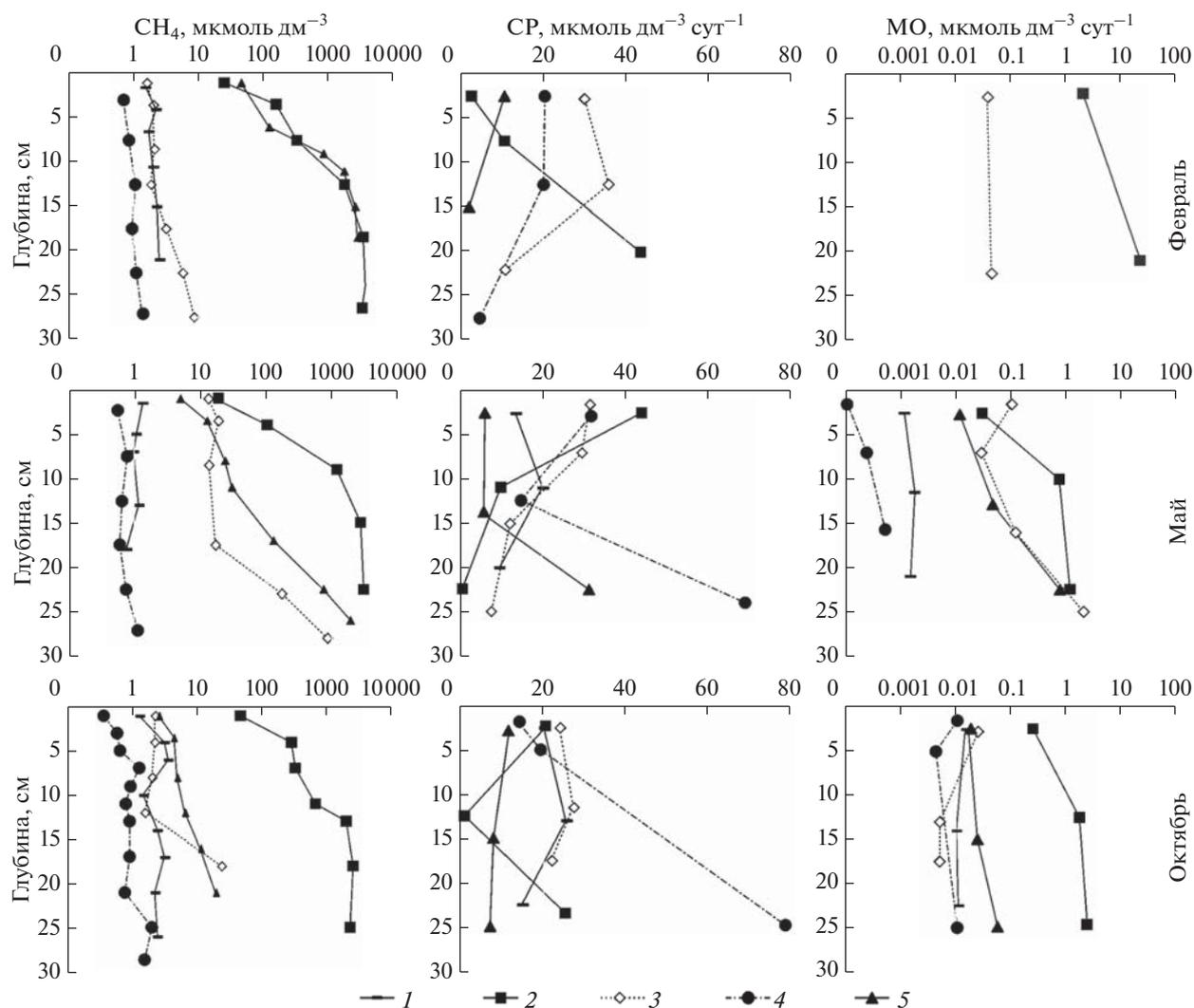


Рис. 3. Профили распределения метана, интенсивности СР и МО в донных осадках в феврале, мае и октябре 2016 г. на 5 прибрежных станциях Севастопольской акватории: 1 – GX1; 2 – GX3; 3 – GX5; 4 – GX7; 5 – GX8.

обнаружено на станциях GX7 и GX1 (табл. 1). В центральной части бухты, на станции GX3, доля биогенного вещества была минимальной и увеличивалась в кутовой части бухты в приустьевой зоне р. Черная (станция GX5). Такое распределение, вероятно, связано с тем, что в восточной части бухты, подверженной речному стоку, накапливается биогенное вещество аллохтонного происхождения, а в западной мористой – автохтонного.

Впервые для Севастопольской акватории была изучена сезонная динамика вклада биогенной фракции в седиментационные процессы. С февраля по октябрь на всех станциях, за исключением GX3, была обнаружена тенденция уменьшения доли биогенной взвеси (таблица). Максимальные значения были измерены в конце февраля, что может быть связано с зимне-весенним пиком развития фитопланктона. Согласно литературным данным, этот пик в Севастопольской бухте, как правило, является максимальным – в летний

и осенний период столь высокий уровень численности и биомассы обычно не достигается [5].

В течение трех сезонов значения концентрации $C_{орг}$ в донных отложениях изученных районов изменялись незначительно. На станциях, расположенных в центральной части Севастопольской бухты, значения $C_{орг}$ в верхнем 1-см слое осадка были в 2–3 раза выше по сравнению с открытой частью акватории (табл. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ

Отрицательная корреляция между содержанием $C_{орг}$ и долей биогенного вещества в верхнем 1-см слое донных осадков ($R = -0.66$; рис. 4) свидетельствует о том, что для исследованных прибрежных районов основным источником захороняемого в донных осадках органического материала является не первичная продукция, а стоки

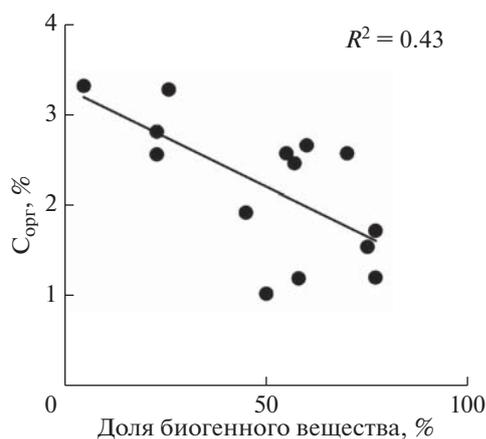


Рис. 4. Зависимость содержания $C_{\text{орг}}$ от доли биогенного вещества, рассчитанной по содержанию в них долгоживущего природного радионуклида ^{40}K , в верхнем 1-см слое донных осадков.

$C_{\text{орг}}$ с берега. Согласно карте-схеме расположения выпусков стоков [6] в районе станций ГХ3 и ГХ8 находятся как ливневые стоки, так и аварийные выпуски неочищенных вод, которые могут быть значимым источником органического вещества. На этих станциях значение $C_{\text{орг}}$ составляло в среднем 3.39 и 2.68% соответственно (таблица). Содержание $C_{\text{орг}}$ на станциях ГХ7 и ГХ1 было существенно меньше и составило 1.14 и 1.73% соответственно, что объясняется отдаленностью этих районов от источников поступления антропогенного $C_{\text{орг}}$. Высокая сезонная изменчивость доли биогенного вещества в донных осадках и в то же время низкая варибельность значений содержания в них $C_{\text{орг}}$ свидетельствует о консервативных источниках его поступления, не связанных с автотонным биогенным веществом.

На станциях с высокой концентрацией $C_{\text{орг}}$ наблюдались большие концентрации CH_4 в осадках и соответственно высокие скорости МО (рис. 5). Зависимость этих величин имела экспоненциальный характер с достаточно высокими коэффициентами детерминации, тогда как для СР количество $C_{\text{орг}}$ не являлось лимитирующим параметром (рис. 5). Известно, что в морских водоемах микробный метан образуется в основном по гидрогенотрофному пути, однако в районах с высокой антропогенной нагрузкой свыше 80% вклада в продукцию метана могут вносить ацетокластические метаногены [23, 24]. На станциях ГХ3 и ГХ8 состав и количество органического вещества, по-видимому, благоприятствовали протеканию метаногенеза по “неконкурентному пути” метаболизма. Скорость микробной деградации осаждающегося органического вещества зависит не только от скорости его накопления, но также и от реакционной способности [9]. В общем, реакционная способность органических веществ является комбинацией многих факторов, таких как природа органического углерода, физическая доступность субстрата, геополимеризация, окислительно-восстановительная зональность в осадочной среде [12, 13, 21]. Определить природу органического вещества планируется в последующих работах.

Ранее методом изотопного анализа состава газа было показано, что метан струйных газовыделений прибрежных районов имеет преимущественно биогенное или смешанное происхождение [3, 24], а процесс газовыделения происходит при превышении величины растворимости концентрации метана в поровой воде осадка. Нами неоднократно наблюдался процесс импульсного пузырькового газовыделения при механическом воздействии на осадки: при отборе донной колонки или ручном пробоотборе. В связи с этим

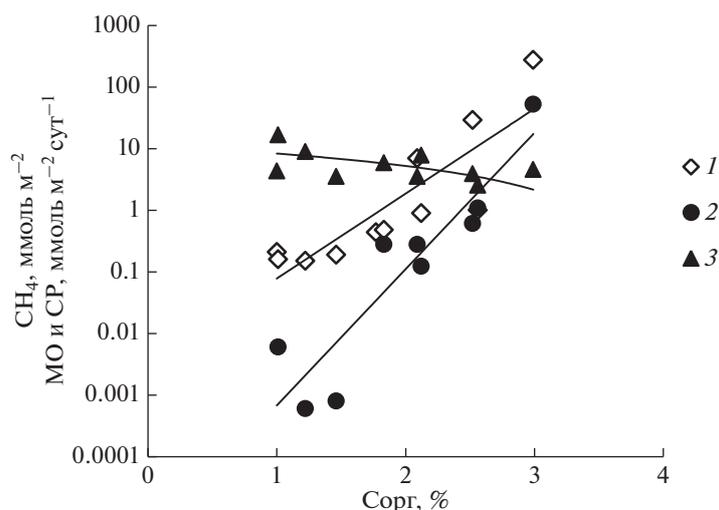


Рис. 5. Зависимость интегральных значений CH_4 (1), МО (2) и СР (3) в верхнем 25-см слое донных осадков, от содержания $C_{\text{орг}}$ в верхнем 1-см слое осадка.

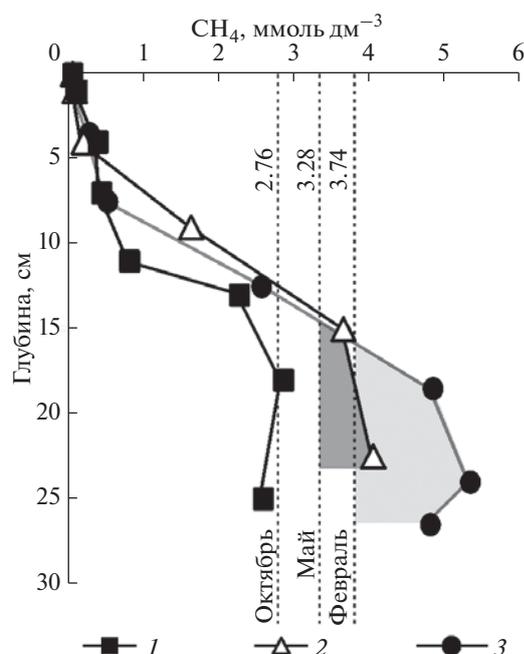


Рис. 6. Профили распределения концентрации метана в поровой воде донных осадков на станции ГХ3 в октябре (1), мае (2) и феврале (3) 2016 г. Пунктирными линиями отмечены рассчитанные значения растворимости для соответствующих сезонов.

для каждой станции были рассчитаны значения растворимости метана с учетом температуры, солёности, пористости осадка, глубины залегания осадка и глубины станции, а также проведено сравнение с концентрациями метана, пересчитанными на объем поровой воды. Было установлено, что только на станции ГХ3 концентрация метана превысила соответствующую величину растворимости в зимний и весенний сезон (рис. 6).

Для того чтобы из растворенного газа образовался газообразный пузырь, парциальное давление всех растворенных газов в поровой воде донных осадков должно быть выше гидростатического давления. После образования газовой фазы движение газа между газовой и водной фазами регулируется законом Генри, который гласит, что концентрация растворенного газа будет эквивалентна парциальному давлению газа, умноженному на его растворимость (константа Генри), которая находится в обратной зависимости от температуры. Таким образом, при увеличении температуры в течение всего лета растворимость газа уменьшается, что приводит к переходу газа от растворенной к газообразной фазе [8]. Давление газовой фазы в донных осадках будет зависеть от изменений в атмосферном и гидростатическом давлении, а также скорости образования и элиминации газа. Падение атмосферного давления (для приливных зон также снижение уровня воды) приводит к снижению давления на глубине, что в свою очередь влечет увеличение объема газовой фазы за счет расширения пузыря и последующее выделение газа.

Принято считать, что в более холодный период года активность микробного сообщества в осадках снижается, тогда как осенний прогрев воды, а также дополнительное поступление органического вещества в период весеннего “цветения” фитопланктона способствует активизации микробного сообщества донных отложений, включая как первичных деструкторов, так и сульфатредуцирующих бактерий, осуществляющих терминальную фазу разложения органического вещества. Сопоставление величин интегральных значений скоростей микробных процессов СР в разные сезоны 2016 г. продемонстрировало разную динамику на 5 станциях Севастопольской прибрежной акватории (рис. 7). Так на станции ГХ7 в течение года скорость СР увеличивалась от 4.3 до 11.3 ммоль м⁻² сут⁻¹, тогда как на станции ГХ8 и ГХ3 скорость СР в течение исследованного периода снижалась (рис. 7). В целом величины скоростей СР на исследованных станциях находились в пределах одного порядка, несмотря на различное содержание С_{орг} в донных осадках (рис. 5 и рис. 7).

Напротив, интенсивность МО изменялась в широком диапазоне от 0.0001 на станции ГХ7 до 3.6 ммоль м⁻² сут⁻¹ на станции ГХ3 (рис. 7). Установлено, что в отличие от СР скорости МО и общее содержание СН₄ в прибрежных илах зависели главным образом от содержания органического углерода в донных осадках (рис. 5). Обогащенные органическим веществом осадки центральной части бухты на станциях ГХ8 и ГХ3 характеризовались большим содержанием метана и высокими интенсивностями процессов МО. На всех станциях, за исключением станции ГХ5 и ГХ8, интегральные скорости МО в октябре были значительно выше по сравнению с маем (рис. 7). По-видимому, интенсификация микробных процессов цикла метана в летне-осенний период происходит в результате активности сульфатредукторов, вследствие чего происходит интенсивное потребление сульфатов, приводящее к снижению скорости этого процесса за счет исчерпания SO₄²⁻-ионов в поровых водах и накоплению свободного сероводорода. На фоне снижения скорости СР происходит активация сообщества метаногенных архей, которые по термодинамике уступают последним в конкурентной борьбе за субстрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования микробных процессов метаноокисления и сульфатредукции в донных отложениях в феврале, мае и октябре 2016 г. на 5 станциях эстуарного района Севастопольской акватории, отличающихся скоростями седиментации: от 2.3 мм год⁻¹ в открытой части до 9.3 мм год⁻¹ в приустьевой зоне р. Черная. Впервые для Севастопольской акватории была изучена сезонная динамика вклада биогенной фракции в седиментационные процессы. С февраля по октябрь на всех стан-

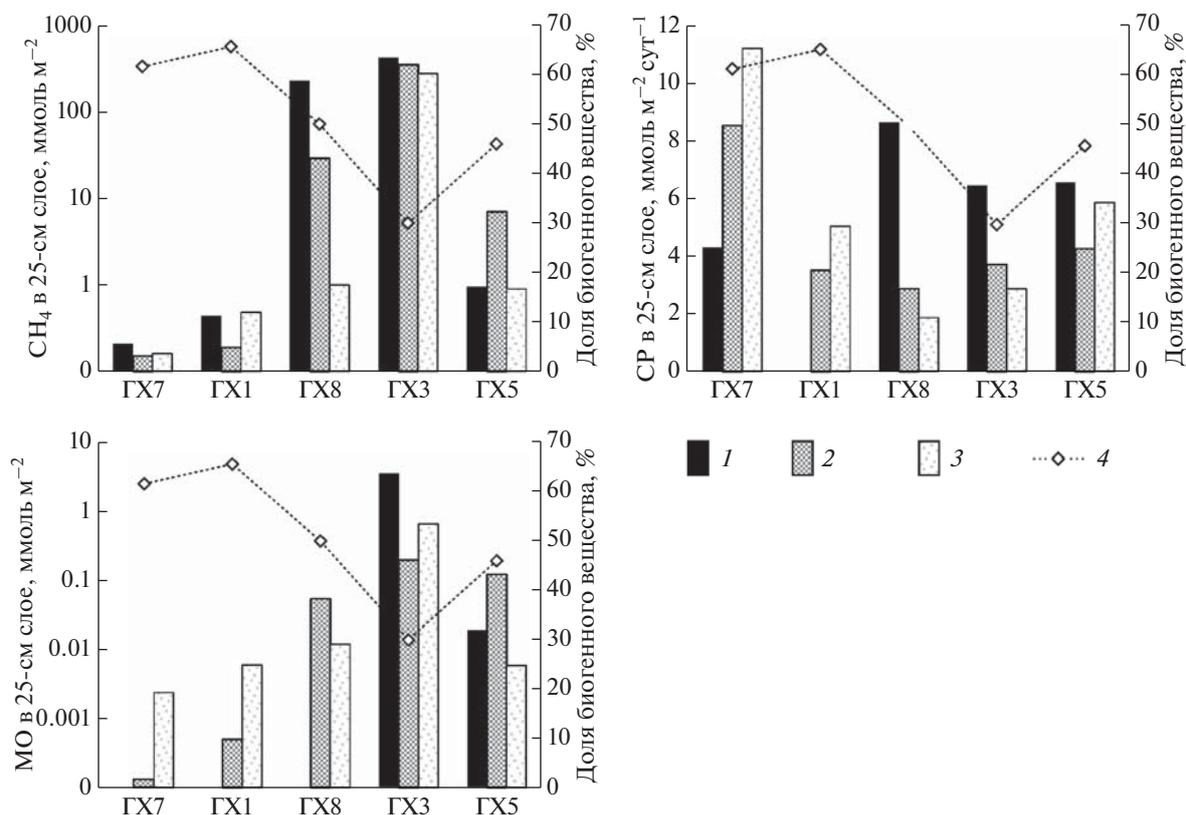


Рис. 7. Интегральные значения CH_4 (ммоль м^{-2}), MO и CP ($\text{ммоль м}^{-2} \text{сут}^{-1}$) в 25-см слое донных осадков на 5 станциях в Севастопольской акватории в феврале (1), мае (2) и октябре (3) 2016 г. и средние значения за год доли осаждающегося биогенного вещества (%) (4). Станции расположены с запада на восток – от открытой части к кутовой.

циях была выявлена тенденция уменьшения доли биогенной взвеси. Обнаружена отрицательная корреляция между долей автохтонного биогенного вещества и содержанием органического углерода $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнем сантиметровом слое осадка (-0.66), что свидетельствует о консервативных источниках его поступления, не связанных с биогенным веществом, продуцируемым фитопланктоном.

Сравнение профилей CH_4 в толще донных осадков в феврале 2016 г. позволило выделить 2 группы станций с низким и высоким содержанием метана. К первой группе относятся станции, где концентрации не превышали $10 \text{ мкмоль дм}^{-3}$. Ко второй группе – станции расположенные в центральной части Севастопольской бухты, где концентрации были на три порядка выше. Было установлено, что только на станции GX3 концентрация метана превысила соответствующую величину растворимости в зимний и весенний сезон.

Диапазон интегральных значений скоростей CP на исследованных станциях находился в пределах от 1.9 до $11.3 \text{ ммоль м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, при этом на станциях в открытом море и центральной части определены разнонаправленные тренды скорости CP : в центре бухты в осадках с повышенным содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ скорость CP в течение исследованного периода снижалась, а в открытом море – повышалась. Диапазон

значений MO изменялся в широких пределах от 0.0001 до $3.6 \text{ ммоль м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, наиболее высокие скорости MO определены в обогащенных органическим веществом осадках центральной части бухты.

Авторы благодарят сотрудника Института микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН Е.Е. Захарову за помощь в радиоизотопном измерении скоростей CP и MO .

Работа выполнена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ “Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем”, регистрационный номер АААА-А18-118020890090-2 при финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-35-00396 мол_а, а также с использованием оборудования ЦКП “Новые материалы и ресурсосберегающие технологии” (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазоворавновесной дегазации при газометрических исследованиях // Океанология. 1987. 27. № 5. С. 861–862.
2. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль / Под ред. Поликарпова Г. Г. С.: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2011. 405 с.

3. Егоров В.Н., Пименов Н.В., Малахова Т.В. и др. Биогеохимические характеристики распределения метана в воде и донных осадках в местах струйных газовыделений в акватории Севастопольских бухт // Морской экологический журнал. 2012. Т. XI. № 3. С. 41–52.
4. Малахова Т.В., Канапатский Т.А., Егоров В.Н. и др. Микробные процессы и генезис струйных метановых газовыделений прибрежных районов Крымского полуострова // Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 743–752.
5. Мысливец В.И., Коротаев В.Н., Зверев А.С. и др. К геоморфологии дна Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Т. 25 (1). С. 104–110.
6. Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я. и др. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. Т. 2. С. 138–152.
7. Сорокин Ю.И. Черное море: Природа, ресурсы. М.: Наука, 1982. 217 с.
8. Abegg F., Anderson A. The acoustic turbid layer in muddy sediments of Eckernförde Bay, Western Baltic: methane concentrations, saturation and bubble characteristics // Marine Geology. 1997. 137. P. V.137–147.
9. Arning E.T., Gaucher E.C., van Berk W., Schulz H.-M. Hydrogeochemical models locating sulfate-methane transition zone in marine sediments overlying black shales: A new tool to locate biogenic methane? // Marine and Petroleum Geology. 2015. V.59. P. 563–574.
10. Blinova V.N., Ivanov M., Bohrmann G. Hydrocarbon gases in deposits from mud volcanoes in the Sorokin Trough, northeastern Black Sea // Geo-Marine Letters. 2003. 23(3–4). P. 250–257.
11. Boetius A., Ravensschlag K., Schubert C.J. et al. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane // Nature. 2000. V. 407. № 5. P. 623–627.
12. Burdige D.J. Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms and an imbalance in sediment organic carbon budgets? // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 467–485.
13. Canfield D.E. Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments // Chem. Geol. 1994. V. 114. P. 315–329.
14. Gulin S.B., Aarkrog A., Polikarpov G.G. et al. Chronological study of ^{137}Cs input to the Black Sea deep and shelf sediments // Radioprotection. 1997. № 32 (C2). P. 257–262.
15. Gulin S.B., Gulina L.V., Sidorov I.G. et al. ^{40}K in the Black Sea: a proxy to estimate biogenic sedimentation // J. of Environmental Radioactivity. 2014. V. 134. P. 21–26.
16. Hoehler T.M., Alperin M.J., Albert D.B., Martens C.S. Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediments: evidence for a methanogen-sulfate reducer consortium // Global Geochem. Cy. 1994. V. 8. № 4. P. 451–463.
17. Ivanov M.V., Pimenov N.V., Rusanov I.I., Lein A.Y. Microbial processes of the methane cycle at the north-western shelf of the Black Sea // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2002. V. 54. P. 589–599.
18. Jørgensen B.B. Kasten S. Sulfur cycling and methane oxidation // Marine Geochemistry, Springer, Berlin / Eds. Schulz H. D., Zabel M. 2006. P. 271–309.
19. Jørgensen B.B. Bacteria and marine biogeochemistry // Marine Geochemistry, Springer, Berlin / Eds. Schulz H.D., Zabel M. 2006. P. 169–206.
20. Jørgensen B.B. et al. Anaerobic mineralization in marine sediments from the Baltic Sea-North Sea transition // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1990. V. 59. P. 39–54.
21. LaRowe D.E., van Cappellen P. Degradation of natural organic matter: a thermodynamic analysis. Geochim // Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 2030–2042.
22. Malakhova L.V., Egorov V.N., Malakhova T.V. et al. Methane in the Sevastopol coastal area, Black Sea // Geo-Marine Letters. 2010. V. 3. № 3–4. P. 391–398.
23. Malakhova T.V., Malakhova L.V., Pimenov N.V. et al. The biogeochemical cycling of methane in the Sevastopol coastal area, Black Sea // Methane in the Environment: Occurrence, Uses and Production. 2013. P. 61–79.
24. Pimenov N.V., Egorov V.N., Kanapatskii T.A. et al. Sulfate Reduction and Microbial Processes of the Methane Cycle in the Sediments of the Sevastopol Bay // Microbiology. 2013. V. 82. № 5. P. 618–627.
25. Reeburgh W.S. Oceanic methane biogeochemistry // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 486–513.
26. Römer M., Sahling H., Pape T. et al. Geological control and magnitude of methane ebullition from a high-flux seep area in the Black Sea – The Kerch seep area // Marine Geology. 2012. V. 319–322. P. 57–74.
27. Schmale O., Beaubien S.E., Rehder G., et al. Gas seepage in the Dnepr paleo-delta area (NW-Black Sea) and its regional impact on the water column methane cycle // J. of Marine Systems. 2010. V. 80. P. 90–100.
28. Yamamoto S., Alcauskas J., Crozier Th. Solubility of methane in distilled water and seawater // J. of Chemical and Engineering Data. 1976. V. 21. P. 78–80.

Seasonal Dynamics of Microbial Processes in Bottom Sediments from Sevastopol Coastal Area

T. V. Malakhova, T. A. Kanapatskiy, I. G. Sidorov, I. I. Rusanov, L. V. Malakhova,
V. Yu. Proskurnin, and N. V. Pimenov

The seasonal study of methane oxidation (MO) and sulfate reduction (SR) microbial processes in bottom sediments was carried out at 5 stations of Sevastopol estuarine sea area characterized by diversity in sedimentation and geochemical conditions. High methane concentrations in bottom sediments as well as accordingly high MO rates were obtained on stations marked by high organic carbon (OC) concentrations. These values relationship was shown to be exponential, whereas for SR the organic carbon amount was found to be not the limiting factor. For stations studied the integral SR rates ranged from 2.9 to 11.3 mmol m⁻² day⁻¹. The SR rate trends having opposite directions for open and closed sea parts were determined: SR had been decreasing during study period at the center of the bay, while at the open sea area it had been increasing. The MO rate values varied in a wide range from 0.0001 to 3.6 mmol m⁻² day⁻¹, the highest ones were obtained in OC reached sediments of the central part of the bay. At only one station with the average annual OC amount in sediments reached 3.39% the methane concentration was shown to exceed its calculated solubility value.