



УДК 579:574.587(262.5)

В. П. Чекалов, м. н. с., М. Б. Гулин, канд. биол. наук, ст. н. с.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

РЕСПИРАТОРНАЯ АКТИВНОСТЬ БАКТЕРИОБЕНТОСА В ПРИБРЕЖНОМ И ГЛУБОКОВОДНОМ РАЙОНАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ

Исследовано соотношение потенциально возможного и фактического потребления кислорода, а также численности аэробной и анаэробной гетеротрофной микрофлоры в донных осадках северо-западной части Чёрного моря, различающихся по окислительно-восстановительным условиям и глубинам залегания. Выявлен рост концентраций метана, сульфид-иона и, как следствие, поглощения кислорода в первой половине светового дня. Расчётным путем показано, что скорость аэробного окисления органического вещества может достигать $0.68 \text{ мкг г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$. Суммарно, включая и ассимиляционные нужды, она достигает $1.7 \pm 0.1 \text{ мкг г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$. Прирост биомассы при этом равен примерно 1.0 мкг г^{-1} . Придонный слой воды на глубине 4 м обогащался кислородом за счёт фотосинтеза со скоростью $140 - 200 \text{ мкг O}_2 \text{ л}^{-1} \text{ ч}^{-1}$. Донные отложения, отличающиеся по содержанию кислорода, тем не менее, оказались близкими по скорости аэробной утилизации кислорода и по численности оксифильной микрофлоры. Для возможности пересчёта и сравнения данных желательно указывать влажность и удельную плотность грунтов.

Ключевые слова: окисленные и восстановленные донные отложения, бактериобентос, потребление кислорода, метаногенез, образование сероводорода, Чёрное море.

Потребление кислорода (O_2) в донных отложениях зависит от ряда факторов, таких как гранулометрия и химический состав осадков, подвижность придонных слоёв воды, температура, но, в первую очередь, от активности биохимических процессов, связанных с минерализацией и трансформацией или, напротив, новообразованием органического вещества (ОВ). Утилизация O_2 в грунтах может иметь высокодинамичный характер и варьировать в широком диапазоне значений: от следовых количеств до сотен $\text{мм}^2 \text{ сут}^{-1}$ [1, 10]. В Чёрном море большинство осадков располагается в анаэробных условиях; даже на верхней сублиторали глубина проникновения кислорода в их толщу часто не превышает 2 – 5 мм [7]. Содержание O_2 и, как следствие, скорость его потребления летом в придонных водах снижается до минимальных значений. Наоборот, когда уровень кислородного насыщения достигает 180 %, интенсивность окисления органического вещества может возрастать до $3.04 - 3.99 \text{ мг O}_2 \text{ дм}^{-3} \text{ сут}^{-1}$. В результате аэробных и анаэробных процессов в грунтах северо-западной части Чёрного моря разрушалось от 335 до $1115 \text{ мг C м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ органического вещества [16]. В целом же, данные по кисло-

родному балансу бентали Чёрного моря немногочисленны и носят эпизодический характер.

Большой полнотой отличается описание бактериального населения грунтов. В 1970-е годы общая численность бактериобентоса составляла десятки тысяч – десятки миллионов клеток в 1 г влажного грунта, количество сапрофитных бактерий колебалось в более широком диапазоне: от единиц до сотен тысяч, а количество сульфатвосстановителей достигало 238 тыс., составляя в среднем 8000 кл. г^{-1} грунта [6, 14]. При этом наименьшая численность бактерий была обнаружена в донных отложениях открытых районов у м. Тарханкут (северо-западный Крым). В 1990-е годы в условиях максимального эвтрофирования северо-западного района количество бактериобентоса, как и бактериопланктона, возросло на 2 – 3 порядка [15]. Максимальная численность гетеротрофных бактерий ($10^6 - 10^7 \text{ кл г}^{-1}$) в донных осадках выявлена на станциях, подверженных сильной антропогенной нагрузке [11, 12].

Цель настоящей работы: сравнить потенциальную способность к окислению с реальным потреблением кислорода и численностью бактерий с различным типом энергетического обмена в аэрируемых и кислород-дефицитных осадках северо-

западной части Чёрного моря. Полученные данные позволят в дальнейшем оценить вклад этих групп бактериобентоса в процессы деструкции органического вещества.

Материал и методы. Экспедиционные исследования проведены вблизи м. Тарханкут (август 2008 г.) и на глубоководной станции (май 2007 г., рейс М72-5 НИС “Meteor”).

У м. Тарханкут образцы донных отложений водолазы отбирали из сульфурет (S_3 и S_6), и прилегающего к ним окисленного участка (Ф). Восстановленные грунты сульфурет представлены органо-генными заиленными песками с высоким содержанием сероводорода и активными процессами метан-образования. В фоновой точке осадки состояли преимущественно из мелкодисперсных песков с примесью ракушки и обломков известковых образований. Данные по этому району сопоставлены с результатами, полученными при исследовании керна грунта, извлечённого с глубины 1008 м ($44^{\circ}39.068' N - 32^{\circ}00.994' E$) кассетным отборником “мультикорер”. От поверхностного “пушистого” до 5-см горизонта послойно с интервалом в 1 см отобраны и исследованы 5 проб. Осадки были представлены тёмно-серым известковым илом с хорошо видимыми прослойками ежегодных отложений кокколитофорид. Содержание карбонатов в них достигало 393 мг г^{-1} сухого грунта.

Определение реального потребления кислорода (РПК) и температуры осуществляли *in situ* с применением оксиметра HQ40d (Hach, США), устанавливая датчик прибора с помощью изолирующей трубки непосредственно над поверхностью дна.

Потенциальную окислительную активность (ПОА) бактериобентоса определяли по ранее предложенной методике, основанной на эффекте реверсного возрастания оптической плотности метиленового синего в пробах, предварительно прошедших анаэробную экспозицию, при их повторном контакте с кислородом воздуха [17]. Данные по темпу восстановления окраски метиленового синего выражали в виде графика изменения во времени количества O_2 , израсходованного на реокисление красителя. Для определения ПОА на кривой выделяли линейный участок, по наклону которого вычисляли скорость процесса. Таким образом, ПОА – это то количество кислорода, которое потребовалось бы на связывание протонов водорода, прошедших через максимально активированные, после

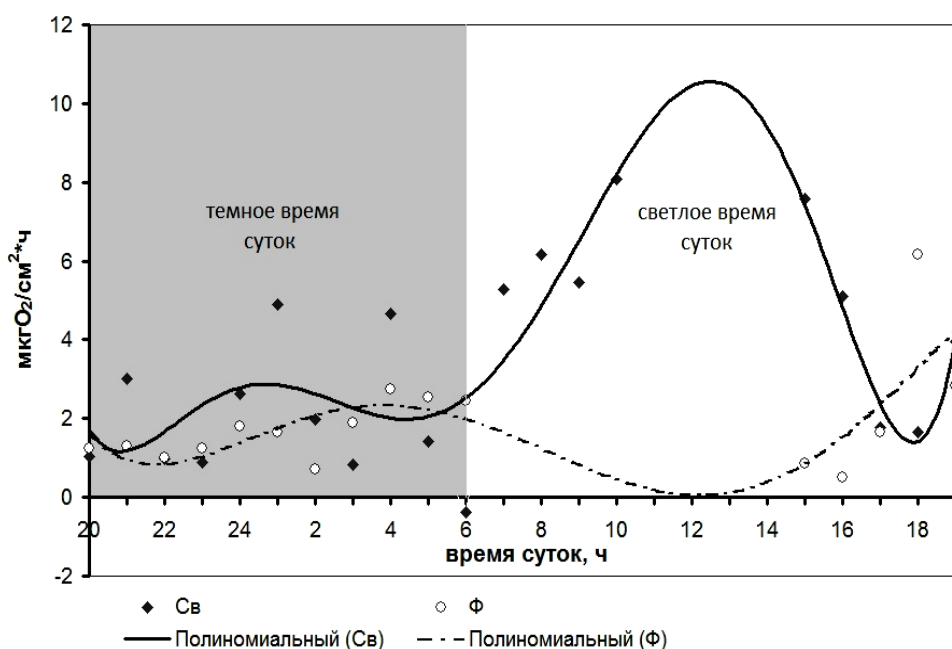
кислородного голодания, электрон-транспортные системы бактериального сообщества.

Численность аэробных гетеротрофных микроорганизмов (Аэ) определяли путём глубинного посева разведений донных отложений в модифицированный мясопептонный агар (МПА), а для выявления анаэробных (АнАэ) и сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) – в среду Вильсона-Блер, приготовленную аналогичным образом. С целью адаптации к морским условиям, по методике [2], навески стандартных сухих сред разводили в морской прокипячённой и профильтрованной воде в соотношении 1:10 от рекомендуемых по прописям. Дополнительно в среды добавляли 1.5 % агар-агара и стерилизовали в автоклаве. Посев АнАэ и СРБ осуществляли по методу, предложенному в [9]. Инкубацию проводили при $+25^{\circ}C$ в течение 48 (Аэ) либо 144 ч (АнАэ и СРБ). В анаэробных посевах тёмноокрашенные колонии учитывали как СРБ, а светлые – как анаэробные гетеротрофные бактерии.

Сухую массу донных отложений определяли после сушки при $+105^{\circ}C$. Содержание органического вещества (ОВ) косвенно оценивали по потере веса образца при прокаливании навесок ($+500^{\circ}C$).

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH и содержания сероводорода измеряли сразу же после доставки проб на берег на Тарханкуте или в судовую лабораторию в рейсе НИС “Метеор”. Наличие сероводорода определяли потенциометрически с использованием $[S^{2-}]$ -селективного электрода (Paterswolde, Нидерланды). В качестве анализатора сигналов применяли универсальные ионометры РН150М и ЭВ-74 (ГЗИП, Беларусь).

Для определения содержания метана в микробных матах газовых сипов акватории у Тарханкута пробы отбирали поршневыми трубками, изготовленными из пластиковых 20-мл шприцов и снабжёнными резиновыми пробками. После доставки на берег 10 см^3 образца донных осадков сразу помещали в склянку ёмкостью 120 мл, заполненную дистиллированной водой. Склянки герметично закупоривали, оставляя в каждой по 10 см^3 воздуха, и помещали в вертикальном положении пробками вниз в экспедиционную сумку-холодильник. Дальнейшие процедуры осуществляли в береговой лаборатории по методике, изложенной в [18]. Для измерений использовали газовый хроматограф ЛХМ-80 с пламенно-ионизационным детектором (МОЗ «Хроматограф», Российская Федерация).



Результаты и обсуждение. Суточные тренды реального потребления кислорода в различающихся по редокс-условиям грунтах колебались в противофазе (рис. 1).

Рис. 1 Потребление кислорода грунтами сульфуреты (Св) и фоновой точки (Ф) в течение суток
Fig. 1 The day oxygen consumption within the sediments of sulphuret (C_B) and at the reference station (Ф)

В темное время амплитуда изменений была незначительной — 1 – 3 мкгО₂·см⁻²·ч⁻¹. В условиях светового дня в донных отложениях фоновой точки отмечалось ожидаемое, за счёт фотосинтеза, снижение кислородного потребления практически до 0. По этой разнице можно косвенно оценить продукцию О₂ фитопланктоном. В полуденный пик в придонных слоях воды на глубине 4 м она колебалась между 140 и 200 мкгО₂·л⁻¹·ч⁻¹. В сульфурете же, наоборот, в течение первой половины дня наблюдался интенсивный рост потребления кислорода до более чем 10 мкгО₂·см⁻² с последующим его снижением до фонового уровня.

В период с 6 до 11 ч зарегистрирован суточный пик метаногенеза. Концентрация растворённого метана в верхнем 1.5-см слое осадков сульфуреты сипа “С₃” менялась в течение суток в 7.7 раз (достигая более 700 мкг·см⁻³), а в более мелководном сипе “Св” — в 6.5 раз. В то же время в толще микробных матов суточные вариации температуры, способной влиять на активность бактерий, были сравнительно небольшими. Максимальные значения (+20.9 °C) зарегистрированы в послеполуденное время, минимальные — ночью и на рассвете (+19.3 °C).

Принимая во внимание, что в черноморских грунтах, обогащённых органикой, преобладает ацетокластический путь образования метана (до 83%) [4], вполне возможно, что ночное снижение концентрации О₂ в грунтах и придонном слое воды (по нашим данным до 0.0 – 0.6 мг·л⁻¹) активирует процессы брожения, конечные продукты которого в дальнейшем используются метаногенами.

В донных отложениях с высоким содержанием лабильного органического вещества наряду с образованием метана, в ходе термодинамически даже более предпочтительной сульфатредукции, идёт также и образование сероводорода [19]. Суточные наблюдения также выявили циклический характер колебаний содержания сульфидов и показаний Eh в поровой воде поверхностного слоя бактериальных матов с пиковыми значениями в дневное время (рис. 2). Это приводит обычно к смещению pH в подкисленную область, что и было зафиксировано нами в грунтах сульфурет (табл. 1).

В рамках данной публикации мы не ставили задачу объяснить природу суточной динамики содержания метана и сероводорода в сульфуретах сипов Тарханкута.

Рис. 2 Суточные изменения электрохимической активности сульфид-иона (А) и Eh (В) в восстановленных осадках

Fig. 2 Daily changes of the electrochemical activity of the sulfide ion (A) and Eh (B) in the reduced sediments

Это – предмет самостоятельного исследования. Однако, повышение концентрации таких легко окисляемых в естественных условиях веществ (CH_4 и H_2S) в совокупности с активацией реакций фотохимического окисления, вполне закономерно должно приводить непосредственно к росту потребления кислорода.

При анализе влажных осадков, несмотря на различия редокс условий и плотности, обращают на себя внимание не слишком большие (в пределах одного порядка величин) расхождения измеряемых параметров, при их пересчёте, как на единицу объёма, так и массу субстрата.

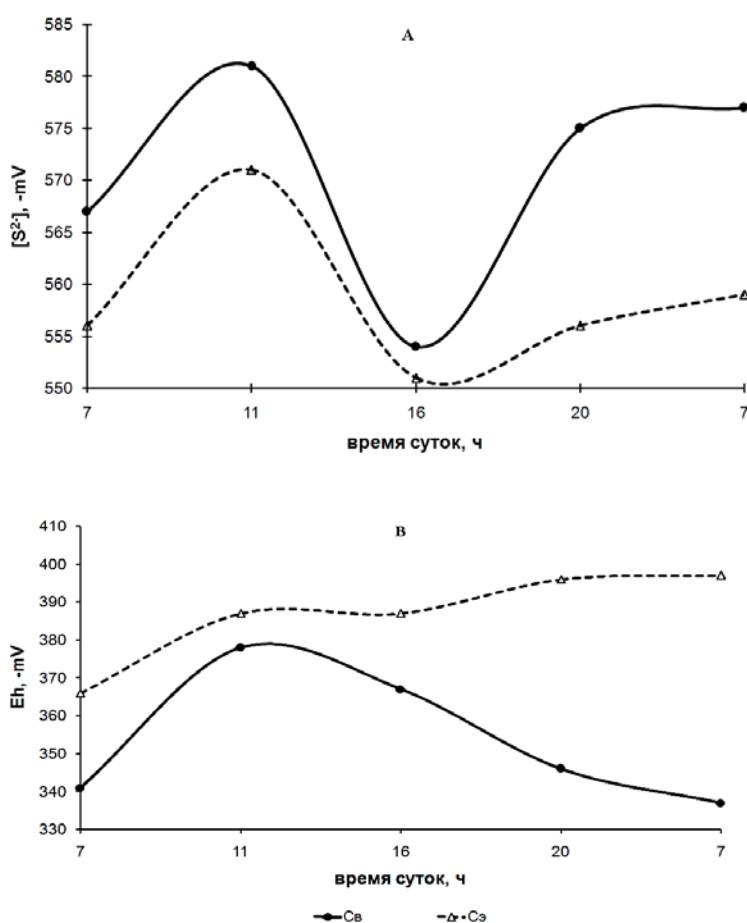


Табл. 1 Гидрохимические показатели верхнего слоя грунтов у м. Тарханкут

Table 1 Hydrochemical characteristics of the uppermost sediments near the Tarhankut Cape

№	Глубина, м	pH	Eh, мВ	Влажность (%)	Органическое вещество (мг)		
					в 1 см ³ (влажный)	в 1 г (влажный)	в 1 г (сухой)
C ₃	7	6.95	-379	86.8	44	38	287
C _в	4	6.8	-385	87.1	46	41	317
Ф	4	7.16	+69	31.1	31	17	24

Очевидно, такой подход, в отличие от анализа предварительно высушенных образцов, ближе к естественным условиям. Действительно, влажные грунты – это структурно ненарушенные субстраты бентали, тогда как 1 г сухого субстрата является искусственной производной. Более того, в зависимости от способа представления данных можно прийти к практически противоположным выводам, что имеет место, например, при рассмотрении численности бактерий в донных осадках у м. Тарханкут и вертикального распределения органического

вещества в грунтах глубоководной станции (табл. 2, 3). Исходя из этого, далее мы выражаем и анализируем результаты в пересчёте на грамм влажного грунта.

Следует учитывать, что РПК является результирующей как минимум трёх масштабных процессов: собственно утилизации кислорода аэробной микрофлорой, его связывания восстановленными соединениями серы и лёгкими углеводородами, а так же противоположно направленного двум предыдущим, – продуцирования O_2 в ходе фотосинтеза.

Причём, как отмечено выше, если в донных отложениях сульфурет ключевую роль играет анаэробный компонент, то на границе “придонная вода – окисленные грунты” фотосинте-

тическая активность может в той либо иной степени маскировать уровень кислородного потребления.

Табл. 2 Потребление кислорода донными отложениями и численность некоторых групп бактериобентоса (м. Тарханкут)

Table 2 Oxygen consumption by sediments as well as number of selected bacteriobenthos groups (Cape Tarhankut)

№	Потребление кислорода, мкгО ₂ ·г ⁻¹ ·ч ⁻¹ (вл.)		Численность бактерий (x10 ³)								
	ПОА	РПК	в 1 см ³			в 1 г (вл.)			в 1 г (сух.)		
			Аэр	АнАэ	СРБ	Аэр	АнАэ	СРБ	Аэр	АнАэ	СРБ
С _э	1.03	-	3100	6	4	2700	5	3	20455	38	23
С _в	0.26	2.46	3444	5	3	3100	5	3	24031	35	23
Ф	3.88	1.10	5190	18	р/н	2800	10	р/н	4064	14	р/н

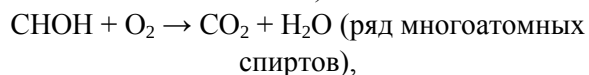
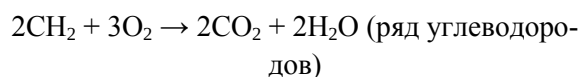
Табл. 3 Гидрохимические и микробиологические показатели грунтов глубоководной станции

Table 3 Hydrochemical and microbiological data of sediments at the deep-water station

Горизонт, см	Е _h , мВ	Влажность (%).	Органическое вещество, мг·г ⁻¹		ПОА, мкгО ₂ ·г ⁻¹ ·ч ⁻¹ (вл.)	Численность бактерий, Nx10 ³ ·г ⁻¹ (вл.)		
			вл. гр	сух. гр		Аэр	АнАэ	СРБ
0		91.0	-	-	2.64	1130	9	0.9
0-1	от	90.3	22	222	1.40	140	16	2.0
1-2	-275	86.4	29	209	0.10	330	29	2.5
2-3	до	82.4	38	216	1.16	1000	41	4.0
3-5	-307	77.4	46	188	1.75	1080	13	1.6

Значением ПОА для каждого конкретного биотопа ограничивается максимально возможный предел респираторной активности гетеротрофов. Как видно (табл. 2), в грамме влажного грунта потенциальная окислительная способность колебалась в пределах 0.26 (С_в) – 1.03 (С_э), а в фоновой точке достигала 3.88 мкгО₂·ч⁻¹.

Исходя из стехиометрических соотношений:



можно рассчитать примерное количество утилизированной при этом органики различной степени окисленности. В нашем случае оно эквивалентно окислению в донных отложениях 0.08 и 0.30 мкг органических соединений с

максимальной степенью восстановленности (-CH₂-)_n или же 0.24 и 0.97 мкг многоатомных спиртов (-CHON-)_n. В окисленных фоновых грунтах эти значения составляют соответственно 1.13 для соединений (-CH₂-)_n и 3.64 для ряда спиртов (-CHON-)_n. Значения для углеводородного ряда (-CH₂-)_n совпадают с результатами, полученными согласно уравнению распада ОВ планктона в кислородных условиях (на 106 атомов С требуется 138 молекул О₂) [3]. Скорее всего, темпы деструкции органического вещества ближе к усредненным данным между максимально восстановленными и частично окисленными соединениями: для сульфурет порядка 0.16 – 0.64 и 2.39 мкг ч⁻¹ в фоновой точке. Как отмечено выше, это – тот максимум окислительной активности, на который способно микробное сообщество при наиболее благоприятных условиях.

В подверженных гипоксии грунтах при наличии большого количества продуктов анаэробной деятельности бактерий более достоверно кислородную потребность аэробных гетеротрофов описывает ПОА, тогда как в аэрированных песчаных осадках реалистичнее, очевидно, выглядят значения РПК. По аналогии с вышеприведенными расчётами с использованием ПОА, данные по интенсивности окисления органики в фоновых грунтах, полученные через РПК ($1.10 \text{ мкгO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$), составляют в среднем $0.68 \text{ мкгO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$. Таким образом, в отличающихся по редокс условиям осадках темпы утилизации кислорода оксифильной микрофлорой, как и её численность, оказываются весьма близкими. Считается, что у аэробных бактерий на покрытие нужд энергетического обмена идёт $40 \pm 5 \%$ утилизированного субстрата [5]. Отсюда, суммарная скорость потребления органики достигает приблизительно $1.7 \pm 0.1 \text{ мкгг}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$, а прирост биомассы около 1.0 мкгг^{-1} .

В экологически стабильных системах, в которых содержание органических веществ относительно постоянно, скорости её окисления и поступления в ходе седиментационных процессов уравнивают друг друга. К таким системам, по всей видимости, можно отнести хорошо аэрируемые песчаные грунты. Тогда, соответственно, осаждение органики из водной толщи также составляет примерно $1.7 \pm 0.1 \text{ мкгг}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$.

При анализе данных ПОА и РПК рассчитано, что в каждом миллилитре воды, контактирующей с восстановленными донными осадками, примерно 5 частей O_2 поступает благодаря фотосинтезу, в то время как утилизируется примерно 9 частей, из которых всего 1 часть идёт на дыхание, а 8 – на нейтрализацию анаэробного метаболизма. При затруднённом проникновении кислорода в толщу мелкодисперсных грунтов такое соотношение неизбежно должно приводить к острой гипоксии. Дисбаланс приходной и расходной частей компенсируется, возможно, за счёт поступления O_2 из вышележащих водных слоёв. В отношении

придонного слоя воды над окисленными осадками «анаэробной» составляющей можно пренебречь, и баланс O_2 оказывается близок к 1, что, как отмечено выше, указывает на стабильное состояние данного биотопа.

Несмотря на высокую численность аэробной микрофлоры, в восстановленных донных осадках расход кислорода на нейтрализацию продуктов энергетического обмена анаэробного бактериобентоса, соответствующий РПК, практически в 10 раз превышает его затраты на дыхание у аэробов, примерно равные уровню ПОА (рис. 3).

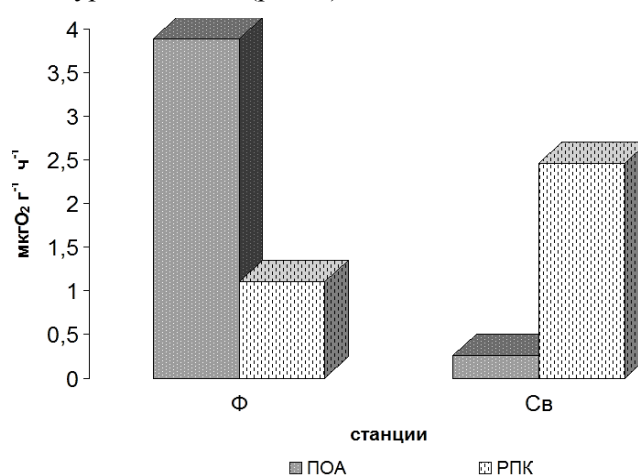


Рис. 3 Соотношение потенциальной окислительной активности (ПОА) и реального потребления кислорода (РПК) в альтернативных по редокс условиям грунтах

Fig. 3 The ratio of the potential oxidative activity (POA) and the real consumption of oxygen (RPK) in sediments from the alternative redox conditions

Очевидно, окислительную активность аэробных бактерий лимитирует низкое содержание кислорода. В то же время в пробе грунта из фоновой точки имеет место обратное соотношение этих параметров: ПОА почти в 4 раза превышает уровень реального потребления кислорода. Следовательно, потенциальная способность утилизировать O_2 совпадает с достаточно высокой численностью аэробной сапрофитной микрофлоры. Относительно же низкое значение РПК может быть результирующей как фотосинтетического процесса, так и указанного выше специфического воздействия физико-

химических условий среды обитания, которые не позволяют сообществу достичь максимальной эффективности.

В окисленных осадках отмечается также количественное превышение анаэробных бактерий над значениями, зафиксированными в кислород-дефицитных грунтах сульфурет, хотя выявить в них сульфатредукторов не удалось. Примечательно, что в фоновой пробе, хранившейся в холодильнике, на 4-е сутки окислительно-восстановительный потенциал понизился до -178 мВ. Таким образом, окисленные грунты располагают полноценным бактериальным комплексом, в том числе анаэробным, и способны в случае изменений во внешней среде перестраиваться на функционирование в условиях аноксии. По образному выражению акад. Г. Г. Поликарпова, «...восстановительная биосфера постоянно готова к реваншу, занимая экстремальное и значительно более

скромное положение при исключительно многообразном распространении её плацдармов...» [8; стр. 12].

Указанное генеральное свойство морских грунтов в полной мере относится также и к перманентно восстановленным осадкам. Так, в донных отложениях глубоководной станции при полном отсутствии кислорода выявлена, в том числе, и достаточно мощная аэробная составляющая бентосного бактериоценоза, особенно в нулевом “пушистом” слое (табл. 3).

Нижележащие горизонты оказались относительно обеднены аэробами, тогда как численность анаэробных и сульфатредуцирующих бактерий, возрастая в 3-сантиметровом слое, в нижележащем горизонте вновь падает практически до исходных значений. Такое распределение указанных групп имеет место на фоне роста концентрации органических веществ (рис. 4).

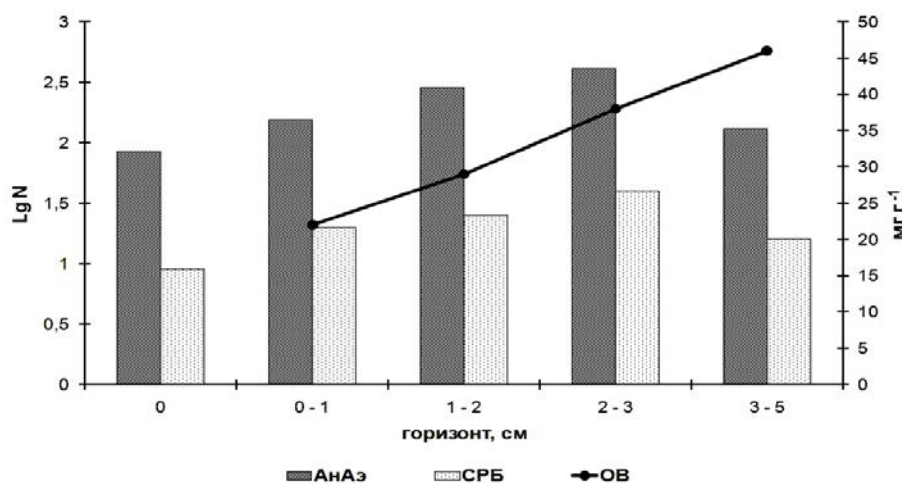


Рис. 4 Вертикальное распределение органического вещества и численности некоторых представителей бактериобентоса в осадках глубоководной станции

Fig. 4 The vertical distribution of organic matter and abundance of selected bacteriobenthos representatives within the sediments of deep-water station

На наличие аэробной сапрофитной микрофлоры в поверхностном слое грунтов, извлеченных с глубин более 1600 м, указывал также Ю. И. Сорокин, по данным которого она пребывала в пассивном состоянии [13]. Поступление этой группы бактерий связывают с процессами их совместной седиментации с детритом из вышележащих аэрированных слоёв водной толщи. При этом микрофлора сохраняла жизнеспособность, а для её активации достаточно было пузырька воздуха. Вполне возможно также переключение представителей

факультативно анаэробной микрофлоры на окислительный тип метаболизма. В нашем случае специфика хранения и обработки микробиологических проб не позволяла полностью изолировать их от контакта с кислородом воздуха и проводить эксперименты в условиях *in situ*.

Потенциальная окислительная активность, как и следовало ожидать, повторяет профиль распределения оксифильной микрофлоры, с максимумом в “пушистом” слое, минимальным значением под ним и дальнейшим повышением на более углубленных горизонтах (табл. 3). Хотя коэффициент корреляции между

этим рядами данных и не достиг уровня устойчивой связи ($r = +0,48$), но весьма показателен на фоне обратной и уже весьма значимой зависимости ПОА с анаэробными ($r = -0,80$) и сульфатвосстанавливающими ($r = -0,75$) бактериями.

При сопоставлении данных, полученных на глубоководной станции и в восстановленных грунтах прибрежных сульфурет, обращают внимание близкие уровни значений содержания органического вещества, ПОА, численности сульфатредуцирующей микрофлоры. Наблюдается лишь незначительное превышение количества анаэробных бактерий в донных отложениях мористой станции.

Выводы. 1. В Чёрном море у м. Тарханкут в донных отложениях, различающихся по редокс условиям, реальное потребление кислорода в светлое время суток колебалось в противофазе с максимальными значениями в восстановленных и, соответственно, минимальными – в окисленных. Это обусловлено, в первом случае, физико-химическими процессами окисления продуктов анаэробного метаболизма, а во втором – фотосинтетической активностью придонного фитопланктона и фитобентоса. 2. Предпосылкой для дневного роста потребления O_2 грунтами сульфурет служит повышение в первой половине дня концентраций восстановленных соединений (метан, сероводород). 3. ПОА выявляет максимальный уровень способности бактериального сообщества к окислению органических веществ в не лимитированных ни по субстрату, ни по кислороду

условиях. РПК, как комплексный показатель, позволяет в комбинации с ПОА оценить соотношение процессов, связанных с кислородным балансом, в частности, аэробное и анаэробное поглощение O_2 , а также его выделение в ходе фотосинтетической деятельности автотрофных организмов. 4. Для бактериобентоса донных осадков м. Тарханкут расчётным путём вычислена скорость аэробного окисления органики – $0,68 \text{ мкг г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$, что соответствует её суммарной утилизации, включая и ассимиляционные нужды, порядка $1,7 \pm 0,1 \text{ мкг г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$. Прирост биомассы при этом равен примерно $1,0 \text{ мкг г}^{-1}$; придонный слой воды на глубине 4 м обогащался кислородом за счёт фотосинтеза со скоростью $140 - 200 \text{ мкг } O_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$. 5. Донные отложения, отличающиеся по редокс условиям, оказались, тем не менее, близкими по скорости аэробной утилизации O_2 и по численности оксифильной микрофлоры. 6. Методические подходы, примененные в настоящей работе, позволяют унифицировать оценки респираторной активности и, соответственно, интенсивности трансформации органики различными по типу энергетического метаболизма группами бактерий и, в конечном счёте, свести их к единому “кислородному эквиваленту”. 7. При пересчёте данных на единицу веса влажного или сухого осадка для возможности их последующего сравнения целесообразно указывать также влажность, а для интерпретации в объёмных единицах и удельную плотность субстрата.

1. Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Тр. Кар. НЦ РАН. – 2011. – 4. – С. 35–41.
2. Горбенко Ю. А. О наиболее благоприятном количестве «сухого питательного агара» в средах для культивирования морских гетеротрофных микроорганизмов // Микробиология. – 1961. – 30, 1. – С. 168–172.
3. Дривер Дж. Геохимия природных вод. – М.: Мир, 1985. – 439 с.
4. Егоров В. Н., Пименов Н. В., Малахова Т. В., Каланацкий Т. А., Артёмов Ю. Г., Малахова Л. В. Биогеохимические характеристики распределе-

ния метана в воде и донных осадках в местах струйных газовыделений в акватории Севастопольских бухт // Морск. экол. журн. – 2012. – 11, 3. – С. 41–52.

5. Мецлер Д. Биохимия: в 3 т. / Мир. – М., 1980. – Т. 1: Химические реакции в живой клетке. – 407 с.
6. Нижегородова Л.Е., Теплинская Н.Г. Сезонная динамика численности сапрофитных и кишечных бактерий северо-западной части Черного моря // Экология моря. – 1984. – Вып. 17. – С. 70–76.
7. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сероводород в донных осадках Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибреж-

- ной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. / НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ. – Севастополь, 2009. – Вып. 18. – С. 48 – 56.
8. Поликарпов Г. Г. Экстремальная жизнь и создаваемая ею самой себе область жизни в батии Черного моря // Морск. экол. журн. – 2012. – **11**, 3. – С. 5 – 16.
9. Родина А. Г. Методы водной микробиологии. – Л.: Наука, 1965. – 363 с.
10. Розанов А. Г., Вершинин А. В., Егоров А. В. Исследование химического обмена на границе вода-дно в Голубой бухте Черного моря // Водн. ресурсы. – 2010. – **37**, № 3. – С. 341 – 350.
11. Рубцова С. И. Ассимилирующая способность севастопольских бухт по отношению к углеводородам нефти // Экология моря. – 2005. – Вып. 68. – С. 83 – 87.
12. Смирнова Л. Л. Комплексы гетеротрофных микроорганизмов прибрежного мелководья бухты Казачья (Чёрное море) // Морск. экол. журн. – 2010. – **9**, 2. – С. 81 – 88.
13. Сорокин Ю. И. Чёрное море: Природа, ресурсы. – М.: Наука, 1982. – 217 с.
14. Теплинская Н. Г. Липолитическая микрофлора северо-западной части Чёрного моря: Дис. канд. биол. наук. – Одесса, 1979. – 222 с.
15. Теплинская Н. Г. Тенденции изменений качественного состава сапрофитного бактериопланктона и бентоса северо-западной части Чёрного моря под влиянием эвтрофирования // Итоги науки и техники. Сер. Микробиология. – 1995. – **31**. – С. 12 – 19.
16. Теплинская Н. Г., Ковалёва Н. В. Бактерии пелагиали и бентали / Зайцев Ю. П., Александров Б. Г., Миничева Г. Г. Северо-западная часть Чёрного моря: биология и экология. – Киев: Наук. думка, 2006. – С. 146 – 174.
17. Чекалов В. П. Эффект реверсного восстановления окраски метиленового синего и возможность его применения для оценки функционального состояния бактериальных сообществ // Морск. экол. журн. – 2012. – **11**, 1. – С. 74 – 80.
18. Dando P. R., Jensen P., O'Hara S. C. M., Taylor L. J. et al. Gas seepage from a carbonate-cemented sandstone reef on the Kattegat coast of Denmark // Mar. Petrol Geol. – 1994. – **11**. – P. 182 – 189.
19. McCarty P. L. Energetics of organic matter degradation / R. Mitchell (Ed.). Water Pollution Microbiology. – N.Y.: Wiley Intersci., 1972. – P. 91 – 118.

Поступила 22 апреля 2013 г.
После доработки 18 ноября 2013 г.

Респіраторна активність бактеріобентосу у прибережному та глибоководному районах північно-західної частини Чорного моря. В. П. Чекалов, М. Б. Гулін. Досліджено співвідношення потенційно можливого і фактичного споживання кисню, а також чисельності аеробної та анаеробної мікрофлори у донних осадах північно-західної частини Чорного моря, які різняться по окисно-відновним умовам та глибинам залягання. Виявлено зростання концентрацій метану, сульфід-іону і, як наслідок, поглинання кисню в першій половині світлового дня. Розрахунковим шляхом показано, що швидкість аеробного окислення органіки може сягати $0.68 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Сумарно, включаючи і асиміляційні потреби, вона сягає $1.7 \pm 0.1 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Приріст біомаси при цьому дорівнював приблизно $1.0 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$. Придонний шар води на глибині 4 м збагачувався киснем за рахунок фотосинтезу зі швидкістю $140 - 200 \text{ мкг} \cdot \text{О}_2 \cdot \text{л}^{-1}$ на годину. Донні відкладення, що відрізняються за вмістом кисню, виявилися тим не менше близькими по швидкості аеробної утилізації кисню і за чисельністю оксифільної мікрофлори. Для можливості перерахунку і порівняння даних доцільно вказувати вологість і питому щільність ґрунтів.

Ключові слова: окислені та відновлені донні відкладення, бактеріобентос, споживання кисню, метаногенеза, освіта сірководню, Чорне море

The respiratory activity of bacteriobenthos in coastal and deep-water areas of northwestern part of the Black Sea. V. P. Chekalov, M. B. Gulin. The ratio of potential and real consumption of oxygen as well as numbers of aerobic and anaerobic heterotrophic bacteria in northwestern part of Black Sea sediments with different redox conditions and the depths of the bottom are investigated. Increase concentrations of methane, sulfide ion, and as a result, the absorption of oxygen in the first half of the daylight hours was found. As shown by calculation the rate of aerobic oxidation of organic matter was $0.68 \text{ mkg} \cdot \text{g}^{-1}$ in hour. It in aggregate with needs of the assimilation amounts to about $1.7 \pm 0.1 \text{ mkg} \cdot \text{g}^{-1}$. Growth of biomass was about $1.0 \text{ mkg} \cdot \text{g}^{-1}$. A rate produced of oxygen at a depth of 4 m in the near-bottom layer through photosynthesis was $140 - 200 \text{ mkg} \cdot \text{O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ in hour. Bottom sediments that vary in content of oxygen were nevertheless it close in rate of aerobic oxygen utilization and by number of oxiphylic microflora. The humidity and the specific gravity of sediments for capability of conversion and comparison of data is advisable indicate.

Keywords: oxidized and reduced sediments, bacteriobenthos, oxygen consumption, methanogenesis, produce of hydrogen sulfide, Black Sea