

УДК [551.351:577.121.2](262.5)

СООТНОШЕНИЕ ПРОЦЕССОВ АЭРОБНОЙ И АНАЭРОБНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ КРЫМА (ЧЁРНОЕ МОРЕ)

© 2023 г. В. П. Чекалов

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

Севастополь, Российская Федерация

E-mail: valch@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021; после доработки 11.06.2021;
принята к публикации 04.08.2023; опубликована онлайн 21.09.2023.

Взаимосвязь водных масс с донными отложениями является очевидной, в первую очередь в вопросах формирования кислородного режима и, как следствие, самоочищения водоёмов. Зная скорость потребления кислорода, с помощью стехиометрических соотношений можно оценить ряд сопряжённых параметров энергетического обмена. Цель настоящей работы — посредством интерпретации данных кислородного потребления рассчитать возможный вклад аэробных и анаэробных процессов в деструкцию органических веществ в донных осадках различных районов крымского побережья Чёрного моря. Измерение суммарной скорости потребления кислорода проводили с помощью респирометрической камеры, герметично соединённой с кислородным датчиком LDO-оксиметра HQ40D. Для подавления бактериальной активности и выявления темпов окисления восстановленных продуктов анаэробного разложения использовали антибиотик стрептомицин. Вертикальное зондирование толщи грунта в палеорусле реки Бельбек показало рост с глубиной окислительного потенциала и подповерхностный пик анаэробной активности. Вследствие ограниченной диффузии кислорода, скорость окисления сероводорода в поверхностном слое была сопоставима с темпами его образования в нижележащей толще грунта. Непосредственно на участке палеоруsla реки Чёрная, прилегающем к устью Севастопольской бухты, донные отложения отличались от грунтов на склоне большим уровнем аэробного потребления кислорода, а также содержанием восстановленных соединений, которое обусловлено более высокой скоростью их образования при относительно низких темпах окисления. Поглощение кислорода единицей донной поверхности в 0,6-см слое осадков Севастопольской бухты в среднем составляло $2,18 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. В бухте Круглая наблюдали различия по динамике восстановленных соединений (H_2S) между окисленными фоновыми участками и зонами восстановленных грунтов (сульфурет). В сульфуретах расчётные данные концентрации, темпов окисления и образования сероводорода выше на 32, 29 и 57 % соответственно. Максимальной, до $4,05 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{ч}^{-1}$, скорость утилизации органического вещества была в Севастопольской бухте и в прилегающей к ней акватории. Большая доля приходилась на анаэробную составляющую. Достаточно высокой она оказалась и в бухте Круглая, но здесь преобладала аэробная деструкция. Это связано с различиями как в целевом использовании бухт, так и в гранулометрическом составе донных осадков. В грунтах сульфуреты при скорости окисления органических веществ, равной таковой фонового участка, анаэробная утилизация протекала более чем в 2 раза интенсивнее. Её абсолютное значение было ближе к уровню, характерному для прибрежных участков открытого моря, в частности для палеоруsla реки Бельбек.

Ключевые слова: донные отложения, потребление кислорода, деструкция органического вещества, Чёрное море

При оценке состояния окружающей среды, в том числе донных отложений Чёрного моря, обычно приводят данные о содержании как органических веществ (далее — ОВ), так и возможных их окислителей [Горшкова, 1974; Орехова, 2010]. В частности, сообщалось, что доля органической составляющей в осадках бухт Гераклеийского полуострова колеблется в пределах 0,51–5,41 % [Орехова и др., 2018]. В широком диапазоне изменяется и концентрация кислорода. Так, было отмечено практически полное его отсутствие в донных отложениях Севастопольской бухты в тёплое время года: его содержание в придонном слое воды могло снижаться до 30 мкмоль·л⁻¹, что в 10 раз меньше концентраций в зимний период [Орехова, Коновалов, 2018a]. Если в Севастопольской бухте [Игнатъева и др., 2008; Моисеенко, Орехова, 2011; Osadchaya et al., 2003] регулярный мониторинг ещё позволяет выявлять определённые тренды, то в остальных акваториях единичные замеры дают возможность только констатировать уровень веществ в данный момент времени. Тем не менее их содержание является результирующей разнонаправленных процессов, интенсивность которых может сместить баланс в ту или иную сторону. Именно поэтому исследование таких динамических характеристик позволяет осуществлять как краткосрочное, так и долговременное прогнозирование. Пересчёт некоторых производных параметров скорости потребления кислорода даёт возможность представить интегральную картину происходящих в биоценозах процессов. Это, с одной стороны, формирование условий окружающей среды и способность к самоочищению, а с другой — состояние и устойчивость входящих в неё элементов. На основании стехиометрических уравнений предложены варианты расчёта возможных коэффициентов для перехода между различными показателями биологической активности сообщества [Сапожников, Метревели, 2015]. Таким образом, по изменению одного параметра можно отследить целый спектр характеристик. С целью изучения соотношения возможных темпов аэробной и анаэробной утилизации ОВ в различных районах крымского побережья была предпринята попытка проанализировать полученные автором данные по потреблению кислорода донными отложениями.

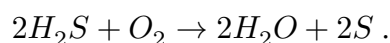
МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В большинстве обследованных акваторий (бухта Двужорная, палеоруло реки Чёрная, Севастопольская и Балаклавская бухты) отбор проб производили с помощью дночерпателя Петерсена. Материалом для исследования служил поверхностный слой донных осадков толщиной 2 см, которым доверху заполняли ёмкости для транспортировки проб, исключая попадание в них воздуха. В бухте Круглая забор материала с этого же слоя из сульфуреты и фонового участка осуществлял водолаз шприцевыми трубками. Пробы в чистой прибрежной зоне заповедника «Мыс Мартыан» и в палеоруло реки Бельбек извлекали с глубины 4–6 м трубчатым пробоотборником типа «Румалот», снабжённым прозрачной акриловой трубкой диаметром 54 мм и высотой 30 см с запорным клапаном на обратном конце и грузом с крепёжной арматурой. Поднятые колонки грунта сохраняли, как правило, ненарушенное строение, что позволяло исследовать их послойно. Координаты точек и даты отбора проб приведены в табл. 1.

Содержание кислорода и Eh-потенциал (окислительно-восстановительный потенциал) измеряли, используя датчики LDO-оксиметра HQ40D и Sension 1 (Hach, США). Точность определения растворённого кислорода составляла $\pm 0,1$ мг·л⁻¹ в интервале 0,1–8,0 мг·л⁻¹. С целью стабилизации показаний Eh-потенциала датчик погружали в пробу на 10 мин, после этого фиксировали результат. Скорость потребления кислорода (далее — СПК) определяли в респирометрической камере объёмом 60 мл, заполненной морской водой и герметично соединённой с кислородным датчиком. Исходная концентрация кислорода в воде составляла 7–8 мг·л⁻¹. Пробу объёмом 0,2 см³ вносили в камеру, где она распределялась на площади 20 см², что соответствовало толщине слоя примерно 0,01 см. Результаты фиксировали с интервалом 1 ч в автоматическом режиме в течение 20–24 ч. На основании полученных данных в дальнейшем вычисляли среднюю СПК.

Из колонок грунта, извлечённых в районе мыса Мартьян, пробы отобраны с горизонтов 0–2 и 3–5 см, а в палеорусле реки Бельбек — 0–2, 2–4 и 4–6 см. Для каждого слоя применяли унифицированную схему расчёта СПК. Она предполагает проведение измерений в условиях максимальной доступности кислорода в поверхностном слое толщиной 0,01 см с последующей экстраполяцией на толщину 0,6 см с учётом особенности его диффузии в донные отложения [Чекалов, 2016].

Определение скорости кислородной нейтрализации восстановленных соединений (далее — КНВС) проводили аналогичным образом, предварительно подавив жизнедеятельность бактерий. Для этого в измерительную ёмкость вносили стрептомицин из расчёта конечной концентрации $0,1 \text{ мг}\cdot\text{мл}^{-1}$; затем проводили инкубацию ёмкости при $+8\dots+10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение всего периода измерения. С помощью $0,1\text{N}$ раствора серной кислоты снижали pH до 5 с целью смещения соотношения сернистых соединений в воде (S^{2-} , HS^- , H_2S) в сторону преобладания наиболее активно окисляемого сероводорода. Измерение содержания кислорода производили каждый час. На основании полученных данных рассчитывали среднюю скорость окисления сероводорода, учитывая, что в водных растворах H_2S окисляется, как правило, до серы и воды:



Скорость аэробного поглощения кислорода (далее — АПК) получали путём вычитания из соответствующих уровней суммарного поглощения КНВС. АПК и КНВС представлены в виде средних с доверительным интервалом ($p = 0,95$).

Для определения скорости обогащения (продукции) восстановленными соединениями сразу же после отбора пробы в лабораторных условиях проводили измерение КНВС до выхода на плато кривой изменения содержания кислорода, то есть стабилизации примерно на одном уровне показаний в течение более чем трёх измерений. По объёму израсходованного при этом кислорода вычисляли возможное содержание сероводорода. Параллельно часть пробы помещали, исключая попадание кислорода, в герметичные ёмкости, которые сохраняли в условиях близких к естественным. Продолжительность инкубации определяли экспериментально, в пределах 30–60 сут, по истечении которых повторно измеряли КНВС. Разность между исходным значением и повторным замером с учётом временного интервала позволяла рассчитать скорость образования восстановленных соединений.

Результаты по аэробному потреблению кислорода и динамике восстановленных соединений (H_2S) согласно стехиометрическим формулам [Орехова, Коновалов, 2018а; Сапожников, Метревели, 2015] выражены в виде скорости утилизации ОВ:



Концентрацию ОВ в донных отложениях определяли гравиметрическим методом после высушивания при $+105 \text{ }^\circ\text{C}$ и дальнейшего прокалывания навесок при $+500 \text{ }^\circ\text{C}$ [ГОСТ 26213-91, 1992; ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32-02, 2002].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зависимости от степени изоляции исследованных акваторий точки отбора проб можно объединить в две группы — расположенные внутри относительно замкнутых бухт и в прибрежной зоне открытых участков моря. В первую группу включены станции в Севастопольской и Балаклавской бухтах и в бухте Круглая, с масштабным поступлением взвеси в донные отложения.

Так, в Севастопольской бухте скорость осадконакопления составляла 2,4 мм·год⁻¹, а в прибрежных районах Крыма — лишь 0,35 мм·год⁻¹ [Денисов, 1998]. Полученная нами СПК в первой группе изменялась в диапазоне 2,63–4,36 мкг·см⁻³·ч⁻¹, тогда как во второй, куда вошли станции в бухте Двужорная, у мыса Мартьян и в палеорусле реки Бельбек, значения не превышали 2,90 мкг·см⁻³·ч⁻¹ (табл. 1).

Таблица 1. Потребление кислорода и производные данные по динамике восстановленных соединений (H₂S) в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма

Table 1. Oxygen consumption and derived data on the dynamics of reduced compounds (H₂S) in the bottom sediments of coastal waters of Crimea

Координаты точек отбора проб, дата	Слой, см	Eh, мВ	O ₂ , мкг·см ⁻³ ·ч ⁻¹		Восстановленные соединения (H ₂ S)		
			АПК	КНВС	Содержание, мкг·см ⁻³	Окисление, мкг·см ⁻³ ·ч ⁻¹	Продукция, мкг·см ⁻³ ·ч ⁻¹
Бухта Двужорная, 44.990°N, 35.36°E, 07.07.2012	0–0,6	–182	2,20 ± 1,00	0,70 ± 0,20	38	1,49	0,77
Мыс Мартьян, 44.509°N, 34.256°E, 13.08.2014	0–0,6	14	2,40 ± 0,19	0,27 ± 0,23	574	0,57	0,17
	3–3,6	–199	3,36 ± 1,07	0,35 ± 0,28	567	0,74	0,62
Палеорусле реки Бельбек, 44.631°N, 33.418°E, 21.05.2013	0–0,6	–193	1,27 ± 0,52	0,61 ± 0,13	609	1,30	0,34
	2–2,6	–176	2,46 ± 0,86	0,84 ± 0,60	777	1,79	0,54
	4–4,6	–184	9,43 ± 5,48	1,35 ± 0,99	1011	2,87	0,17
Палеорусле реки Чёрная, 44.618°N, 33.474°E, 26.05.2013	Русло, 0–0,6	–68	2,41 ± 0,78	0,28 ± 0,09	1320	0,60	1,07
	Склон, 0–0,6	–140	1,25 ± 0,43	0,43 ± 0,15	797	0,91	0,71
Севастопольская бухта, 44.615°N, 33.520°E, 12.06.2012	0–0,6	–	2,00 ± 0,59	0,63 ± 0,19	1345	1,34	1,00
Бухта Круглая, 44.602°N, 33.441°E, 27.07.2020	Фон, 0–0,6	30	3,39 ± 0,49	0,35 ± 0,18	750	0,75	0,15
	Сульфурета, 0–0,6	–72	3,14 ± 0,25	0,50 ± 0,21	1097	1,06	0,35
Балаклавская бухта, 44.496°N, 33.595°E, 23.10.2008	0–0,6	–209	3,98 ± 0,78	0,38 ± 0,03	703	0,81	–

Примечание: АПК — аэробное поглощение кислорода; КНВС — кислородная нейтрализация восстановленных соединений.

Note: АПК, aerobic oxygen consumption; КНВС, oxygen neutralization of reduced compounds.

На формирование осадков в палеорусле реки Чёрная оказывает влияние Севастопольская бухта, находящаяся под значительным антропогенным давлением [Орехова и др., 2013]. Этим, по-видимому, объясняется сходство между ними по ряду параметров, что не позволяет отнести район палеорусла ни к одной из групп. Как специфический объект палеорусла рек вблизи Севастополя рассмотрены в работе [Гулин, Коваленко, 2010]. Донные отложения в обеих группах представлены слабо заиленными песками и мелкодисперсными илами. Илистая фракция

характерна для осадков Севастопольской и Балаклавской бухт, палеорусел рек Чёрная и Бельбек. Остальные пробы представлены песками с незначительными следами заиления. В подавляющем большинстве проб зафиксированы отрицательные показания редокс-потенциала, указывающие на восстановленные условия среды.

Осадки у мыса Мартьян, являющегося заповедной территорией, и палеоруслу реки Бельбек различаются гранулометрическими характеристиками, антропогенным воздействием и, как следствие, концентрацией органических соединений. В то же время вертикальное зондирование толщи грунта в этих точках выявило рост с глубиной окислительного потенциала и подповерхностный пик анаэробной активности (см. табл. 1).

В 2008 г. в донных отложениях центральной части бухты Круглая был определён ряд параметров, включая суммарную СПК. Повторные исследования СПК и содержания ОВ, проведённые в ходе настоящей работы, не выявили существенных изменений этих параметров за прошедшее время. Скорость СПК колебалась в пределах 3,25–3,66 мкг·см⁻³·ч⁻¹, а содержание ОВ составляло 33 мг·г⁻¹.

Темпы образования восстановленных соединений зависели в том числе от гранулометрического состава донных отложений: в илах они были в 1,5–2 раза выше, чем в песках. Максимальные значения, более 1 мкг Н₂S·см⁻³·ч⁻¹, получены в илистых грунтах Севастопольской бухты. В целом в бухтах отмечен и более высокий уровень концентрации Н₂S — до 1,4 мг·см⁻³. В пробах прибрежных участков открытых акваторий содержание Н₂S не превышало в поверхностном слое 0,6 мг·см⁻³, а скорость образования — 0,77 мкг Н₂S·см⁻³·ч⁻¹. Исключением являлись донные отложения в палеорусле реки Чёрная, что можно объяснить влиянием Севастопольской бухты. Так, интенсивность сульфатредукции в поверхностном слое грунта в бухтах Севастополя достигала 93 мкМ·дм⁻³·сут⁻¹, или 0,132 мкг·см⁻³·ч⁻¹ [Егоров и др., 2012]. Величины бактериального восстановления сульфатов в осадках северо-западного шельфа Чёрного моря составляли от 28,3 до 427,0 мг Н₂S·кг⁻¹ влажного осадка в сутки [Карначук, 1989].

Гидрологические особенности относительно замкнутых акваторий бухт, связанные с ограниченным водообменом, ослабленным волновым воздействием и, как правило, значительным поступлением органических и биогенных веществ, способствуют интенсивному осадконакоплению [Ломакин, Попов, 2014; Орехова и др., 2013]. При достаточной аэрации это приводит к повышенной активности биохимических процессов в поверхностном слое грунтов.

Поступление кислорода в толщу восстановленных осадков также инициирует окислительные процессы, интенсивность которых может быть даже выше, чем на поверхности осадков. Так, в колонке грунта из палеоруслу реки Бельбек АПК возрастало с 1,27 мкг О₂·см⁻³·ч⁻¹ на поверхности до 9,43 мкг О₂·см⁻³·ч⁻¹ на глубине 4 см. Отмеченный здесь подповерхностный пик продукции восстановленных соединений связан, очевидно, с активацией сульфатредукции. Относительно поверхностного горизонта она повышается в 1,5–3,5 раза. В то же время окисление продуктов анаэробного разложения в грунтах палеоруслу вследствие недостаточной диффузии кислорода в илы ограничено лишь поверхностным слоем. Соответственно, послойное суммирование темпов образования Н₂S и скорость его окисления в поверхностном слое оказываются вполне сопоставимыми. У мыса Мартьян, в более аэрированных песчаных грунтах, слой окисления восстановленных соединений получается несколько толще, и в сумме масштаб этого процесса превалирует над масштабом их продуцирования, что определяет положительные значения Eh.

Как уже отмечено выше, на формирование донных отложений в палеорусле реки Чёрная оказывает влияние близость устья Севастопольской бухты [Орехова и др., 2013]. Непосредственно в русле они отличались от грунтов на склоне бóльшим максимальным уровнем аэробного потребления кислорода, а также содержанием восстановленных соединений, которое обусловлено более высокой скоростью их образования при относительно низких темпах окисления.

Экспериментально измеренная СПК в 0,01-см слое осадков Севастопольской бухты в среднем составила $0,96 \text{ мкг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ [Чекалов, 2016]. С учётом предполагаемой глубины проникновения кислорода (0,6 см) это соответствует $2,18 \text{ мкг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Ранее сообщалось [Орехова, Коновалов, 2018a], что рассчитанная согласно первому закону Фика величина потока кислорода через поверхность донных отложений бухты в холодное время года изменялась незначительно, составляя в среднем $2 \text{ моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Это значение соответствует $0,73 \text{ мкг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$, что несколько ниже полученного нами, однако, как отмечают сами авторы, не были учтены ряд геофизических факторов и высокая скорость протекания биохимических процессов. В другой работе [Орехова, Коновалов, 2018b] рассчитанные для крымского шельфа величины потока кислорода возросли с $2,85 \text{ М}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в западной части до $3,55 \text{ М}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ у южного побережья и далее до $4,26 \text{ М}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в восточной акватории, что соответствует 1,05; 1,31 и 1,56 $\text{мкг O}_2\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$.

Совпадение настоящих и полученных ранее значений суммарного поглощения кислорода донными отложениями в бухте Круглая позволяет говорить о возможном сбалансированном состоянии этой системы. Несмотря на интенсивное рекреационное использование бухты, определяющую роль здесь, вероятно, играют гидрохимический режим и рыхлый состав песчаных грунтов, что обеспечивает свободное проникновение в их толщу кислорода. В целом донные отложения, в отличие от водных масс, являются более консервативной средой, инертность которой сглаживают как сезонные, так и межгодовые колебания гидрохимических параметров. В бухте выявлены зоны восстановленных грунтов с отрицательными значениями редокс-потенциала, называемые сульфуретами. Нами отмечены различия в динамике восстановленных соединений (H_2S) между осадками сульфурет и соседних окисленных участков. В сульфуретах расчётные данные концентрации, темпов окисления и образования H_2S были выше на 32, 29 и 57 % соответственно.

Исходя из полученных данных о СПК, в том числе при окислении восстановленных соединений, произведён расчёт возможных темпов деструкции ОВ (табл. 2). Сумма аэробной и анаэробной утилизации органических соединений оказалась максимальной, до $4,05 \text{ мкг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$, в Севастопольской бухте и в прилегающей к ней акватории. При этом бóльшая доля приходилась на анаэробную составляющую. Достаточно высокой она была и в бухте Круглая, но здесь преобладала аэробная деструкция. Это связано с различиями как в целевом использовании бухт, так и в гранулометрическом составе донных осадков. Рыхлые грунты, как правило, более аэрированы, что определяет преобладание окислительного типа метаболизма. Даже в сульфуретах песчаных грунтов бухты Круглая уровень аэробного окисления оказался так же высок, как и в фоновой точке. При этом интенсивность анаэробной утилизации ОВ различалась между ними вдвое, хотя её абсолютные значения оставались ближе к уровню, характерному для прибрежных участков открытого моря, в частности для палеоруслы реки Бельбек.

При вертикальном зондировании толщи грунта у мыса Мартьян и в палеорусле реки Бельбек отмечено повышение с глубиной способности как к аэробной, так и к анаэробной деструкции, что закономерно повторяет кислородный профиль. Так, в районе мыса Мартьян величины возросли в слое 0–3 см с 1,93 до 2,70 и с 0,34 до 1,22 $\text{мкг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$ соответственно. Абсолютные значения скоростей окисления ОВ в осадках палеоруслы реки Бельбек были несколько ниже — 1,02–1,98 $\text{мкг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$. Разложение ОВ за счёт сульфатредукции в поверхностном горизонте здесь оказалось вдвое выше; значение, формируя пик 1,06 $\text{мкг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$ на глубине 2 см, снижалось до 0,34 $\text{мкг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$. В донных осадках Севастопольской бухты в поверхностном слое темпы анаэробной деструкции превысили темпы аэробной утилизации органики, достигнув 1,97 против 1,61 $\text{мкг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$. Таким образом, бóльшая вариативность присуща анаэробной составляющей. Проникновение кислорода в слои грунта глубже 1 см обычно весьма незначительно, в частности в Севастопольской бухте — не более чем на 0,5 см [Орехова и др., 2013]. В таком случае при отсутствии кислорода аэробная деструкция органики, в отличие от анаэробной, в нижележащих слоях практически прекращается. Отсюда, приняв во внимание интенсивность

анаэробных процессов во всей толще грунта, получаем приблизительно равный, а иногда и более высокий вклад анаэробнобиоза в суммарную деструкцию ОВ. Установлено, что сульфатредукция обеспечивает до 50 % минерализации органического углерода в морских отложениях [Jørgensen, 1982]. При этом за её счёт разлагается до 99 % органического углерода, расходуемого на сульфатредукцию и метаногенез [Карначук, 1989]. Всё это свидетельствует о важности участия сульфатредукторов как в глобальном цикле серы, так и в цикле углерода.

Таблица 2. Содержание органического вещества и расчётные скорости его аэробной и анаэробной деструкции в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма

Table 2. Content of organic matter and calculated rates of its aerobic and anaerobic destruction in the bottom sediments of coastal waters of Crimea

Точка отбора проб	Т, °С	Слой, см	Органическое вещество, мг·см ⁻³	Деструкция органического вещества, мкг·см ⁻³ ·ч ⁻¹	
				аэробная	анаэробная
Бухта Двужорная	+24	0–0,6	25	1,77	1,52
Мыс Мартъян	+24	0–0,6	17	1,93	0,34
		3–3,6	24	2,70	1,22
Палеоруло реки Бельбек	+21	0–0,6	45	1,02	0,67
		2–2,6	54	1,98	1,06
		4–4,6	46	7,58	0,34
Палеоруло реки Чёрная	+20	Русло, 0–0,6	68	1,94	2,11
		Склон, 0–0,6	51	1,01	1,40
Севастопольская бухта	+21	0–0,6	60	1,61	1,97
Бухта Круглая	+25	Фон, 0–0,6	41	2,73	0,30
		Сульфурета, 0–0,6	34	2,52	0,69
Балаклавская бухта	+19	0–0,6	61	3,18	–

Вывод. Зарегистрированы определённые различия по темпам использования кислорода и утилизации органики в донных отложениях относительно замкнутых бухт и открытых акваторий. Прежде всего это связано с особенностями гидрологии, осадконакопления и интенсивности использования акваторий человеком. Так, в зависимости от уровня антропогенной нагрузки и состава донных отложений преобладает либо аэробная деструкция органического вещества, как в бухте Круглая, либо анаэробная, что характерно для грунтов Севастопольской бухты. В ложе палеорула реки Чёрная отмечен более высокий уровень потребления кислорода и содержания восстановленных соединений, чем на склонах. Это можно объяснить превалированием процессов их образования над окислением. Зафиксированы различия по динамике восстановленных соединений (H₂S) между участками восстановленных грунтов (сульфуреты) и окисленными фоновыми. В сульфурете расчётные данные концентрации, темпов окисления и образования сероводорода выше на 32, 29 и 57 % соответственно. В ней более чем в 2 раза интенсивнее происходит анаэробное разложение органики, тогда как по скорости её окисления различия выявлены не были. В толще грунта у мыса Мартъян и в палеоруле реки Бельбек установлены рост окислительного потенциала с глубиной и подповерхностный пик анаэробной активности. При этом, вследствие ограниченной диффузии кислорода, скорость окисления сероводорода в поверхностном горизонте и послонная сумма темпов его образования во всей толще грунта оказались сопоставимы. По этой же причине вклад в деструкцию органического вещества процессов анаэробнобиоза зачастую равен, а иногда и больше доли, приходящейся на аэробный путь.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации 121041400077-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горшкова Т. И. Биогеохимия современных морских осадков и их биологическое значение // *Труды ВНИРО*. 1974. Т. 48, вып. 1, ч. 2. С. 135–144. [Gorshkova T. I. Biogeochemistry of modern marine sediments and their biological significance. *Trudy VNIRO*, 1974, vol. 48, iss. 1, pt 2, pp. 135–144. (in Russ.)]
2. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества : взамен ГОСТ 26213-84; введ. 1993-07-01. Москва : Издательство стандартов, 1992. 8 с. [GOST 26213-91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* : vzamen GOST 26213-84; vved. 1993-07-01. Moscow : Izdatel'stvo standartov, 1992, 8 p. (in Russ.)]
3. Гулин М. Б., Коваленко М. В. Палеоруслу рек Чёрная и Бельбек на шельфе юго-западного Крыма – новый объект экологических исследований // *Морской экологический журнал*. 2010. Т. 9, № 1. С. 23–31. [Gulin M. B., Kovalenko M. V. Paleo-rivers Chernaya and Belbek at the continental shelf of southwestern Crimea – new object of ecological researches. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 23–31. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1051>
4. Денисов В. И. Закономерности образования взвешенного материала на шельфе Чёрного моря : дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.01. Ростов-на-Дону, 1998. 299 с. [Denisov V. I. *Zakonomernosti obrazovaniya vzveshennogo materiala na shel'fe Chernogo morya*. [dissertation]. Rostov-on-Don, 1998, 299 p. (in Russ.)]
5. Егоров В. Н., Пименов Н. В., Малахова Т. В., Канапацкий Т. А., Артёмов Ю. Г., Малахова Л. В. Биогеохимические характеристики распределения метана в воде и донных осадках в местах струйных газовыделений в акватории Севастопольских бухт // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 3. С. 41–52. [Egorov V. N., Pimenov N. V., Malakhova T. V., Artemov Yu. G., Kanapatsky T. A., Malakhova L. V. Biogeochemical characteristics of methane distribution in sediment and water at the gas seepage site of Sevastopol bays. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2012, vol. 11, no. 3, pp. 41–52. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1230>
6. Игнатьева О. Г., Овсяный Е. И., Романов А. С., Коновалов С. К., Орехова Н. А. Оценка состояния карбонатной системы вод и изменения содержания органического углерода в донных осадках Севастопольской бухты по данным наблюдений за 1998–2005 годы // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 2. С. 57–67. [Ignat'eva O. G., Ovsyanyi E. I., Romanov A. S., Konovalov S. K., Orekhova N. A. Analysis of state of the carbonate system of waters and variations of the content of organic carbon in bottom sediments of the Sevastopol Bay in 1998–2005. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2008, no. 2, pp. 57–67. (in Russ.)]
7. Карначук О. В. Бактериальная сульфатредукция в прибрежных морских осадках : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.07. Абовян, 1989. 23 с. [Karnachuk O. V. *Bakterial'naya sul'fatreduksiya v pribrezhnykh morskikh osadkakh* : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk : 03.00.07. Abovyan, 1989, 23 p. (in Russ.)]
8. Ломакин П. Д., Попов М. А. Оценка степени загрязнения и перспектива экологических исследований вод Балаклавской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. Вып. 28. С. 195–213. [Lomakin P. D., Popov M. A. Otsenka stepeni zagryazneniya i perspektiva ekologicheskikh issledovaniy vod Balaklavskoi bukhty. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2014, iss. 28, pp. 195–213. (in Russ.)]
9. Моисеенко О. Г., Орехова Н. А. Исследование механизма многолетней эволюции цикла углерода в экосистеме Севастопольской бухты // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 2. С. 72–83. [Moiseenko O. G., Orekhova N. A. Investigation of the mechanism of the long-term evolution of the carbon cycle in the ecosystem of the Sevastopol Bay. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 72–83. (in Russ.)]
10. Орехова Н. А. Гипоксия и аноксия в донных осадках крымского побережья // *Географія та туризм : науковий збірник / відп. ред. Я. Б. Олійник*. Київ : Альтерпрес, 2010. Вип. 4. С. 146–152. [Orekhova N. A. Gipoksiya i anoksiya v donnykh osadkakh krymskogo

- poberezh'ya. In: *Neohrafiia ta turizm : naukovyi zbirnyk* / Ya. B. Oliinyk (Ed.). Kyiv : Al'terpres, 2010, iss. 4, pp. 146–152. (in Russ.)]
11. Орехова Н. А., Моисеенко О. Г., Коновалов С. К. Исследование геохимических характеристик Севастопольской бухты // *Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона : материалы VIII Международной конференции, 26–27 июня 2013 г. Керчь : ЮгНИРО, 2013. С. 55–58.* [Orekhova N. A., Moiseenko O. G., Konovalov S. K. Study of the Sevastopol Bay geochemical features. *Current Fishery and Environmental Problems of the Azov and Black Seas Region : materials of VIII International Conference. Kerch, 26–27 June, 2013. Kerch : YugNIRO Publishers, pp. 55–58.* (in Russ.)]
 12. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона // *Океанология*. 2018а. Т. 58, № 5. С. 739–750. [Orekhova N. A., Konovalov S. K. Oxygen and sulfides in bottom sediments of the coastal Sevastopol region of Crimea. *Okeanologiya*, 2018а, vol. 58, no. 5, pp. 739–750. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.1134/S0030157418050106>
 13. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сульфиды в верхнем слое донных отложений Чёрного моря // *Система Чёрного моря* / ред. А. П. Лисицын. Москва : Научный мир, 2018b. С. 542–559. [Orekhova N. A., Konovalov S. K. Kislород i sulfidy v verkhnem sloe donnykh otlozhenii Chernogo morya. In: *Sistema Chernogo morya* / A. P. Lisitsyn (Ed.). Moscow : Nauchnyi mir, 2018b, pp. 542–559. (in Russ.)]
 14. Орехова Н. А., Овсяный Е. И., Гуров К. И., Попов М. А. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Чёрное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. № 6. С. 523–533. [Orekhova N. A., Ovsyany E. I., Gurov K. I., Popov M. A. Organic matter and grain-size distribution of the modern bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2018, no. 6, pp. 523–533. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-6-523-533>
 15. ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32-02. *Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания сухого и прокалённого остатка в твёрдых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом* / Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. Москва, 2002. 15 с. [PND F 16.2.2:2.3:3.32-02. *Kolichestvennyi khimicheskii analiz pochv. Metodika vypolneniya izmerenii sodержaniya sukhogo i prokalennogo ostatka v tverdykh i zhidkikh otkhodakh proizvodstva i potrebleniya, osadkakh, shlamakh, aktivnom ile, donnykh otlozheniyakh gravimetricheskim metodom* / Gosudarstvennyi komitet RF po okhrane okruzhayushchei sredy. Moscow, 2002, 15 p. (in Russ.)]
 16. Сапожников В. В., Метревели М. П. Стехиометрическая модель органического вещества – основа количественного изучения продукционно-деструкционных процессов в океане // *Труды ВНИРО*. 2015. Т. 155. С. 137–141. [Sapozhnikov V. V., Metrevely M. P. Organic matter stoichiometry as a basis for quantitative studies of production and destruction processes in the oceans. *Trudy VNIRO*, 2015, vol. 155, pp. 137–141. (in Russ.)]
 17. Чекалов В. П. Абсорбция кислорода донными осадками прибрежных районов Севастополя (Чёрное море) в процессе утилизации органического вещества // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, № 4. С. 44–52. [Chekalov V. P. Oxygen absorption in the oxidation of organic compounds in the coastal sediments of Sevastopol (the Black Sea). *Morskoi biologicheskii zhurnal*, 2016, vol. 1, no. 4, pp. 44–52. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.4.06>
 18. Jørgensen B. B. Mineralization of organic matter in the sea bed—the role of sulphate reduction. *Nature*, 1982, vol. 296, pp. 643–645. <https://doi.org/10.1038/296643a0>
 19. Osadchaya T. S., Ovsyany E. I., Kemp R., Romanov A. S., Ignatieva O. G. Organic carbon and oil hydrocarbons in bottom sediments of Sevastopol Bay (the Black Sea). *Morskoi ekologicheskii zhurnal*, 2003, vol. 2, no. 2, pp. 94–101. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/711>

**RELATIONSHIP OF THE PROCESSES
OF AEROBIC OXIDATION AND ANAEROBIC DESTRUCTION
OF ORGANIC MATTER
IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF COASTAL WATERS OF CRIMEA
(BLACK SEA)**

V. P. Chekalov

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: valch@mail.ru

The relationship between water masses and bottom sediments is obvious. This primarily refers to the formation of oxygen regime and self-purification of water bodies. Stoichiometric ratios allow assessing certain parameters of energy metabolism associated with oxygen consumption. The aim of this work is to determine the possible contribution of aerobic and anaerobic processes to the destruction of organic matter in bottom sediments of various areas of the Crimean coast by interpreting the data on oxygen consumption. The total oxygen consumption rate was measured using a respirometry camera hermetically connected to an HQ40D oxygen sensor with LDO oximeter. To suppress bacterial activity and reveal the rate of oxidation of reduced anaerobiotic products, the antibiotic streptomycin was used. Vertical sounding of the bottom sediment strata in the Belbek River paleochannel showed an increase with depth of oxidative potential and a subsurface peak of anaerobic activity. Due to the limited diffusion of oxygen, the rate of hydrogen sulfide oxidation in the surface layer was comparable to the rate of its formation in the underlying sediment layer. A higher level of aerobic oxygen consumption and content of reduced compounds was observed in the bottom sediments of the Chernaya River paleochannel in contrast to its slopes. Increased concentration of hydrogen sulfide is due to the higher rate of its formation at relatively low rates of oxidation. In the Sevastopol Bay, the experimentally measured oxygen consumption by a unit of the bottom surface in the 0.6-cm sediment layer averaged $2.18 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. In the Kruglaya Bay, certain differences in the dynamics of reduced compounds (H_2S) were registered between the oxidized background areas and the zones of reduced bottom sediments (sulfurettes). In sulfurettes, the calculated values for concentration, oxidation rate, and formation of hydrogen sulfide were higher by 32, 29, and 57%, respectively. The maximum rate of organic matter decomposition, up to $4.05 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, was recorded in the Sevastopol Bay and the adjacent water areas, with the anaerobic component accounting for a larger share. The share turned out to be quite high in the Kruglaya Bay as well, but there, aerobic destruction prevailed. This is due to differences in both the targeted use of the bays and the granulometric composition of bottom sediments. In sulfurette sediments, against the backdrop of the rate of oxidation of organic substances equal to that of the background area, anaerobic utilization occurred more than 2 times more intensive. Its absolute value corresponded to the level characteristic of the open-sea coastal areas, in particular, the Belbek River paleochannel.

Keywords: bottom sediments, oxygen consumption, destruction of organic matter, Black Sea