

УДК 579:574.587(262.5)

К вопросу об интенсивности поглощения кислорода донными осадками Балаклавской бухты (Черное море)

Чекалов В. П.

*Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН
Севастополь, Россия
valch@mail.ru*

Приведены экспериментальные и расчетные данные поглощения кислорода в донных осадках Балаклавской бухты. Дана оценка вклада в этот процесс аэробной и анаэробной микрофлоры, а также возможных максимальных темпов утилизации накопленных запасов органики. Интенсивность окислительной активности в целом характерна для бухт Севастополя, она составляет в среднем порядка 3 мкгО₂/г×ч. При этом колебания численности аэробной и анаэробной групп бактерий по оси бухты были более значительны, что позволяет говорить о различной эффективности дыхания донной микрофлоры и процессов окисления восстановленных соединений.

Ключевые слова: донные отложения, потребление кислорода, бактериобентос, Черное море.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении длительного периода времени возможность изучения экологического состояния Балаклавской бухты была ограничена особенностью ее использования. При этом антропогенное воздействие, изменяя свой вектор, всегда оставалось весьма значительным. Так, ежегодный сброс неочищенных сточных вод в бухту составляет около 4,4 млн м³ (Ковригина и др., 2003). Соответственно, вблизи локальных источников загрязнения в донных осадках наблюдаются повышенные концентрации тяжелых металлов (Овсяный и др., 2009; Неврова, 2014).

В последние годы накоплен некоторый массив гидрохимических и гидробиологических данных по Балаклавской бухте (Куфтаркова и др., 1999; Киселева, Просви́ров, 2006; Муравьева, 2007). При этом исследования донных отложений носят эпизодический характер и относятся преимущественно к описанию их гранулометрического состава и степени загрязнения различными поллютантами (Миронов и др., 2003; Малахова, 2013; Гуров и др., 2015). Биохимическое потребление кислорода (БПК), являясь своеобразным интегральным параметром бактериальной активности, широко применяется для оценки процессов самоочищения водоемов. Имеются данные по БПК₅ для поверхностных и придонных водных слоев Балаклавской бухты (Ломакин и др., 2010; Мачкевский и др., 2011; Чекалов и др., 2013), однако отсутствуют сведения о поглощении кислорода донными осадками. Тем не менее масштаб этого явления на мелководьях и в замкнутых акваториях часто весьма значителен и в некоторых случаях может в 2–4 раза превышать утилизацию кислорода в столбе воды (Burns, 1976).

В связи с этим целью настоящей работы было изучение окислительной активности микрофлоры в донных отложениях Балаклавской бухты и, как следствие, их потенциальной способности к самоочищению.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы донных осадков в районе Балаклавской бухты были отобраны с помощью дночерпателя Петерсена в октябре 2008 года (рис. 1). Для исследования брали поверхностный 2-см слой. Все определения, кроме температуры, окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и водородного показателя (pH), производили в лабораторных условиях. Измерение pH и Eh осуществляли портативным иономером Sention 1 (Hach, США) непосредственно на борту катера.

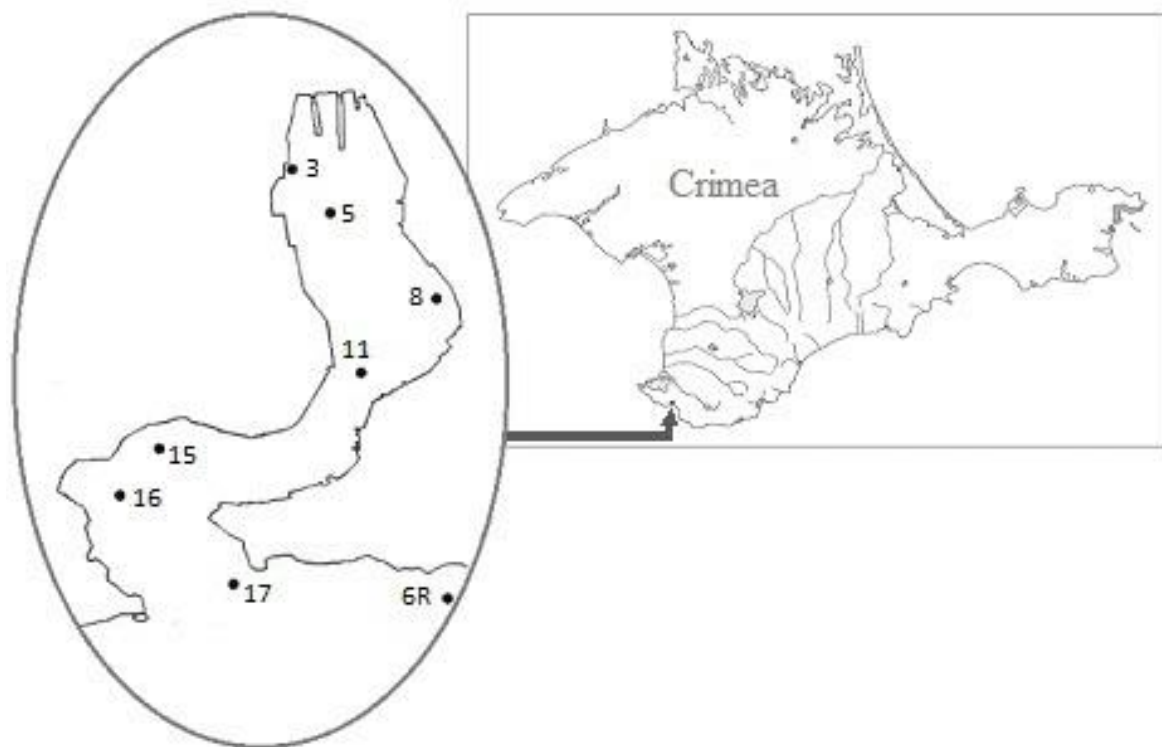


Рис. 1. Схема расположения станций в Балаклавской бухте

Влажность и содержание органического вещества определяли гравиметрическим методом соответственно после сушки при $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прокаливании навесок при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Потенциальную окислительную активность (ПОА) бактериобентоса определяли по ранее предложенной методике, основанной на эффекте реверсного возрастания оптической плотности метиленового синего в пробах, предварительно прошедших через анаэробную экспозицию, при их повторном контакте с кислородом воздуха (Чекалов, 2012).

Скорость суммарного потребления кислорода (СПК) измеряли с помощью респирометрической камеры объемом 60 мл, герметично соединенной с кислородным датчиком LDO-оксиметра HQ40d (Hach, США). Емкость заполняли морской водой, вносили $0,2\text{ см}^3$ исследуемого ила и плотно закрывали специальной пробкой с газоотводной трубкой. Материал распределяли на площади 20 см^2 слоем толщиной примерно $0,01\text{ см}$. Измерение осуществлялось при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ автоматически ежечасно в течение 12–20 часов. Полученные результаты в дальнейшем были пересчитаны на грамм влажного грунта.

Определение скорости кислородной нейтрализации восстановленных соединений (КНВС) проводили аналогичным образом, предварительно подавив жизнедеятельность бактерий и создав благоприятные условия для окисления восстановленных веществ. Учитывая, что снижение pH смещает соотношение сернистых соединений в воде (S^{2-} , HS^- , H_2S) в сторону преобладания наиболее активно окисляемого сероводорода, водородный показатель в емкости доводили $0,1\text{N}$ серной кислотой до 5. Это также способствовало подавлению жизнедеятельности микрофлоры, наряду с внесением в измерительную емкость стрептомицина из расчета конечной концентрации $0,1\text{ мг/мл}$ и последующим термостатированием емкости при $8\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Скорость аэробного поглощения кислорода (АПК) получали путем вычитания из соответствующего уровня суммарного поглощения (СПК) значения КНВС.

Потребление кислорода измеряли в условиях его достаточной исходной концентрации в измерительной емкости, порядка $6\text{--}8\text{ мг/л}$. В связи с этим полученные результаты следует рассматривать как потенциальные, особенно для кислород-дефицитных зон.

Учет численности аэробных гетеротрофных микроорганизмов (Аэ) проводили путем глубинного посева разведений донных отложений в модифицированную среду (Горбенко, 1961). Для выявления анаэробных гетеротрофов (АнАэ) и сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) использовали модифицированную среду Вильсона – Блера. Как и в случае со средой Горбенко, навеску сухой среды брали в соотношении 1:10 от рекомендуемой по прописи. Посев осуществляли по методу Л. Д. Штурм (Родина, 1965). При этом темноокрашенные колонии учитывали как СРБ, а светлые – как анаэробные гетеротрофные бактерии. Инкубацию вели при температуре 18–20 °С, что соответствовало условиям среды обитания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом гидрологических особенностей, антропогенного воздействия и динамики вод акватория бухты была условно разделена на 3 части: кутовую, среднюю и устьевую, а также отдельно выделены район сброса стоков и фоновая точка (табл. 1).

Как было отмечено ранее (Чекалов и др., 2013), концентрация кислорода в придонных водах Балаклавской бухты колеблется в пределах 4.29–5.83 мг/л, что в целом характерно для черноморских вод.

Таблица 1

Некоторые физико-химические параметры воды и донных отложений Балаклавской бухты

Часть бухты	№ точек	Глубина, м	t, °С	Плотность влажного грунта, г/см ³	Влажность, %	Ph	Eh, мВ	Органическое вещество, мг/г (вл)
Кутовая	3	6	18,8	1,39	52,7	7,17	-163	28
	5	7	18,8	1,35	61,4	7,45	-189	34
	8	12	18,7	1,30	56,9	7,90	-200	33
Средняя	11	13	18,6	1,25	62,5	7,79	-202	37
Устьевая	15	20	17,1	1,30	58,8	8,00	-209	43
	16	23	18,5	1,49	38,9	7,86	-236	28
Сброс стоков	17	27	16,2	1,43	48,2	7,61	-116	28
Фон	6R	12	17,4	2,04	26,1	7,47	198	10

С ростом глубин по оси бухты в донных осадках на фоне снижения окислительно-восстановительного потенциала наблюдалось повышение рН в слабощелочной зоне, тогда как в придонных слоях воды ранее были зафиксированы противоположные изменения рН. Подобные тенденции отмечались также и в районе Голубой бухты у Геленджика (Чекалов, 2016). Содержание органических веществ в донных осадках колебалось в пределах 3–4 %, поступательно возрастая до максимума в центральной части с последующим снижением в устье бухты. Такое распределение обусловлено комплексом гидрологических и антропогенных факторов (Ломакин, Попов, 2014). По данным (Гуров и др., 2015), доля $S_{орг}$ составляла в среднем 2,37 %, что дает близкие величины при пересчете на органическое вещество.

Максимальные значения потенциальной окислительной активности отмечены в кутовой части бухты. Здесь же, впрочем, зафиксирован и минимальный уровень (ст. 8). По всей видимости, это связано с располагавшимся длительное время судоремонтным предприятием, а также сбросом стоков. По приведенным ранее данным (Неврова, 2014), донные отложения в этом районе признаны наиболее загрязненными тяжелыми металлами. Так, относительно остальной акватории бухты наблюдалось пятикратное превышение

содержания свинца, хрома, кадмия, восьмикратное – ртути и в 10 раз – пестицидов. Такой комплекс биологически активных веществ вполне способен ограничить активность микрофлоры. В то же время здесь же наблюдается и пик численности аэробных бактерий, но в условиях среды обитания, надо полагать, большая часть из них пребывает в неактивном или слабоактивном состоянии.

Расход кислорода на окисление восстановленных соединений в грунтах бухты не превышал 9 % от его суммарного потребления, в то время как на реперной станции достигал почти трети, хотя собственно количественные значения при этом оказались вдвое ниже (табл. 2).

Таблица 2

Респираторные характеристики и численность некоторых групп бактерий в грунтах различных районов Балаклавской бухты

Часть бухты	№	ПОА, мкг/г×ч	СПК, мкг/г×ч	КНВС, мкг/г×ч	АПК, мкг/г×ч	Численность, КОЕ×10 ²		
						Аэ	АнА	СРБ
кутовая	3	3,69 ± 1,72	-	-	-	2100	180	р/н
	5	4,77 ± 1,25	3,12 ± 0,40	0,28 ± 0,04	2,84	13300	1090	150
	8	1,02 ± 0,46	-	-	-	32800	460	р/н
средняя	11	2,77 ± 1,00	-	-	-	800	70	1
устьевая	15	3,6 ± 0,63	3,36 ± 0,62	0,30 ± 0,02	3,07	400	80	р/н
	16	2,6 ± 1,04	-	-	-	220	20	р/н
сброс стоков	17	2,39 ± 0,54	-	-	-	1500	150	6
фон	6R	1,96 ± 1,25	0,55 ± 0,06	0,16 ± 0,02	0,39	400	Р/н	р/н

Примечание к таблице: р/н – характерные колонии не обнаружены.

Еще масштабнее здесь, более чем в 7 раз, сокращалось аэробное потребление кислорода. По всей видимости, незначительный уровень кислородного поглощения связан со снижением концентрации органических веществ в песках фоновой точки. На это также указывает расхождение в 5 раз значений потенциальной окислительной активности и АПК, то есть внесение по методике дополнительной органики в первом случае привело к существенному росту потребления окислителя аэробной микрофлорой (рис. 2). При этом в донных осадках бухты приведенные показатели были выше и практически совпадали между собой, что позволяет говорить о присутствии в достаточном количестве как органики, так и кислорода. В целом, АПК по оси бухты к кутовой части незначительно снижалось с 3,07 до 2,84 мкг/г×ч, тогда как потенциальная окислительная активность, наоборот, возрастала. Такие же соотношения ранее были отмечены и для грунтов Севастопольской бухты (Чекалов, 2016). Если считать ПОА максимальным уровнем, то эффективность бактериальной окислительной системы превышает 90 %. Это несколько выше среднего значения по Севастопольской бухте (82 %), что связано, возможно, с более благоприятными условиями.

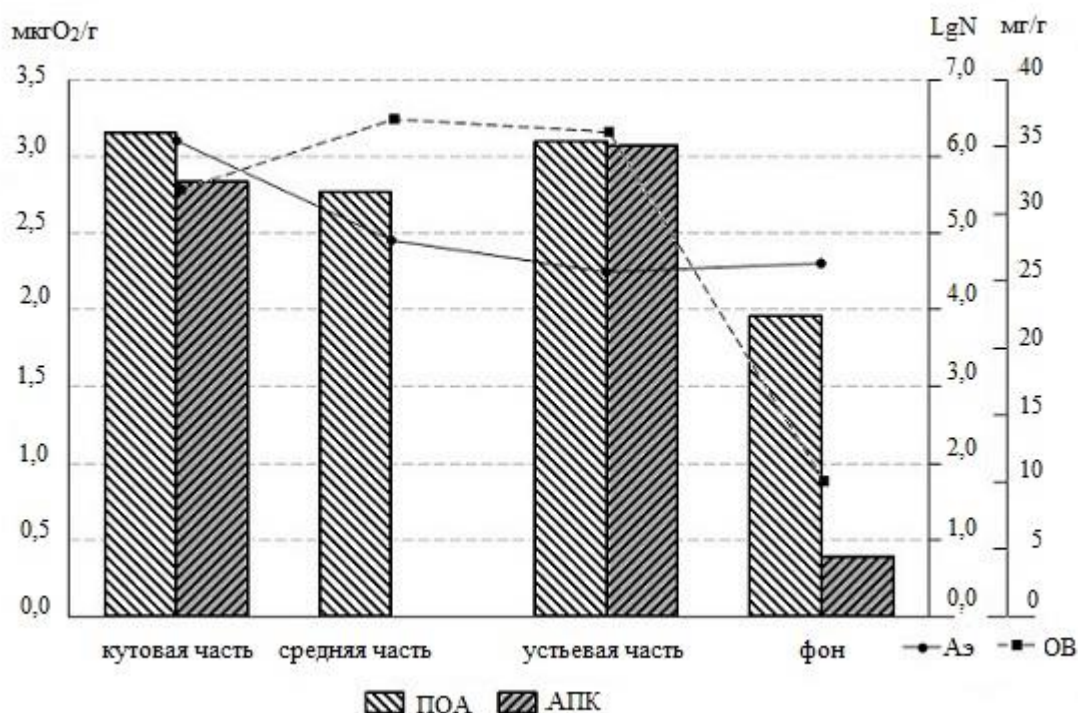


Рис. 2. Соотношение потенциальной окислительной активности (ПОА), аэробного потребления кислорода (АПК), численности аэробной микрофлоры (Аэ) и содержания органического вещества в донных отложениях различных районов Балаклавской бухты

Исходя из соотношения Редфилда (106/138) при окислении $C_{орг}$ (Froelich et al., 1979; Schulz, 2000) и полученных значений потребления кислорода аэробной микрофлорой, были определены потенциально возможные и реальные скорости деструкции органических соединений в условиях достаточной аэрации, что, как отмечалось выше, соответствует действительности. Для облегчения сопоставления с уровнем содержания органики результаты были пересчитаны на органическое вещество с использованием переводного коэффициента, равного 2 (Агатова и др., 2005). Полученные таким образом значения во внутренней и устьевой акваториях бухты оказались близкими, соответственно 4,36 и 4,72 мкг/г×ч, тогда как в фоновой пробе, очевидно, вследствие низкой концентрации органических соединений, лишь 0,60 мкг/г×ч. Следует учесть, что это та часть органики, которая подвергается минерализации при энергетическом обмене, тогда как примерно такое же количество, согласно литературным данным (Готтшалк, 1982), вовлекается в ассимиляционные процессы в ходе поддержания и новообразования бактериальной биомассы то есть суммарная скорость трансформации органических веществ в грунтах бухты может достигать до 10 мкг/г×ч. Однако «безвозвратные» потери все же связаны с дыханием. В этом случае при содержании в среднем порядка 35 мг/г полное разложение органики произошло бы в течение примерно года, а в фоновых донных отложениях существенно более низкая скорость ее деструкции определяет также и большую в два раза продолжительность разложения.

Концентрация органических веществ является производной от противоположно направленных процессов элиминации при дыхании и поступления извне, прежде всего в ходе седиментации. Тогда, если принять содержание органики неизменным во времени, то темпы ее окисления и поступления будут примерно равны. Рассуждая таким образом, можно предположить также, что и скорость КНВС уравнивается соответствующим образованием восстановленных соединений, преимущественно сероводорода. Учитывая, что в водных растворах, ввиду недостаточного поступления кислорода, сероводород окисляется,

как правило, до воды и серы $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$ (Некрасов, 1973), получаем продукцию H_2S приблизительно 0,6 и 0,3 мкг/г×ч в грунтах бухты и контрольной точке соответственно.

Слабые колебания содержания органики и АПК (рис. 2) в донных отложениях различных районов бухты, тем не менее, сопровождались существенными отличиями по численности аэробной и анаэробной микрофлоры (табл. 2). В кутовой части она была на два порядка выше, чем в устьевом районе. Пересчитав потребление кислорода на одну бактериальную клетку, мы получим удельные скорости процессов дыхания и кислородного окисления восстановленных соединений. Так, в кутовой части они равны $2,1 \times 10^{-6}$ мкг O_2 /ч для аэробных и $2,5 \times 10^{-6}$ мкг O_2 /ч для анаэробных представителей против 0,8 и $0,4 \times 10^{-4}$ мкг O_2 /ч соответственно у выхода из бухты, что примерно в 200 и 600 раз ниже. Причина этого, по всей видимости, в каждом конкретном случае заключается в специфических условиях среды обитания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, консервативность условий в толще донных осадков сглаживает градиенты поступающих химических соединений и веществ, обычно более контрастные в водной среде. Вследствие этого грунты различных частей Балаклавской бухты имеют близкие значения некоторых физико-химических параметров, в частности редокс-потенциала и содержания органических веществ, что в свою очередь обуславливает сходные показатели респираторной активности бактериобентоса. Интенсивность окислительных процессов в целом характерна для бухт Севастополя, составляя в среднем порядка 3 мкг O_2 /г×ч. При этом колебания численности аэробной и анаэробной групп бактерий по оси бухты были более значительны, что позволяет говорить о различной эффективности дыхания донной микрофлоры и процессов окисления восстановленных соединений. Высокая численность бактерий на фоне низкой удельной скорости потребления кислорода может указывать на широкий спектр присутствующих веществ, которые с одной стороны формируют группы зависимых потребителей, а с другой ограничивают, подавляют жизнедеятельность других консументов.

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

Список литературы

- Агапова А. И., Аржанова Н. В., Лапина Н. М., Торгунова Н. И., Красюков Д. В. Пространственно-временная изменчивость органического вещества в прибрежных экосистемах Кавказского шельфа Черного моря // *Океанология*. – 2005. – Т. 45, № 5. – С. 670–677.
- Горбенко Ю. А. О наиболее благоприятном количестве «сухого питательного агара» в средах для культивирования морских гетеротрофных микроорганизмов // *Микробиология*. – 1961. – Т. 30, вып. 1. – С. 168–172.
- Гуров К. И., Овсяный Е. И., Котельянец Е. А., Коновалов С. К. Факторы формирования и отличительные особенности физико-химических характеристик донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. – 2015. – № 4. – С. 51–58.
- Готтшалк Г. *Метаболизм бактерий*. – М.: Мир, 1982. – 310 с.
- Ковригина Н. П., Попов М. А., Лисицкая Е. В., Сеничева М. И., Субботин А. А. Оценка антропогенного воздействия и сгонно-нагонных явлений на экологическое состояние вод Балаклавской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа* (Сб. научных трудов). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 8. – С. 105–114.
- Куфтаркова Е. А., Ковригина Н. П., Родионова Н. Ю. Гидрохимическая характеристика вод Балаклавской бухты и прилегающей к ней прибрежной части Черного моря // *Гидробиол. журн.* – 1999. – Т. 35, № 3. – С. 88–99.
- Ломакин П. Д., Попов М. А., Куфтаркова Е. А., Ковригина Н. П. Проявление апвеллинга в полях гидрофизических и гидрохимических элементов на акватории Балаклавской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа* (Сб. научных трудов). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 23. – С. 180–192.

Ломакин П. Д., Попов М. А. Оценка степени загрязнения и перспектива экологических исследований вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря (Сб. научных трудов). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – Вып. 28. – С. 195–213.

Малахова Л. В. Полихлорированные бифенилы и органический углерод в донных отложениях Севастопольской и Балаклавской бухт (Черное море) // Морской экологический журнал. – 2013. – Т. 12, № 1. – С. 52–58.

Мачкевский В. К., Попов М. А., Ковригина Н. П., Лозовский В. Л., Козинцев А. Ф. Изменчивость параметров популяции мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. и ее эндосимбионтов в районе Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа (Сб. научных трудов). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Вып. 25, ч. 1. – С. 417–428.

Мионов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 185 с.

Муравьева И. П. Сравнительная характеристика видового и химического состава макрофитообрастаний Балаклавской бухты (Черное море) // Экология моря. – 2007. – Вып. 73. – С. 60–63.

Неврова Е. Л. Эколого-таксономическая оценка донных диатомовых в Балаклавской бухте (Юго-Западный Крым, Черное море) // Альгология. – 2014. – Т. 24, № 1. – С. 47–66.

Некрасов Б. В. Основы общей химии. – М.: Химия, 1973. – Т. 1. – 656 с.

Родина А. Г. Методы водной микробиологии. – Л.: Наука, 1965. – 363 с.

Чекалов В. П. Эффект реверсного восстановления окраски метиленового синего и возможность его применения для оценки функционального состояния бактериальных сообществ // Морской экологический журнал. – 2012. – Т. 11, № 1. – С. 74–80.

Чекалов В. П., Копытов Ю. П., Аннинская И. Н., Копытова В. Н. Некоторые гидрохимические параметры в слое контакта грунтов и придонной воды Балаклавской бухты (Черное море) // Морской экологический журнал. – 2013. – Т. 12, № 1. – С. 80–84.

Чекалов В. П. Потребление кислорода в зоне контакта водных масс верхней границы сероводородного слоя с донными осадками (Черное море) // Экосистемы. – 2016. – Вып. 5 (35). – С. 53–59.

Чекалов В. П. Абсорбция кислорода донными осадками прибрежных районов Севастополя (Черное море) в процессе утилизации органического вещества // Морской биологический журнал. – 2016. – Т. 1, № 4. – С. 44–52.

Burns N. M. Oxygen depletion in the central and eastern basins of Lake Erie, 1970 // J. Fish. Res. Board Can. – 1976. – Vol. 33, N. 3. – P. 512–519.

Froelich P. N., Klinkhammer G. P., Bender M. L., Luedtke N. A., Heath G. R., Cullen D., Dauphin P., Hammond D., Hartmann B. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1979. – Vol. 43. – P. 1075–1090.

Schulz H. D. Quantification of early diagenesis: dissolved constituents in marine pore waters // Marine Geochemistry. Springer. Berlin. Heidelberg. – 2000. – P. 85–128.

Chekalov V. P. To the question of the intensity absorption of oxygen by the Balaklava bay sediments (the Black Sea) // Ekosistemy. 2018. Iss. 15 (45). P. 99–105.

Experimental and calculated data on oxygen absorption in bottom sediments of the Balaklava Bay are presented. The estimation of the contribution to this process of aerobic and anaerobic microflora, as well as the possible maximum rates of utilization of the accumulated reserves of organics are given. The intensity of oxidation processes in general is typical for the bays of Sevastopol averaging about $3 \mu\text{gO}_2/\text{g}\times\text{h}$. At the same time, fluctuations in the number of aerobic and anaerobic groups of bacteria along the axis of the bay were more significant. This allows us to talk about the different effectiveness of respiration of the microflora and the oxidation of the reduced compounds processes.

Key words: bottom sediments, oxygen consumption, bacteriobentos, the Black Sea.

Поступила в редакцию 18.06.18