

УДК 579.68(268.45)

МИКРОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ И ДОННЫХ ОСАДКАХ ГУБЫ ДОЛГАЯ-ВОСТОЧНАЯ (БАРЕНЦЕВО МОРЕ) ДО НАЧАЛА СТРОИТЕЛЬСТВА СЕВЕРНОЙ ПРИЛИВНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

© 2009 г. А. С. Саввичев*, Н. А. Демиденко**, И. И. Русанов*, Е. Е. Захарова*, Е. Ф. Веслополова*, И. Афонина***, И. Анкудинова***, Н. В. Пименов*, М. В. Иванов*

*Учреждение Российской Академии Наук

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

**Государственный океанографический Институт, Москва,

***Наноген, Сизтл, США

Поступила в редакцию 19.03.2009 г.

Приливные электростанции (ПЭС) являются альтернативными источниками получения электроэнергии. Многолетний опыт наблюдений за ПЭС в губе Кислой Баренцева моря и ПЭС Ранс на атлантическом берегу Франции [1, 2] указывает на то, что строительство и эксплуатация Северной ПЭС (губа Долгая Восточная) может повлечь изменение состояния водного бассейна. Одним из вероятных негативных последствий может оказаться сероводородное заражение придонного водного слоя, связанное с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий. Активизация процесса сульфатредукции описана для различных морских бассейнов в разной степени изолированных от открытого моря [3–8]. Наиболее яркий пример быстрого изменения экологической ситуации связан с нарушением технологического режима эксплуатации Кислогубской ПЭС в период с 1974 по 1982 г., приведшему к снижению водообмена с морем до 2–3% [1]. Ограничение водообмена привело к сильному распреснению поверхностного 15 метрового слоя, затруднению перемешивания водной толщи, накоплению сероводорода на глубинах более 20 м и, как следствие, массовой гибели бентосных животных.

Целью настоящего исследования было получение количественных характеристик микробных процессов циклов углерода и серы в водной толще и донных осадках губы Долгой Восточной до начала строительства Северной ПЭС. Ранее микробиологические и биогеохимические исследования в губе Долгой не проводились.

Материалы для исследований получены в июне и августе 2008 г. в коротких рейсах МРБ “Ростислав”. Исследован продольный водный профиль губы Долгая от кутовой части до морского порога. Для отбора проб воды использовали батометр Нискина, для отбора осадков – лимнологический стратометр. Все эксперименты с водой и осадками проводили в первый час после отбора проб. Общую численность и продукцию бактериопланктона, а

также интенсивности микробных процессов метаногенеза и сульфатредукции определяли методами, изложенными ранее [9]. Для учета численности сульфатредуцирующих бактерий и метанобразующих архей использовали высеивание на селективные среды [10, 11]. Для детекции таксономических групп использовали метод молекулярной диагностики (real-time PCR) [12].

Губа Долгая Восточная расположена в южной части Баренцева моря в Мурманской области. Она впадает в северную часть побережья Кольского полуострова на расстоянии 5.5 км и представляет собой удлинённый фьордоподобный залив (фиард). Устье залива открытое, шириной около 800 м и глубиной до 30 м, в вершине залив расширяется до 1.5 км. Средняя ширина акватории составляет 0.65 км, средняя глубина – 40.7 м, максимальная – 96 м. В южной части в фиард впадает р. Долгая и небольшой ручей. Акватория залива при уровне полной воды занимает 5.6 км².

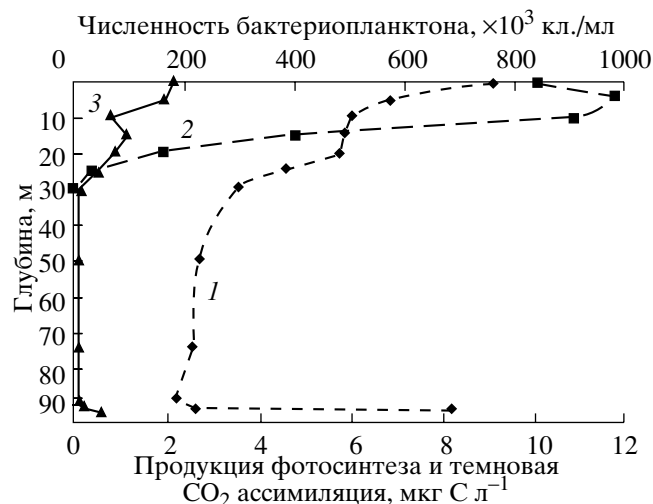
Проведенные исследования показали, что слабо опреснённый слой водной толщи (32.6‰) соответствует поверхностным 10 метрам. Гало- и термоклин выражены слабо и находятся на глубине 20–30 м (табл. 1). Ниже температура понижается, а солёность повышается, достигая в придонном горизонте 3.5°C и 35.05‰ соответственно. Содержание кислорода в поверхностном слое соответствовало 10.1–10.9 мг/л, глубже концентрация O₂ снижалась вплоть до 7.67 мг/л в придонном слое. Концентрация растворённого метана в поверхностном водном слое была близкой к равновесной с содержанием в приводной атмосфере; локальные максимумы отмечены в слое термоклина, а также в узком придонном слое (табл. 1). Принципиально термохалинная структура мало отличалась в периоды июньской и августовской съёмки.

В августе интенсивность фотосинтеза была максимальной в верхних десяти метрах (9.9–11.7 мкг С л⁻¹ сут⁻¹), далее постепенно снижаясь до минималь-

Таблица 1. Гидролого-гидрохимические характеристики вод губы Долгая Восточная по результатам съемки в июне и августе 2008 г.

№ станции	Горизонт, м	Съемка 21–23.06.2008/Съемка 21–22.08.2008 г.				
		T, °C	S (εпс)	O ₂ (мг/л)	O ₂ (%)	CH ₄ (нл/л)
7	0	7.3 / 11.60	32.2 / 32.66	10.9 / 10.86	123	80 / 81
	5	Нд / 9.25	Нд / 34.18	Нд / 10.50	114	Нд / 90
	10	7.1 / 8.50	34.1 / 34.31	10.5 / 10.27	109	140 / 137
	15	Нд / 8.20	Нд / 34.35	Нд / 10.50	111	Нд / 160
	20	6.4 / 8.05	34.2 / 34.38	9.8 / 10.74	113	120 / 144
	25	Нд / 6.70	Нд / 34.54	Нд / 10.44	107	Нд / 137
	30	5.8 / 5.50	34.4 / 34.60	9.8 / 10.38	103	60 / 105
	50	4.1 / 4.10	34.5 / 34.63	9.4 / 9.44	91	50 / 72
	75	Нд / 4.10	Нд / 34.67	Нд / 9.09	88	Нд / 61
	90	Нд / 3.90	Нд / 34.83	Нд / 8.85	85	Нд / 82
	92	Нд / 3.80	Нд / 35.02	Нд / 8.67	83	Нд / 95
93	3.5 / 3.80	35.1 / 35.05	8.4 / 7.67	73	280 / 160	
11	0	6.5 / 10.20	32.0 / 32.83	10.8 / 10.97	120	70 / 88
	30	5.1 / 4.10	34.1 / 34.35	9.5 / 9.56	92	100 / 57
	68.2	3.8 / 3.80	34.5 / 34.43	8.4 / 9.44	90	120 / 95
12	0	6.09 / 9.85	32.2 / 33.44	10.7 / 10.92	119	70 / 76
	30	5.7 / 5.70	34.3 / 34.18	10.0 / 10.50	105	90 / 70
	58.2	3.5 / 3.50	34.4 / 34.62	8.8 / 9.74	92	140 / 82

ных значений ($0.38 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$) на 30 м (рисунок). Суммарная продукция фотосинтеза соответствовала 215 мг С м^{-2} , что позволяет считать исследуемый залив мезотрофным водоемом. Общая численность



Численность бактериопланктона, продукция фотосинтеза и интенсивность темновой CO_2 -ассимиляции в водной толще губы Долгая: 1 – темновая ассимиляция углекислоты, мкг С л^{-1} ; 2 – продукция фотосинтеза, мкг С л^{-1} ; 3 – численность бактериопланктона, $\times 10^3 \text{ кл мл}^{-1}$.

бактериопланктона в поверхностном горизонте была достаточно высокой – $570\text{--}760 \text{ тыс. кл. мл}^{-1}$; с 20 м начиналось ее снижение с $470 \text{ тыс. кл. мл}^{-1}$ до $200 \text{ тыс. кл. мл}^{-1}$. В наддонной воде (в 10–20 см над поверхностью осадка) численность бактерий резко увеличивалась до $680 \text{ тыс. кл. мл}^{-1}$. Интенсивность темновой CO_2 ассимиляции (ТАУ), являющаяся показателем общей (автотрофной и гетеротрофной) микробной активности, также была максимальной в водном слое от поверхности до 20 м. Глубже величина ТАУ резко снижалась и оставалась почти постоянной ($0.10\text{--}0.20 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$) вплоть до наддонного слоя. Все изученные характеристики свидетельствуют о том, что в августе в бассейне фиарда интенсивность продукции фито- и бактериопланктона умеренная, причем реальная активность процессов приходится на поверхностный слой, зону термоклина, а также придонную воду.

Донные отложения наиболее глубоких впадин губы Долгой Восточной были представлены алевроитовыми осадками с примесью песка. Окислительно-восстановительный потенциал варьировал от +80 до +140 мВ. В табл. 2 представлены данные скорости процессов сульфатредукции и метаногенеза, вызываемых облигатно анаэробными бактериями и археями. Интенсивность этих процессов соответствовала средним значениям, характерным для прибрежных осадков морей западного сектора Арктики [13]. Методом молекулярной диагностики показано,

Таблица 2. Интенсивность микробных процессов в донных осадках губы Долгая Восточная по результатам съемки в июне и августе 2008 г.

№ станции, глубина, м	Горизонт, см	Съемка 21–23.06.2008 г./Съемка 21–22.08.2008 г.				
		<i>Eh</i> , мВ	[CH ₄], мкл дм ⁻³	ТАУ, мкг С дм ⁻³ сут ⁻¹	МГ, мкл CH ₄ дм ⁻³ сут ⁻¹	СР, мкг S дм ⁻³ сут ⁻¹
7 (93)	0–1	160 / 120	25 / 19	110 / 253	1.2 / 0.89	8.0 / 13.5
	2–6	90 / 100	32 / 23	190 / 356	1.6 / 1.99	68 / 171
	6–10		/ 21	/ 364	/ 1.87	/ 46
11 (69)	0–3	140 / Нд	5 / Нд	204 / Нд	0.86 / Нд	37 / Нд
	3–8	100 / Нд	7 / Нд	255 / Нд	0.69 / Нд	54 / Нд
12 (59)	0–3	180 / Нд	5.5 / Нд	46 / Нд	0 / Нд	35 / Нд
	3–8	120 / Нд	9 / Нд	75 / Нд	0 / Нд	45 / Нд

[CH₄] – концентрация метана, ТАУ – темновая фиксация углекислоты, МГ – интенсивность образования метана, СР – интенсивность сульфатредукции, Нд – нет данных.

что анаэробные микроорганизмы поверхностного слоя (0–6 см) донных отложений были представлены бактериями и археями родов *Desulfovibrio* (100 ед.), *Methanosarcina* (10 ед.), *Methanogenium* (1 ед.) и *Methanobacterium* (0.1 ед., неустойчивая детекция). На селективных питательных средах был выявлен рост сульфатредуцирующих бактерий (1–10 кл/г осадка), но не обнаружено роста метаногенных архей.

Проведенные исследования показали, что в водной толще губы Долгой заметная активность микроорганизмов обнаруживается лишь в фотической зоне. Глубже 30 м численность микроорганизмов и активность ТАУ снижается (рис. 1). Поэтому даже в конце августа вплоть до придонного слоя наблюдаются достаточно высокие концентрации растворенного кислорода – до 83–91% насыщения (табл. 1). В донных осадках обнаруживаются анаэробные микроорганизмы, а эксперименты с радиоактивными изотопами показывают, что сульфатредуцирующие бактерии и метаногенные археи активны (табл. 2). Прямым доказательством активности метаногенов является наличие метана во всех пробах воды с максимальными концентрациями в придонных горизонтах. Косвенным доказательством поступления восстановленных продуктов микробного происхождения из осадков в придонную воду служит понижение содержания кислорода в придонных пробах (табл. 1) и возрастание в них величины ТАУ (рисунок).

Негативный сценарий анаэробизации водной толщи, возможный после строительства ПЭС, это нарушение существующего баланса притока морских и пресных вод. В случае заметного опреснения верхних горизонтов водной толщи и ухудшения условий перемешивания, в нижних горизонтах сначала возникнет дефицит растворенного кислорода, а после его исчерпания появится сероводород, кото-

рый будет образовываться не только в осадках, но и в самой водной толще.

Статья не призывает к отказу от строительства Северной ПЭС. Инженерное решение конструкции дамбы должно учитывать максимальное сохранение естественного водообмена и необходимость регулярного промыва изолированного бассейна. Публикуемые данные станут начальной точкой отсчета изменений в функционировании микробного сообщества губы Долгая Восточная.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ 08-04-00248-а, 09-04-10035-к, МКБ Президиума РАН и ВНИИ 4174.2008.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марфенин Н.Н., Малютин О.И., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М., Усачев И.Н. Влияние приливных электростанций на окружающую среду. М.: Изд-во МГУ, 1995. 125 с.
2. Clavier J., Lechart J.-P., Retiere Ch., Rivain V. Effects a long terme du fonctionnement de l'usine maremotrice sur l'evolution du peuplement des sables fins vaseux de la Rance // *Oceanologica Acta*. 1983. N SP. P. 75–79.
3. Семенов В.Н. Систематика и экология морских бассейнов Севера на разных этапах изоляции. Апатиты: Изд-во ММБИ КФ АН СССР, 1988. 46 с.
4. Дерюгин К.М. Реликтовое озеро Могильное. Тр. Петергофского ест.-научн. ин-та. 1925. № 2. С. 1–112.
5. Иванов М.В., Русанов И.И., Пименов Н.В., Байрамов И.Т., Юсупов С.К., Саввичев А.С., Леин А.Ю., Сапожников В.В. Микробные процессы циклов углерода и серы в озере Могильном // *Микробиология*. 2001. Т. 70. № 5. С. 675–686.
6. Dyrssen D.W., Hall P.O.J., Haraldsson C. Time dependence of organic matter decay and mixing process in Framvaren, a permanent anoxic fjord in South Norway // *Aquatic Geochem.* 1996. V. 2. P. 111–129.

7. Иванов Н.О., Китаев С.П., Чеченков А.В. Особенности гидрофауны Канда-губы Белого моря. Л.: Изд-во ЗИН АН СССР, 1983. С. 37–44.
8. Нимбург Е.А. Долгая губа: изоляция естественная и искусственная // Природа. 1990. № 7. С. 44–49.
9. Саввичев А.С., Русанов И.И., Пименов Н.В., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Леин А.Ю., Иванов М.В., Крейн К. Микробные процессы циклов углерода и серы в Чукотском море // Микробиология. 2007. Т. 76. № 5. С. 682–693.
10. Widdel F. The genus *Desulfotomaculum* // The Prokaryotes. 2nd ed. Eds. Balows A., Trüper Y.G., Dworkin M., Harder W. New York-Berlin: Springer-Verlag, 1992. V. 2. P. 1792–1799.
11. Zeikus J.G., Weimer P.J., Nelson D.R., Daniels L. Bacterial methanogenesis: acetate as a methane precursor in pure culture // Arch. Microbiol. 1975. V. 104. P. 129–134.
12. Afonina I., Mills A., Sanders S., Kulchenko A., Dempsey R., Lokhov S., Vermeulen N.M.J., Mahoney W. Improved biplex quantitative real-time polymerase chain reaction with modified primers for gene expression analysis // Oligonucleotides. 2006. V. 16. № 4. P. 401–409.
13. Саввичев А.С., Русанов И.И., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Мицкевич И.Н., Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Иванов М.В. Микробные процессы циклов углерода и серы в Белом море // Микробиология. 2008. Т. 77. № 6. С. 823–838.