

УДК 551.481:543

**В. В. ХАХИНОВ\***, **Б. Б. НАМСАРАЕВ\*\***, **Г. С-С. ДОРЖИЕВА\*\*\***, **С. П. БУРЮХАЕВ\*\***

\*Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

\*\*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ

\*\*\*Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ

## ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПЕРЕШЕЙКА ПОЛУОСТРОВА СВЯТОЙ НОС (ОЗЕРО БАЙКАЛ)

*Представлены результаты гидрохимических и микробиологических исследований Арангатуйских болотных экосистем перешейка п-ова Святой Нос побережья оз. Байкал. Показаны особенности формирования болотных вод в результате подъема уровня озера.*

Ключевые слова: болотные экосистемы, гидрохимические и микробиологические исследования.

*Presented are the results from hydrochemical and microbiological investigations into Arangatui bog ecosystems on the isthmus of Syatol Nos Peninsula on the shores of Lake Baikal. The formation features of bog waters as a result of a rise in the lake's water level are shown.*

Keywords: bog ecosystems, hydrochemical and microbiological investigations.

### ВВЕДЕНИЕ

Болота с аккумулятивным характером обмена веществ и энергии обладают одним из главных углеродных пулов биосферы. Известна роль болот в формировании газового состава атмосферы: растительный покров болотных экосистем планеты выделяет в атмосферу до  $1,6 \cdot 10^8$  т кислорода в год, кроме того образуются парниковые газы, такие как  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Источником газов служит биологическая деструкция органического вещества [1–3].

Развитие большинства болот — относительно длительный природный процесс, который является составной частью функционирования единой природной экосистемы. В то же время достаточно широко распространены заболоченные участки, сформировавшиеся в результате хозяйственной деятельности человека. Особняком стоят современные природно-антропогенные болотные системы; их существование, с одной стороны, это естественный природный процесс, а с другой — их развитие происходит в результате прямого или косвенного антропогенного воздействия [1, 4–6]. Примером таких образований служат экосистемы на восточном побережье оз. Байкал. Здесь, в ходе повышения общего уровня озера, которое произошло в результате строительства гидросооружений на р. Ангаре, активизировались процессы болотообразования [7, 8]. Последствием таких процессов является образование особого вида болотных вод.

Болотные комплексы представляют определенный научный интерес как полигон изучения природно-антропогенных процессов в интерактивном режиме, где антропогенная составляющая рассматривается как естественные условия функционирования общей прибрежной экосистемы. В качестве примера можно привести обширные площади Арангатуйского болотного массива перешейка п-ова Святой Нос, где в результате повышения уровня оз. Байкал произошли изменения в развитии экосистемы в целом.

Современное экологическое состояние биотопов в условиях подъема уровня грунтовых и подземных вод связано прежде всего с изменениями гидрологических, гидрохимических, микробиологических, биологических и других характеристик, изучение которых стало целью настоящей работы.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для территории Арангатуйского болотного массива была составлена ландшафтно-типологическая карта, на которой выделены биогеоценозы с местами отбора проб (рис. 1). Воду на анализ отбирали в колодцах каждого болотного фитоценоза. *Пункт 1* — литоральная часть оз. Мал. Арангатуй, дно

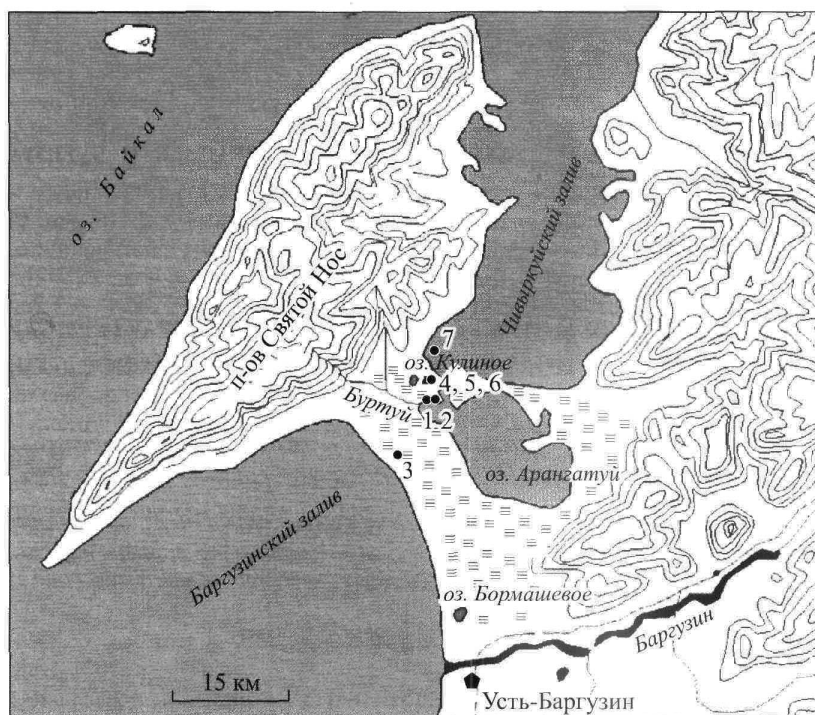


Рис. 1. Район исследования (1–7 — пункты отбора проб).

покрыто слоем разложившихся растительных остатков. *Пункт 2* — болотный биотоп с осоково-хвощовой растительностью, донные осадки состоят из слабо разложившегося торфа. На этих двух пунктах происходит выделение газов. *Пункт 3* — осоково-разнотравно-гипновое болото, расположенное на западной границе Арангутуйского болотного массива в 300–500 м от побережья Баргузинского залива. Пробы отбирались из обводненного участка, где в водной толще на растениях образуются микробные обрастания. *Пункты 4 и 5* являются небольшими болотными участками, на поверхности которых происходит разгрузка глубинных термальных вод минерального источника Кулиные болота. *Пункт 6* — проба, взятая непосредственно над источником, затопленным в результате подъема уровня оз. Байкала. *Пункт 7* — проба воды из Чивыркуйского залива оз. Байкал.

Гидрохимический анализ воды выполнен по общепринятым методикам [9]. Пробы воды и донных отложений отбирали с помощью батометра Молчанова и стратометра. В свежееотобранных пробах определяли pH, концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и биогенные элементы. Численность и активность микроорганизмов определяли в лабораторных условиях: целлюлолитиков и протеолитиков — методом предельных разведений в жидкой среде Пфеннинга с субстратами (фильтровальной бумагой и пептоном), амилитиков и сульфатредуцирующих бактерий — на плотной среде Пфеннинга с субстратом (крахмал) и на среде Виделя [10]. Состав газов изучали на газожидкостном хроматографе М 3700 (детектор — катарометр, газ-носитель — аргон).  $\text{CO}_2$  определяли с помощью колонки Sovpol B (длина 3 м, диаметр 3 мм), метан, водород и кислород — с использованием колонки Molsieve 5A (длина 3 м, диаметр 2 мм), условия хроматографирования  $30\text{ }^\circ\text{C} \times 70\text{ }^\circ\text{C} \times 90\text{ }^\circ\text{C}$ .

Скорость микробиологических процессов определена радиоизотопными методами в различных модификациях [11–12]. После введения в пробу радиоактивной метки пробы инкубировали *in situ* в течение 12–24 ч. В качестве меток использовали равномерно меченые растворы: для определения интенсивности темновой фиксации  $\text{CO}_2$  и автотрофного метаногенеза —  $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ , для сульфатредукции —  $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ , для метаноокисления —  $^{14}\text{CH}_4$ . После завершения инкубации пробы фиксировали 0,2–0,4 мл 40 %-ного формалина, в пробы, со-держащие  $^{35}\text{S}^{2-}$ , дополнительно вводили 1 мл 20 %-ного ацетата цинка. Дальнейшую обработку проводили согласно методам [11, 13]. Радиоактивность фиксированных образцов определяли на жидкостном сцинтилляционном счетчике RackBeta (ЛКВ, Швеция).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Малая мощность зоны аэрации и относительно высокая водопроницаемость торфов Арангатуйских озерно-болотных образований благоприятствуют тесному влагообмену между грунтово-болотными водами, зоной аэрации и атмосферой. В зоне аэрации существует верховодка, которая образуется в результате таяния льдистых включений в торфах. Особенности зимне-весеннего сезона в значительной степени определяются характером распределения и схода снежного покрова. В условиях инфильтрации снеготалых вод сквозь мерзлый слой торфа происходит резкий подъем грунтово-болотных вод со средней скоростью 2 см в сутки и достигает уровня на 0,2–0,4 м выше дневной поверхности.

После схода снега в формировании водного баланса принимают участие грунтово-болотные воды. В результате истощения запасов снеготалых вод и максимального испарения их уровень понижается до летнего минимума. С летними дождями начинается подъем, но заметное влияние сказывается лишь при величине их декадной суммы, превышающей 20 мм. В период дождей уровень грунтово-болотных вод поднимается до дневной поверхности, и большая часть болот превращается в топи. С началом промерзания торфов и прекращением осадков в первой декаде октября происходит спад уровня грунтово-болотных вод до зимне-ранневесеннего минимума. Более подробно гидрогеологические условия обсуждены в [14].

Подъем уровня оз. Байкал выразился в нарушении режима подземных вод и сложившегося водного баланса, в перераспределении поверхностных и подземных стоков, что отразилось на природных ландшафтах и состоянии почвенного покрова. По топографическим картам 1954 г. река Буртуй впадала в Байкал в районе Баргузинского залива. Позднее, в пределах перешейка п-ова Святой Нос, она изменила направление своего движения. В настоящее время река впадает в оз. Арангатуй, где образовались труднопроходимые топи.

Из-за замедления стока происходит изменение химического состава болотных вод. Минеральное ложе болот состоит из карбонатных суглинков, что влияет на гидрохимический режим и приводит к формированию болотных вод, обогащенных минеральными веществами. Запас биогенных элементов создается главным образом биологическим путем; основным их источником служит минеральная порода, подвергшаяся заболачиванию.

Грунтовые воды в основном гидрокарбонатные, кальциевые, кальциево-магниевого, натриевого, реже гидрокарбонатно-сульфатного со смешанным катионным составом; минерализация, как правило, не превышает 0,6 г/дм<sup>3</sup>. В летний период минерализация болотно-грунтовых вод увеличивается за счет испарительного концентрирования и капиллярного подтягивания влаги из глубоких горизонтов. На участках с неглубоким залеганием подземных вод развиваются процессы засоления, химизм которых разнообразен — сульфатно- и хлоридно-гидрокарбонатный, сульфатно-содовый, содово-хлоридный. Протекание процессов засоления и формирования такого разнообразия солей в пределах сравнительно небольшой территории требует дальнейшего детального исследования.

Формирующиеся в пределах болота малые водотоки имеют повышенную концентрацию  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , высокую минерализацию и значительное содержание органического вещества. Наибольшее содержание практически всех микрокомпонентов наблюдается на окраине болот в приподнятой части и в заболоченном лесу. В топи и протоках микроэлементы сорбируются в достаточно больших концентрациях на тонкодисперсных частицах оксидов металлов, гуминовых кислот, в меньшей степени микроэлементы выводятся из раствора и концентрируются в верховых частях болот на торфах [14].

Болотные воды являются нейтральными. Вблизи минерального источника значения pH возрастают. В летний период температура поверхностной воды в болотах незначительно отличается от температуры воздуха. Температура воды в болотных водах на момент исследования составляла 32–34 °С, в грифоне минерального источника достигала 62–65 °С. Болотные воды, в сравнении с водами Чивыркуйского залива, обогащены органическим веществом, что подтверждается высокими значениями ХПК, гуминовых кислот, появлением нитритов и повышенным содержанием  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ . Наибольшие значения БПК обнаружены в пробах пункта 6, что может свидетельствовать о высокой активности микробных сообществ данных биотопов (численность аэробных сапрофитов до 10<sup>8</sup> кл/мл) (табл. 1).

Газы, выделяемые из болот, по составу являются азотно-метановыми (пункты 2 и 4) и метаново-азотными (пункты 1, 3, 5). Содержание азота достигает 86 %, выявлено относительно высокое содержание метана — до 76 %. Содержание углекислого газа в пробах достигает 5 %. Отсутствие  $\text{CO}_2$  в пробах газа пунктов 4 и 5 объясняется его связыванием щелочными водами источника и переходом в формы угольной кислоты (табл. 2).

Таблица 1

Гидрохимический состав болотных экосистем перешейка Святой Нос

Показатели	Пункты отбора проб						
	1	2	3	4	5	6	7
$T, ^\circ\text{C}$	22	22	19	34	32	65	14
pH	7,08	6,70	6,70	9,36	8,96	9,50	7,95
БПК, мг/дм <sup>3</sup>	0,63	1,71	0,08	2,96	3,33	4,08	—
$\text{O}_2$ , мг/дм <sup>3</sup>	4,3	3,5	2,0	0,3	0,4	5,1	—
$\text{CO}_{2\text{св}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	Не обн.	Не обн.	4,4	Не обн.	Не обн.	26,4	—
Минерализация, мг/дм <sup>3*</sup>	190	210	225	—	—	290	145
$\text{HCO}_3^-$ , мг/дм <sup>3</sup>	79,3	134,2	152,5	123,0	195,2	366,0	86,4
$\text{CO}_3^{2-}$ , мг/дм <sup>3</sup>	н/о	18	30	78	60	108	—
$\text{SO}_4^{2-}$ , мг/дм <sup>3*</sup>	10,75	12,9	9,05	—	12,0	16,0	9,6
$\text{Cl}^-$ , мг/дм <sup>3</sup>	1,9	3,0	3,0	30,2	35,6	32,6	0,8
$\text{NO}_3^-$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,17	0,26	0,50	1,20	1,22	0,26	0,70
$\text{NO}_2^-$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,079	0,024	0,014	0,044	Не обн.	0,003	—
$\text{PO}_4^{3-}$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,076	0,107	Не обн.	0,034	0,037	0,006	—
$\text{Ca}^{2+}$ , мг/дм <sup>3</sup>	11,3	10,8	17,8	3,8	4,1	48,1	16,1
$\text{Mg}^{2+}$ , мг/дм <sup>3</sup>	2,6	3,9	2,8	6,0	6,0	10,7	3,2
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , мг/дм <sup>3*</sup>	10,6	12,5	15,7	—	18,2	22,7	9,8
$\text{NH}_4^+$ , мг/дм <sup>3</sup>	Не обн.	0,008	0,460	0,066	0,130	0,280	—
$\text{Fe}_{\text{общ}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,63	0,73	1,80	1,15	0,95	0,28	0,18

Примечание. Прочерк — не определялось, звездочка — пробы отобраны в зимнее время.

Болота являются местом активной деятельности микроорганизмов, чему способствуют наличие благоприятствующих гидрохимических параметров воды, богатое содержание автохтонного и аллохтонного органических и минеральных веществ. Микроорганизмы участвуют в продукции и деструкции органического вещества, образовании биогенных газов, формировании аэро- и анаэробноза в водах и донных отложениях болот. Одним из показателей активности микробного сообщества является темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  [13] — процесс, в результате которого происходит образование органического вещества. Ассимиляция может происходить как на свету (в процессе фотосинтеза), так и в темноте (темновая ассимиляция или темновая фиксация  $\text{CO}_2$ ). Скорость темновой ассимиляции является интегральным показателем активности всего микробного сообщества экосистемы. Интен-

Таблица 2

Качественный и количественный состав болотных газов, %

Пункты отбора проб	$\text{H}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CH}_4$
1	0	2	2	18	76
2	0	4	1	55	40
3	0	5	0	42	53
4	0,3	0	2	86	12
5	0	0	4	44	52

сивность темновой фиксации углекислого газа в изученных биотопах составляет 0,20–2,88 мг С/дм<sup>3</sup> в сутки (рис. 2, а). Наибольшая активность микробного сообщества наблюдается в биотопах, расположенных вблизи термального источника.

При активной деятельности аэробных микроорганизмов в воде и донных отложениях формируются восстановительные условия. В торфяной залежи с мощностью торфа не более 0,7 м в слое 0,3 м поддерживаются резко окислительные условия (500–900 мВ), ниже по профилю отмечается снижение Eh от –140 до –180 мВ. При низких значениях Eh активно функционируют анаэробные микроорганизмы. На терминальных этапах в разложении органического вещества участвуют сульфатредуцирующие и метанобразующие бактерии. Скорость сульфатредукции в изученных болотных биотопах составляла 6,35–16,02 мг S/(дм<sup>3</sup>·сут) (см. рис. 2, б). Другим терминальным этапом деструкции органического вещества является метаногенез. Эти процессы считаются конкурирующими. Было определено автотрофное и ацетокластическое метанобразование (см. рис. 2, в, г) — во всех изученных болотных биотопах метанобразование преимущественно автотрофное.

Скорость автотрофного метанобразования в донных осадках и микробных матах составляла 1,9–284,3 мкл СН<sub>4</sub>/(дм<sup>3</sup>·сут). Максимальная скорость образования метана выявлена в микробном мате пункта 3. В донных осадках пунктов 4 и 5 метаногенез протекал с наименьшей скоростью — 2,7 и 1,9 мкл СН<sub>4</sub>/(дм<sup>3</sup>·сут) соответственно. Образование метана из ацетата в болотных экосистемах про-

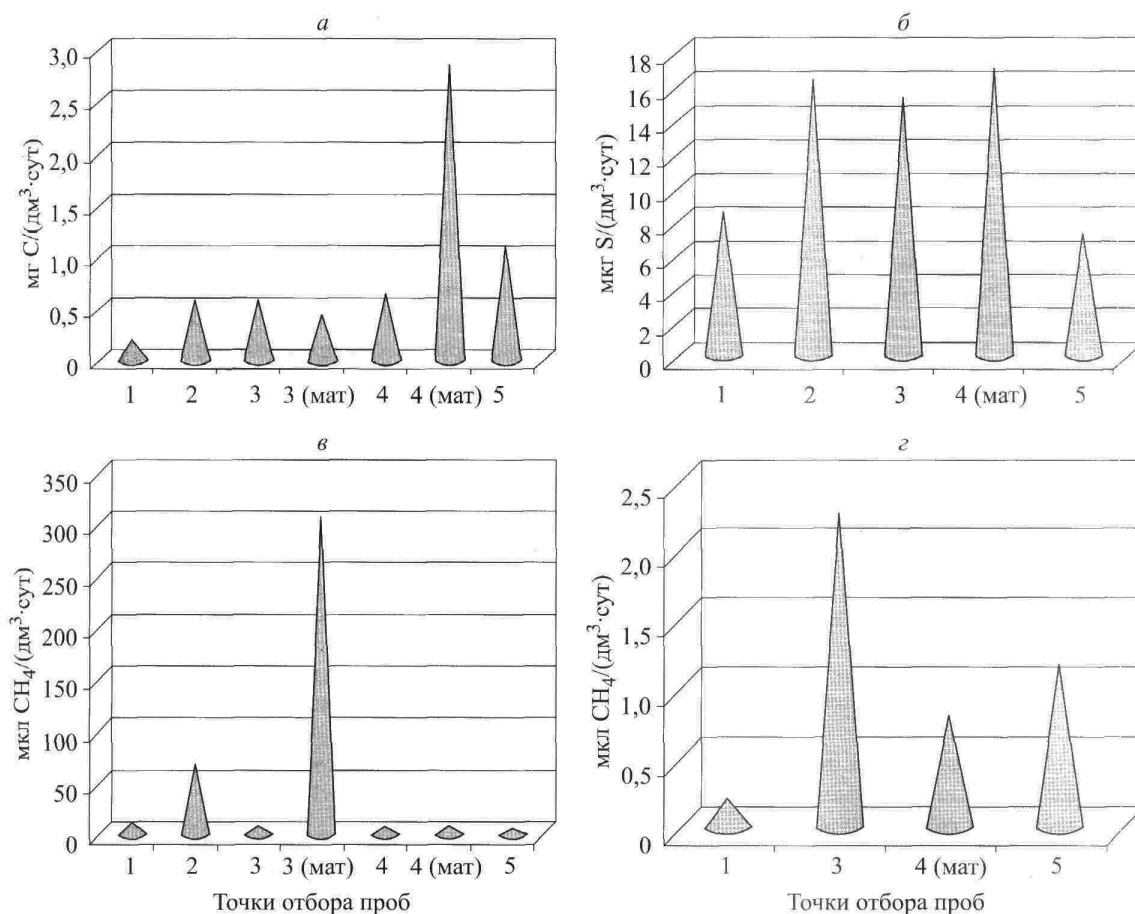


Рис. 2. Скорость микробиологических процессов в донных осадках и микробных матах болотных биотопов.

а — темновая фиксация CO<sub>2</sub>, б — сульфатредукция, в — автотрофное метанобразование, г — ацетокластическое метанобразование.

текает с меньшей скоростью — от 0,25 до 2,15 мкл  $\text{CH}_4/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ . Максимальная скорость ацетокластического метаногенеза выявлена в пункте 3. В микробных матах активность метаногенного сообщества выше, чем в донных осадках этих же биотопов.

Минусовые значения Eh в болотах существуют в более глубоких слоях почв, где анаэробные процессы могут протекать со значительно высокой интенсивностью. Доказательством этому служит тот факт, что в составе выделяющегося болотного газа высокое процентное содержание метана (см. табл. 2). Образующийся в восстановленных условиях метан в аэробных условиях подвергается окислению высокоспециализированной группой бактерий — метанотрофами. Активность этих бактерий в изученных болотных экосистемах составляла 33,9–181,6 мкл  $\text{CH}_4/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ . Наибольшая интенсивность метаноокисления отмечена в донных осадках минерального источника.

Значения интенсивностей и балансовые уравнения микробных процессов позволяют рассчитать количество использованного бактериями органического углерода на продукцию метана и сероводорода [13]. На восстановление сульфатов потребляется от 5,5 до 12,7 мкг  $\text{C}/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ . В процессе автотрофного и ацетокластического метаногенеза потребляется от 7,6 до 657,0 и от 0,04 до 0,48 мкг  $\text{C}/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$  соответственно. На образование метана микробное сообщество использует от 7,6 до 657,0 мкг  $\text{C}/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ , тогда как на восстановление сульфатов расходуется 6,5–12,3 мкг  $\text{C}/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ . При этом большую часть метана образуют автотрофные метаногены, использующие для синтеза водород и углекислоту — продукты деструкции органического вещества.

Ацетатиспользующие метаногены потребляют для синтеза метана до 0,50 мкг  $\text{C}/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ . Определение активности сульфатредукторов показало, что они синтезируют до 17,5 мкг  $\text{H}_2\text{S}/(\text{дм}^3\cdot\text{сут})$ . В болотных биотопах с нейтральными значениями pH и пресной водой доминирующим терминальным процессом является метаногенез, в то время как в щелочных биотопах с минерализованной водой сульфидогенез сопоставим с метанообразованием. При этом в болотной экосистеме создаются анаэробные условия, способствующие захоронению органического вещества в донных отложениях.

Радиоизотопным методом с помощью меченого метана определяли распределение углерода метана. От 8 до 22 % углерода в процессе окисления метана включается в биомассу клеток и органические экзометаболиты, в  $\text{CO}_2$  переходит от 88 до 92 % меченого метана. Наибольшее окисление метана происходит в биотопах у минерального источника.

Количественная оценка деятельности микроорганизмов показывает, что аэробные и анаэробные бактерии активно участвуют в круговороте веществ и энергии в болотной экосистеме перешейка п-ова Святой Нос. Микроорганизмы принимают участие в процессах продукции и деструкции органического вещества, образовании и потреблении газов, изменении химического состава вод и трансформации биогенных и абиогенных веществ, транзитом поступающих из болот в оз. Байкал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате повышения уровня оз. Байкал болотные образования перешейка Святой Нос развиваются в новых условиях с увеличением участков заболачивания и ускоренным развитием болот без выраженного антропогенного фактора в общем естественном развитии. Параллельно происходят изменения в направленности развития экосистемы перешейка в целом, прежде всего связанные с гидрологическими, гидрохимическими, микробиологическими характеристиками болот. Трансформировался гидрохимический состав болотных биотопов, особенно заметно активизировались микробиологические процессы, влияющие на процессы формирования химического состава вод.

*Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционных проектов СО РАН (№ 38 и № 95), программ «Фундаментальные исследования и высшее образование» (НОЦ-017 Байкал) и «Развитие научного потенциала высшей школы» (РНП.2.1.1/2165).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахнов В. К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. — Новосибирск: Наука, 1986. — 193 с.
2. Добродеев О. П. Баланс и ресурсы свободного кислорода биосферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. — 1977. — № 2. — С. 58–62.

3. Заварзин Г. А. Биогаз и малая энергетика // Природа. — 1987. — № 1. — С. 67–79.
4. Лопатин В. Д. О новой трактовке определения болота // Экология. — 1986. — № 1. — С. 70–72.
5. Лопатин В. Д. О наиболее существенных экологических особенностях болот // Экология. — 1977. — № 6. — С. 419–422.
6. Baird A. J. Hydrology and Hydrochemistry of British Wetland. — Chi Chester: Jonh Wiley and Sons, 1995. — 111 p.
7. Ляхова И. Г. О выделении юго-восточного побережья Байкала в особый торфяно-болотный район // Проблемы экологии Прибайкалья. — Иркутск: Изд-во Лимнол. ин-та СО РАН, 1982. — 216 с.
8. Ляхова И. Г., Косович И. Г. Болота Прибайкалья и их природоохранное значение // Уникальные объекты живой природы бассейна Байкала. — Новосибирск: Наука, 1990. — 224 с.
9. Фомин Г. С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам: Энциклопедический справочник. — М.: Протектор, 2000. — 848 с.
10. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных вод. — Л.: Наука, 1974. — 193 с.
11. Беляев С. С., Иванов М. В. Радиоизотопный метод определения интенсивности бактериального метанобразования // Микробиология. — 1975. — Т. 44, вып. 1. — С. 166–168.
12. Иванов М. В. Применение изотопов для изучения интенсивности процесса редукции сульфатов в озере Беловодь // Микробиология. — 1956. — Т. 25, вып. 6. — С. 306–309.
13. Кузнецов С. И., Саралов А. И., Назина Т. Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. — М.: Наука, 1985. — 213 с.
14. Намсараев Б. Б., Хахинов В. В., Турунхаев А. В. Болотные экосистемы перешейка полуострова Святой Нос // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 4. — С. 66–71.

*Поступила в редакцию 22 февраля 2012 г.*