

БИОГЕННОЕ НАКОПЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА В ДОННЫХ ОСАДКАХ БАЙКАЛА

© 2011 г. Л. З. Гранина, Ю. Р. Захарова, В. В. Парфенова

Лимнологический институт СО РАН
664033, Иркутск, ул. Уланбаторская, 3
e-mail: granina@gmail.com
Поступила в редакцию 17.11.2010 г.

Ключевые слова: Байкал, донные осадки, железо, марганец, микроорганизмы, диагенез.

ВВЕДЕНИЕ

На большей части дна Байкала осадки с поверхности окислены, и в окисленных отложениях накапливаются гидроксиды железа (Fe) и марганца (Mn). Мощность окисленной зоны пелагических осадков в среднем около 5 см, в некоторых районах озера до 10–15 см, в отдельных случаях — более 20 см. Как толщина окисленного слоя осадков, так и уровень его обогащения гидроксидами Fe и Mn обусловлены глубиной проникновения кислорода в отложения, которая тесно связана с условиями осадконакопления в озере. Последние варьируют в широких пределах. Темпы накопления осадков в открытом Байкале меняются от менее 0.02 мм до 1.5 мм в год, а количество захороненного в осадках органического вещества от менее 0.1% до более 4%. Разнообразие условий осадконакопления делает Байкал удобным объектом для изучения диагенетических процессов, связанных с окислительно-восстановительными (редокс) реакциями в осадках. К ним в первую очередь относятся процессы перераспределения соединений Fe и Mn.

В приустьевых осадках окисленный слой отсутствует или представляет собой тонкую буроватую пленку на поверхности осадка, тогда как в глубоководных отложениях, формирующихся при замедленном осадконакоплении, в мощном окисленном слое развивается полный диагенетический профиль [1]. Для него характерно образование бурого полужидкого прослоя (пелогена) на поверхности отложений, под которым имеется шоколадно-коричневая или черная Mn-микрозона, залегающая на светло-коричневом железистом прослое или корке. Нередко на границе между окисленными и восстановленными осадками формируется плотная Fe/Mn корка. Появление данных о количественных показателях процесса перераспределения Fe и Mn в осадках Байкала, а также о скоростях осадконакопления в озере позволило выделить в Байкале два ти-

па диагенеза Fe и Mn [2], которые фактически отражают крайние ситуации, описанные в свое время И.Б. Мизандронцевым [1]. Они характерны для районов с относительно высокими скоростями осадконакопления (тип I) и районов замедленной седиментации (тип II).

В первом случае Fe и Mn накапливаются в поверхностных отложениях, которые обогащены этими элементами в 3 (Fe) — 16 (Mn) раз относительно вмещающего осадка, что отмечено вблизи дельты р. Селенги, в Южном и Среднем Байкале, в проливе Малое Море. Во втором случае накопление железа и марганца существенно выше: уровень обогащения окисленных осадков может превышать 10 для Fe и 100 для Mn. При этом основная масса элементов аккумулируется не на поверхности осадка, а на редокс границе между окисленными и восстановленными отложениями, где образуются массивные прослои, существенно обогащенные гидроксидами Fe и Mn. Они распространены в Северном Байкале и на Академическом хребте, районах с низкими темпами седиментации и глубоким проникновением кислорода в осадки.

В первом случае рассчитанное время аккумуляции гидроксидов Fe и Mn в поверхностном окисленном слое осадков составляет десятки и первые сотни лет, в Северном Байкале и на подводном Академическом хребте накопление значительной массы этих элементов продолжается тысячи лет. Таким образом, Fe и Mn, поступающие в районы высоких темпов седиментации, быстро захороняются, тогда как при низких скоростях осадконакопления имеет место длительный процесс редукционного растворения накоплений Fe и Mn, сопровождающийся их переотложением, что в итоге приводит к автохтонной аккумуляции почти чистых гидроксидов.

Известно, что диагенетическое накопление Fe и Mn в донных осадках имеет биогенный характер, однако до последнего времени имелись весьма

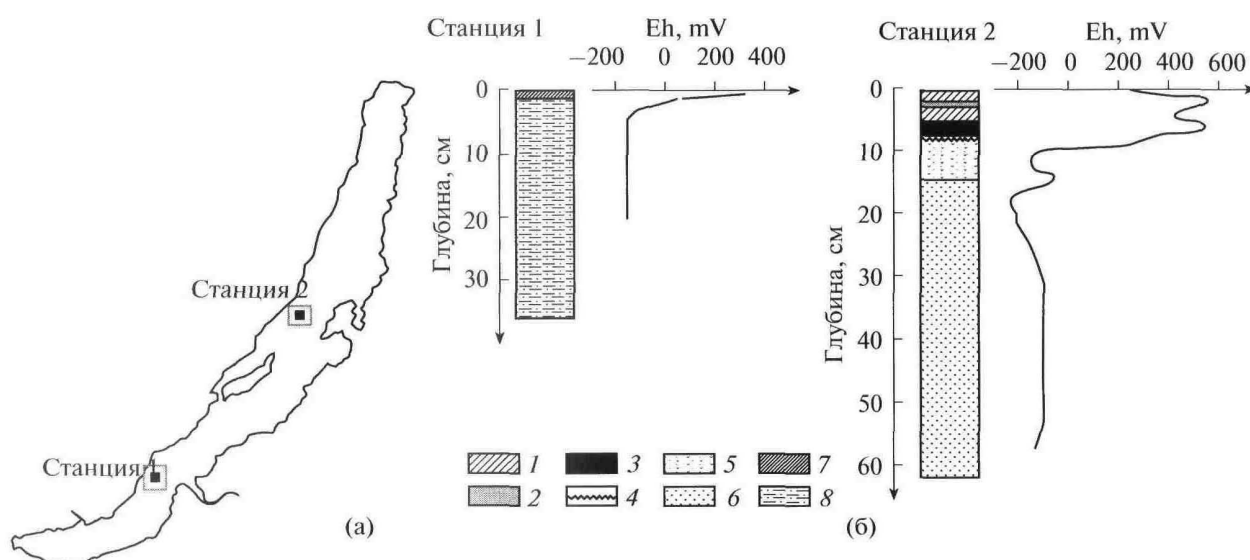


Рис. 1. Схема расположения станций отбора кернов (а); их литологическое строение и профили редокс потенциала осадков (б).

Обозначения: 1 — светло-коричневый окисленный ил; 2 — плотный темно-коричневый Fe/Mn прослой; 3 — черный Mn-прослой; 4 — оранжевая Fe-корка; 5 — серый восстановленный ил с коричневыми примазками окисленного осадка; 6 — серый восстановленный ил; 7 — темно-коричневый окисленный ил; 8 — серый восстановленный ил с черными включениями гидротроилита.

скудные сведения о микроорганизмах, участвующих в процессах перераспределения этих элементов в отложениях Байкала [3–5]. Лишь недавно нами начато систематическое изучение этого вопроса [6]. Целью настоящей работы является исследование роли микробного сообщества в диагенетических превращениях железа и марганца в связи с условиями осадконакопления в озере Байкал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С борта научно-исследовательского судна “Верещагин” трубкой “Бентос” были отобраны два коротких керна донных осадков на двух станциях, расположенных в районах озера, характеризующихся различными условиями осадконакопления (рис. 1). Станция 1 находится напротив дельты р. Селенги, крупнейшего притока Байкала, который обеспечивает более 75% твердого речного стока в озеро [7], а станция 2 расположена на подводном Академическом хребте, разделяющем среднюю и северную котловины озера. Таким образом, эти станции представляют районы, в которых протекает диагенез I типа (ст. 1) и диагенез II типа (ст. 2).

Пробы осадков отбирали послойно с шагом 1 см в верхней части кернов и через 2–4 см в их нижней части. Выделение чистых культур и учет численности культивируемых бактерий, окисляющих железо

(Fe-OX) и марганец (Mn-OX), проводили на селективных питательных средах по общепринятым методикам [8], модифицированным для условий Байкала [9]. Выделенные культуры бактерий идентифицировали по культуральным, морфологическим и биохимическим свойствам в соответствии с современными принципами классификации [10, 11].

Для характеристики условий обитания микроорганизмов во влажном осадке сразу после его отбора измеряли значения pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) на pH-метре Orion SA 250 (США) при комнатной температуре стеклянным и пластинчатым платиновым электродами, соответственно, с каломельным электродом сравнения. Измерения Eh выполняли до установления постоянных значений, полученных с интервалом в 15 мин. Концентрацию Fe и Mn в твердой фазе осадков определяли в солянокислых вытяжках из осадков методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборе AAS-30. Оцененная экспериментально ошибка определений составляет 2% для Mn и 4% для Fe.

Поровые воды получали центрифугированием осадка с последующим фильтрованием через мембранные фильтры SUPOR-450 с размером пор 0.45 мкм. В фильтрах измеряли колориметрически концентрацию растворенных форм Fe (фиксированного ацетатным буфером) и Mn, используя

Характеристика кернов и некоторые результаты их исследования

Параметр	Станция 1	<i>n</i>	Станция 2	<i>n</i>
Координаты станций отбора кернов	52°18'E 105°55'N		53°44'E 108°17'N	
Длина керна, см	37		62	
Толщина окисленного слоя, см	1		8	
Концентрация Fe в осадке*, мг/г	3–5.6(3.5)	11	0.6–8.3 (2.2)	11
Концентрация Mn в осадке*, мг/г	0.46–6.27(1.2)	18	1.21–57.46(11.0)	18
Концентрация ионов Fe ²⁺ в ПВ*, мг/л	0–0.97 (0.22)	21	0–0.45(0.16)	32
Концентрация ионов Mn ²⁺ в ПВ*, мг/л	0.26–1.13(0.49)	21	0.16–4.48(2.18)	29
Концентрация сульфатов в ПВ*, мг/л	1.2–13.2(5.8)	21	1.5–43.0(14.7)	23
Горизонт исчезновения сульфатов из поровой воды, см	3.5		10	
pH*	7.0–7.2(7.1)	19	6.3–7.7(7.1)	31
Eh на поверхности осадка, мВ	320		275	
Eh в осадке, мВ	320÷–130	20	575÷–220	29
Количество Fe-ОХ бактерий, КОЕ/г	0÷1500	30	0÷1500	32
Количество Mn-ОХ бактерий, КОЕ/г	0÷300	30	0÷1100	32

n – число определений, ПВ – поровая вода, * – диапазон значений, в скобках среднее значение.

полумикромодификации дипиридилового (Fe) и формальдоксимового (Mn) методов, предложенные для анализа поровых вод Байкала [12]. Концентрацию сульфатов измеряли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе “Миллихром” [13]. Ошибка всех определений не выше 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно литературным данным, скорости осадконакопления на станциях отбора кернов составляют от примерно 1 мм/год вблизи дельты р. Селенги (вне зоны непосредственного влияния реки) до 0.015 мм/год на Академическом хребте [14–16 и др.]. Для сравнения ожидаемых результатов необходимо, чтобы оба керна были представлены материалом с близким гранулометрическим составом, в данном случае, мелкоалевритовым илом. Поэтому ст. 1 расположена напротив дельты, а не возле нее (рис. 1а), что позволяет избежать примеси крупнозернистой фракции, характерной для осадков, находящихся под влиянием речного стока. Соответственно, скорость накопления осадков на ст. 1 существенно ниже 1 мм/год, но она, безусловно, много выше, чем на Академическом хребте. Глубина проникновения кислорода в осадки, измеренная микроэлектродами, варьирует в Байкале от 0.6 мм

возле дельты Селенги до более 50 мм на Академическом хребте [17], поэтому редокс условия в осадках обоих кернов существенно различаются.

В керне ст. 1 на поверхности осадка имеется окисленный слой мощностью 1 см (табл., рис. 1а). В керне ст. 2 толщина окисленного слоя составляет 8 см, он существенно обогащен гидроксидами Fe и Mn, которые химически дифференцированы и образуют на различных горизонтах обогащенные Fe-и Mn-прослой (рис. 1б, 2).

Известно, что Mn является исключительно чувствительным индикатором редокс условий. Он реагирует на их изменение в осадках (при наличии микроорганизмов) в течение всего нескольких часов [18]. Экспериментально показано, что величина редокс потенциала в байкальских осадках тем выше, чем больше в них содержание Mn(IV) [19]. Соответственно, диагенетическая слоистость в керне ст. 2 находит свое отражение на редокс профилях, измеренных в осадках (рис. 1б). В вертикальном разрезе осадков на ст. 2 отмечены три пика значений Eh, соответствующие повышенным концентрациям марганца в осадке: первый в темно-коричневом Mn-прослое на горизонте 1–3 см, второй – в черном Mn-прослое на редокс границе (горизонт 5–8 см), третий небольшой пик соответствует тонкому Fe/Mn прослою, захороненному на горизонте 12–13 см (рис. 1б, 2). На рис. 3 эти обогащенные про-

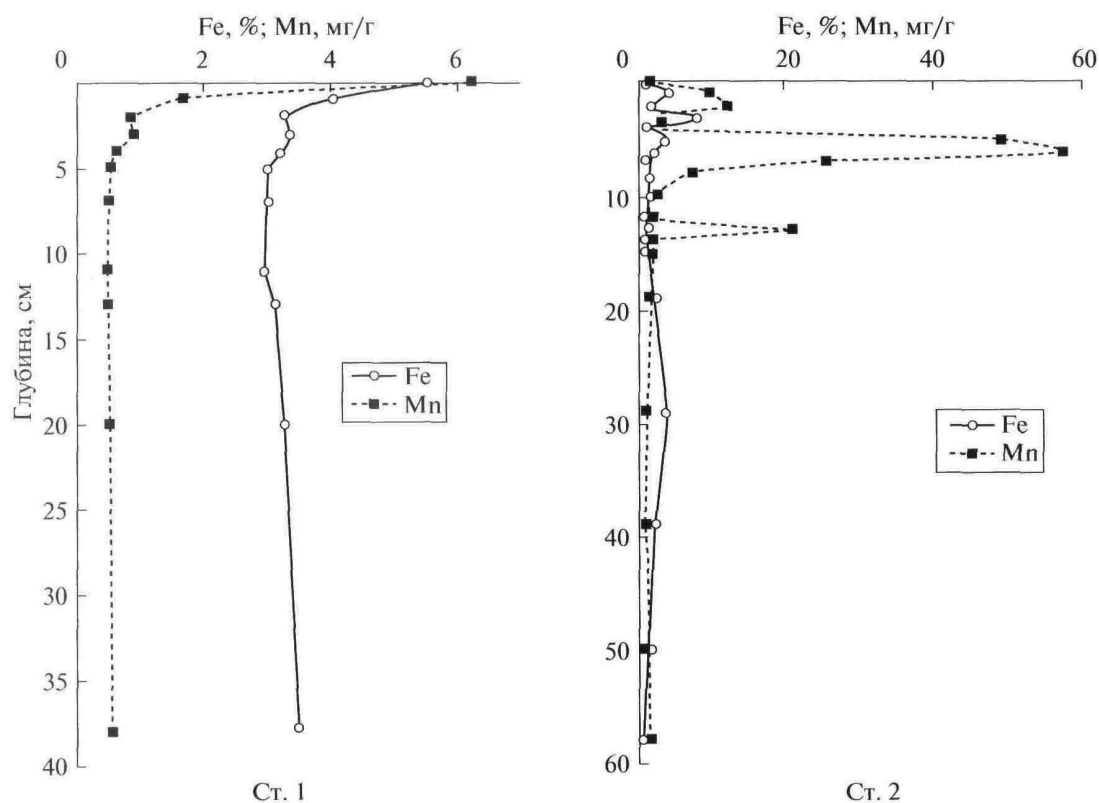


Рис. 2. Профили концентраций Fe и Mn в осадках исследуемых станций.

слои обозначены соответствующими номерами 1, 2, 3. Основная масса гидроксидов марганца сконцентрирована в черном Mn-прослое 2 вблизи редокс границы. Внутри него, на горизонте 5–6 см, отмечены максимальные значения Eh (575 мВ) (рис. 16, табл.). В керне ст. 1 наибольшее значение Eh (320 мВ) в поверхностном окисленном слое осадка на горизонте 0–1 см.

Более высокие значения редокс потенциала в осадках керна ст. 2 связаны с повышенными здесь концентрациями марганца (рис. 2, табл.), значительная часть которого представлена гидроксидами Mn(IV). Максимальная концентрация Fe в осадках ст. 2 в 1.5 раза, а Mn почти в 10 раз выше, чем в осадках керна ст. 1. На порядок выше и а максимальная концентрация Mn в поровой воде.

Диапазон измеренных значений pH и Eh в осадках керна ст. 2 существенно шире, чем в осадках ст. 1 (табл.). Таким образом, условия здесь характеризуются большим разнообразием, и, соответственно, концентрации всех анализируемых компонентов, как в осадке, так и в поровой воде (отличаются большей изменчивостью (за исключением содержания Fe в поровой воде).

В Байкале, благодаря протекающему в осадках процессу сульфатредукции, средний градиент концентраций сульфатов в поровых водах закономерно связан с процессом преобразования осадочного органического вещества. На ст. 1 концентрация сульфатов в поровой воде падает до аналитического нуля на глубине 3.5 см под поверхностью дна, тогда как на ст. 2 — лишь на горизонте 10 см. Это указывает на более интенсивный процесс деградации свежезахороненного органического вещества в районе с высокими темпами седиментации.

Вариации содержания ионов Fe в поровой воде не подчиняются определенным закономерностям, средние концентрации мало различаются в обоих кернах (табл.). То же справедливо и для значений pH, которые меняются от 6.3 до 7.7. Низкие значения pH отмечены в окисленных осадках ст. 2. Они несколько повышаются в восстановленных глинистых отложениях этой станции, однако средние значения pH осадков близки в обоих кернах.

Из отобранных осадков были изолированы бактерии родов *Siderocapsa* и *Bacillus*, представители которых могут окислять как железо, так и марганец. Следует отметить, что эти гетеротрофные микроорганизмы не являются специализированными, то

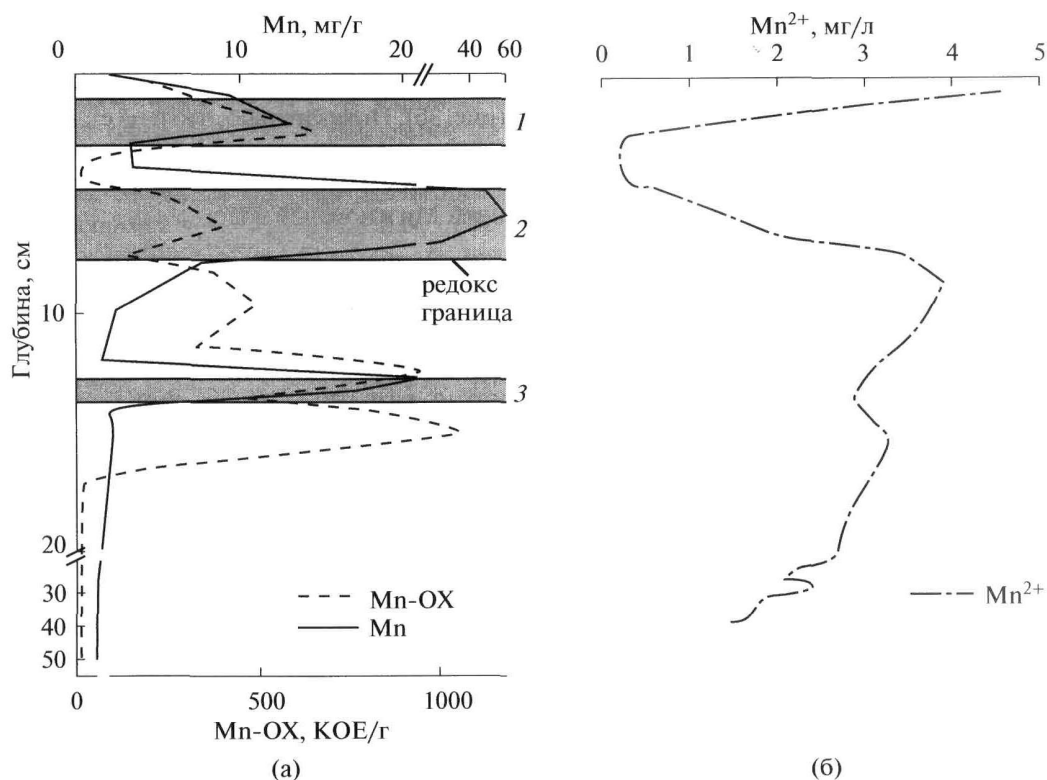


Рис. 3. Концентрация Mn в осадке, численность колоний культивируемых марганцеоокисляющих бактерий (а) и концентрация Mn^{2+} в поровой воде (б) на ст. 2 (Академический хребет). 1, 2 – первый и второй Mn-прослой в окисленном слое осадка; 3 – Fe/Mn микрозона, захороненная в восстановленном осадке.

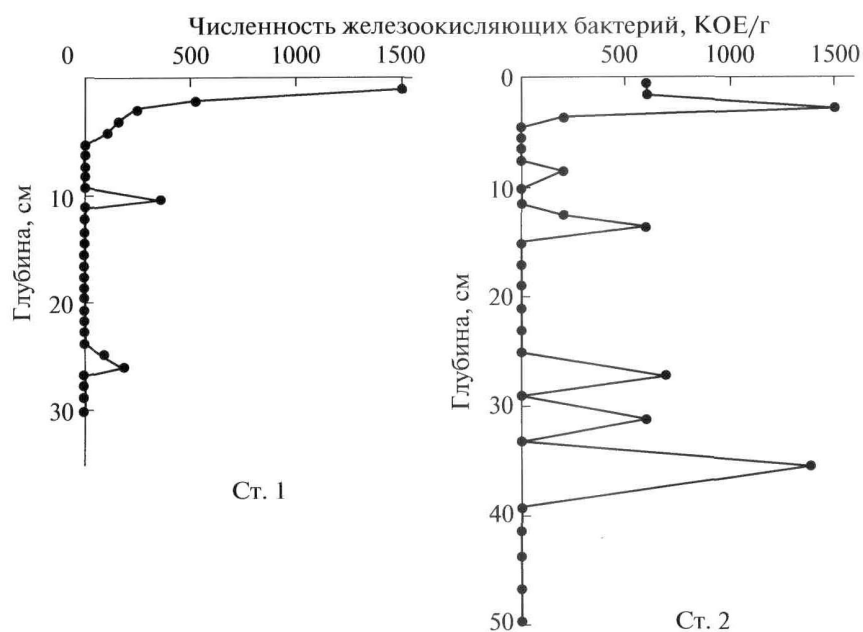


Рис. 4. Распределение культивируемых железоокисляющих бактерий в осадках исследуемых станций.

есть они лишь условно названы нами Fe- и Mn-окисляющими. Количество образующихся колоний таких бактерий показывает их потенциальную способность к окислению соединений железа и/или марганца при помещении в ту или иную питательную среду.

Численность культивируемых Mn-окисляющих бактерий достигала 1100 колоний образующих единиц на грамм влажного грунта (КОЕ/г). Их максимальное количество отмечено в керне ст. 2, и это согласуется с наибольшими здесь концентрациями Mn в осадке (рис. 2, табл.). Что касается Fe-окисляющих бактерий, то их максимальная численность в обоих кернах одинакова — 1500 КОЕ/г; близки между собой и максимальные концентрации Fe в осадках.

Изменения численности колоний культивируемых микроорганизмов по вертикали различаются на обеих станциях (рис. 3, 4). В керне осадков ст. 1 только на одном горизонте (3 см) непосредственно под окисленным слоем обнаружены Mn-ОХ бактерии, но их численность всего 300 КОЕ/г. Этот осадочный интервал характеризуется сравнительно высоким (1 мг/л) содержанием Mn в поровой воде. На остальных горизонтах Mn-ОХ бактерии не найдены.

В осадках керна ст. 2, имеющего мощный окисленный слой, обогащенный гидроксидами марганца, Mn-ОХ бактерии более многочисленны, они выявлены почти на всех горизонтах верхней 16 см части керна (табл., рис. 3а). Профиль концентраций Mn^{2+} в поровой воде (рис. 3б) отражает процесс мобилизации марганца: ионы Mn, образующиеся при редукции нижней части окисленного слоя, а также при растворении захороненной на горизонте 12–13 см окисленной микрозоны, диффундируют вверх, и марганец вновь отлагается вблизи границы вода-осадок. В результате образуется Mn-прослой на горизонте 1–3 см (1 на рис. 3а), который совпадает с пиком численности культивируемых Mn-ОХ бактерий. Совпадение максимума содержания Mn в осадке и наибольшей численности культивируемых колоний Mn-ОХ бактерий можно рассматривать как прямое доказательство того, что диагенетическое накопление марганца в донных отложениях Байкала имеет биогенный характер. В прослоях 2 и 3 максимальным концентрациям Mn также соответствуют заметные повышения численности культивируемых Mn-ОХ микроорганизмов (рис. 3а). Однако абсолютный максимум их численности не совпадает со вторым, наиболее мощным Mn-прослоем (2 на рис. 3а), а находится на горизонте 16 см ниже поверхности дна. При этом культивируемые Mn-ОХ бактерии выявлены как выше, так и ниже редокс границы, в широком осадочном ин-

тервале от 5 до 16 см. Такое распределение, вероятно, обусловлено тем, что именно в этом интервале поровые воды наиболее обогащены ионами Mn (рис. 3б). Показательно, что и на ст. 1 Mn-ОХ бактерии развиваются лишь в том осадочном интервале, который характеризуется повышенной концентрацией Mn в поровой воде.

В оз. Верхнее (Канада), где pH и редокс условия в осадках близки таковым в Байкале, Mn окисляющие бактерии также были найдены в отложениях ниже редокс границы [20]. Авторы предположили, что их развитию способствует присутствие ионов Mn^{2+} в поровой воде. Известно, что многие железобактерии в процессе метаболизма выделяют перекись водорода H_2O_2 — соединение, токсичное для микроорганизмов, которое частично удаляется из зоны их обитания путем его расходования на окисление соединений Fe и Mn. В результате, среда с повышенным содержанием растворенных форм Fe и Mn является благоприятной для развития железобактерий [21, 22]. По-видимому, этим обусловлены отмеченные закономерности изменения численности колоний культивируемых Mn-ОХ микроорганизмов в вертикальном разрезе осадков Байкала.

Что касается культивируемых Fe-ОХ микроорганизмов, то в осадках керна ст. 1 они активно развиваются в верхнем окисленном слое. Их численность плавно снижается с глубиной от 1500 КОЕ/г на поверхности осадка до 0 КОЕ/г на горизонте 5 см (рис. 4), изменяясь аналогично профилю концентрации Fe в осадке (рис. 2). На ст. 2 культивируемые Fe-ОХ бактерии также многочисленны (600–1500 КОЕ/г) в поверхностных осадках, но максимальная их численность приходится не на самый верхний слой осадка, а на нижнюю часть темно-коричневого прослоя 1 (горизонт 3 см, рис. 4), с которым совпадает и первый пик численности колоний культивируемых Mn-ОХ бактерий (рис. 3а). Непосредственно под ним залегает Fe-прослой.

Однако в осадках обоих кернов Fe-ОХ микроорганизмы образуют также единичные пики численности культивируемых колоний на отдельных горизонтах ниже редокс границы. Вероятно, они обусловлены развитием здесь спорообразующих бактерий, способных окислять железо, которые идентифицированы как представители рода *Bacillus*. Такие споры могли длительно сохраняться в осадке с тех времен, когда он был окисленным. Попадая в благоприятную среду, применяемую для культивирования железобактерий, они начинают активно развиваться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано участие микроорганизмов в перераспределении соединений железа и марганца в донных осадках озера Байкал. Установлено, что культивируемые бактерии, окисляющие Fe и Mn в осадках Байкала, относятся к родам *Siderocapsa* и *Bacillus*. Они распространены как в районах, характеризующихся высокими темпами седиментации, так и на участках, где скорость осадконакопления понижена. Показано, что численность колоний культивируемых железобактерий тесно связана с концентрациями Fe и Mn в осадках и поровых водах, которые, в свою очередь, контролируются редокс обстановкой в осадках, определяемой условиями осадконакопления. Соответственно, активность бактерий, способных окислять соединения Fe и Mn в осадках, существенно различается в различных районах озера. Наиболее активно процесс дифференциации соединений Fe и Mn происходит в районах с низкими скоростями осадконакопления: здесь в мощном окисленном слое осадков интенсивно аккумулируются гидроксиды Fe и Mn, а численность культивируемых колоний Fe- и Mn-окисляющих бактерий достигает максимальных значений. Полученные результаты позволяют рассматривать высокую численность таких бактерий как еще одну особенность диагенеза II типа.

Для диагенеза II типа характерна химическая дифференциация элементов в "окисленных осадках", выражающаяся в образовании четко выраженных в вертикальном разрезе отложений осадочных прослоев, обогащенных Fe и Mn. Во всех Mn-прослоях отмечено заметное повышение численности культивируемых Mn-окисляющих бактерий, и это свидетельствует о биогенной природе диагенетического накопления марганца в донных отложениях озера. Наиболее активны Mn-окисляющие микроорганизмы в интервале осадка, характеризующемся высокими концентрациями ионов Mn^{2+} в поровой воде, что, вероятно, связано с особенностями их метаболизма. Колонии культивируемых Fe-окисляющих микроорганизмов многочисленны в верхних окисленных слоях осадка, и результатом их жизнедеятельности является обогащение этих осадков гидроксидами железа. Однако такие бактерии могут также образовывать единичные скопления культивируемых колоний и на более глубоких горизонтах, что, вероятно, обусловлено активизацией сохраняющихся в осадке спорообразующих бактерий рода *Bacillus*, способных окислять железо, при их попадании в процессе культивирования в благоприятную среду.

Авторы выражают глубокую признательность М. Штурму (Швейцарский федеральный институт

изучения и технологии окружающей среды) и Е.П. Чебыкину (ЛИН СО РАН) за отбор осадочных кернов, а также Т.В. Погодаевой и К.Л. Соколовой за помощь при анализе содержания железа и марганца в осадках, Л.П. Голобокову за определения содержания сульфатов в поровых водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мизандронцев И.Б. К геохимии грунтовых растворов / Динамика Байкальской впадины. Новосибирск: Наука, 1975. С. 203–230.
2. Granina L., Müller B., Wehrli B. Origin and dynamics of Fe- and Mn- sedimentary layers in Lake Baikal // Chemical Geology. 2004. V. 205. P. 55–72.
3. Горленко КМ., Дубинина Г.А., Кузнецов СИ. Экология водных микроорганизмов. М., Наука, 1977. 288 с.
4. Нильсон Л.Х., Майерс КР. Марганец редуцирующие бактерии Байкала / Первая Международная Верещагинская байкальская конференция. 2–7 окт. 1989 г. Тезисы докладов. Иркутск, 1989. С. 20–21.
5. Granina L., Klump J.V., Myers C.R., Nealson K.H. Mn cycling in Lake Baikal –distribution of Mn and Mn reducing bacteria in water and sediments // Eos Trans. AGU. 1990. V. 71. № 2. P. 76.
6. Zakharova Yu.R., Parfenova V.V., Granina L.Z., Kravchenko O.I., Zemskaya T.I. Specific ecological features of the distribution of iron and manganese oxidizing bacteria in bottom sediments of Lake Baikal // Journal Ecology & Safety. International Scientific Publications. 2008. V. 2. № 1. 313 – 322.
7. Агафонов Б.П. Экзоэкология Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, Наука, 1990. 176 с.
8. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. Москва: Наука. 1989. 289 с.
9. Захарова Ю.Р., Парфенова В.В. Метод культивирования микроорганизмов, окисляющих железо и марганец в донных осадках оз. Байкал // Изв. РАН. Сер. биол. 2007. № 3. С. 290–295.
10. Хоулт Дж., Криг К., Снит П., Сэйли С., Вильямс Т. Определитель бактерий Берджи. М.: Мир, 1997. 800 с.
11. Garrity G.M. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. N. Y.: Springer-Verlag, 2005. V. 1–2. 2494 p.
12. Лейбович Л.З. Модификация колориметрического определения Fe и Mn в грунтовых растворах озерных осадков / Вопросы методологии гидрохимических исследований. Часть I. Л.: Гидрометеоздат. 1979. С. 163.
13. Барам Г.И., Верещагин А.Л., Голобокова Л.П. Применение микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ- детекцией для анализа анионов в объектах окружающей среды // Журн. анал. Химии. 1999. Т. 54. № 9. С. 962–965.
14. Edgington D.N., Klump I.V., Robbins J.V., Kusner Yu.S., Pampura V.D., Sandimirov I.V. Sedimentation rates, residence times and radionuclides inventories in Lake Baikal from ^{137}Cs and ^{210}Pb in sediment cores // Nature. 1991. V. 350. P. 601–604.

15. Colman S.M., Peck J.A., Karabanov E.B., Carter S.J., Bradbury J.P., King J.W., Williams D.F. Continental climate response to orbital forcing from biogenic silica records in Lake Baikal // *Nature*. 1995. V. 378. P. 769–771.
16. Вологина Е.Г., Штурм М., Воробьева С.С., Гранина Л.З., Тоцаков С.Ю. Особенности осадко-накопления в озере Байкал в голоцене // *Геология и геофизика*. 2003. Т. 44. № 5. С. 407–421.
17. Martin P., Granina L., Martens K., Goddeeris B. Oxygen concentration profiles in sediments of two ancient lakes: Lake Baikal (Siberia, Russia) and Lake Malawi (East Africa) // *Hydrobiologia*. 1998. V. 367. P. 163–174.
18. Bargar J.R., Tebo B.M., Villinski J.E. In situ characterization of Mn(II) oxidation by spores of the marine *Bacillus* sp. Strain SG-1 // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2000. № 64. P. 2775–2778.
19. Лейбович Л.З. Железо и марганец в окисленных осадках Байкала // *Геохимия*. 1983. № 12. С. 1756–1761.
20. Richardson L.L., Nealson K.K. Distribution of manganese, iron, and manganese-oxidizing bacteria in Lake Superior sediments of different organic carbon content // *J. Great Lakes Res.* 1989. V. 15. № 1. P. 123–132.
21. Дубинина Г.А. Биология железобактерий и их роль в образовании железомарганцевых руд. Автореферат ... докт. биол. наук // Москва. Ин-т микробиологии АН СССР. 1977. 44 с.
22. Лазуренко В.И. Геологическая деятельность железобактерий. Киев, Наукова думка, 1989. 98 с.

Сдано в набор 16.06.2011 г.	Подписано к печати 05.09.2011 г.	Формат бумаги 60 × 88 ¹ / ₈
Цифровая печать	Усл. печ. л. 14.0	Уч.-изд. л. 14.1
	Усл. кр.-отт. 2.6 тыс.	Бум. л. 7.0
	Тираж 144 экз.	Зак. 1814

Учредители: Российская академия наук,
Институт геохимии им. В.И. Вернадского РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6