

СТРАТИГРАФИЯ

УДК 546.28+551.352.48+552.5

СОВРЕМЕННЫЕ СКОРОСТИ НАКОПЛЕНИЯ БИОГЕННОГО КРЕМНЕЗЕМА
В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БАЙКАЛ: РОЛЬ ВИДОВОГО СОСТАВА
ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

О.В. Левина, Е.Б. Карabanov

Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

Рассматриваются особенности распределения биогенного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{биог}}$) в поверхностных осадках оз. Байкал (0—0.2 и 0—0.5 см) и массовые скорости его аккумуляции (МСА) в современных условиях, а также оцениваются процессы, ответственные за это распределение. Для решения этой задачи было определено содержание $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в пробах 87 станций, равномерно расположенных по акватории озера. На основании полученных данных рассчитаны массовые скорости аккумуляции биогенного кремнезема. Построены карты распределения $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ и МСА, которые показали, что оно неоднородно и сильно различается в зависимости от района. Самые высокие значения МСА отмечаются в Северном Байкале, в Среднем и Южном их значения заметно ниже. Самые низкие значения зафиксированы на Селенгинском мелководье. Картина распределения МСА по котловинам озера во многом соответствует распределению в поверхностных осадках створок эндемичного байкальского вида диатомовых водорослей *Aulacoseira baicalensis*. Среди современных видов диатомовых он отличается наиболее массивными и тяжелыми створками, в наименьшей степени подверженными растворению при опускании на дно. Это дает возможность говорить об основном вкладе данного вида в процесс накопления биогенного кремнезема в современных донных отложениях озера, тогда как вклад тонкопанцирных видов незначителен вследствие их малого веса и частичного или полного растворения в водной толще во время осаднения. Разбавление же терригенным материалом играет менее важную роль в процессе аккумуляции $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в современных осадках оз. Байкал.

Биогенный кремнезем, массовые скорости аккумуляции, диатомовый планктон, видовой состав, продукция, оз. Байкал.

MODERN ACCUMULATION RATES OF BIOGENIC SILICA IN BAIKAL BOTTOM SEDIMENTS:
SIGNIFICANCE OF DIATOM SPECIES COMPOSITION

O.V. Levina and E.B. Karabanov

The modern distribution of biogenic silica ($\text{SiO}_{2\text{биог}}$) in Baikal surface (0–0.2 and 0–0.5 cm) sediments, mass accumulation rates (MAR), and the processes responsible for this distribution were studied. The contents of $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ were determined in samples from 87 stations evenly distributed throughout the lake water area. These data were used to calculate the MAR of $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ and compile $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ and MAR distribution maps. The maps showed that the MAR varies significantly throughout the study area. Its highest values have been established in North Baikal. In Central and South Baikal MAR values are much lower, and the minimum values are observed in the Selenga shoal. This MAR distribution pattern is consistent with the distribution of valves of *Aulacoseira baicalensis* endemic diatoms throughout the surface sediments. Compared with other modern diatom species, this one has the most massive and heaviest valves, which undergo the least dissolution when settling. This suggests that the above species plays a leading role in the accumulation of biogenic silica in modern Baikal bottom sediments, whereas the role of fine-frustule species is minor because of their small mass and partial or complete dissolution in water on settling. Dilution of the sediments with terrigenous material is less significant for the $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ accumulation.

Biogenic silica, mass accumulation rates, diatom plankton, species composition, production, Lake Baikal

ВВЕДЕНИЕ

Основным поставщиком биогенного кремнезема в донные отложения оз. Байкал являются диатомовые водоросли [Вотинцев, 1955, 1961, 1967; Вотинцев и др., 1975; Выхристюк, 1979, 1980], поэтому предполагалось, что величины продукции диатомовых и концентраций опала в них взаимосвязаны. Иными словами, содержание $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в донных отложениях озера отражает изменение значений продукции диатомового планктона. Это дает возможность использовать значения концентраций опала в

осадках Байкала в качестве индикатора изменений продуктивности озера в другие геологические эпохи [Безрукова и др., 1991; Гранина и др., 1993; Qiu et al., 1993; Colman et al., 1995]. Поскольку изменение продуктивности есть следствие изменений природной среды и климата, очевидно, что биогенный кремнезем является одним из важных индикаторов, которые в настоящее время активно используются для расшифровки палеоклиматических летописей, полученных из байкальских осадков [Colman et al., 1995; Грачев и др., 1997; Williams et al., 1997; Grachev et al., 1998; Коллектив... "Байкал-бурение", 1998, 2000; Karabanov et al., 2000a, 2000b, 2001, 2004; Вильямс и др., 2001; Khursevich et al., 2001; Prokopenko et al., 2001; BDP-99 Baikal..., 2005]. Также известно, что концентрации какого-либо вещества в осадках не всегда отражают его реальное поступление и накопление в них за счет возможного разбавления терригенным материалом. Точнее и правильнее использовать значения абсолютных масс [Страхов, 1947; Лисицин, 1991] или потоков (массовых скоростей аккумуляции) [Rea et al., 1993; Maeda et al., 2002]. МСА какого-либо компонента в осадках являются пространственно-временной характеристикой, позволяющей количественно оценить интенсивность процесса аккумуляции, абстрагируясь от эффекта разбавления. В связи с этим, чтобы получить истинную картину накопления $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в современных осадках Байкала, нам представляется важным рассчитать потоки или массовые скорости аккумуляции биогенного кремнезема в трех котловинах озера, которые имеют разные морфологические характеристики и разную продуктивность диатомового планктона, а также понять — действительно ли концентрации опала в донных отложениях зависят от продуктивности диатомовых.

Вопрос о том, что правильнее было бы использовать массовые скорости аккумуляции опала, а не его концентрации [Гранина и др., 1993; Karabanov et al., 1997], поднимался и ранее. Однако отсутствие или ограниченное количество данных по скоростям седиментации и сухому объемному весу осадка не позволяло перейти к расчетам МСА для всего Байкала. В настоящее время накоплены и опубликованы обширные данные по изотопному датированию осадков озера [Купцов, Богданов, 1991; Edgington et al., 1991; Colman et al., 1996; Maskay et al., 1998; Nakamura et al., 2003] и появились новые данные по сухому объемному весу донных отложений [Colman, 1994]. Благодаря этому можно более детально оценить аккумуляцию $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в современных осадках практически всех частей озера и по-новому взглянуть на связь концентраций и потоков опала с морфологическими характеристиками котловин Байкала, условиями осадконакопления, продуктивностью и видовым составом диатомовых.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы пробы поверхностных осадков (0—0.2 и 0—0.5 см от поверхности) 87 станций, отобранные летом 1993 г. в южной, средней и северной котловинах оз. Байкал, в авандельте Селенги, а также на подводных поднятиях: Академический хребет и Бугульдейская перемычка (рис. 1). Отбор проб осуществлялся с помощью специального пробоотборника [Лихошвай и др., 2005], который позволяет получить поверхностный слой осадков практически в ненарушенном виде. Определение содержания $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в осадках проводилось с использованием стандартного метода [Mortlock, Froelich, 1989] (см. детальнее в работе [Грачев и др., 1997]). Массовые скорости аккумуляции были рассчитаны по стандартной формуле [Maeda et al., 2002]: $\text{MAR} = 1000 \cdot [C/100] \cdot \text{DBD} \cdot \text{LSR}$, где MAR — массовая скорость аккумуляции (г/см^2 в тыс. лет), C — концентрация биогенного кремнезема (%), DBD — сухой объемный вес осадка (г/см^3), LSR — линейная скорость осадконакопления (см/тыс. лет). Для расчета скоростей седиментации были использованы датировки по ^{210}Pb [Купцов, Богданов, 1991; Edgington et al., 1991; Maskay et al., 1998], а для расчета DBD — данные по плотности поверхностного слоя осадков [Colman et al., 1994; А.В. Маккей (неопубликованные данные)]. Для визуализации полученных результатов были построены карты распределения концентраций опала и его потоков на дно озера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами данные по распределению $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в поверхностных осадках оз. Байкал во многом соответствуют опубликованным ранее [Выхристюк, 1979; Гранина и др., 1993; Вильямс и др., 1993]. Самые высокие концентрации биогенного кремнезема (32—49 %) отмечены в Северном Байкале (рис. 2, А), в районе Академического хребта они несколько ниже (32—36 %), в Среднем Байкале еще ниже (10—26 %) и самые низкие (1.2—7.3 %) в районе Селенгинского мелководья (см. рис. 2, А). Распределение биогенного кремнезема в Южном Байкале неоднородно. Если ближе к дельте Селенги и к восточному берегу концентрации очень низкие (порядка 4—7 %), то на юге котловины и у западного берега они возрастают до 14—32 % (см. таблицу, рис. 2, А).

Однако, как было отмечено ранее [Выхристюк, 1979; Гранина и др., 1993], подобное распределение опала не соответствует данным по численности и биомассе диатомового планктона для разных котловин озера. Согласно Г.И. Поповской [1975, 1977], наибольшая численность и биомасса диатомовых отмечается в южной котловине и на Селенгинском мелководье, где нами пролучены самые низкие концентрации биогенного кремнезема (см. таблицу, рис. 2, А). Это противоречие объяснялось различным уровнем

Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Байкал с положением станций отбора поверхностных проб донных отложений.

Координаты 82 станций см. [Лихошвай и др., 2005]. Нами были добавлены следующие станции: 72 (54°55'34" с.ш. и 109°26'35" в.д.), 100 (53°16'44" с.ш. и 107°19'59" в.д.), 102 (53°17'31" с.ш. и 107°56'86" в.д.), 106 (55°14'30" с.ш. и 109°28'30" в.д.)



питания терригенным материалом северной и южной котловин, а также значительным разбавлением биогенного кремнезема за счет привноса терригенной взвеси Селенгой и притоками восточного берега в южную котловину [Выхристюк, 1979; Гранина и др., 1993].

По нашим данным, распределение $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$ в южной и центральной котловинах в целом хорошо согласуется с особенностями поступления терригенного материала в озеро и возможным разбавлением биогенного кремнезема терригенной составляющей. Так, низкие значения концентраций характерны для районов, расположенных в зоне влияния крупных притоков (реки Селенга, Баргузин и др.), с водами которых поступает значительное количество твердого стока (см. рис. 2, Б). При удалении от прямых источников терригенного вещества, например, при приближении к западному борту или к центру средней котловины, эффект разбавления снижается и значения концентраций опада увеличиваются. В то же время для северной котловины это положение не выполняется. Здесь высокие концентрации $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$ характерны и для районов влияния таких крупных рек, как Верхняя Ангара и Кичера, а также мелких притоков, и для центральной и для южной частей этой котловины, включая район Академического хребта, где влияние стока рек минимально (см. рис. 2, Б).

Значения массовых скоростей, полученные нами (см. таблицу, рис. 2, Б), тоже показывают различную интенсивность аккумуляции опада в разных котловинах и районах озера, кроме того, характер их распределения несколько отличается от распределения $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$. Самые высокие значения массовых скоростей наблюдаются в северной котловине (4.4 мг/см² в год), особенно в центральной и северной ее частях. Ближе к берегам озера и в районе Академического хребта, а также в средней котловине величины МСА снижаются (1.2—3.1 мг/см² в год) (см. рис. 2, Б). Самые низкие значения МСА получены для Селенгинского мелководья — 0.5—1.2 мг/см² в год. В южной котловине величины скоростей аккумуляции имеют такой же сильный разброс, как и концентрации биогенного кремнезема. Их значения также низки

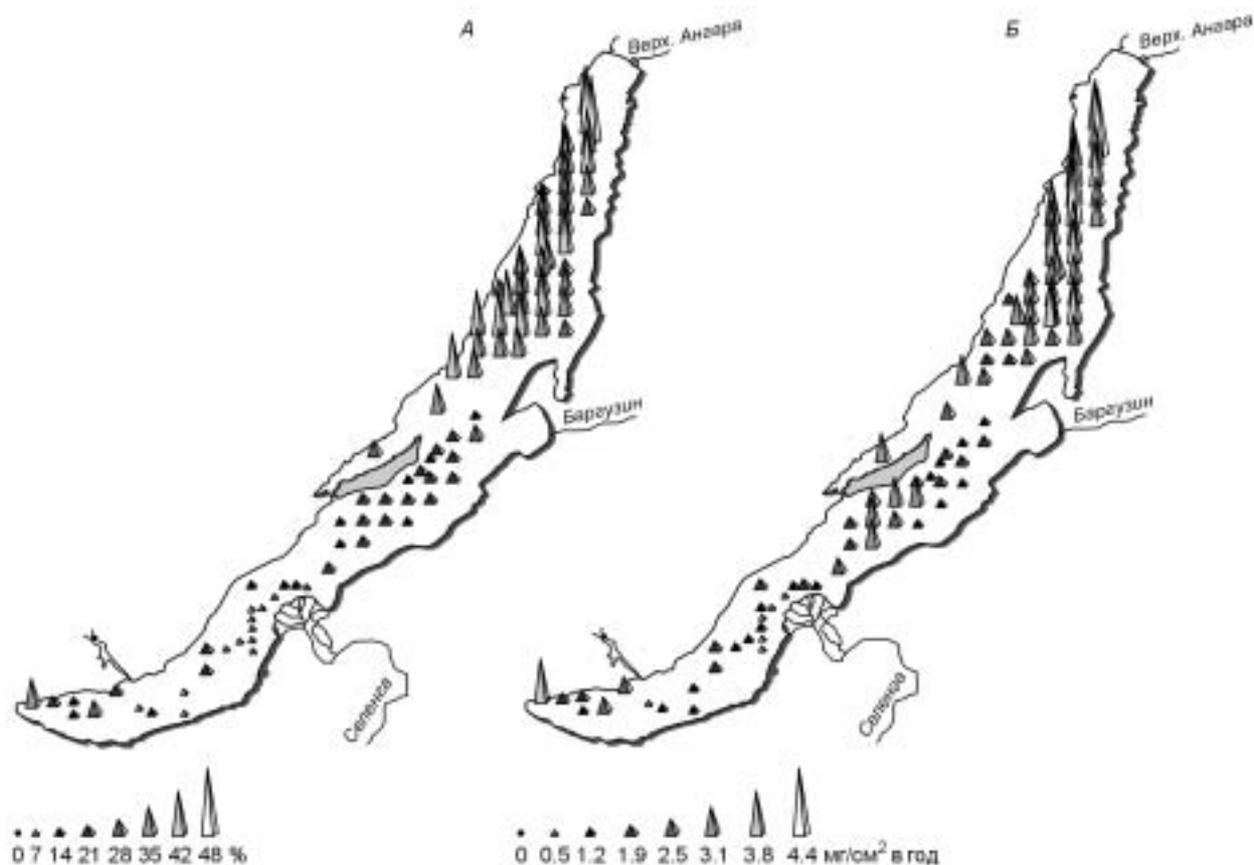


Рис. 2. Распределение в поверхностном слое донных отложений (0—0.5 см):

А — концентраций биогенного кремнезема (%), *Б* — массовых скоростей аккумуляции биогенного кремнезема ($\text{мг}/\text{см}^2$ в год).

в районе дельты Селенги и вдоль восточного берега ($0.5\text{—}1.2 \text{ мг}/\text{см}^2$ в год) и высоки вдоль западного ($1.9\text{—}3.8 \text{ мг}/\text{см}^2$ в год) (см. рис. 2, *Б*).

Наши результаты не согласуются с данными Л.З. Граниной и др. [1993], которые получили самые высокие значения массовых скоростей для южной котловины, а для средней и северной — более низкие. Однако такие выводы сделаны на основании всего лишь трех точек — по одной на котловину. Согласно нашим новым и более детальным данным, в северной котловине озера отмечаются как высокие концентрации, так и высокая скорость аккумуляции биогенного кремнезема, тогда как значения численности и биомассы диатомового планктона низки [Поповская, 1975, 1977]. В южной же котловине и на Селенгинском мелководье эти показатели самые низкие (см. таблицу, рис. 2, *А, Б*) несмотря на самые высокие значения численности и биомассы диатомовых [Поповская, 1975, 1977]. Другими словами, предполагаемый эффект разбавления $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$ терригенным веществом, влияющий на особенности его распределения, о котором писали Л.З. Гранина с соавторами [1993], не нашел подтверждения в наших данных. Противоречие, отмеченное выше, очень важно для понимания особенностей накопления биогенного кремнезема в современных условиях в озерных отложениях. Оно указывает на какой-то дополнительный фактор, оказавшийся неучтенным при предыдущих исследованиях и значение которого для этого процесса велико. Возможно, высокие концентрации и скорости аккумуляции опала в северной котловине обусловлены относительно малой ее глубиной (900 м, по сравнению с 1400 м в южной и 1600 м в средней котловинах) и, вследствие этого, снижением эффекта растворения створок диатомовых в процессе их осаждения. Однако факторы глубины и растворения также не могут быть решающими. Об этом свидетельствуют значения МСА на мелководных поднятиях Академический хребет и Бугульдейская перемычка, где при глубинах около 300 м они ниже, чем при больших глубинах (см. рис. 2, *Б*).

Полученная нами картина распределения МСА по котловинам Байкала (рис. 3, *А*) во многом соответствует распределению в поверхностных осадках суммарной массы панцирей диатомовых водорослей [Лихошвай и др., 2005] (см. рис. 3, *Б*), которой, в свою очередь, соответствует распределение створок байкальского эндемичного вида диатомовых водорослей *Aulacoseira baicalensis* (K. Meyer) Simonen [Stoer-

Массовые скорости аккумуляции биогенного кремнезема в донных отложениях разных районов Байкала и данные, необходимые для их оценки

Район	Глубина (м) ^{1,2}		Скорость седиментации по ²¹⁰ Pb (см/год) ^{4,6,7}			Биогенный кремнезем, %			МСА биогенного кремнезема, мг/см ² в год			Среднегодовая	
	сред.	макс.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.	величина первичной продукции (г C _{орг} /м ²) ^{1,3,5}	биомасса фитопланктона (мг/м ³) ^{1,3,5}
Южный Байкал	843	1446	0.045	0.078	0.062	3.3	32.5	17.9	0.5	3.18	2.2	131.15	1535.7
Бугульдейская перемычка	—	358	—	—	0.084	—	—	12	—	—	1.9	110	1314.3
Селенгинское мелководье	—	200	0.084	0.1	0.092	1.2	7.3	4.3	0.5	1.9	1.2	80	939.3
Средний Байкал	854	1637	0.035	0.108	0.072	9.9	21.7	15.8	1.2	3.1	2.2	130.87	877.7
Академический хребет	200	350	0.036	0.043	0.04	32	36.1	34.1	2.5	2.5	2.5	100	862.9
Северный Байкал	576	903	0.026	0.067	0.047	15.6	48.5	32.1	1.9	4.4	3.2	118.99	537.8

Примечание. 1 — [Байкал: Атлас, 1993]; 2 — [Байкал в цифрах (краткий справочник), 2001]; 3 — [Вотинцев и др., 1975]; 4 — [Купцов, Богданов, 1991]; 5 — [Поповская, 1971]; 6 — [Edgington et al., 1991]; 7 — [Mackay et al., 1998].

mer et al., 1995; Лихошвай и др., 2005] (см. рис. 3, В). Данный вид является одним из двух доминирующих и в современном диатомовом планктоне [Поповская, 1975, 1977], и в поверхностном слое донных отложений оз. Байкал не столько за счет численности, сколько за счет биомассы. Это обеспечивается главным образом его достаточно крупными размерами и значительным весом панцирей ($6.574 \cdot 10^{-9}$ г) [Лихошвай и др., 2005], который превышает вес панцирей диатомей других видов в среднем в 4—200 раз.

Вышесказанное позволяет предположить, что на концентрацию и массовую скорость аккумуляции биогенного кремнезема в поверхностных осадках Байкала, помимо уже известных факторов (глубина, рельеф дна, поступление терригенного материала, течения, выедание зоопланктоном, растворение в водной толще в процессе осаждения), влияет не столько продукция диатомового планктона в целом, сколько продукция определенных видов диатомовых [Stoermer et al., 1995; Лихошвай и др., 2005]. В данном случае определяющую роль играет крупнопанцирный вид *A. baicalensis*. Это заключение совпадает с выводом Е.В. Лихошвай [2004], сделанным на основании изучения диатомовых в современных байкальских донных отложениях.

По нашему мнению, на массовую скорость аккумуляции биогенного кремнезема в поверхностных осадках различных районов озера влияют три основные причины: продуктивность диатомового планктона и в первую очередь крупнопанцирной *A. baicalensis*; растворение панцирей во время осаждения на дно; глубина бассейна. Размеры панцирей также влияют на скорость их осаждения и степень растворения в водной толще. *A. baicalensis* имеет крупные и массивные панцири, а также строение в виде длинных крепких нитей, состоящих из 27 и более клеток [Поповская и др., 2002], скорость осаждения которых значительно выше, чем одиночных клеток. Именно поэтому у нее больше преимуществ достичь дна в нерастворенном виде по сравнению с тонкими, мелкими, легкими, одиночными панцирями водорослей других видов. Кроме того, для этого вида характерно опускание в глубинную зону озера на 200—500 м и более, где его можно обнаружить в значительном количестве [Поповская и др., 2002]. Все указанное выше уменьшает вероятность растворения и позволяет панцирям достичь дна в неразрушенном виде. По данным Г.И. Поповской [1971], большая часть створок диатомовых водорослей рода *Synedra*, имеющих тонкий панцирь, растворяется при осаждении и не захоранивается в осадках даже при глубине менее 100 м. То же можно сказать и о мелкопанцирных видах родов *Stephanodiscus*, *Nitzschia* и других [Flower et al., 1995; Mackay et al., 1995; Ryves et al., 2003].

Анализ карты МСА позволяет выделить районы озера с высокой и низкой скоростью аккумуляции опала. По нашим данным, процесс интенсивнее всего протекает в северной и центральной частях Северного Байкала (см. рис. 3, А). Это обеспечивается его относительно небольшой глубиной (500—900 м) и доминированием *A. baicalensis* в диатомовом сообществе [Поповская, 1975, 1977; Лихошвай и др., 2005]. На юге северной котловины значения массовых скоростей аккумуляции заметно понижаются (см. рис. 3, А), что, вероятно, обусловлено уменьшением продуктивности диатомового планктона, в частности *A. baicalensis*, в этой части озера (см. рис. 3, В) [Поповская, 1975, 1977; Лихошвай и др., 2005].

В средней и южной котловинах массовые скорости аккумуляции биогенного кремнезема значительно ниже, чем в северной (см. рис. 3, А). Это не может зависеть от разбавления SiO₂_{биог} терригенной частью

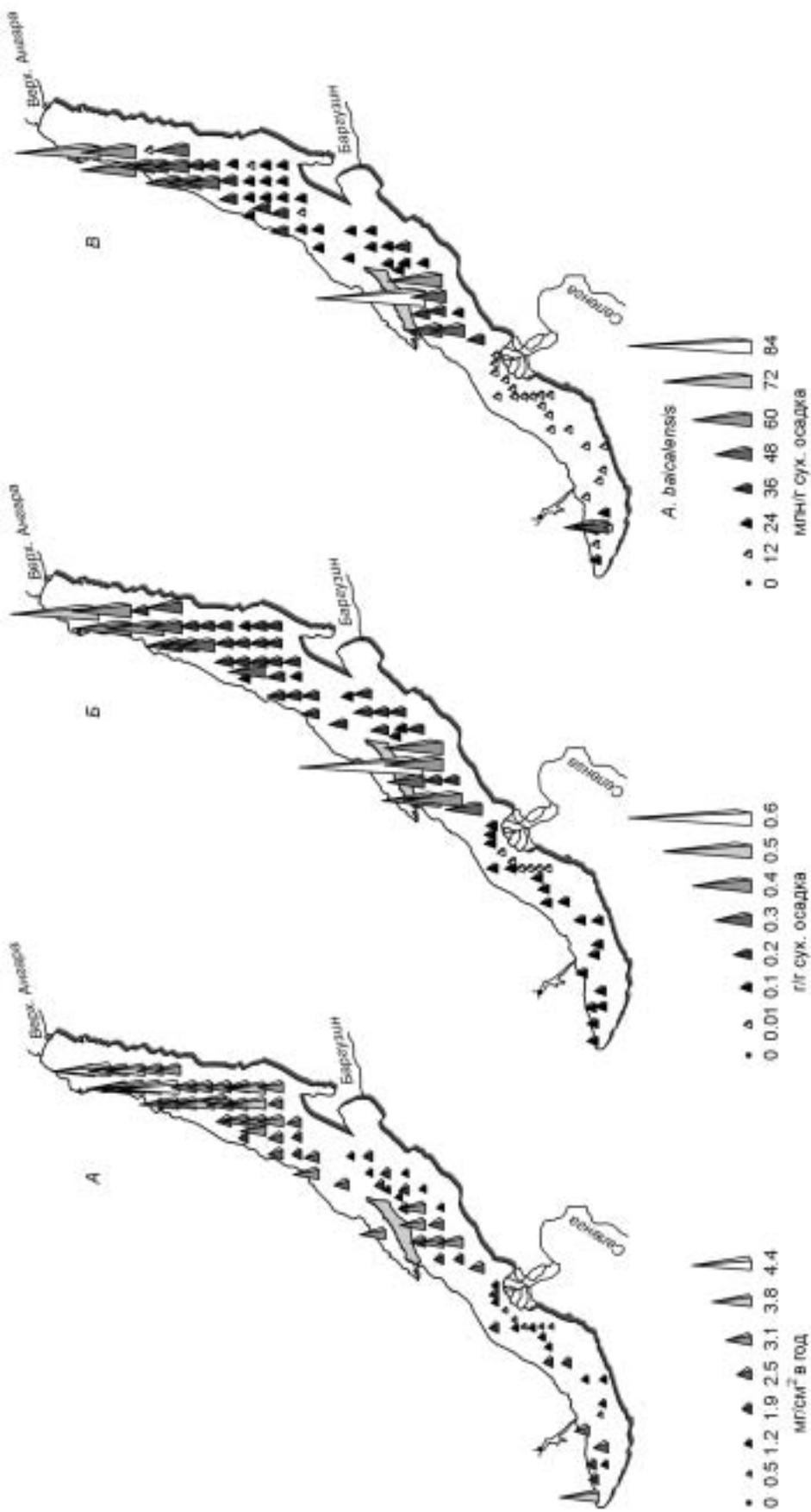


Рис. 3. Распределение в поверхностном слое донных отложений (0—0.5 см):

A — массовых скоростей аккумуляции биотеннема ($\text{мг}/\text{см}^2$ в год), *B* — суммарной массы панцирей диатомовых ($\text{г}/\text{г}$ сух. осадка) [Лихошвай и др., 2005], *B* — створок диатомовых водорослей *A. baicalensis* ($\text{млн}/\text{г}$ сух. осадка) [Лихошвай и др., 2005].

осадка за счет более интенсивного привноса речной взвеси Селенгой и другими крупными реками обеих котловин, поскольку в оценке скоростей аккумуляции уже учитывается эффект разбавления. Подобные низкие величины МСА, по-видимому, связаны как с более низкой продукцией опала за счет более низкой численности *A. baicalensis* (см. рис. 3, В), так и с большими глубинами (1400 и 1600 м) этих котловин и увеличением эффекта растворения тонкопанцирных водорослей во время их осаждения [Flower et al., 1995; Mackay et al., 1995; Ryves et al., 2003].

Особенно низки значения МСА в районе дельты Селенги, хотя, как уже отмечалось выше, здесь наблюдается высокая продуктивность и продукция диатомовых (см. таблицу) [Поповская, 1977; Байкал: Атлас, 1993]. По нашему мнению, это можно объяснить прежде всего тем, что в данном районе в диатомовом сообществе преобладают мелкопанцирные водоросли рода *Stephanodiscus* [Поповская, 1977; Лихошвай и др., 2005], которые при своих незначительных размерах отличаются исключительно малым весом ($0.031\text{—}0.069\cdot 10^{-9}$ г) [Лихошвай и др., 2005]. Таким образом, при очень высокой численности их биомасса мала, а способность растворяться велика. В то же время численность и биомасса крупнопанцирных *A. baicalensis* в этом районе незначительна. Отсюда и низкие величины концентрации и МСА в этом районе (см. рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Картина распределения биогенного кремнезема в осадках озера такова, что его концентрации в районе дельты Селенги (в южной и средней котловинах) колеблются от 7 до 21 %. В северной же котловине мы не наблюдаем такого сильного разброса, и эти значения достаточно велики (35—48 %) (см. рис. 2, А), хотя известно, что продуктивность северной котловины значительно ниже по сравнению с южной, средней и Селенгинским мелководьем (см. таблицу) [Поповская, 1971, 1975, 1977]. Подобное распределение опала и его несоответствие распределению продуктивности в озере ранее объяснялось разбавлением биогенного кремнезема, продуцируемого диатомовым планктоном в водной толще озера, терригенным веществом, сносимым с водосборного бассейна [Выхристюк, 1979, 1980; Гранина и др., 1993]. Поскольку поступление терригенного вещества в южную и среднюю котловины оценивалось как более значительное, считалось, что эффект разбавления в них проявляется сильнее и, следовательно, концентрации опала в их осадках ниже, несмотря на более высокую по сравнению с северной продуктивность южной котловины.

Расчеты показывают, что распределение концентраций и МСА приблизительно одинаковы: в Северном бассейне они велики, а на Селенгинском мелководье, в южном и среднем бассейнах малы (см. рис. 2). Это указывает на то, что эффект разбавления $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$ терригенным веществом не является ведущим процессом, влияющим на накопления опала в современных донных отложениях озера. Разбавление опала терригенным материалом, конечно, имеет место и особенно сильно данное обстоятельство проявляется в районе дельты Селенги, южной и средней котловинах, где уровень поступления осадков с водосборного бассейна значительно выше [Гранина и др., 1993], что, вероятно, и находит свое отражение в картине распределения $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$ по акватории озера (см. рис. 2, А).

Однако существуют и другие факторы, которые, по нашему мнению, ответственны за процесс аккумуляции биогенного кремнезема в донных отложениях Байкала. К ним, помимо продуктивности диатомового планктона, относятся особенности видового состава диатомовых и их биомасса, а также растворение панцирей во время опускания на дно. Последнее определяется как их размерами и весом, так и глубиной водоема. Крупные и тяжелые панцири растворяются в воде труднее, чем мелкие и тонкие. Крупные панцири также быстрее погружаются, что уменьшает время их пребывания в воде и снижает эффект растворения. Исследования показывают, что сохранность крупнопанцирных видов в осадках озера лучше, чем тонкопанцирных [Mackay et al., 1995; Ryves et al., 2003]. Многие мелкие диатомовые полностью растворяются и не захораниваются в осадках.

Сравнение распределения видового состава водорослей в озере [Поповская, 1977] и в донных отложениях [Лихошвай и др., 2005] показывает, что диатомовые вида *A. baicalensis* доминируют по биомассе в планктоне северной котловины и что их створки преобладают по численности и массе в осадках этой котловины [Поповская, 1977; Лихошвай и др., 2005]. Причем распределение створок *A. baicalensis*, суммарной массы панцирей всех диатомей и массовых скоростей аккумуляции биогенного кремнезема практически совпадают (см. рис. 3). Мы полагаем, что высокие значения биомассы и продуктивности диатомовых водорослей вида *A. baicalensis* во время вегетации в Северном Байкале являются определяющим фактором, влияющим на высокий уровень накопления опала в осадках этого бассейна. Так же как и более низкая продуктивность, а соответственно и более низкая биомасса диатомей этого вида в южной и средней котловинах оказывают влияние на снижение значений массовых скоростей аккумуляции $\text{SiO}_{2\text{биог.}}$ (см. рис. 3).

Подводя итог, следует отметить, что использование для палеоклиматических реконструкций содержания биогенного кремнезема, а не его МСА, вполне допустимо, поскольку картины их распределения в донных отложениях в целом очень схожи (см. рис. 2, А, В). В то же время необходимо помнить, что и

измеренные концентрации, и рассчитанные потоки $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ являются отражением не реальной продуктивности озера, а только продуктивности тех диатомовых, которые захоронились в осадках. Особенно это касается видов с крупными, массивными панцирями.

Авторы выражают благодарность д.б.н. Е.В. Лихошвай и академику РАН М.А. Грачеву за предоставленную возможность работать с пробами поверхностных осадков. Особо мы хотим поблагодарить доктора А. Маккея (Центр исследования изменений окружающей среды, Лондонский университетский колледж) за предоставление неопубликованных данных по датировкам и плотности осадков по нашим станциям, а также сотрудников Лимнологического института СО РАН В.Н. Сергееву и А.С. Перетолчина за помощь в построении карт.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 03-05-65127).

ЛИТЕРАТУРА

Безрукова Е.В., Богданов Ю.А., Вильямс Д.Ф., Гранина Л.З., Грачев М.А., Игнатова Н.В., Карabanов Е.Б., Купцов В.М., Курьлев А.В., Летунова П.П., Лихошвай Е.В., Черняева Г.П., Шимараева М.К., Якушин А.О. Глубокие изменения экосистемы Северного Байкала в голоцене // Докл. АН СССР, 1991, т. 321, № 5, с. 1032—1037.

Байкал: Атлас. М., Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993, 160 с.

Байкал в цифрах (краткий справочник). Иркутск, Байкальский музей ИНЦ СО РАН, 2001, 72 с.

Вильямс Д.Ф., Лин Чин, Карabanов Е.Б., Гвоздков А.Н. Геохимические индикаторы продуктивности и источники органического вещества в поверхностных осадках оз. Байкал // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (10—11), с. 136—148.

Вильямс Д.Ф., Карabanов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И., Хурсевич Г.К., Гвоздков А.Н., Безрукова Е.В., Солотчина Э.П. Комплексные исследования позднемиоцен-плейстоценовых донных отложений озера Байкал — основа палеоклиматических реконструкций и диатомовой биоистратиграфии // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 35—47.

Вотинцев К.К. Пути миграции кремния в озере Байкал // Тр. Всесоюзного гидробиол. общества, Т. 6. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 70—79.

Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал. М., Изд-во АН СССР, 1961, 311 с.

Вотинцев К.К. К вопросу о современном осадкообразовании в Байкале // Докл. АН СССР, 1967, т. 174, № 2, с. 78—86.

Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск, Наука, 1975, 190 с.

Выхристюк Л.А. Аморфный кремнезем в донных осадках Байкала // Литол. и полезн. ископаемые, 1979, № 1, с. 43—51.

Выхристюк Л.А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск, Наука, 1980, 80 с.

Гранина Л.З., Грачев М.А., Карabanов Е.Б., Купцов В.М., Шимараева М.К., Вильямс Д.Ф. Аккумуляция биогенного кремнезема в донных отложениях Байкала // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (10—11), с. 149—159.

Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Воробьева С.С., Хлыстов О.М., Безрукова Е.В., Вейнберг Е.В., Гольдберг Е.Л., Гранина Л.З., Корнакова Е.Г., Лазо Ф.И., Левина О.В., Летунова П.П., Отинов П.В., Пирог В.В., Федотов А.П., Яскевич С.А., Бобров В.А., Сухоруков Ф.В., Резчиков В.И., Федорин М.А., Золотарев К.В., Кравчинский В.А. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (5), с. 957—980.

Коллектив участников проекта „Байкал-бурение“. Непрерывная запись климатических изменений в отложениях озера Байкал за последние 5 миллионов лет // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (2), с. 139—156.

Коллектив участников проекта „Байкал-бурение“. Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового ядра глубокого бурения) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 3—32.

Купцов В.М., Богданов Ю.А. Изотопная геохронология поверхностного слоя донных отложений озера Байкал // Докл. АН СССР, 1991, т. 319, № 5, с. 1226—1229.

Лисицин А.П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М., Наука, 1991, 270 с.

Лихошвай Е.В. Эволюция диатомовых водорослей рода *Aulacoseira Thwaites* в озере Байкал: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 2004, 32 с.

Лихошвай Е.В., Помазкина Г.В., Костюковская А.О., Сергеева В.Н., Левина О.В. Распределение диатомовых водорослей в верхнем слое донных отложений озера Байкал // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (1), с. 34—49.

Поповская Г.И. Диатомовые водоросли в поверхностном слое грунта // Лимнология придельтовых пространств Байкала. Иркутск, Лимнол. ин-т АН СССР, 1971, с. 86—89. (Тр. Лимнол. ин-та АН СССР, т. 12, № 32).

Поповская Г.И. О фитопланктоне пелагиали Байкала // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, Наука, 1975, с. 16—27.

Поповская Г.И. Динамика фитопланктона пелагиали // Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость. Новосибирск, Наука, 1977, с. 5—39.

Поповская Г.И., Генкал С.И., Лихошвай Е.В. Диатомовые водоросли планктона озера Байкал: Атлас-определитель. Новосибирск, Наука, 2002, 168 с.

Страхов Н.М. К познанию закономерностей и механизма морской седиментации, Черное море // Изв. АН СССР, Сер. геология, 1947, № 2, с. 49—90.

BDP-99 Baikal Drilling Project Members. A new Quaternary record of regional tectonic, sedimentation and paleoclimate changes from drill core BDP-99 at Posolskaya Bank, Lake Baikal // *Quart. Inter.*, 2005, v. 136, p. 33—48.

Colman S.M., Carter S.J., Hatton J., Haskell B.J. Cores collected by the US Geological Survey in Lake Baikal, Siberia: visual descriptions, photographs, X-radiographs, bulk density and grain size // *US Geological Survey, Open-File Report 96-274*, 1994, 122 p.

Colman S.M., Peck E.B., 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.

Colman S.M., Jones G.A., Rubin M., King J.W., Peck J.A., Orem W.H. AMS radiocarbon analyses from Lake Baikal, Siberia: challenges of dating sediments from a large, oligotrophic lake // *Quart. Sci. Rev.*, 1996, v. 15, p. 669—684.

Edgington D.N., Van Klump J., Robbins J.A., Kusner Yu.S., Pampura V.D., Sandimirov I.V. Sedimentation rates, residence times and radionuclide inventories in Lake Baikal from ^{137}Cs and ^{210}Pb in sediment cores // *Nature*, 1991, v. 350, p. 601—604.

Flower R.J., Mackay A.W., Rose N.L., Boyle J.L., Dearing J.A., Appleby P.G., Kuzmina A.E., Granina L.Z. Sedimentary records of recent environmental change in Lake Baikal, Siberia // *The Holocene*, 1995, v. 5, № 3, p. 323—327.

Grachev M.A., Vorobyova S.S., Likhoshway Y.V., Goldberg E.L., Ziborova G.A., Levina O.V., Khlystov O.M. A high-resolution diatom record of the palaeoclimates of East Siberia for the last 2.5 My from lake Baikal // *Quart. Sci. Rev.*, 1998, v. 17, № 12, p. 1101—1106.

Karabanov E.B., Williams D.F., Prokopenko A.A., Peck J.A., King J.W., Kuzmin M.I., Kalmuchkov G.V., Gvozdkov A.N., Khursevich G.K. Rapid changes of climate in Central Asia during the last 450 kyr: the climatic signal from biogenic silica record of Lake Baikal sediments // *Abstracts of GSA annual meeting*. Salt Lake City, Utah, 1997.

Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Williams D.F., Khursevich G.K. A new record of Holocene climate change from bottom sediments of Lake Baikal // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 2000a, v. 156, p. 1211—224.

Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Williams D.F., Khursevich G.K. Evidence for mid-Eemian cooling in continental climatic record from Lake Baikal // *J. Paleolimnol.*, 2000b, v. 23, p. 365—371.

Karabanov E., Williams D., Kuzmin M., Sideleva V., Khursevich G., Prokopenko A., Solotchina E., Tkachenko L., Fedenya S., Kerber E., Gvozdkov A., Khlistov O., Bezrukova E., Letunova P., Krapivina S. Ecological collapse of Lake Baikal and Lake Hovsgol ecosystems during the Last Glacial and consequences for aquatic species diversity // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 2004, v. 209, p. 227—243.

Khursevich G.K., Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Williams D.E., Kuzmin M.I., Fedenya S.A. Biostratigraphic significance of new fossil species of the diatom genera *Stephanodiscus* and *Cyclotella* from Upper Cenozoic deposits of Lake Baikal, Siberia // *Micropaleontology*, 2001, v. 47, p. 47—71.

Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J., Granin N.G., Jewson D.H., Ryves D.B., Sturm M. The deposition and accumulation of endemic planktonic diatoms in the sediments of Lake Baikal and an evaluation of their potential role in climate reconstruction during the Holocene // *Final Report to NERC-GEOPASS № 59*. ECRC, University College, London, 1995, p. 1—9.

Mackay A.W., Flower R.J., Kuzmina A.E., Granina L.Z., Rose N.L., Appleby P.G., Boyle J.F., Battarbee R.W. Diatom succession trends in recent sediments from Lake Baikal and their relation to atmospheric pollution and to climate change // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1998, v. 353, p. 1011—1055.

Maeda L., Kawahata H., Nohara M. Fluctuation of biogenic and abiogenic sedimentation on the Shatsky rise in the western North Pacific during the late Quaternary // *Marine Geology*, 2002, v. 189, p. 197—214.

Mortlock R.A., Froelich Ph.N. A simple method for rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // *Deep-Sea Res.*, 1989, v. 36, № 9, p. 1415—1426.

Nakamura T., Oda T., Tanaka A., Horiuchi K. High-resolution AMS ¹⁴C dating of sediment samples from Lake Baikal and Lake Khubsugul // *Chikyū Monthly*, 2003, № 42, p. 20—31.

Prokopenko A.A., Karabanov E.B., Williams D.F., Kuzmin M.I., Shackleton N.J., Crowhurst S.J., Peck J.A., Gvozdkov A.N., King J.W. Biogenic silica record of the Lake Baikal response to the climatic forcing during the Brunhes // *Quart. Res.*, 2001, v. 55, p. 123—132.

Qiu L., Williams D.F., Gvozdkov A., Karabanov E., Shimaraeva M. Biogenic silica accumulation and paleoproductivity in the northern basin of lake Baikal during the Holocene // *Geology*, 1993, v. 21, p. 25—28.

Rea D.K., Basov I.A., Janecek T. North Pacific Transect, science operator report, Leg 145 // *JOIDES Journal*, 1993, p. 21—28.

Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M., Battarbee R.W., Flower R.J., Mackay A.W., Granin N.G. Quantitative and qualitative relationships between planktonic diatom communities and diatom assemblages in sedimenting material and surface sediments in Lake Baikal, Siberia // *Limnol. Oceanogr.*, 2003, v. 48, № 4, p. 1643—1661.

Stoermer E.F., Edlund M.B., Pilskalns C.H., Schelske C.L. Siliceous microfossil distribution in the surficial sediments of Lake Baikal // *J. Paleolimnol.*, 1995, v. 14, p. 69—82.

Williams D.F., Peck J., Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Kravchinsky V., King J., Kuzmin M.I. Lake Baikal record of continental climate response to orbital insolation during the past 5 million years // *Science*, 1997, v. 278, p. 1114—1117.

*Рекомендована к печати 7 ноября 2006 г.
М.И. Кузьминым*

*Поступила в редакцию 8 февраля 2006 г.,
после доработки — 6 октября 2006 г.*