

ГИДРОГЕОХИМИЯ

УДК 556.114.6(282.256.341/.5)

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД
ОЗЕРА БАЙКАЛ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ РЕКИ СЕЛЕНГА

Е.П. Чебыкин, Е.Л. Гольдберг*, Н.С. Куликова

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

** Институт археологии и этнографии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17, Россия*

Методом ИСП-МС исследован элементный состав взвешенного вещества поверхностных вод оз. Байкал вдоль трансекты, проходящей через зону влияния р. Селенга. Количество терригенной взвеси в воде оценивалось по Al, содержание которого вдоль трансекты уменьшается скачкообразно: на участке 6.5—8.3 км от берега — на порядок, на участке 11—14 км — еще в 20 раз, и далее, в пелагической зоне, уже почти не меняется. Последний участок маркирует границу зоны распространения взвеси Селенги в поверхностной воде озера в исследуемый период (конец июня 2001 г.).

Установлено, что пелагическая озерная взвесь обогащена рядом элементов (Ca, P, Zn, Cu, Ni, Sn, Mo, Bi, S, Cd) более чем в 20 раз по сравнению с прибрежной (6.5 км от берега), находящейся в зоне влияния Селенги. Выявлено, что обогащение элементами происходит главным образом за счет вклада мелкодисперсной взвеси (<1.2 мкм), которая исходно, в составе взвеси Селенги значительно обогащена по сравнению с более крупными фракциями такими элементами, как Ca, P, Zn, Cu, Ni, Sn, Mo, Sb, Cd.

Сравнение элементного состава мелкодисперсных взвесей показывает, что байкальская взвесь как в зоне влияния Селенги, так и в пелагической части озера значительно обогащена (в 2—35 раз) большинством элементов, исключая типично терригенные, по сравнению со взвесью реки. Это указывает на то, что обогащение элементами происходит в самом озере, вероятно, за счет биоаккумуляции и хемосорбции. На данные процессы могут влиять дополнительные факторы, поскольку озерная мелкодисперсная взвесь в зоне влияния Селенги по своему элементному составу заметно отличается от взвеси в пелагической части озера.

Взвешенное вещество, ИСП-МС, озеро Байкал.

ELEMENTAL COMPOSITION OF SUSPENDED PARTICLES FROM THE SURFACE WATERS
OF LAKE BAIKAL IN THE ZONE AFFECTED BY THE SELENGA RIVER

E.P. Chebykin, E.L. Goldberg, and N.S. Kulikova

The elemental composition of suspended particles in surface waters of Lake Baikal has been studied by ICP MS along a transect of the zone affected by the Selenga River. The amount of terrigenous suspension in water was estimated from Al content, which decreases in a saltatory manner along the transect: 6.5–8.3 km offshore it decreases by an order of magnitude; 11–14 km offshore, by other 20 times; in the pelagic zone it remains almost unchanged. During the study period (late June 2001), the distribution limit of suspension from the Selenga River in the lake's surface waters lays 11–14 km offshore.

It has been found that pelagic suspension is more than 20 times richer in Ca, P, Zn, Cu, Ni, Sn, Mo, Bi, S, and Cd than littoral one (6.5 km offshore) in the zone affected by the Selenga River. This is mainly due to fine suspension (<1.2 μm), which was considerably richer in Ca, P, Zn, Cu, Ni, Sn, Mo, Sb, and Cd than coarser ones in the river.

Fine suspension in Lake Baikal, both in the zone affected by the river and in the pelagic zone, is considerably (2–35 times) richer in most elements, except for typical terrigenous ones, than river one. This suggests that element enrichment takes place in the lake, probably owing to bioaccumulation and chemisorption. These processes may be affected by additional factors, because fine suspension from the zone affected by the river differs significantly from pelagic one in elemental composition.

Suspended matter, ICP MS, Lake Baikal

ВВЕДЕНИЕ

Изучение элементного состава взвешенного вещества в оз. Байкал важно для понимания механизмов формирования байкальских вод, донных отложений, биогеохимических процессов, протекающих в озере и его водосборном бассейне. Определение «фоновых» содержаний взвешенных форм элементов и изучение их пространственно-временного распределения необходимо для оценки антропогенной нагрузки на озеро при проведении мониторинговых исследований. Расширение круга исследуемых элементов и выявление особенностей элементного состава взвесей важны для решения вопроса об источниках поступления, установления механизмов трансформации и балансовых оценок твердого стока в озеро. Все эти задачи имеют также отношение к проблеме реконструкции климата и окружающей среды в прошлом. Несмотря на ряд работ, появившихся с середины 1990-х годов [Кашик и др., 1993, 1994; Granina et al., 1995; Jambers, Grieken, 1997; Potyomkina et al., 1998; Гранина и др., 1998; Granina et al., 2000; Bobrov et al., 2001; Ломоносов и др., 2001], эти вопросы остаются слабо изученными. В первую очередь это связано с крайне низким содержанием взвеси в байкальской воде (часто существенно ниже 1 мг/л в пелагических областях [Granina et al., 1995; Potyomkina et al., 1998]), что значительно затрудняет получение материала для измерений и осложняет определение элементного состава исследуемого вещества в крайне малых (а часто исчезающе малых) навесках инструментальными методами анализа, такими как РФА СИ, нейтронно-активационный анализ и атомная спектроскопия, которые традиционно используются в подобных исследованиях. Кроме того, прямым взвешиванием фильтраата определяются суммарный вес биогенных и кластогенных частиц, при этом доля последних чаще всего остается неопределенной. Эпизодический отбор проб, скудность пространственно-временного опробования в совокупности с аналитическими погрешностями методов анализа зачастую не позволяют провести надежное сравнение результатов, полученных разными авторами, и составить цельное представление о процессах поступления и последующей трансформации взвешенных элементов в озере.

В данной работе мы попытались расширить круг определяемых элементов и восполнить отчасти слабую изученность элементного состава байкальской взвеси с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). В этой работе мы представляем результаты изучения относительного элементного состава взвешенных частиц в поверхностных водах оз. Байкал в зоне влияния наиболее крупного его притока — р. Селенга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб. Поверхностную воду из оз. Байкал отбирали в 100-литровые непрозрачные полипропиленовые бочки с борта НИС «Верещагин» в период с 18 по 22 июня 2001 г. Пробы отбирали в направлении от Харауза — главной протоки дельты Селенги к пелагиали озера (табл. 1 и рис. 1).

Пробу воды из Селенги (200 л) отобрали 30 августа 2001 г. с парома в районе с. Татаурово (рис. 1).

Пробоподготовка. Образцы воды объемом 5 л отбирали из 100-литровых бочек (после тщательного перемешивания) и фильтровали с помощью вакуумной системы ПВФ-47 (ЗАО «МЕМБРАНЫ», г. Владимир, рабочий объем воронки 0.5 л, нержавеющая сталь) через мембранные фильтры из нитрата целлюлозы (Sartorius, Германия). Пробы, взятые из Селенги и на ст. 2, последовательно фильтровали через фильтры с диаметром пор 1.2 мкм и после этого через двойной фильтр 0.45 и 0.2 мкм. Пробы, взятые на других станциях, фильтровали только через двойной фильтр 0.45 и 0.2 мкм. Фильтры с собранной взвесью помещали в полипропиленовые пробирки с закручивающейся крышкой (объем 15 мл), добавляли 1 мл HNO_3 (70 %, ОСЧ) и 0.6 мл HF (45 %, ОСЧ), оставляли на ночь, затем пятикратно обрабатывали микроволновым излучением в бытовой СВ-печи DAEWOO KOC-1B4KA (выходная мощность микроволн 700 Вт) с промежуточным охлаждением до комнатной температуры. Дозу излучения и длительность СВ-обработки подбирали так, чтобы не было перегрева содержи-

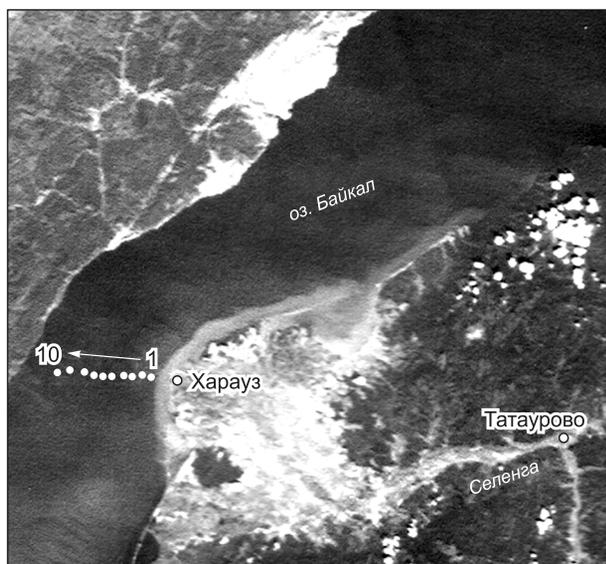


Рис. 1. Схема отбора проб на трансекте Харауз—Байкал и в р. Селенга.

Космический снимок сделан 13.08.2001 г. КА EOS AM-1 (Terra), MODIS.

мого пробирок выше 100 °С. Последнюю итерацию проводили с добавлением 2 мл H₂O₂ (30 %). Растворы переносили в стеклоуглеродные тигли (СУ-2000, 40 мл, УЭХК), выпаривали досуха, затем дважды выпаривали с добавлением 1 мл HNO₃ (70 %, ОСЧ). Остаток растворяли в 15 мл 3%-й HNO₃, вносили внутренний стандарт индия (In = 10 мг/т). Аналогично готовили холостые пробы — чистые фильтры, предварительно вымоченные в дистиллированной воде.

Многоэлементный ИСП-МС анализ. Многоэлементный анализ подготовленных растворов проводили в Центре коллективного пользования «Ультрамикроданализ» (Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск) методом ИСП-МС на квадрупольном спектрометре VG PlasmaQuad 2, используя полуколичественный способ определения [Laborda et al., 2001]. В этом случае относительная погрешность определения составляет не более ±30 % для металлов (для неметаллов может достигать ±50 %). Повторяемость результатов анализа не хуже 10 % (относительное стандартное отклонение), что позволяет надежно проводить сравнительный анализ образцов в серии. Пределы обнаружения и интерференции, связанные с количеством собранного материала, условиями пробоподготовки и измерения позволяют надежно определить следующие элементы: Al, Fe, Ca, Mg, Mn, Ti, P, Pb, Ba, Zn, S, Sr, Cu, REE (лантаниды), Li, Ni, Rb, Zr, U, Sn, Mo, Y, Co, Ga, Th, W, Nb, Sb, Cs, Cd, Be, Hf, Bi, Ta, Ag, Tl, Pt.

Местоположение станций по отбору проб из оз. Байкал

№ станции	Расстояние от берега, км	Глубина воды, м	Е	Н
1	6.5	30	52°16'40"	106°09'02"
2	8.3	41	52°17'00"	106°07'13"
3	9.2	50	52°17'04"	106°05'36"
4	11.2	99.7	52°17'12"	106°04'42"
5	14.2	200	52°17'20"	106°02'13"
6	15.5	300	52°17'26"	106°01'00"
7	16.7	400	52°17'40"	106°00'03"
8	17.7	503	52°18'49"	105°59'04"
9	22.3	854	52°18'00"	105°55'02"
10	22.8	900	52°18'04"	105°55'00"

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Содержание взвешенного алюминия в поверхностной воде. Определение содержания суммарной взвеси в байкальской воде представляется весьма сложной задачей вследствие ее крайне низкой концентрации, особенно в пелагических областях. Даже при содержаниях терригенной взвеси ~1 мг/л для получения 50 мг взвеси (для надежного взвешивания) на фильтре необходимо было бы профильтровать ~50 л воды, что технически почти невозможно выполнить при фильтрации через двойной фильтр 0.45 и 0.2 мкм. В наших экспериментах после фильтрации 5 л воды вес взвеси на фильтрах был явно недостаточен для определения ее содержания в водах весовым методом. Только в единственном случае при фильтрации наиболее мутной воды Селенги (Татаурово) через крупный фильтр (1.2 мкм) удалось определить содержание взвеси весовым методом ~35 мг/л, что соответствует данным работы [Ломоносов и др., 2001]. Тем не менее оценку содержания терригенной взвеси в воде сделать можно исходя из объема воды, пропущенной через фильтр, и замера абсолютного количества терригенных элементов, задержанных на фильтре. Для оценки содержания терригенной составляющей взвесей в нашем случае удобно воспользоваться алюминием. Алюминий — один из основных породообразующих элементов кластогенных частиц, химический состав которых практически не изменяется в водах Байкала (при pH ~ 7.3—7.5), по крайней мере, за время порядка нескольких недель. Поскольку содержание алюминия в различных размерных фракциях взвеси Селенги (за исключением тяжелой крупной 250—50 мкм) практически постоянно (7.8—10 %) [Ломоносов и др., 2001], профиль содержания взвешенного Al отражает профиль содержания взвеси в воде. Результаты измерений содержания взвешенного Al в мелкодисперсных взвесах в водах озера показаны на рис. 2, а. Видно, что содержание взвешенного Al в поверхностной воде, как и ожидалось, уменьшается в направлении от дельты Селенги к пелагиали озера. Самое высокое содержание Al в мелкодисперсной фракции на первой станции (~550 мкг/л), затем оно резко падает (на порядок) в направлении второй станции (60 мкг/л). Это скачкообразное уменьшение наблюдается на коротком участке (1.8 км) с небольшим перепадом глубин (10 м, см. таблицу) и свидетельствует о том, что здесь выпадает основная часть кластогенного материала. На ст. 4 наблюдается небольшое увеличение содержания Al (74 мкг/л), вероятно, вследствие выхода подтопленных вод на поверхность. На участке ст. 4, 5 содержание Al вновь резко падает (~ в 20 раз) и далее (ст. 5—10) слабо меняется, составляя в среднем 4 мкг/л. При содержании Al во взвеси ~ (7.8—10 %) [Ломоносов и др., 2001] это соответствует содержанию мелкодисперсной терригенной взвеси в пелагических водах озера ~50 мкг/л. Таким образом, в исследуемый период селенгинская взвесь в поверхностной воде Байкала распространяется на расстояние до 14 км от берега по профилю трансекты. Далее будем условно называть взвесь на ст. 5—10 «пелагическая», а взвесь на ст. 1 (ближайшая к берегу) «прибрежная».

2. Относительный элементный состав взвеси. Как уже было указано выше, прямое взвешивание остатка взвеси на фильтре невозможно, поэтому мы определяли относительный элементный состав

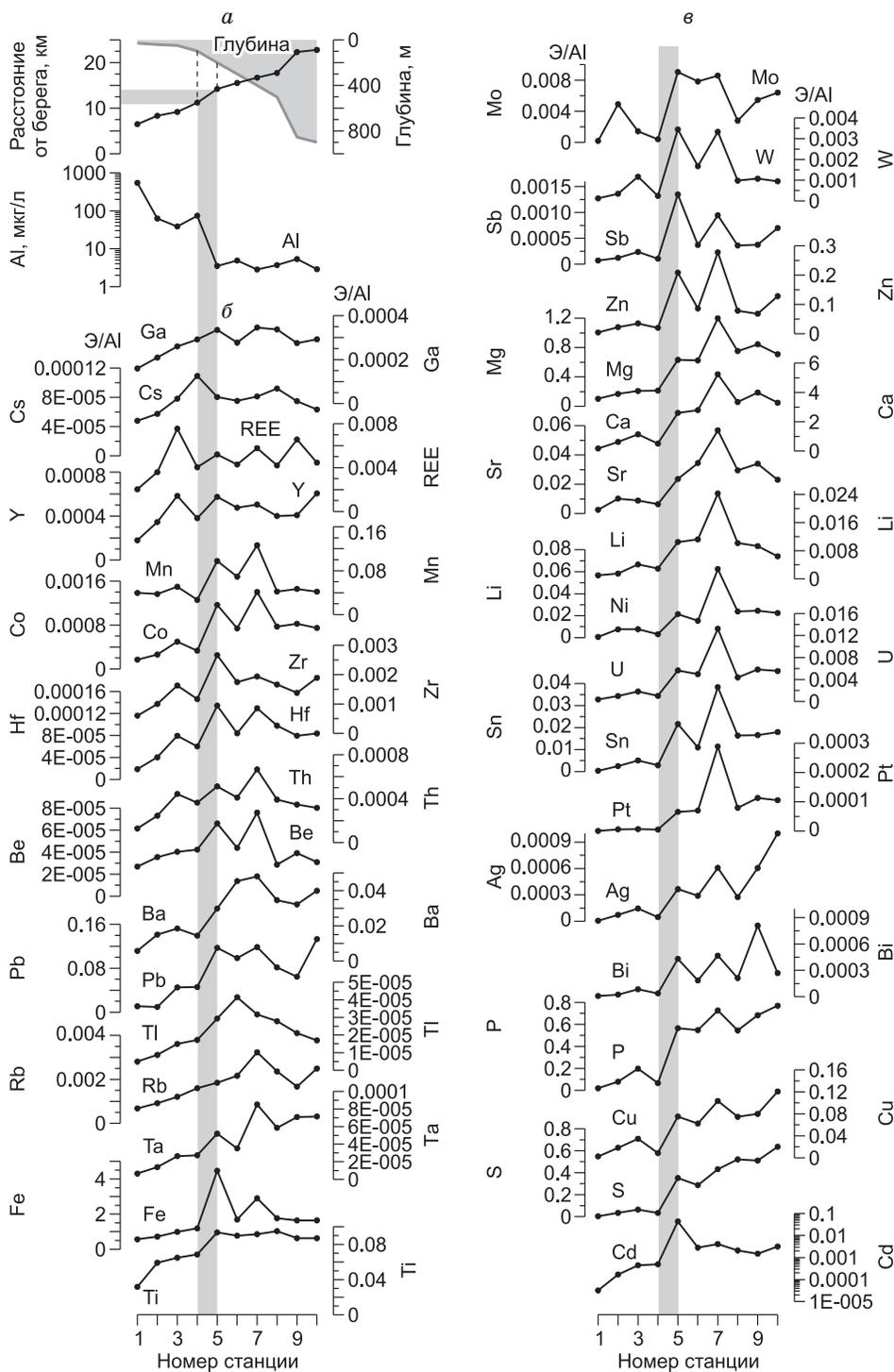


Рис. 2. Элементный состав взвеси в поверхностной воде на трансекте Харауз—Байкал.

a — батиметрия и содержание взвешенного алюминия в воде; *b* и *c* — Al «модули» элементов взвеси. Серым прямоугольником обозначена граница распространения селенгинской взвеси (ст. 4, 5).

взвеси, нормируя содержание элемента в образце на содержание в нем алюминия (отношение содержания элемента/Al во взвеси). Далее для обозначения этого отношения мы используем термин Al «модуль». Al «модули» представлены на рис. 2, *b* и *c*. Отчетливо видно, что по мере удаления от берега терригенная взвесь обогащается всеми элементами в той или иной степени. В меньшей степени это характерно для Ga, Cs, REE (сумма редкоземельных элементов), Mn, Co, Zr, Hf, Th, Be, Ba, Pb, Tl, Rb, Ta, Fe, Ti (см.

рис. 2, б). Большинство из этих элементов типично терригенные, т.е. входят в состав практически нерастворимых в пресной природной воде кластогенных частиц и мигрирующих в составе этих частиц [Перельман, 1968]. Остальными элементами (см. рис. 2, в) пелагическая взвесь (ст. 5—10) обогащена в большей степени: в среднем более чем в 4 раза по сравнению со взвесью в зоне влияния Селенги (ст. 1—4). Соотношение Al «модулей» пелагической и прибрежной (ст. 1) взвесей представлено на рис. 3. По величине отношений Al «модулей» (пелагическая/прибрежная) элементы можно условно разделить на 4 группы.

В *группу 1* мы включили элементы, которыми пелагическая взвесь обогащена относительно слабо (в 1—6 раз), — Al, Fe, Ti, Mn, REE, Rb, Zr, Y, Co, Ga, Th, Cs, Be, Hf и Tl. Далее степень обогащения возрастает:

группа 2 — Mg, Pb, Ba, Sr, Li, U, W, Nb, Sb и Ta, обогащение в 7—18 раз;

группа 3 — Ca, P, Zn, Cu, Ni, Sn, Mo и Bi, обогащение в 20—56 раз;

группа 4 — S, Cd, Ag и Pt, обогащение в 90—300 раз.

Очевидно, что по элементному составу прибрежная и пелагическая (ст. 5-10) взвеси существенно различаются. Исходя из общих соображений и имеющихся литературных данных, можно выделить несколько вероятных факторов, обуславливающих данное различие.

1. Известно, что мелкие фракции (<10 мкм) селенгинской взвеси обогащены рядом элементов относительно более крупных фракций и валовых проб [Ломоносов и др., 2001]. Поэтому в процессе оседания крупных частиц на дно и уменьшения среднего размера частиц, оставшихся во взвеси, их элементный состав может изменяться.

2. При транспортировке терригенной взвеси в воде, по мере уменьшения общего количества и размера взвешенных частиц, возрастает вклад в элементный состав от биогенной составляющей взвеси — планктонных гидробионтов, способных к избирательному накоплению ряда элементов. Известно,

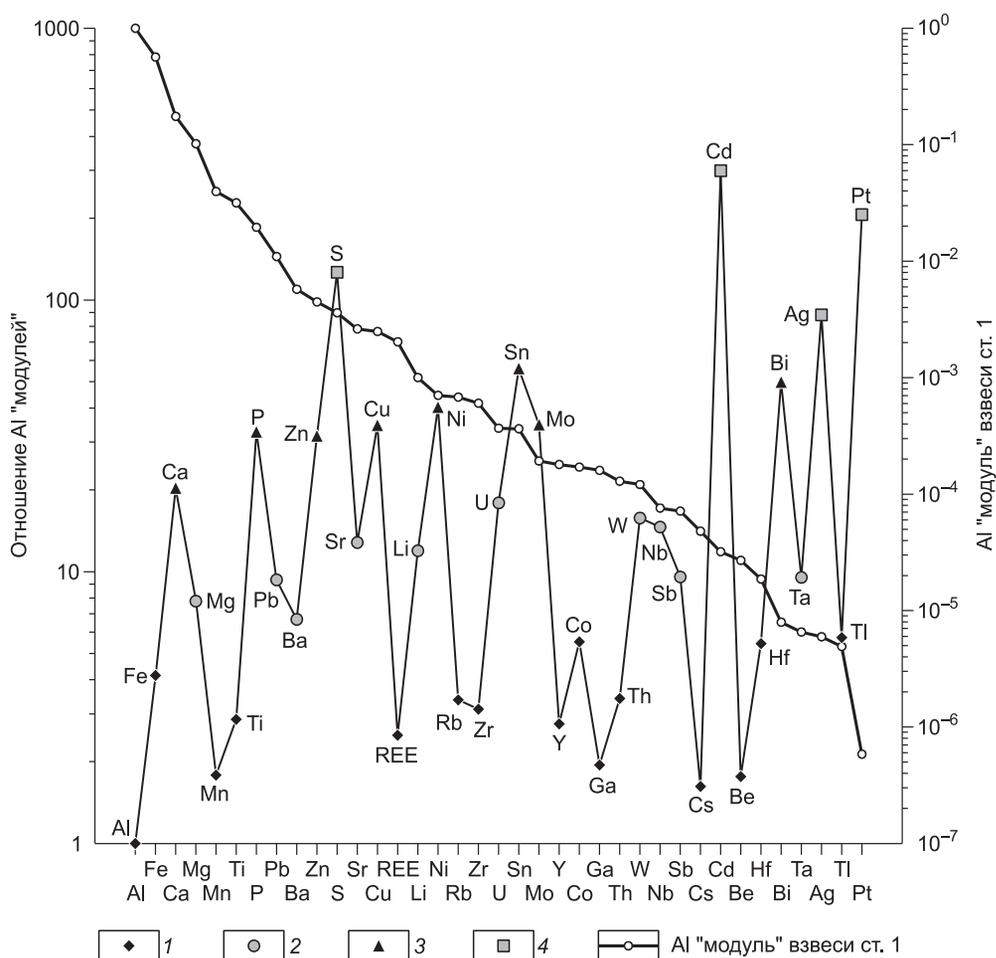


Рис. 3. Степень обогащения (отношение Al «модулей») элементами пелагической взвеси (среднее по ст. 5—10) относительно прибрежной (ст. 1).

По степени обогащения элементы условно разбиты на группы 1—4.

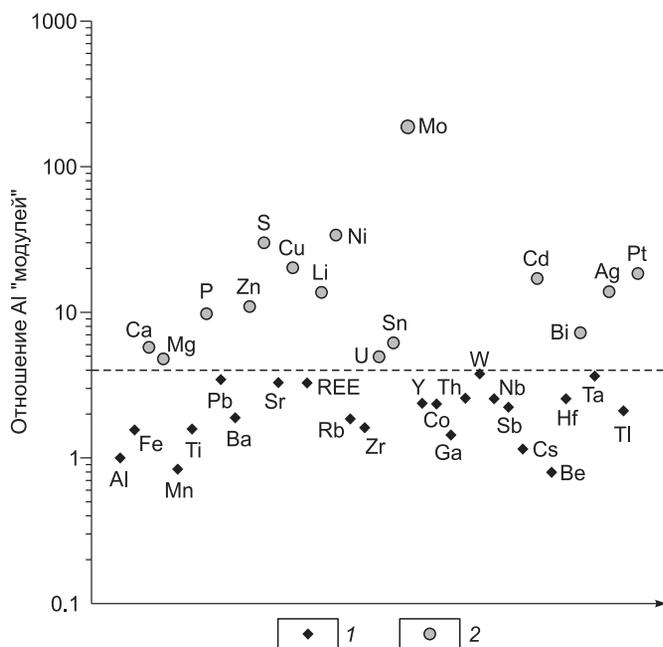


Рис. 4. Отношение Al «модулей» тонкодисперсной взвеси к грубодисперсной на ст. 2.

1 — элементы условно слабого обогащения мелкодисперсной взвеси (<4 раз); 2 — элементы умеренного и высокого обогащения (5—190 раз).

что P и S относятся к элементам энергичного биологического накопления, Ca, Sr, Zn — сильного, Ni, Cu, Sn, Mo, Ag — среднего [Войткевич и др., 1990]. Для байкальского планктона установлено, что Zn, Cu и Pb имеют наибольшие коэффициенты аккумуляции по сравнению с другими рассматриваемыми элементами [Гранина и др., 1998]. Вероятно, что значительная доля биологического накопления элементов происходит за счет гетеротрофных бактерий, известных своей способностью аккумулировать ряд тяжелых металлов [Hu, Reeves, 1997; Selenska-Pobbel et al., 1999; Sar, D'Souza, 2001; Дмитриева и др., 2002].

3. Терригенная мелкодисперсная взвесь, достигающая пелагических областей озера, состоит главным образом из субмикронных частиц, время жизни которых в озере составляет несколько десятков лет [Edgington et al., 1991], т.е. мелкодисперсная пелагическая взвесь представляет некую «осредненную» взвесь от всего твердого стока, поступающего в Байкал, в том числе и из атмосферы. Очевидно, что такая взвесь будет наследовать признаки элементного состава всех источников (с разной долей вклада), а не только Селенги.

4. Не исключено, что элементный состав взвеси может формироваться за счет аутигенного минералообразования. Такая возможность вытекает из данных физико-химического моделирования [Кашик и др., 1993, 1994], однако экспериментально доказать реальность таких процессов за время порядка нескольких дней (и/или лет) пока не удастся, а термодинамические расчеты не учитывают кинетические эффекты реакций, кинетику образования зародышей, поверхностные эффекты, а также процессы пассивации поверхности частиц.

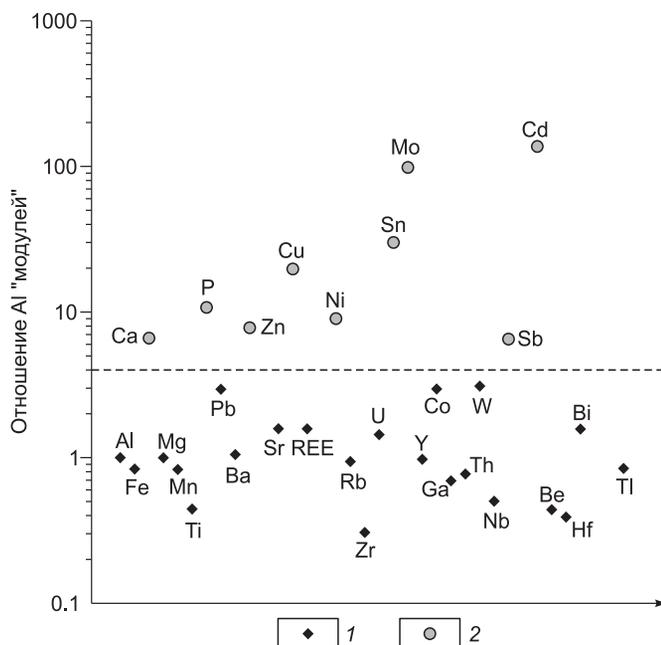
5. Мелкодисперсная взвесь обладает хорошо развитой поверхностью и при благоприятных физико-химических условиях способна адсорбировать растворенные в воде элементы, как это, скорее всего, происходит с ураном [Edgington et al., 1997].

Определить основную причину изменения элементного состава взвеси вдоль рассматриваемой трансекты представляется довольно сложной задачей. Тем не менее, исходя из полученных данных, мы попытались выявить некоторые тенденции. Весьма информативным представляется сравнение относительного элементного состава (Al «модули») грубодисперсной (>1.2 мкм) и мелкодисперсной (<1.2 мкм; см. Материалы и методы) фракций взвеси, отобранной в озере в зоне влияния р. Селенга (ст. 2) и в самой реке (с. Татаурово, см. рис. 1).

Сравнение элементного состава мелкодисперсной и грубодисперсной фракций

Рис. 5. Отношение Al «модулей» тонкодисперсной взвеси к грубодисперсной в р. Селенга.

1 — элементы условно слабого обогащения мелкодисперсной взвеси (<4 раз); 2 — элементы умеренного и высокого обогащения (6—137 раз).



взвеси. Отношение Al «модулей» фракций мелкодисперсная/грубодисперсная для взвеси ст. 2 представлено на рис. 4. Из рисунка следует, что мелкодисперсная взвесь обогащена более чем в 5 раз относительно грубодисперсной теми же элементами (за исключением Pb, Ba, Sr, W, Nb, Sb, Ta), что и пелагическая взвесь относительно прибрежной (ср. рис. 3, гр. 2—4). Такие элементы мы условно объединили в группу 2 (серые кружки на рис. 4). Особенно сильное обогащение по Mo (в 180 раз). Высокое обогащение (в 20—34 раза) характерно для S, Cu, Ni. Остальными элементами, условно отнесенными к группе 1 (черные ромбы), мелкодисперсная взвесь обогащена в меньшей степени и, за исключением указанных выше элементов (Pb, Ba, Sr, W, Nb, Sb, Ta), тождественна группе 1 (пелагическая/прибрежная) на рис. 3.

Качественно похожая картина распределения элементов наблюдается и для селенгинской взвеси, т.е. для взвеси исходно поступающей в озеро (рис. 5). Мелкодисперсная фракция селенгинской взвеси обогащена относительно грубодисперсной такими элементами, как Ca, P, Zn, Cu, Ni, Sn, Mo и Sb (гр. 2, серые кружки на рис. 5). Наибольшая степень обогащения характерна для Mo (в 100 раз) и Cd (в 140 раз). Данные по S, Li, Ta, Ag и Pt не приведены, поскольку их не удалось надежно определить в грубодисперсной взвеси. Растворы разложения обеих фракций селенгинской взвеси были загрязнены Cs, поэтому он также исключен из рассмотрения. Элементами гр. 1 селенгинская мелкодисперсная взвесь обогащена слабо. А по некоторым элементам — даже обеднена (Fe, Mn, Ti, Ba, Zr, Ga, Th, Nb, Be, Hf и Tl), особенно по Ti, Zr, Nb, Be и Hf — в 2—3 раза.

Сопоставляя данные по степени обогащения элементами мелкодисперсных фракций относительно грубодисперсных (рис. 4 и 5), хорошо видно, что для U в случае селенгинской взвеси это обогащение значительно меньше (~1.4 раза), чем в случае с озерной взвесью в зоне влияния Селенги (~5 раз). Это указывает на то, что мелкодисперсная взвесь обогащается ураном в самом озере, скорее всего, вследствие сорбционных процессов [Edgington et al., 1997]. Не исключено также, что уран может захватываться гетеротрофными бактериями родов *Pseudomonas* и *Bacillus*, обладающими такой способностью [Selen-

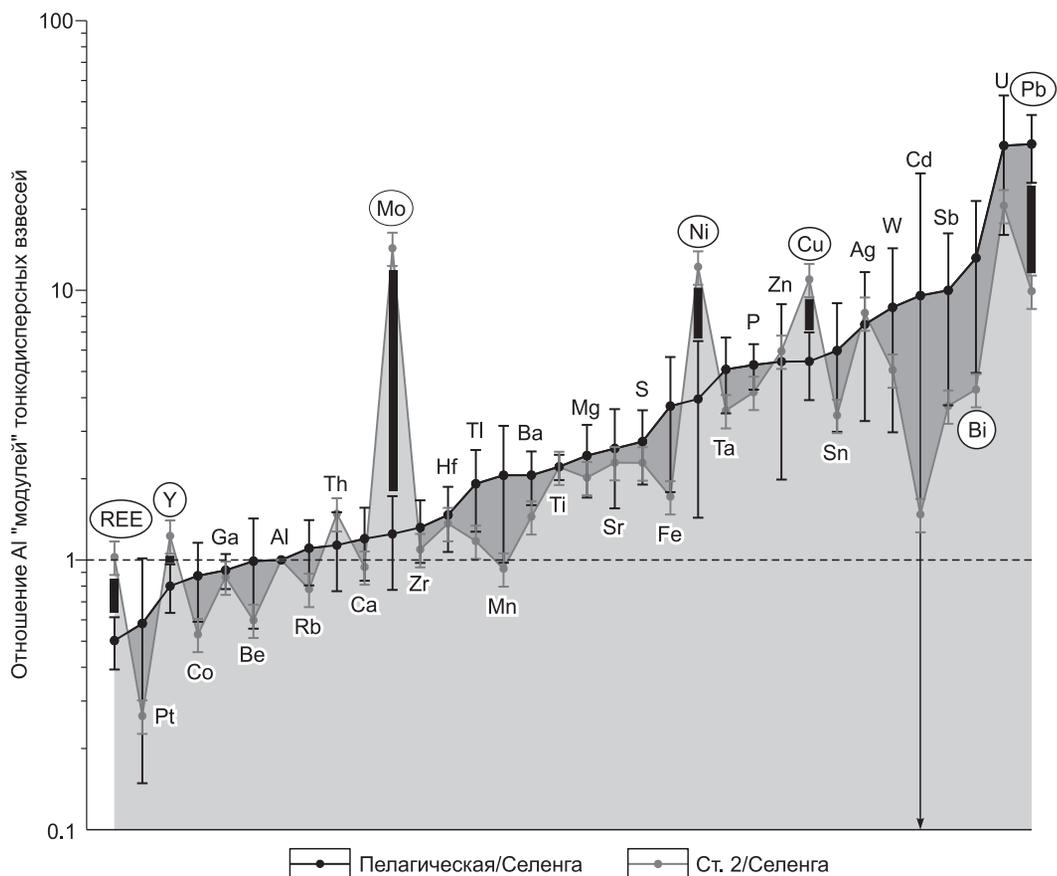


Рис. 6. Отношение Al «модулей» тонкодисперсной взвеси ст. 2 и пелагической взвеси (среднее ст. 5—10, см. рис. 2) к Al «модулю» тонкодисперсной взвеси р. Селенга.

Барами отмечены доверительные интервалы отношений, соответствующих уровню доверительной вероятности 0.95. Эллипсами отмечены элементы, по которым пелагическая взвесь и взвесь на ст. 2 достоверно различаются (вероятное минимальное отличие отмечено черными прямоугольниками).

ska-Pobbel et al., 1999; Sar, D'Souza, 2001], однако, насколько такой процесс вероятен в экосистеме озера, пока не установлено.

Сравнение элементного состава мелкодисперсных взвесей. Терригенная мелкодисперсная взвесь в озере обогащается также и другими элементами. Это хорошо заметно, если сравнить Al «модули» пелагической взвеси и мелкодисперсной взвеси на ст. 2 с Al «модулями» мелкодисперсной взвеси Селенги (рис. 6).

Из данных, представленных на рис. 6, следует, что помимо U озерная мелкодисперсная взвесь по сравнению с мелкодисперсной взвесью Селенги сильно обогащена Pb (в 35 раз — пелагическая, в 10 раз — ст. 2) и в меньшей степени рядом других элементов. Мелкодисперсная взвесь в зоне влияния реки (ст. 2) по сравнению с пелагической достоверно обогащена REE (в 2.0 раза), Y (1.5), Mo (12), Ni (3.1), Cu (2.0), но в то же время обеднена Bi (3.1) и Pb (3.5). Видно также, что при снижении доверительной вероятности (<0.95) количество элементов, по которым наблюдается различие, возрастает. Данное различие свидетельствует о том, что воздействие факторов, оказывающих влияние на формирование элементного состава взвеси, в разных частях озера неодинаково.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам многоэлементного ИСП-МС анализа взвешенного вещества установлено, что содержание терригенной взвеси в поверхностной воде Байкала уменьшается скачкообразно в направлении от дельты Селенги к пелагиали озера. Вдоль исследуемой трансекты наблюдаются два участка, на которых содержание взвеси значительно падает: на первом участке 6.5—8.3 км от берега падение на порядок и на втором участке 11—14 км от берега еще в 20 раз. Далее содержание взвеси в воде остается почти постоянным (на уровне 50 мкг/л, в предположении, что содержание Al во взвесах 8—10 %). Граница распространения селенгинской взвеси в поверхностной воде Байкала в исследуемый период (конец июня 2001 г.) простирается до 11—14 км от берега.

Относительный элементный состав (Al «модули») прибрежной взвеси в зоне влияния реки (ст. 1, 6.5 км от берега) существенно отличается от состава взвеси в пелагической области. В меньшей степени эти различия характерны для элементов (Cs, REE, Y, Zr, Hf, Th, Be, Rb, Ta, Ti), входящих в состав вещества кластогенных частиц и транспортируемых ими, и некоторых других (Ga, Mn, Co, Ba, Pb, Tl, Fe). В существенно большей степени этот эффект заметен для остальных элементов (Mo, W, Sb, Zn, Mg, Ca, Sr, Li, Ni, U, Sn, Pt, Ag, Bi, P, Cu, S, Cd), обогащение которыми происходит в пелагических областях.

Сравнение элементного состава мелкодисперсных фракций (<1.2 мкм) с грубодисперсными (>1.2 мкм) для взвесей, отобранных в Байкале в зоне влияния Селенги (ст. 2; 8.3 км от берега) и в Селенге (с. Татаурово) показало, что мелкодисперсные фракции как в том, так и в другом случаях существенно обогащены большинством тех же элементов, что и пелагическая взвесь по сравнению с прибрежной (ст. 1). Это свидетельствует о том, что мелкодисперсная взвесь в пелагиали озера в некоторой степени наследует признаки мелкодисперсной взвеси, исходно поступающей с твердым стоком Селенги. Но в то же время мелкодисперсная взвесь в пелагиали озера значительно обогащается (в 2—35 раз) большинством элементов (за исключением типично кластогенных) под влиянием ряда факторов, основными из которых, по-видимому, являются уменьшение размера частиц взвеси при седиментации, адсорбция или примесь частиц от удаленных источников.

Авторы выражают благодарность академику РАН М.А. Грачеву за постановку задачи и поддержку работы. Работа поддержана проектом СО РАН № 106, программой Президиума РАН № 16 и РФФИ 08-05-98071-р_сибирь_а.

ЛИТЕРАТУРА

Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М., Недра, 1990, 480 с.

Гранина Л.З., Каллендар Э., Грачев А.М., Грачев М.А. Поступление взвешенных форм элементов с речными водами в Байкал и их роль в химическом балансе (Ti, Cr, Sr, Cu, Zn, Pb, Br) // Докл. РАН, 1998, т. 362, № 5, с. 691—695.

Дмитриева Г.Ю., Безвербная И.П., Христофорова Н.К. Микробная индикация — эффективный инструмент для мониторинга загрязнения прибрежных морских вод тяжелыми металлами // Океанология, 2002, т. 42, № 3, с. 719—736.

Кашик С.А., Карпов И.К., Мазилев В.Н. Модель физико-химического баланса вещества в Байкале. Возможный механизм // Докл. РАН, 1993, т. 328, № 6, с. 731—734.

Кашик С.А., Карпов И.К., Ломоносов И.С., Мазилев В.Н. Химический состав взвеси в озере Байкал по данным физико-химического моделирования // Докл. РАН, 1994, т. 335, № 3, с. 359—361.

Ломоносов И.С., Антипин В.С., Ломоносова Т.К., Гапон А.Е. Сопоставление состава и геохимических особенностей коренных пород и твердого стока крупных рек водосборного бассейна озера Байкал // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 278—297.

Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М., Недра, 1968, 331 с.

Bobrov V.A., Granina L.Z., Kolmogorov Yu.P., Melgunov M.S. Minor elements in aeolian and riverine suspended particles in Baikal Region // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 2001, v. 470, p. 431—436.

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

Edgington D. N., Robbins J. A., Colman S. M., Orlandidni K.A., Gustin, M.-P., Klump J. V., Granina L. Z. Reply to Comment by R. Anderson on «Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal» // Earth Planet. Sci. Lett., 1997, v. 148, p. 399—404.

Granina L.Z., Baryshev V.B., Grachev M.A. Study of the elemental composition of suspended sediments in Lake Baikal and its tributaries by X-ray fluorescent analysis based on synchrotron radiation // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 1995, v. 359, p. 302—304.

Granina L., Tomza U., Aromoto R., Grachev A., Granin M. A study of the chemical budget of Lake Baikal using neutron activation and synchrotron radiation // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 2000, v. 448, p. 419—424.

Hu M. X.-C., Reeves M. Biosorption of uranium by *Pseudomonas aeruginosa* strain CSU immobilized in a novel matrix // Biotechnol. Prog., 1997, v. 13, p. 60—70.

Jambers W., Grieken R.V. Single particle characterization of inorganic suspension in Lake Baikal, Siberia // Environ. Sci. Technol., 1997, v. 31, p. 1525—1533.

Laborda F., Medrano J., Castillo J.R. Quality of quantitative and semiquantitative results in inductively coupled plasma mass spectrometry // J. Anal. At. Spectrom., 2001, v. 16, p. 732—738.

Potjomkina T.G., Baryshev V.B., Grachev A.M., Potjomkin V.L. Chemical composition of suspension in water body of Lake Baikal // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 1998, v. 405, p. 543—545.

Sar P., D'Souza S.F. Biosorptive uranium uptake by a *Pseudomonas* strain: characterization and equilibrium studies // J. Chem. Technol. Biotechnol., 2001, v. 76, № 12, p. 1286—1294.

Selenska-Pobbel S., Panak P., Miteva V., Boudakov I., Bernhard G., Nitsche H. Selective accumulation of heavy metals by three indigenous *Bacillus* strains, *B. cereus*, *B. megaterium* and *B. sphaericus*, from drain waters of a uranium waste pile // FEMS Microbiology Ecology, 1999, v. 29, p. 59—67.

Рекомендована к печати 9 апреля 2010 г.
Г.Н. Аношиным

Поступила в редакцию 27 марта 2009 г.,
после доработки — 25 февраля 2010 г.