

## О ДИНАМИКЕ СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КРЕМНИЯ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2002 г. М. Н. Шимараев, В. М. Домышева

Представлено академиком Н.А. Логачевым 14.05.2002 г.

Поступило 27.05.2002 г.

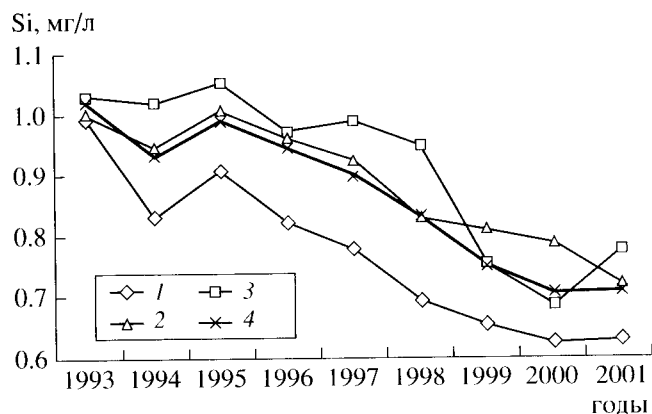
При изучении воздействий колебаний климата на глубокие озера внимание обращается обычно на изменение таких абиотических показателей, как температура воды, ледовые явления, водный режим [1, 2]. Между тем последствия этих воздействий могут иметь и более глубокий характер. Это связано с влиянием климата на биологические процессы и, следовательно, на содержание биогенных элементов в водной толще. Особый интерес из них представляет растворенный кремний (Si). Его роль в экосистеме Байкала определяется участием в жизнедеятельности диатомовых водорослей, а также в формировании донных отложений за счет попадания в них кремния, содержащегося в отмирающем диатомовом планктоне. Отметим, что биогенный кремнезем в глубоких колонках донных отложений Байкала рассматривается как один из основных индикаторов при реконструкциях климата Внутренней Азии за последние сотни тысяч и миллионы лет [3]. Данная работа посвящена анализу изменений содержания растворенного кремния в Байкале в период аномального потепления в районе озера в конце XX столетия [2].

По многолетним данным [4, 5], в Байкал в расчете на единицу поверхности озера поступает ежегодно с водами рек 8.8, выносится со стоком реки Ангары 1.4 и попадает в донные отложения с остатками диатомовых водорослей 7.4 г/м<sup>2</sup> Si. Эти величины принимаются как средние для многолетних условий, на что указывает и практически неизменные за последние 40–50 лет значения концентрации Si в водах главных притоков [6]. Ранее вопрос о межгодовых изменениях кремния в Байкале не рассматривался. Систематические наблюдения в 1950–1960 гг. вблизи пос. Лиственничное в Южном Байкале показали, что размах колебаний может значительно превышать реальное потребление кремния водорослями, и поэто-

му не анализировались [7]. Причиной таких изменений в локальном районе озера, как следует из [5], является перераспределение элемента под действием динамических процессов.

Первые подробные данные о содержании Si в водной толще всех частей озера получены во время разовых ежегодных комплексных съемок в 1993–2001 гг. Наблюдения велись на 21 станции продольного разреза, включавшего 6–8 станций в каждой из котловин озера. Пробы воды с горизонтов 0, 25, 50, 100 и глубже через каждые 100–200 м до дна анализировались по методике, приведенной в [5]. По результатам определений рассчитаны средние концентрации Si на разных глубинах, а также и ее средние (с учетом морфометрических данных) значения в водных массах озера и его котловин в отдельные годы. Результаты относятся к периоду с конца мая по октябрь, когда основной в году пик весенней вегетации диатомовых водорослей уже завершился или уже был завершен. Поэтому они позволяют выявить тенденцию межгодовых изменений концентрации элемента за период исследований.

Общей для всего озера особенностью явилось большое понижение концентрации Si в 1995–2001 гг. (рис. 1), что подтвердилось и данными независимых сезонных наблюдений в те же годы на разрезе Лиственничное–Танхой в Южном Байкале [8]. Уменьшение концентрации Si происходило во всей водной толще, незначительно ослабевая с глубиной (рис. 2). В 100–200 м над дном величины отрицательных приращений концентрации могли вновь возрастать (южная и северная котловины) из-за прямого поступления в придонную зону вод из верхних слоев озера с пониженным содержанием Si при глубинной конвекции ранней весной и поздней осенью [5]. По изменению запасов Si под отдельными изобатами вычислены средние значения потоков элемента, направленных из нижних в верхние слои (рис. 3). С увеличением глубины из-за уменьшения отношений объема воды под изобатами к их площади (от 0.73 на поверхности до 0.07 на глубине 1500 м) и ослабления интенсивности вертикального обмена величины потоков падают. Более слабые потоки Si характерны

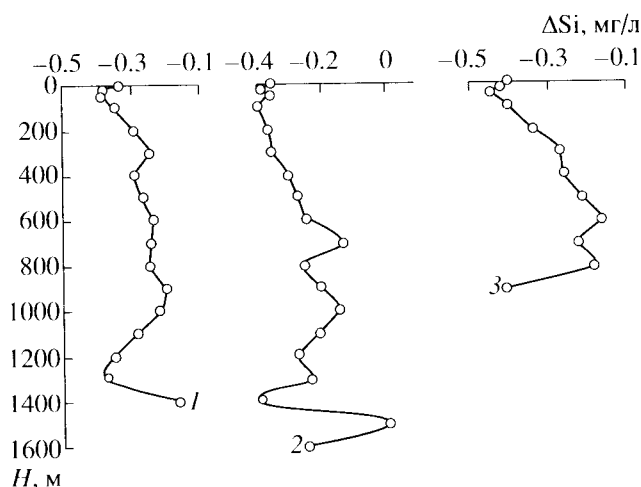


**Рис. 1.** Изменение средних взвешенных значений концентрации кремния в водных массах Байкала в 1993–2001 гг. 1 – Южный, 2 – Северный, 3 – Средний Байкал; 4 – все озеро.

для северной котловины, что можно объяснить меньшей активностью вертикального водообмена, а также и особенностями биологического потребления кремния в ней по сравнению с другими частями озера [4, 8].

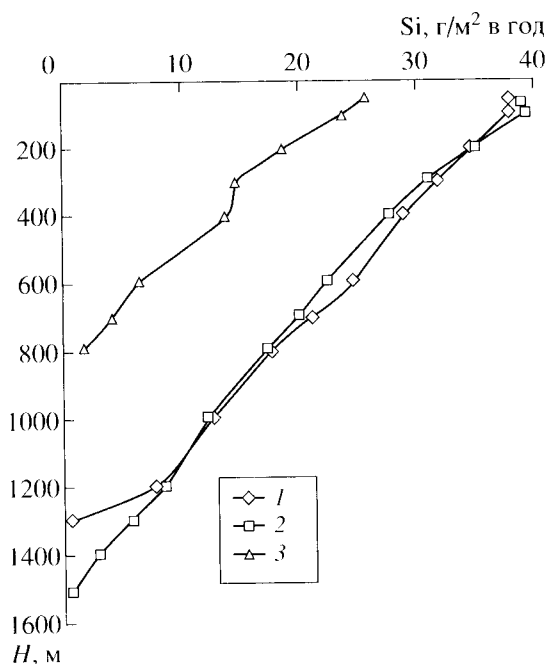
За период с 1995 по 2001 г. запасы кремния во всем озере и его южной, средней и северной котловинах понизились на  $200 \pm 18$ ,  $240 \pm 21$ ,  $230 \pm 21$  и  $170 \pm 15$  г/м<sup>2</sup>, или на 28% от содержания в водной массе всего озера в 1995 г. ( $\sim 730$  г/м<sup>2</sup>). На масштабы понижения указывает то, что ежегодные потери Si во всем озере превышали его поступление с водами рек в 4.6 раза, а суммарные с 1995 до 2001 г. – в 30 раз. Причиной изменений могло быть только резкое возрастание потребления кремния диатомовыми водорослями и его выведения в донные отложения в количестве, равном сумме потерь элемента в водной толще и его прихода с водами рек (за вычетом убыли со стоком р. Ангары). Оно составляет около 41 г/м<sup>2</sup> за год, что в 5.6 раза больше его средней многолетней величины (7.4 г/м<sup>2</sup>). Качественно вывод о повышении урожайности диатомовых водорослей подтверждается наблюдениями за фитопланктоном в Южном Байкале. Так, у пос. Б. Коты [9] в 1990–1997 гг. по сравнению с периодом 1964–1974 гг. наряду с резким (в десятки раз) ростом максимальной биомассы водорослей летом и осенью отмечен и ее рост весной, в период основного пика развития диатомей. Для 1990–1997 гг. он составил 1.7 раза, а для начала периода снижения запасов Si (1995–1997 гг.) – 2.8 раза. Характерным для всех 90-х годов было и более частое, чем ранее, появление урожайных по диатомовому планктону лет – в 1990, 1994, 1996, 1997 гг. [10, 11], а также в 1999 и 2000 гг. (Н.А. Бондаренко, устное сообщение).

Причиной наблюдаемых изменений вряд ли можно считать постепенное увеличение с конца 40-х го-



**Рис. 2.** Приращения концентрации кремния ( $\Delta Si$ ) в водных массах Южного (1), Среднего (2) и Северного (3) Байкала от 1995 к 2001 году.  $H$  – глубина.

дов притока соединений азота и фосфора с водами рек [6], которое не сопровождается ростом их концентраций в озере из-за активного вертикального водообмена. Очевидно, что “вспышка” развития водорослей явилась следствием изменения абиотических условий водной среды. Ранее показано, что долгопериодная (порядка 7–10 лет) динамика фитопланктона на Байкале имеет климатическую обусловленность [12, 13]. Последняя проявляется в прямой связи колебаний численности и биомассы фитопланктона и таких характе-



**Рис. 3.** Вертикальные потоки кремния (в г Si на 1 м<sup>2</sup> за год) в отдельных котловинах Байкала в 1995–2001 гг. 1 – Южный, 2 – Средний и 3 – Северный Байкал.

ристик, как сроки ледовых явлений, колебания проникающей в воду солнечной радиации, температуры воды. Расчет годовой биомассы фитопланктона по эмпирической зависимости от температуры поверхности воды из работы [13] показывает, что ее величина, определяемая в значительной степени биомассой крупных диатомей, должна была вырасти от первого ко второму периоду примерно в 5 раз, что соответствует увеличению потребления кремния во второй половине 90-х годов.

Мы полагаем, что характер изменения запасов кремния в Байкале отражает в основных чертах многолетнюю динамику колебаний климата в районе озера. Рассмотрим в связи с этим динамику климатических показателей (рис. 4) и данные о диатомовом планктоне в Южном Байкале во вторую половину XX столетия. В 1950–1960 гг., относящиеся к максимуму предшествующего внутривекового цикла потепления и части ветви его спада [2], интервалы между наиболее продуктивными по диатомовому планктону годами составляли 3–4 года [14]. В 1950, 1953, 1957 и 1960 гг. высокая урожайность диатомей вызывалась в основном развитием крупных водорослей *Aulacoseira baicalensis* и *A. islandica*. При этом потребление кремния должно было возрастать, а его содержание в водной толще уменьшаться. После 1968 г. на фоне минимума климатического цикла высокие урожаи *Aulacoseira baicalensis* возникали лишь в 1974, 1982 и 1990 гг., т.е. через 6–8 лет при одновременном понижении уровня ее развития [14]. Возрастала численность одного из видов мелкой диатомовой водоросли *Nitzschia acicularis* [11], створки которой после ее отмирания в основном растворяются в водной толще. Тенденция уменьшения биомассы с возрастанием численности отмечена в 1950–1980 гг. и для всего фитопланктона [15]. Эти условия были благоприятны для уменьшения потребления кремния и роста его запасов в озере. Лишь в первой половине 90-х годов на фоне более значительного, чем в 50-х годах, потепления восстановился прежний ритм “аулакозирных” лет [10] параллельно с одновременным развитием и других диатомовых водорослей, что вызвало значительное падение содержания кремния в озере. Очевидно, что восстановление запасов кремния будет происходить в начале текущего столетия на фоне ожидаемой ветви спада текущего внутривекового цикла температуры воды и воздуха [2]. Однако при сохранении общей тенденции глобального потепления характерные для 90-х годов XX столетия изменения в экосистеме озера могут проявиться еще резче в периоды более высоких максимумов последующих внутривековых климатических циклов.

Полученные результаты показывают, что колебания климата, отражаясь на развитии фитопланктона, влекут за собой и циклические изменения содержания растворенного кремния во всей

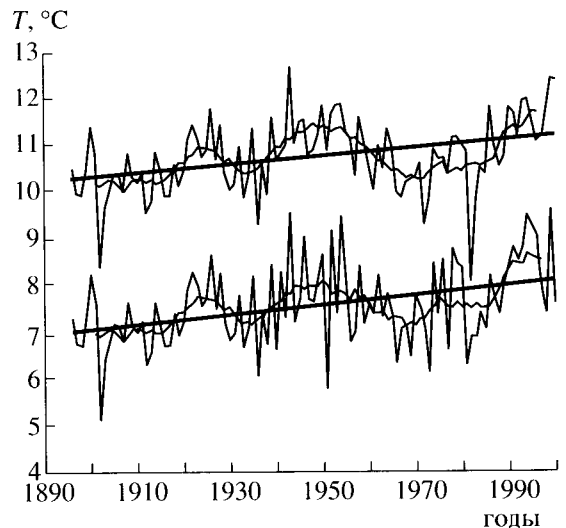


Рис. 4. Средние за май–сентябрь температура воздуха в Бабушкине (верхняя кривая) и температура поверхности воды у пос. Листвничного (Южный Байкал): текущие, 10-летние скользящие значения и тренд.

толще вод Байкала. В годы, близкие к максимумам внутривековых циклов температуры, при высокой урожайности диатомовых, как это было в 90-х годах, количество вовлекаемого в круговорот кремния существенно превышает его приход с реками. Основным источником его потребления водорослями становится приток из глубинных слоев, в которых кремний накапливается в предшествующие годы в результате минерализации его соединений при растворении части опускающихся остатков диатомовых водорослей [4], а также при проникновении обогащенных кремнием речных вод [5]. В конечном итоге это приводит к падению запасов Si во всей водной массе озера, которое должно компенсироваться в последующем при снижении урожайности диатомовых водорослей на ветви спада и в периоды минимумов внутривековых климатических циклов. Выявленные особенности в режиме кремния одновременно свидетельствуют о возможности значительного (в 5–6 раз) изменения скорости его накопления в донных отложениях Байкала за исторически короткие (десяtkи лет) интервалы времени, сопоставимые с длительностью внутривековых циклов колебаний климата.

Авторы благодарят за полезную дискуссию и замечания Н.А. Бондаренко, Г.И. Поповскую, И.Б. Мизандронцева, Н.Г. Гранина.

Работа поддерживается РФФИ (грант 00–05–65058), Сибирским отделением РАН (интеграционный проект № 56).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Н.Н. // ДАН. 1998. Т. 359. № 2. С. 255–257.

2. Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В. // Метеорология и гидрология. 2002. № 3. С. 71–78.
3. Коллектив участников проекта “Байкал–бурение” // Геология и геофизика, 1998. Т. 39. № 2. С. 139–156.
4. Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1961, 311 с.
5. Домышева В.М., Шимараев М.Н., Горбунова Л.А. и др. // География и природ. ресурсы. 1998. № 4. С. 73–81.
6. Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Ходжер Т.В. и др. // Метеорология и гидрология. 2001. № 4. С. 78–86.
7. Вотинцев К.К., Глазунов И.В. В кн.: Гидрохимические исследования озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 3–56.
8. Домышева В.М. Закономерности пространственного распределения и динамика кислорода и биогенных элементов в глубоководной области Байкала: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2001. 22 с.
9. Изместьева Л.Р., Павлов Б.К., Шимараева С.В. Тез. докл. VIII съезда Гидробиол. о-ва РАН. Калининград, 2001. Т. 1. С. 12 – 14.
10. Бондаренко Н.А. Структура и продукционные характеристики фитопланктона озера Байкал: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 1997. 23 с.
11. Bondarenko N. // Plankton Biol. Ecol. 1999. V. 46. № 1. P. 18–23.
12. Шимараев М.Н. В кн.: Лимнология придельтовых пространств Байкала. Л.: Наука, 1971. С. 259 – 267.
13. Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical Limnology of Lake Baikal. Irkutsk: Okaayama, 1994, 80 p.
14. Поповская Г.И. Фитопланктон Байкала и его многолетние изменения (1958–1990 гг.): Дис. ... д-ра биол. наук в форме науч. докл. Новосибирск, 1991. 32 с.
15. Кузеванова Е.Н. Особенности многолетней динамики фитопланктона и зоопланктона в Южном Байкале: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 1986. 23 с.