

## Конвекция и перемешивание подо льдом озера Байкал

Н. Г. ГРАНИН, Р. Ю. ГНАТОВСКИЙ, А. А. ЖДАНОВ, В. В. ЦЕХАНОВСКИЙ, Л. А. ГОРБУНОВА

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

### АННОТАЦИЯ

Конвекция в подледный период играет важную роль в поддержании популяции диатомовых, которые составляют значительную часть первичной продукции оз. Байкал. Существуют два механизма генерации конвекции – температурная за счет объемного поглощения солнечной радиации и солевая. В Байкале минерализация льда составляет примерно 20 % от минерализации воды. При увеличении толщины льда минерализация воды в подледном слое возрастает, что приводит к увеличению плотности воды, и это, в свою очередь, нарушает стратификацию, обусловленную градиентом температуры. Таким образом, конвекция способствует поддержанию клеток диатомовых в фотической зоне в неблагоприятный для их размножения период.

Важность турбулентного перемешивания для поддержания клеток диатомовых водорослей во взвешенном состоянии хорошо известна [1]. В настоящее время в фитопланктонном сообществе оз. Байкал доминирует эндемичный вид *Aulacoseira baicalensis*, максимум продуктивности которого приходится на весенний период. Клетки *A. baicalensis* не обладают физиологическим механизмом, который обеспечивал бы их положительную плавучесть. Из-за тяжелого кремнистого панциря их плотность достигает  $1,1 \text{ г/см}^3$ , и они погружаются под действием силы тяжести со средней скоростью 3–4 м в сутки [2]. Поэтому решающее значение для поддержания концентрации, достаточной для вегетативного размножения *A. baicalensis* в прилегающем ко льду слое воды, имеют два фактора: скорость деления клеток (зависящая от освещенности) и интенсивность турбулентности, поддерживающая клетки в фотической зоне [3, 4].

Конвекция и турбулентность в подледный период, когда отсутствует касательное напряже-

ние ветра, поддерживаются за счет потока плавучести. Существуют два возможных механизма генерации конвекции: 1. Поток плавучести обеспечивается увеличением минерализации воды в тонком подледном слое в процессе нарастания ледового покрова, поскольку минерализация льда меньше минерализации воды. Этот механизм действует в неблагоприятный для развития диатомовых период. 2. Поток плавучести обусловлен объемным поглощением солнечной радиации. Этот механизм достаточно хорошо описан в литературе и проявляется одновременно с началом интенсивного размножения диатомовых при достаточно большой величине проникающей радиации и поэтому не является определяющим для существования весеннего комплекса диатомовых.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно [5], что минерализация льда Байкала составляет 10–20 % от минерализации

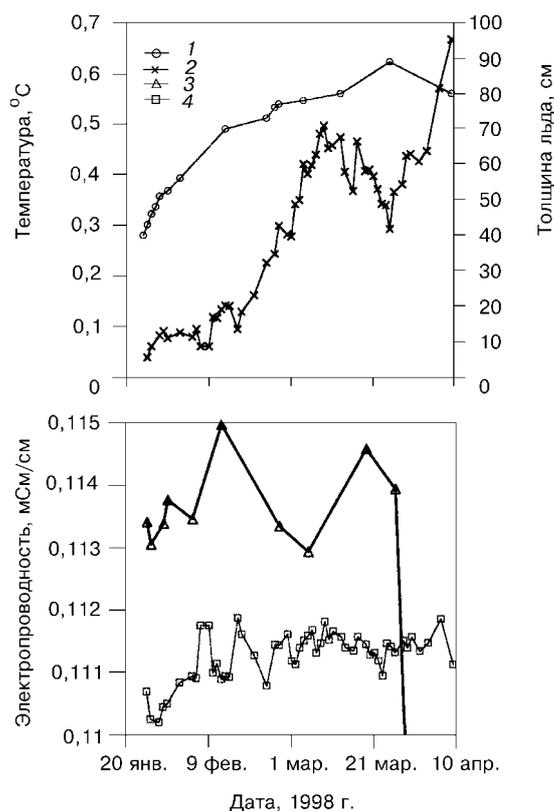


Рис. 1. Изменение толщины льда, температуры и электропроводности воды в январе-марте 1998 г. 1 – толщина льда, 2 – средняя температура 0–20 м, 3 – средняя электропроводность 0–2 м, 4 – то же 0–50 м.

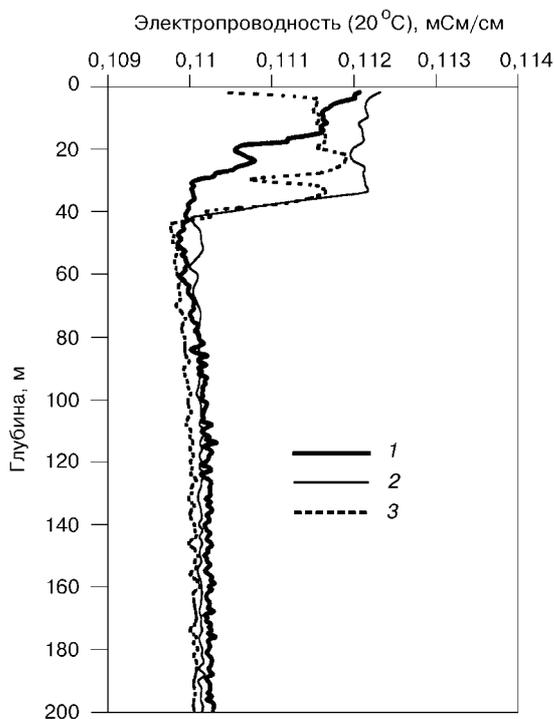


Рис. 2. Вертикальное распределение электропроводности.

воды. Повышение минерализации при отдаче солей намерзающим льдом вызывает повышение плотности воды в прилегающем ко льду слое и приводит к возникновению конвекции (рис. 1). Можно оценить количество солей, поступающих в верхний слой за счет льдообразования, используя данные измерений электропроводности [6]. Для 1998 г., при толщине льда 90 см и минерализации 15 % от минерализации воды, рассчитанный поток солей составит около  $66 \text{ г/м}^2$ . Измеренное повышение минерализации в верхнем 50-метровом слое воды к концу периода нарастания толщины льда составляет  $68 \text{ г/м}^2$  (рис. 2).

Конвекция за счет осолонения имеет место при  $\beta \Delta S > \alpha \Delta T$ , где  $\Delta S$  и  $\Delta T$  – разности минерализации и температуры по вертикали,  $\alpha$  – удельный коэффициент температурного расширения, а  $\beta$  – удельное изменение плотности, вызванное изменением минерализации  $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dS}$ ,

где  $\rho$  – плотность. При  $\Delta S = 10 \text{ мг/л}$  (максимальное зафиксированное различие) и средней минерализации воды Байкала  $\approx 96 \text{ мг/л}$   $\Delta T \approx 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Глубина проникновения конвекции зависит от температуры воды. Слой конвекции максимален сразу после образования льда. Как показывают наши измерения, в конце января – начале февраля конвекция за счет повышения минерализации может проникать до 10–20 м. Позднее в результате повышения температуры за счет прогрева проникающей солнечной радиацией глубина проникновения конвекции уменьшается, и к середине марта она не превышает 1–2 м. К концу марта, когда под воздействием возрастающей инсоляции температура прилегающего ко льду слоя воды возрастает и скорость намерзания льда снижается, глубина проникновения конвекции, вызванной осолонением, уменьшается. Позднее, когда лед начинает снизу подтаивать, подледный слой воды распресняется. Стратификация минерализации (минерализация подледного слоя увеличивается с глубиной) становится стабилизирующим фактором.

Поток плавучести  $J$ , вызванный осолонением, может быть оценен подобно тому, как оценивается поток плавучести при испарении [7]. Поскольку в подледный период поток кинетической энергии, обусловленный трением ветра,

отсутствует, можно предположить, что скорость диссипации турбулентной энергии приблизительно равна потоку плавучести, вызванному осолонением. При минерализации воды 96 и льда 20 мг/л и скорости замерзания льда около 1 см/сут поток плавучести, а следовательно, и скорость диссипации турбулентной энергии составит  $\epsilon \approx 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}^3$ . Для вертикального масштаба конвекции  $h \approx 1 \text{ м}$  коэффициент вертикального обмена составит

$$K_z \approx \frac{1}{\epsilon^{\frac{1}{3}}} \cdot h^{\frac{4}{3}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

До сих пор считалось, что подледный прогрев начинается в середине марта [8]. В 1998 г. подледный прогрев, согласно нашим данным, начался сразу после становления ледового покрова (см. рис. 1) и при достаточно высокой температуре воздуха может быть интенсивным начиная с середины февраля. Зимние экспедиционные работы в предыдущие годы начинались в конце февраля – начале марта, и это не позволяло верно оценить даты начала периода подледного прогрева. В 1998 г. исследования были начаты 25 января при ледоставе 13 января. Толщина снежного покрова и наличие незаснеженного льда на акватории Южного Байкала были достаточно типичными. Аналогичные условия наблюдались в 1994, 1996 и 1997 гг. Зная темп роста температуры, можно оценить поток плавучести [7], скорость диссипации турбулентной энергии и коэффициент вертикального обмена вследствие радиационного прогрева

$$J = -\alpha g h_{mix} \frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha g}{c_p \rho} B =$$

$$= 2 \cdot 10^{-10} \div 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}^3,$$

где  $h_{mix}$  – перемешанный слой,  $c_p$  – теплоемкость,  $B$  – суммарный поток тепла. При этом коэффициент вертикального обмена составит от 0,01 до 0,07  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Можно оценить поток тепла, обусловленный конвекцией за счет повышения минерализации, если приравнять потоки плавучести для температурной и солевой конвекции. Оценка потока тепла за счет "солевой" конвекции в период интенсивного нарастания толщины льда дает величину менее 1 Вт/м<sup>2</sup>. Это составляет менее 1 % проходящей радиации и менее 10 % проникающей. Нельзя пренебрегать этим пото-

Показатель	Январь–февраль	Март–апрель
Приходящая радиация, МДж/(м <sup>2</sup> · сут)	6	10
$dT/dt$ , °С/сут	0,003	0,02
$h_{mix}$ , м	20	35
Проникающая радиация, %	4	25
То же, Вт/м <sup>2</sup>	6	60

ком, но следует помнить, что его величина незначительна по сравнению с величиной проникающей радиации (см. таблицу).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конвекция, обусловленная увеличением минерализации при нарастании ледового покрова, определяет перемешивание в начальный период после ледостава. В более поздний период (конец февраля – апрель) возрастает роль температурной конвекции. После прекращения нарастания толщины льда температурная конвекция определяет перемешивание и является главным механизмом, поддерживающим клетки диатомовых в фотической зоне.

Полевые работы проводились при финансовой поддержке Королевского общества Великобритании, а также грантов: INTAS 96-1937- "Phytoplankton and mixing of Lake Baikal"; РФФИ-Байкал 97-05-96436 "Изучение физических механизмов, способствующих поддержанию диатомовых водорослей в фотической зоне".

## ЛИТЕРАТУРА

1. C. S. Reynolds, The Ecology of Freshwater Phytoplankton, Cambridge University Press, 1984.
2. К. К. Вотинцев, Гидрохимия озера Байкал, М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. N. G. Granin, D. H. Jewson, A. A. Zhdanov, et al., Physical Processes and Mixing of Algal Cells under the Ice of Lake Baikal. Proceedings of XXVII SIL Congress, Dublin, Ireland, 1998, 252.
4. D. H. Jewson, N. G. Granin, A. A. Zhdanov, et al., Life under Ice: Lake Baikal's Endemic Planktonic Diatoms. Proceedings of XXVII SIL Congress, Dublin, Ireland, 1998, 213.
5. А. И. Аверин, Л. И. Горбунова, Н. Г. Гранин, *Водные ресурсы*, 1990, 4, 23–29.
6. R. Hohmann, Deep-water Renewal in Lake Baikal, Zurich, 1977.

7. D. M. Imboden, A. Wuest, Mixing Mechanisms in the Lakes, Physics and Chemistry of Lakes, Springer, 1995, 83–139.

8. М. Н. Шимараев, Элементы теплового режима озера Байкал, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1977.

## **Convection and Stirring under the Lake Baikal Ice**

N. G. GRANIN, R. Yu. GNATOVSKY, A. A. ZHDANOV, V. V. TSEKHANOVSKY, L. A. GORBUNOVA

Convection during the ice-cover period plays an important role in supporting the population of diatoms that make up a considerable part of the primary production of Lake Baikal. There are two mechanisms of convection – temperature-dependent due to voluminal absorption of solar radiation, and salt-dependent one. In Baikal, ice mineralization makes up about 20 % of water mineralization. As the ice thickness increases, so does the water mineralization in the subglacial layer, which results in an increase of water density, and this, in its turn, disturbs the stratification determined by the temperature gradient. In this way, convection promotes maintenance of diatom cells in the photic zone at the period unfavorable for their reproduction.