

# РОЛЬ биогеохимических процессов В БАЛАНСЕ АЗОТА ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ

**На сегодняшний день отсутствуют данные по активности биогеохимических процессов круговорота азота в оз. Байкал. На основе исследованных авторами процессов азотфиксации и денитрификации составлен баланс азота. Предполагалось, что хотя годовой сток нитратного азота с водным стоком р. Ангара составляет около  $2,4 \cdot 10^3$  тонн/год, потеря азота с планктоном через Ангару (биосток) ничтожно мала. Как видно из полученных результатов, биосток соизмерим с потерей нитратного азота, и составляет  $0,42 \cdot 10^3$  и  $0,54 \cdot 10^3$  т/год, соответственно. В результате проведенных авторами исследований выявлено, что основная роль в процессах круговорота азота принадлежит микроорганизмам.**

## Введение

До недавнего времени изучение цикла круговорота азота в гидросфере считалось важной научной задачей, но не имеющей существенного практического значения. Недостаточное внимание к изучению этого вопроса объяснялось тем, что время нахождения фиксированного азота в океане считается продолжительным - около 10 тыс. лет, и баланс азота подобен таковому у других элементов, т.к. находится в стабильном состоянии или очень близок к этому. Серьезные попытки квалифицировать баланс связанного азота – денитрификации и фиксации азота – начались в 1970 годах и, несмотря на различные оценки исследователей, понятие о равновесном состоянии круговорота азота стало возможным лишь в середине 1980-х годов [1]. Однако пределы, в которых изменения денитрификации или фиксации азота могут влиять на баланс этого элемента в гидросфере, остаются спорными. Интерес к балансу азота привел к обширному диапазону исследований, в которых особое внимание уделяется биологическим измерениям специфических процессов (например,  $N_2$ -фиксации и денитрификации), геохимическим измерениям в

масштабах водоема и комплексному моделированию.

Круговорот азота представляет собой взаимосвязанную цепь реакций превращения различных форм азота, ведущая роль в осуществлении которых, принадлежит микроорганизмам. Азотфиксация - процесс пополнения экосистемы азотом. Немаловажная роль в этом процессе принадлежит многим видам цианобактерий, образующим гетероцисты. Способностью к фиксации азота обладает широкий круг авто- и гетеротрофных микроорганизмов, как в аэробных, так и анаэробных условиях, обладающих ферментом нитрогеназой. Все они имеют похожий биохимический механизм фиксации молекулярного азота. Этот процесс называют биологической фиксацией азота.

Денитрификация представляет собой единственный биохимический процесс, ведущий к обеднению водоема азотом, что играет важную роль в процессах самоочищения водоемов. Только имея данные о количественном состоянии процессов, ведущих к накоплению или освобождению азота в водоемах, можно составить заключение о содержании этого элемента в экосистемах. Эти знания имеют существенное значение для развивающихся направлений по регулированию экосистем с целью контроля качества воды или увеличения первичной продуктивности водоема. Нужно отметить, что содержание отдельных форм азота в воде сильно меняется по сезонам года и зависит от развития фитопланктона, полноты и характера циркуляции воды в водоеме, а также от поступления азота из грунта, притока его с водосборного бассейна и т.д. Вместе с тем, содержание общего азота, а часто и его отдельных соединений, из года в год остается для одного и того же озера величиной постоянной.

Нередко основная масса органических и минеральных соединений азота поступает в озеро с водосборной площади и осадками в

**В.А. Верхозина\***,  
профессор, доктор  
технических наук,  
ведущий научный  
сотрудник,  
Учреждение  
Российской академии  
наук Института  
геохимии  
им. А.П. Виноградова  
СО РАН,  
Национальный  
научно-  
исследовательский  
Иркутский  
государственный  
технический  
университет

**Е.В. Верхозина**,  
кандидат  
биологических наук,  
научный сотрудник,  
Учреждение  
Российской академии  
наук Института  
земной коры СО РАН

\* Адрес для корреспонденции: [verhval@igc.irk.ru](mailto:verhval@igc.irk.ru)

виде дождя и снега. В сводке по вопросам научных основ эвтрофирования сделана попытка статистического подхода к трофической классификации вод на основе показателей среднего содержания связанного азота и фосфора, где подчеркивается, что проблема эвтрофирования связана не с содержанием питательных веществ в водоеме, а со скоростью поступления их извне. При этом роль биологических процессов никак не учитывалась.

В настоящее время выявлено, что азотный цикл в морях и океанах более динамичен, чем считали прежде. Время оборота фиксированного азота примерно равно 1500 лет [2]. Однако, несмотря на впечатляющие и быстрые успехи в исследовании циклов азота гидросферы, остаются нерешенными многие спорные вопросы. Исследование биогеохимических процессов трансформации азотсодержащих соединений в континентальных водоемах еще более актуально, чем в океане в связи с проблемой качества воды и интенсификацией антропогенного эвтрофирования.

Ввиду отсутствия данных по скоростям азотфиксации и денитрификации для экосистемы оз. Байкал, как и для подавляющего числа крупных водоемов в мире, баланс этого важнейшего биогенного элемента не был исследован. Для Байкала ранее был рассчитан сток нитратного азота через р. Ангара [3]. Роль биогеохимических процессов азотфиксации и денитрификации в балансе азота не был учтен, поскольку рассматриваемые процессы из-за трудностей измерения не были исследованы.

Цель работы - исследовать биогеохимические процессы азотфиксации и денитрификации и выявить их роль в балансе азота экосистемы оз. Байкал.

**К.В. Чудненко,**  
доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией физико-химического моделирования.  
Учреждение Российской академии наук Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

## Материалы и методы исследования

Основные проблемы и трудности измерений связаны со спецификой круговорота азота в природе. Хотя над каждым квадратным километром земной поверхности находится около 8 млн. тонн азота, для осуществления биохимических реакций необходимо разрушить его химическую инертность, а затем регулировать химическую активность обратимых реакций производства органического вещества. Весь этот цикл в водной толще и донных осадках крупных глубоких озер, где отсутствуют электрические разряды и пока еще несущественно антропогенное воздействие, могут осуществлять только микроорганизмы.

Для измерения процессов азотфиксации и денитрификации использован ацетиленовый метод, который основан на идее искусственного субстрата. Азот был заменен газами, отсутствующими в атмосфере, но с той же энергией связи - ацетилен и этилен. Достаточно инкубировать заданный объем или массу пробы в замкнутом объеме с ацетиленом, через заданное время зафиксировать ее и измерить образующиеся количества этилена. Затем делается хроматографический анализ, который может проводиться через какое-то время после отбора проб в лабораторных условиях.

Для расчета скорости азотфиксации по измеренным величинам использовали формулу, учитывающую растворимость этилена в воде путем введения коэффициента перераспределения Бунзена между фазами, равного для этилена, путем определения площади хроматографического пика этилена  $C_э$  мкг/л за вычетом концентрации этилена в исходном ацетилене и содержания его в контрольной пробе:

$$C_э = (V_г K/a N t M) (1 + 0,122 V_ж/V_г)$$

$K$  - продукция этилена единицей пробы, мкмоль,

$V_ж$  и  $V_г$  - объем водной и газовой фаз в инкубационном сосуде, мл,

$t$  - длительность инкубации (час),

$N$  - количество анализируемой пробы (мл для воды и в г для донных осадков),

$M$  - молекулярный вес этилена (28),

$a$  - коэффициент пересчета скорости продуцирования этилена из ацетилена в скорость фиксации азота (теоретическое молярное соотношение, равное 3).

Таким образом, скорость азотфиксации будет рассчитана в мкмоль/г сут. (для донных осадков) или в мкмоль /мл сут. (для воды).



Метод привлекает своей простотой и пригодностью применения его в длительных и дальних экспедициях. Впервые использован на оз. Байкале в 1986 г. Методика и полученные результаты по исследованию этих процессов в экосистеме озера Байкал описаны ранее [4-6].

При денитрификации  $N_2O$ -редуктаза ингибируется ацетиленом, который подавляет восстановление закиси азота. Измеряется закись азота, образующаяся при денитрификации, практически отсутствующая в атмосфере.

## Результаты и их обсуждение

**З**адача выявления роли биогеохимических процессов в балансе азота экосистемы оз. Байкал является особенно актуальной для контроля качества воды. При развитии туризма, строительстве коттеджей, кемпингов, саун на побережье озера наблюдается почти полное отсутствие очистных сооружений и поступление в воду большого количества органического азота с неочищенными сточными водами, что может привести к антропогенному эвтрофированию водоема. Гидрохимическими исследованиями установлено [7], что в воде оз. Байкал существует довольно устойчивая сезонная цикличность динамики азота, который присутствует, в основном, в форме нитратов. Аммонийный и нитритный азот можно выявить лишь в зонах литорали (мелководье) или в отдельных точках пелагиали при отмирании фитопланктона, который имеет ярко выраженную пространственно-временную неоднородность. Поэтому проследить динамику азота можно лишь по азоту, находящемуся в форме нитратов.

Изучение процессов азотфиксации и денитрификации в водной толще и донных осадках экосистемы оз. Байкал было начато в 1985 г. [6, 8], продолжено до 1991 г. и повторено в 2005 г. В данной работе проанализированы полученные результаты за все годы исследований. Выявлено слабое течение процессов азотфиксации и денитрификации в пелагиали озера и активное – в мелководных районах. Можно отметить высокую вариабельность активности азотфиксации в донных осадках Байкала. Активность азотфиксации изменялась в поверхностном слое донных осадков оз. Байкал от  $0,025 \cdot 10^{-3}$  до  $2,58 \cdot 10^{-3}$  мкмоль/г сут. Такой разброс рассматриваемых данных по всей площади озера обусловлен тем, что донные осадки Байкала имеют различный литологический и, соответственно, химический состав. Среднее квадратичное отклонение



(SD)= $0,075 \pm 0,041$  (55 %). В колонках байкальских грунтов активность азотфиксации имеет место во всех исследуемых пробах. Также на всех горизонтах были выявлены азотфиксаторы, активность и численность которых значительно варьируют в вертикальном и горизонтальном распределениях.

Основные проблемы и трудности измерений исследуемых процессов связаны со спецификой экосистемы оз. Байкал, которую невозможно считать единой из-за разницы глубин - пелагиаль более 1000 м и литоральная зона – несколько метров. Соответственно, наблюдается очень большая разница температурного и гидрохимического режима [9]. Для рассматриваемых процессов в водной толще водоемов важно иметь в виду, что молекулярный кислород является ингибитором фермента нитрогеназы. Поэтому микроорганизмы, фиксирующие азот, либо действуют и растут в анаэробных условиях и являются облигатными, либо факультативными анаэробами. Возможно, что в столь насыщенных кислородом водах, как оз. Байкал до самых больших его глубин, микроорганизмы имеют специальную систему защиты нитрогеназы от кислорода, т.к. азотфиксирующие микроорганизмы были выявлены в зоне литорали, пелагиали и в донных осадках экосистемы озера.

Как известно, денитрификация еще более сильно ингибируется свободным кислородом, чем процесс азотфиксации, т.е. для ее протекания необходимы анаэробные условия. Поэтому в донных осадках денитрификация протекает значительно быстрее, чем в водной толще, хотя в оз. Байкал при отмирании водорослей после их массового цветения могут наблюдаться микрозоны с пониженным содержанием кислорода и повышенным содержанием органического вещества, где начинают работать денитрификаторы. Скорости процессов азотфиксации и денит-

**Таблица 1**

Баланс азота в озере Байкал по средним многолетним данным

Приход	10 <sup>3</sup> -т/год	Вклад, %	Расход	10 <sup>3</sup> -т/год	Вклад, %
NO <sub>3</sub> с притоками и осадками	0,54	0,26	NO <sub>3</sub> через р. Ангара	0,54	0,26
Азотфиксация в водной толще	201,5	98	Биосток планктона через р. Ангара	0,42	0,21
Азотфиксация в донных осадках	3,96	1,74	Захоронение в донных осадках	70	34,15
			Денитрификация в донных осадках	134	65,38
Всего	206	100	Всего	205	100

рификации обнаруживают столь же значительную пространственно-временную изменчивость, как и изменчивость бактериопланктона в экосистеме озера [10], что не наблюдается в мелководных озерах.

Бассейну оз. Байкал свойственно весьма сложное распределение речного стока, обуславливающее различную интенсивность его поступления в отдельные части котловины озера. Тем не менее, на основе гидрохимических съемок был рассчитан годовой сток нитратного азота. Хотя содержание нитратного азота в экосистеме озера подвержено большим сезонным изменениям [11], его многолетняя средняя концентрация составляет 40 мг/м<sup>3</sup>. С водным стоком р. Ангара концентрация нитратного азота составляет около  $2,4 \cdot 10^3$  т/год. Сток из озера  $Q = 60,4$  км<sup>3</sup>/год [3]. Баланс средней многолетней концентрации NO<sub>3</sub> осуществляется за счет притока в озеро (реки, осадки и т.д.).

При подсчете баланса азота в оз. Байкал показано, что вклад бактериальных процессов, рассчитанных по средним многолетним данным, существенен (табл. 1).

Как видно из полученных результатов, потеря азота с планктоном через р. Ангара (биосток) соизмерим с потерей нитратного азота -  $0,42 \cdot 10^3$  и  $0,54 \cdot 10^3$  т/год, соответственно. Самый большой процент поступления азота в процессе азотфиксации наблюдается в водной толще экосистемы Байкала и составляет  $201,5 \cdot 10^3$  т/год. В донных осадках озера, процесс фиксации азота идет довольно активно. В целом, рассчитанная на всю площадь озера, скорость азотфиксации составляет  $3,96 \cdot 10^3$  т/год. Расходная часть баланса азота при захоронении в донных осадках озера составляет  $70 \cdot 10^3$  т/год и в процессе денитрификации  $134 \cdot 10^3$  т/год; в водной толще озера денитрификация практически не выявлена.

В результате проведенной работы оценены элементы баланса азота в экосистеме оз.

Байкал и выявлена роль процессов азотфиксации и денитрификации. Следует отметить, что баланс азота в озере является непостоянным, зависящим от времени. На рассматриваемые процессы существенное влияние оказывают климатические изменения, такие как урожайные и неурожайные по фитопланктону годы [12], т.к. фитопланктон является основным поставщиком органического вещества в экосистему озера. Вклад процессов фиксирования азота бактериопланктоном соизмерим с содержанием растворимых форм азота в озере.

## Заключение

Впервые оценены биогеохимические процессы азотфиксации и денитрификации и выявлена их роль в балансе азота экосистемы оз. Байкал. Как видно из полученных результатов, потеря азота с планктоном через р. Ангара (биосток) соизмерим с потерей нитратного азота -  $0,42 \cdot 10^3$  и  $0,54 \cdot 10^3$  т/год, соответственно. При захоронении в донных осадках озера расходная часть баланса азота составляет  $70 \cdot 10^3$  т/год азота, т.е. величину, на два порядка большую, чем сток нитратного азота. Самый большой процент поступления азота в процессе азотфиксации выявлен в водной толще экосистемы озера, включая зоны пелагиали -  $201,5 \cdot 10^3$  т/год. В донных осадках озера процесс фиксации азота идет довольно активно. В целом, рассчитанная на всю площадь озера скорость азотфиксации составляет  $3,96 \cdot 10^3$  т/год. В процессе денитрификации в донных осадках теряется  $134 \cdot 10^3$  т/год азота, в водной толще озера денитрификация практически не выявлена.

Таким образом, вклад бактериальных процессов, рассчитанных по средним многолетним данным, значителен. Установлено, что процессы азотфиксации и денитрификации



играют существенную роль в балансе азота экосистемы оз. Байкал, хотя ранее предполагалось, что они незначительны. Поскольку пелагиаль озера насыщена кислородом до дна, то процессы денитрификации (освобождение экосистемы от интенсивного поступления азота) слабые, и эту особенность следует учитывать в процессах антропогенной деятельности.

### Литература

1. Codispoti, L.A. Nitrification, denitrification and nitrous oxide cycling in the eastern tropical South Pacific Ocean // Codispoti, L.A., Christensen J.P // Mar. Chem., 1985. V. 16. P. 277-300.
2. Gruber N. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification / Gruber N., Sarviento J. L. Gruber N., Sarviento J. L. // Global Biogeochem., 1997. V. 11. P. 235-266.
3. Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука СО АН СССР. 1976. 239 с.
4. Верховина В.А. Микроорганизмы круговорота азота в воде Байкала // Экологические аспекты водной микробиологии. Новосибирск: Наука, 1984. С. 10-18.
5. Верховина В.А. Влияние антропогенного фактора на микробиальные процессы круговорота азота // Совершенствование регионального мониторинга состояния оз. Байкал. Л.: Гидрометиздат, 1985. С. 66-70.
6. Верховина В.А. Фиксация азота и денитрификация в грунтах Южного Байкала //

### Ключевые слова:

денитрификация,  
нитрификация,  
азотфиксация,  
круговорот,  
баланс

- Верховина В.А., Одинцов В.С., Илялетдинов А.Н // Изв. АН КазССР. 1987. № 5. С. 51-55.
7. Folkner K.K. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal / Folkner K.K., Measures C., Herbelin S.E., Edmond J.M., and Weiss R.F. // Limnology and Oceanog. 1991. V. 36. N. 3. P. 413-423.
  8. Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР. 1961. 311 с.
  9. Codispoti, L.A. The ocean fixed nitrogen and nitrous oxide budgets: Moving targets as we enter the antropocene? // Codispoti, L.A., Brandes J.A., Christensen J.P., Devol A.N., Naqvi S.W.A., Paerl H.W., Yoshinari T. // Sci. Var. 2001. V. 65. P. 85-105.
  10. Верховина В.А. Проявление климатической изменчивости в периодичности урожайности планктона озера Байкал // Верховина В.А., Куснер Ю.С., Павлова Т.В., Потемкин В.Л. // ДАН 2000. Т. 374. № 2. С. 252-254.
  11. Folkner K.K. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal / Folkner K.K., Measures C., Herbelin S.E., Edmond J.M., and Weiss R.F. // Limnology and Oceanog. 1991. V. 36. N. 3. P. 413-423.
  12. Верховина В.А. Процессы азотфиксации и денитрификации в озере Байкал, их влияние на качество воды и общий баланс азота в экосистеме / Верховина В.А., Верховина Е.В., Куснер Ю.С. // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири. Научная конференция. Томск. ТПУ. 2003. С. 220-222.

V.A. Verkhovina, E.V. Verkhovina, K.V. Chudnenko

## BIOGEOCHEMICAL PROCESSES ROLE IN NITROGEN BALANCE OF LAKE BAIKAL ECOSYSTEM

The role of biogeochemical processes is described in the overall nitrogen balance of the Baikal based on the activity of nitrogen and denitrification processes. Previously it was assumed that the

biological processes of the nitrogen circulation are small and do not play a decisive role in the overall balance of nitrogen. As can be seen from the results, the runoff is commensurable with the loss of nitrate

nitrogen, and is  $0,42 \cdot 10^3$  and  $0,54 \cdot 10^3$  t/y respectively.

**Key words:** denitrification, nitrogen fixation, nitrogen circulation, balance