

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 озера 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

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

Задача 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-