

Л. М. СОРОКОВИКОВА, В. Н. СИНЮКОВИЧ, О. Г. НЕЦВЕТАЕВА,  
И. В. ТОМБЕРГ, Н. П. СЕЗЬКО

## ПОСТУПЛЕНИЕ СУЛЬФАТОВ И АЗОТА В ОЗЕРО БАЙКАЛ С ВОДАМИ ЕГО ПРИТОКОВ

*Характеризуется динамика поступления сульфатов и нитратного азота с водами притоков в оз. Байкал. Изменения стока химических компонентов крупных водотоков в значительной степени определяются поступлением ингредиентов в составе сточных вод. Показано, что увеличение потока загрязняющих веществ из атмосферы в современный период оказывает значительное влияние на химический состав воды небольших рек южного Байкала с низкой минерализацией.*

Ключевые слова: химический состав воды, сульфаты, соединения азота, атмосферные выпадения, сток.

*The dynamics of the entry of sulfates and nitrate nitrogen into Lake Baikal together with its influent waters is outlined. Changes in the discharge of chemical components by large water streams are largely determined by the entry of ingredients as part of effluents. It is shown that the current increase in the flow of pollutants from the atmosphere has a dramatic effect on chemical composition of water in small rivers of Southern Baikal with low mineralization.*

Keywords: chemical composition of water, sulfates, nitrogen compounds, atmospheric fallout, discharge.

### ВВЕДЕНИЕ

Химический состав атмосферных выпадений над территорией бассейна оз. Байкал изменяется под воздействием техногенных факторов, условий климата и отличается крайней неоднородностью [1–3]. Повышенное содержание в воздухе отдельных веществ сопровождается ростом их потоков из атмосферы и загрязнением поверхностных вод. Переход вещества из атмосферы в речные воды проследить достаточно сложно в силу несовпадения зоны формирования осадков с областью их выпадения, одновременного воздействия на состав атмосферных выпадений природных факторов, местных и удаленных источников загрязнения, трансформации химического состава выпавших осадков при их контакте с подстилающей поверхностью и других причин.

В доиндустриальный период химический состав атмосферных осадков в бассейне Байкала характеризовался низкой концентрацией ионов. Минерализация снеговых и дождевых вод не превышала 7–9 мг/л, а по составу главных ионов осадки относились к гидрокарбонатному классу, группе кальция [4]. В этот период доля атмосферной составляющей не превышала 1,5 % от суммарного поступления ионов в оз. Байкал [5].

Наиболее существенные изменения в составе атмосферных выпадений, связанные с повышением антропогенной нагрузки в регионе, произошли во второй половине XX в. [6], что привело к повышению роли атмосферной составляющей в химическом балансе оз. Байкал до 3 % [5]. Внутри горного обрамления (котловины) озера связь загрязненности атмосферы и качества поверхностных вод более отчетливо проявляется в его южной части, чему способствуют особенности местной циркуляции, высокая увлажненность территории и близость мощных источников выброса [7].

Цель настоящей работы — исследование поступления в оз. Байкал сульфатов и минерального азота с водами притоков и обусловленность этого процесса загрязненностью атмосферных выпадений.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе анализируются опубликованные данные, а также материалы авторов по поступлению сульфатов и минерального азота в оз. Байкал с водами притоков и из атмосферы. Пробы воды на химический анализ отбирались в период 1996–2006 гг. в нижнем течении рек в основные гидрологические фазы — зимнюю межень, весеннее половодье, паводки, летне-осеннюю межень. Средние значения концентраций ингредиентов определялись как взвешенные по стоку. Сток рек оценивался по данным Росгидромета. Суммарный поток веществ из атмосферы в холодный период анализировался по их накоплению в снежном покрове, пробы которого в конце февраля–начале марта отбирались в низовьях рек.

Химические анализы выполнены общепринятыми в гидрохимии пресных вод и атмосферных осадков методами [8], а также с использованием современных разработок [9]. Определение содержа-

ния сульфатов и нитратного азота выполнено методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с относительной погрешностью 5–10 %, аммонийного азота — колориметрическим методом с погрешностью 4–5 %.

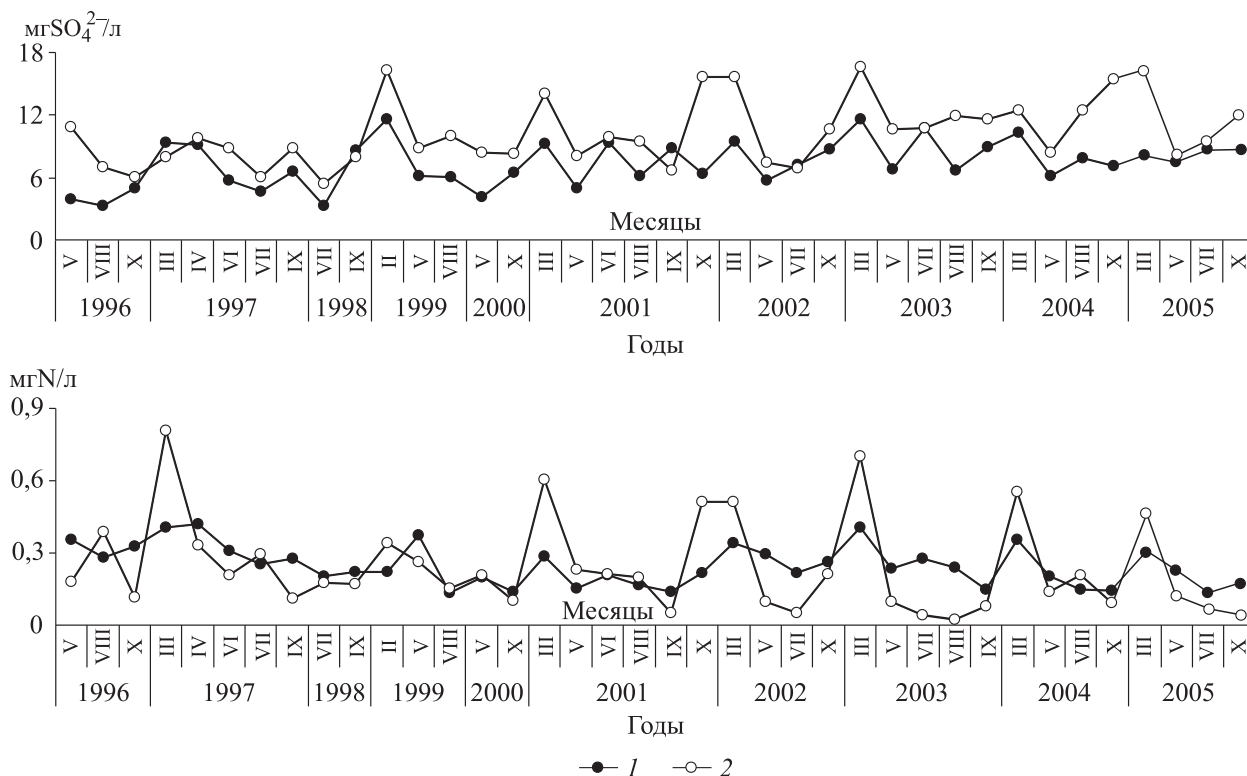
Достоверность полученных результатов проверялась регулярным проведением контроля качества анализов в рамках международной программы по тестированию стандартных образцов поверхностных вод (EANET). В речной воде погрешность определения стандартов не превышала 3 %, в снеговой — 8 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменчивости концентраций рассматриваемых ингредиентов в водах отдельных притоков оз. Байкал указывает на наличие значительных межгодовых и сезонных колебаний, зависящих от фазы водного режима (см. рисунок). В связи с этим оценка многолетних тенденций стока отдельных элементов основывалась на средних значениях их концентраций и с учетом происходящих изменений водности рек. Первые обобщенные данные о поступлении сульфатов и нитратного азота в озеро с водами притоков и атмосферными осадками получены в 1965 г. [10]. Они относятся к началу хозяйственного освоения Сибири и в значительной степени отражают фоновые показатели химического стока с водосборной территории Байкала. Последующие исследования [11] и наши результаты (табл. 1) указывают на постепенный рост как выноса рассматриваемых компонентов отдельными реками, так и суммарного притока этих веществ в озеро (фактические объемы выноса приводились к условиям водности рек 1950-х гг.).

Аналогичная картина отмечена и в поступлении сульфатов и нитратного азота в составе атмосферных осадков. Из анализа динамики потока исследуемых компонентов в оз. Байкал следует, что в сравнении с 1950-ми гг. поступление азота с речным стоком увеличилось примерно в 1,5 раза, с осадками — более чем в 2 раза, сульфатов — в 1,8 и 3,3 раза соответственно. Одним из факторов, обусловивших рост концентраций сульфатов и азота в природных водах и их стока в озеро, стало повышение загрязненности атмосферы в регионе. Это подтверждается высокими темпами роста потоков веществ из атмосферы.

Представленные в табл. 1 результаты характеризуют изменения стока сульфатов и нитратного азота по притокам Байкала с середины XX в. На всех водотоках отмечен рост выноса исследуемых компонентов, различающийся по своим масштабам, очевидно, в силу неодинаковых условий формирования стока и уровня антропогенной нагрузки.



Изменение концентраций сульфатов и нитратного азота в воде рек Снежная (1) и Селенга (2).

Так, р. Селенга характеризуется наибольшей водосборной территорией (447 060 км<sup>2</sup>), климат в бассейне достаточно сухой, осадки в среднем составляют около 300 мм в год, а модуль стока — 2,12 л/с с квадратного километра. В условиях недостаточного увлажнения территории и низкого модуля стока атмосферные осадки не оказывают существенного влияния на формирование и трансформацию химического стока Селенги. Об этом свидетельствуют стабильные данные, характеризующие динамику концентраций и стока химических компонентов в районе пос. Наушки.

Нарушение химического состава вод и увеличение стока сульфатов и минерального азота (см. табл. 1) регистрируются ниже г. Улан-Удэ, что в основном обусловлено поступлением в русло реки сточных вод с высоким содержанием загрязняющих компонентов [12]. В то же время в отдельных районах бассейна Селенги поступление ингредиентов за счет атмосферы, особенно во время снеготаяния, весьма существенно, о чем свидетельствуют повышенные концентрации ионов, включая сульфаты, в осадках в зонах влияния промышленных выбросов (г. Улан-Удэ, поселки Селенгинск и Каменск).

Снегосъемки, проведенные в нижнем течении Селенги и ее дельте, выявили повышенные концентрации сульфатов и нитратного азота в снеговой воде вдоль внешнего края дельты, в районе выхода проток Харауз, Колпинная и Средняя. Учитывая удаленность дельты от Байкальска, а также картину распределения накопления исследуемых ионов в снежном покрове вдоль побережья Байкала от р. Утулик до р. Бол. Сухая, полагаем, что это результат влияния Селенгинского ЦКК, находящегося в 40 км к западу.

Условия формирования стока рек южного Байкала коренным образом отличаются от условий Селенги. Реки, стекающие со склонов хр. Хамар-Дабан, имеют горный характер, небольшую длину при значительном превышении истоков над устьями. Средний перепад высот составляет 50–60 м на километр, а в горной части — до 100–200 м на километр. В соответствии с большими высотными различиями распределение осадков здесь крайне неравномерно. На побережье их годовое количество составляет 500–700 мм, а в горах достигает максимальных для бассейна Байкала значений — 1500 мм в год.

Средний модуль стока рек превышает таковой Селенги примерно на порядок и достигает 20–25 л/с с квадратного километра [13]. На три летних месяца приходится до 50 % и более годового объема стока, а в зимнюю межень минимальная величина месячного стока рек составляет менее 1 % их годовой водности. На этих реках хорошо выражено увеличение стока с высотой местности.

Необходимо отметить, что в реки южного Байкала промышленные сточные воды практически не сбрасываются. Незначительное влияние на химический состав вод этих рек могут оказывать хозяйственно-бытовые стоки от небольших поселков, расположенных в устьях, хотя отбор проб проводился в основном выше их расположения. В этих условиях атмосферные осадки играют определяющую роль в формировании состава речных вод, поэтому их загрязнение вызывает рост концентраций и стока химических компонентов.

Анализируя многолетние данные по изменению концентраций исследуемых компонентов в составе атмосферных выпадений в районе южного Байкала можно сказать, что основные изменения их состава произошли после строительства Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). До его введения в эксплуатацию концентрации сульфатов в снеговых и дождевых водах изменялись в пределах 0,6–0,8 мг/л, аммонийного азота — 0,02–0,07 мгN/л, нитратного азота — 0,005–0,009 мгN/л [4]. Период 1970–1980 гг. характеризуется максимальным развитием промышленности в регионе, ростом количества выбросов в атмосферу, загрязнением атмосферных выпадений и повышением концентраций отдельных компонентов [2, 3, 14].

В это время концентрации сульфатов в осадках достигали 3,6 мг/л, аммонийного азота — 0,07–0,18 мгN/л, нитратного азота — 0,05–0,12 мгN/л [5]. Накопление сульфатов в зоне влияния БЦБК оценивалось в 10 т/км<sup>2</sup> в год, минерального азота — до 2 т/км<sup>2</sup> в год [6]. По данным других исследователей, поступление с осадками нитратов в районе Байкальска в этот период равнялось 600 кг/км<sup>2</sup> в год. На ст. Хамар-Дабан оно составляло 340–400 кг/км<sup>2</sup> в год [14]. В пределах северо-западного склона Хамар-Дабана поступление веществ из атмосферы возрастает с высотой местности. На высоте 800–1200 м отмечено накопление сульфатов до 1,3 т/км<sup>2</sup> [15].

Последовавший в 1990-е гг. спад промышленного производства, а также переход на новые виды топлива и улучшение очистки выбросов обусловили некоторое снижение накопления исследуемых

Таблица 1

**Относительный рост выноса сульфатов и соединений азота притоками оз. Байкал с середины XX в.**

Река	Отношение современных величин выноса к оценкам [10]	
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub>
Снежная	1,85	1,65
Хара-Мурин	1,63	1,24
Утулик	1,98	1,25
Селенга	1,57	1,53
Баргузин	1,52	1,29
Верх. Ангара	2,29	1,73
Бол. Сухая	1,21	1,10
Солзан	1,35	1,80
Переменная	1,64	1,43

**Содержание и накопление сульфатов и минерального азота  
в снежном покрове на водосборах основных притоков  
южного Байкала (1997–2006 гг.)**

Бассейн реки	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Σ N
	мг/л	т/км <sup>2</sup>	мг/л		т/км <sup>2</sup>
Утулик	1,91	0,23	1,62	0,19	0,06
Солзан	11,77	1,47	1,91	0,19	0,08
Хара-Мурин	1,3	0,24	1,82	0,12	0,10
Снежная	1,29	0,19	1,82	0,12	0,07
Переменная	1,47	0,22	2,27	0,24	0,11
Мишиха	1,16	0,13	2,00	0,18	0,07

компонентов в снежном покрове [3], однако, по данным Росгидромета, в отдельные годы поток сульфатов из атмосферы (в районе Байкальска) остается значительным. Например, в 2001 г. он составил 11,6 т/км<sup>2</sup>. По данным прибрежных станций наблюдения этот участок побережья остается наиболее загрязненным выбросами БЦБК, что подтверждается составом снеговых вод. Так, в составе катионов, как и в 1970–1980-е гг., доля ионов натрия в отдельных случаях может достигать 21–29 %-экв [16].

Наиболее типичное соотношение анионов в осадках бассейна Байкала имеет вид HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup>, катионов Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>. В периоды же наибольших выбросов БЦБК изменяется соотношение как анионов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup>), так и катионов (Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup>) [3, 16].

В последние годы (1997–2006) концентрации сульфатов и минерального азота в снеговых водах (как и накопление этих веществ) на территории бассейнов рек Утулик, Солзан, Хара-Мурин, Снежная, Переменная и Мишиха изменялись в широких пределах (табл. 2). Постепенно происходят изменения в составе доминирующих анионов снеговых вод. В бассейнах рек Хара-Мурин, Снежная, Переменная и Мишиха в основном преобладает нитрат-ион, а в долинах рек Солзан и Утулик — сульфат. Эта специфика состава осадков в бассейнах, вероятно, связана с расположением главного источника загрязнения [6].

В силу орографических особенностей и циркуляционных условий на побережье озера уже на протяжении нескольких десятилетий долины рек представляют собой очаги локализации промышленных выбросов и накопления загрязняющих веществ в различных средах. Отмечено повышение концентрации сульфатов в почвах и растениях [17], которые при определенных условиях среды также служат дополнительными источниками азота и сульфатов в поверхностных водах.

Таким образом, полученные данные убедительно показывают, что под влиянием загрязненных атмосферных осадков на побережье южного Байкала происходит изменение условий формирования химического состава поверхностных вод. Установлено, что в речных водах увеличилось относительное содержание сульфатов и снизилось — гидрокарбонатов и кальция [16]. Наиболее существенные изменения относительного состава вод отмечены для рек Переменная и Хара-Мурин, имеющих крайне низкую минерализацию (11–42 мг/л). Небольшая буферная емкость и неустойчивость их вод к воздействию загрязняющих веществ вполне закономерны и характерны для водотоков с низкой минерализацией [18].

Повышение концентраций нитратного азота в воде притоков проявляется несколько слабее, но достаточно устойчиво, особенно в реках, удаленных от БЦБК (Снежная, Переменная и др.). Увеличение концентраций сульфатов и азота в речных водах фиксируется даже по водотокам сравнительно чистых (фоновых) территорий — р. Бол. Сухая (см. табл. 1), что может быть связано с глобальным загрязнением атмосферы [19].

Повышение абсолютных концентраций компонентов в воде рек привело к увеличению их выноса в озеро (см. табл. 1). К сожалению, сравнительный анализ по изменению выноса соединений азота реками проведен только по нитратному азоту, так как данные по аммонийному азоту в речных водах за 1950-е гг. в литературе отсутствуют.

Наиболее существенные изменения стока сульфатов отмечены для рек Утулик, Верх. Ангара, Снежная и Переменная, нитратов — для рек Верх. Ангара, Снежная и Солзан. Необходимо отметить, что фактическое увеличение стока сульфатов по р. Утулик было еще более значительным и связано не только с повышением концентраций этого иона в воде, но и с более высоким водным стоком реки в 1995–2004 гг., в то время как сток остальных исследованных рек южного Байкала был пониженным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные результаты показали, что увеличение выноса сульфатов и нитратного азота притоками оз. Байкал обусловлено повышением поступления этих компонентов на подстилающую поверхность в составе атмосферных выпадений и в русла рек с загрязненными стоками. Наиболее заметно влияние загрязненных атмосферных выпадений на небольшие водотоки с низкой минерализацией

вод, водосборы которых находятся в зоне воздействия крупных источников аэропромвыбросов. В Байкальской котловине такая территория расположена на обращенном к озеру северо-западном склоне хр. Хамар-Дабан, отличающемся высокой увлажненностью и наличием мощного источника загрязнений — БЦБК. Значительное поступление сульфатов и соединений азота из атмосферы в этом районе обусловило увеличение выноса данных компонентов в Байкал.

Для крупных рек с промышленно освоенными бассейнами основное количество рассматриваемых ингредиентов попадает в речную сеть в составе стоков от промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также коммунально-бытового сектора. Участие веществ, поступающих из атмосферы в составе сухого и влажного осаждения, в формировании химического состава вод значительно ниже.

Несмотря на относительный рост выноса сульфатов и нитратного азота притоками Байкала, в целом он оказывается несколько ниже соответствующих показателей их поступления из атмосферы, что говорит о некоторой инерционности в механизме перехода вещества в речные воды и накопления загрязнений на водосборах рек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голобокова Л. П. Разработка и реализация методик для исследования химического состава газовых примесей и атмосферного аэрозоля (на примере Байкальской природной территории): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Барнаул, 2004. — 19 с.
2. Нецветаева О. Г. Формирование химического состава вод притоков Южного Байкала в современный период: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск, 2004. — 22 с.
3. Ходжер Т. В. Исследование состава атмосферных выпадений и их воздействия на экосистемы Байкальской природной территории: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — М., 2005. — 44 с.
4. Вотинцев К. К. Химический состав вод атмосферных осадков Прибайкалья // Докл. АН СССР. — 1954. — Т. 45, № 5. — С. 979–981.
5. Вотинцев К. К., Ходжер Т. В. Химический состав атмосферных осадков в районе оз. Байкал // География и природ. ресурсы. — 1981. — № 4. — С. 100–105.
6. Оболкин В. А., Ходжер Т. В. Годовое поступление из атмосферы сульфатов и минерального азота в регионе оз. Байкал // Метеорол. и гидрол. — 1990. — № 7. — С. 71–76.
7. Сороковикова Л. М., Синокович В. Н., Коровякова И. В. и др. Особенности гидрохимического режима рек бассейна южного Байкала в условиях повышенного увлажнения // География и природ. ресурсы. — 2001. — № 4. — С. 54–59.
8. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 534 с.
9. Барам Г. И., Верещагин А. Л., Голобокова Л. П. Применение микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием для определения анионов в объектах окружающей среды // Аналит. химия. — 1999. — Т. 54, № 9. — С. 962–965.
10. Вотинцев К. К., Глазунов И. В., Толмачева А. П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. — М.: Наука, 1965. — 496 с.
11. Тарасова Е. Н., Мешерякова А. И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1992. — 144 с.
12. Сороковикова Л. М., Синокович В. Н., Голобокова Л. П., Чубаров М. П. Формирование ионного стока Селенги в современных условиях // Водн. ресурсы. — 2000. — № 5. — С. 560–565.
13. Синокович В. Н., Троицкая Е. С. Средний сток рек Байкальской котловины и его определение при недостаточности наблюдений // География и природ. ресурсы. — 2000. — № 4. — С. 60–64.
14. Валикова В. И., Матвеев А. А., Чебаненко Б. Б. Поступление некоторых веществ с атмосферными осадками в регионе озера Байкал // Совершенствование регионального мониторинга состояния озера Байкал. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. — С. 58–66.
15. Кокорин А. О., Полигов С. В. Поступление загрязняющих веществ из атмосферы с осадками в Южном Прибайкалье // Метеорол. и гидрол. — 1991. — № 1. — С. 48–54.
16. Сороковикова Л. М., Нецветаева О. Г., Томберг И. В. и др. Влияние атмосферных осадков на химический состав речных вод Южного Байкала // Оптика атмосферы и океана. — 2004. — № 5–6. — С. 423–427.
17. Массель Г. И., Швец М. М., Середкова С. В. Состояние пихтовых лесов байкальских склонов Хамар-Дабана // Лесопатологические исследования в Прибайкалье. — Иркутск, 1989. — С. 5–23.
18. Моисеенко Т. И. Закисление поверхностных вод Кольского Севера: Критические нагрузки и их превышения // Водн. ресурсы. — 1996. — Т. 23, № 2. — С. 200–210.
19. Galloway J. N. Acidification of the world: natural and antropogenic // Water, Air and Soil Pollution. — 2001. — Vol. 130, № 1/4. — P. 17–24.