

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Е.Н. Тарасова, А.А. Мамонтов, Е.А. Мамонтова

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск

e-mail: tarasova@igc.irk.ru

В водах Байкала, его притоках и атмосферных осадках систематическое исследование органического вещества по перманганатной и бихроматной окисляемостям, кремния, минеральных форм азота и фосфора проводилось с 1947 г. [Вотинцев, 1961; Вотинцев и др., 1965]. С 1964 г. исследования органического вещества и биогенных элементов были расширены и проведены под руководством Бориса Александровича Скопинцева во взвешенных и растворенных формах с одновременным определением суммарного взвешенного вещества, хлорофилла «а», органического углерода, азота и фосфора в атмосферных осадках, притоках озера, а также в водах Байкала [Тарасова, 1975; Тарасова, Мещерякова, 1992]. До этого времени были известны лишь единичные определения отдельных составляющих органического вещества в поверхностных водах озера. Так, органический углерод был определен Л.П. Крыловой и Б.А. Скопинцевым в 1959 г., в этом же году Т.В. Дышко и Б.А. Скопинцевым было определено содержание органического азота. После стажировки в лаборатории Бориса Александровича Скопинцева в Морском Гидрофизическом институте РАН Е.Н. Тарасовой были начаты исследования элементного состава органического вещества в Байкале. В 1975 г. вышла ее первая монография «Органическое вещество вод Южного Байкала», ответственным редактором которой был Б.А. Скопинцев. В книге впервые по таким показателям, как $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{орг}}$ и $P_{\text{орг}}$ охарактеризованы изменения содержания органических веществ (ОВ) по сезонам года, глубине и акватории Южного Байкала. Эти исследования сопровождалось определением обычных косвенных показателей ОВ – цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости, а также минеральных форм азота и фосфора. Для пересчета данных по перманганатной окисляемости даны расчетные коэффициенты. Величины отношений $C : N$, $C : P$, а также соотношений окисляемостей позволяют ориентировочно судить о природе ОВ. По вертикали же указанные отношения служат показателями трансформации ОВ во времени. Приводятся данные по содержанию ОВ во взвеси (по углероду) и суммарному количеству взвешенного материала в водах Байкала и главного притока озера – р. Селенге. Оценена доля фитопланктона в «урожайные» и «неурожайные» годы во взвешенном ОВ. Вычислено процентное содержание взвешенного углерода в общем количестве ОВ и в общем количестве взвеси.

С 1975 по 1980 г. проводятся экспериментальные исследования по степени устойчивости органического вещества как аллохтонных (сточные воды, атмосферные осадки), так и автохтонных (доминирующие в Байкале водоросли – *Aulacoseira baicalensis*, *Synedra arcus*, *Gymnodinium*) источников водного гумуса.

С 1981 г. исследования по балансу органического вещества и биогенных элементов проводятся параллельно с изучением компонентов ионного состава совместно с К.К. Вотинцевым, что позволило показать на примере многолетних исследований гидрохимических компонентов не только тренд их изменений, но и возможность прогнозировать состояние водных экосистем с точки зрения как еутрофирования, так загрязнения их вод.

Для решения этих задач в водных экосистемах озера Байкал является прекрасным модельным объектом. Этому способствует его уникальность (глубина, высокое содержание кислорода до дна, весеннее развитие почти чистых диатомовых водорослей в пелагиали озера, уникальное биоразнообразие и др.); население на берегах озера малочисленно; промышленность развита слабо: фактически только целлюлозно-бумажный комбинат, расположенный на берегу Байкала в г. Байкальске (БЦБК), на главном притоке Байкала – Селенге работает целлюлозно-картонный комбинат (СЦКК); и, наконец, хорошая комплексная изученность экосистемы с 1950-х гг.

Особое внимание было уделено правильному пробоотбору (время суток и месяца отбора, требования к посуде для хранения воды и др.). Именно отбор проб может внести значительно большую ошибку, чем сам анализ.

По сравнению с 1950-ми гг. в 1980–1990-х гг. увеличилось поступление в озеро с притоками и атмосферными осадками сульфатов, хлоридов и органического вещества (отметим, что периоды были близки по водному стоку).

Совместно с Гидрометом по заданию президента АН СССР А. Александрова в 1986 г. была проведена оценка влияния хозяйственной деятельности человека на озеро Байкал. В воды озера ежегодно в результате хозяйственной деятельности поступает 409 тыс. т минеральных веществ, в том числе 27,2 тыс. т хлоридов, 162 тыс. т сульфатов. Наибольшую нагрузку от результатов хозяйственной деятельности испытывает Южный Байкал, где поступление веществ антропогенного происхождения на единицу площади превышает аналогичную величину для Северного и Среднего Байкала: по сульфатам – в 5,2 раза, по хлоридам – в 3,9 раза [Галазий и др., 1987]. Сточные воды и атмосферные выбросы БЦБК вносят в южную часть 29,1 % минеральных веществ, в том числе 39 % сульфатов и 55 % хлоридов, от общего количества поступающих в озеро от антропогенных источников. При условии равномерного поступления веществ в озеро Байкал указанная антропогенная нагрузка увеличит среднегодовые величины минеральных веществ на 1,78 мг/л, сульфатов – на 0,75 мг/л, хлоридов – на 0,12 мг/л, что находится в пределах точности измеряемых компонентов. Казалось бы, можно сделать вывод, что изменение химического состава байкальских вод обнаружить в настоящий период не представляется возможным. На самом же деле своеобразие динамики водных масс (опускание верхней зоны вод в нижнюю и наоборот), впервые отмеченное В.А. Толмачевым [1957], приводит к тому, что химический состав Байкала неоднороден и непостоянен, вследствие чего в отдельные сезоны года на отдельных горизонтах (включая и глубинные) можно обнаружить загрязненные воды. Именно благодаря этому явлению на основе многолетних исследований компонентов ионного состава, в том числе сульфатов, в водах глубоководной станции Южного Байкала – 12 км от м. Половинного (20 км от Байкальска) – показано влияние сточных вод БЦБК. По содержанию сульфатов в водах данной станции Южного Байкала период многолетних исследований можно характеризовать как:

- период естественного состояния озера – до 1967–1968 гг. Среднегодовая концентрация сульфатов в глубоководной части Южного Байкала ($3,9 \pm 1,2$ мг/л) определялась содержанием указанного компонента в самом многоводном в этом районе озера притоке Снежной (3,8 мг/л);
- период слабого антропогенного воздействия до 1986 г. Среднегодовая концентрация SO_4^{2-} – $4,6 \pm 0,6$ мг/л. Повышенные величины сульфатов обнаружены зимой на глубине 50–100 м. Напомним, что спуск сточных вод БЦБК в озеро производится на глубину 40 м;
- период сильного антропогенного воздействия – 1986–1987 гг. ($6,5 \pm 2,2$ мг/л). Поступление вод с высоким содержанием сульфатов (свыше 10 мг/л) в глубоководную часть озера шло как с поверхности, так и непосредственно в глубинные горизонты.

Именно в 1986 г. наблюдались отложения волокон целлюлозы на берегах Байкала (у п. Максима и Катково), на полуострове Святой нос и Ушканьих островах [Агафонов и др., 1995]. В 1987 г. отмечена массовая гибель нерпы. В экосистеме озера произошли изменения: нарушена цикличность развития весеннего диатомового фитопланктона – *Aulacoseira baicalensis*; понизилась численность зоопланктона – рачка *Epishura baicalensis*, уменьшились темпы роста и ухудшились физиологические характеристики байкальских рыб. Так, средний вес омуля по сравнению с 1960-ми гг. уменьшился в 2 раза (Настоящее и будущее..., 1996); в водной толще глубоководной части озера найдены в огромной массе нехарактерные для глубоководной части озера бентосные формы диатомовых водорослей *Achnanthes minutissima* [Кожова, Кобанова, 1994].

Биологический мониторинг прибрежной части озера у п. Б. Коты показал, что в 1990-е гг. резко изменилась роль видов планктонных водорослей в круговороте вещества и энергии [Кожова и др., 2000]. Стали активно вегетировать виды, которые ранее не учитывались или биомасса их была крайне мала: пикоцианобактерии – *Synechocystis limnetica*, *Romeria* sp. и др. [Поповская, Белых, 2003]. Исследования азотфиксирующих цианобактерий, таких как *Anabena* и *Gloeotricbia*, проведенные японскими и российскими учеными в Байкале летом 1992–1995 гг., дали основание сделать вывод о том, что Байкал потенциально эвтрофируется [Watanabe, Drucker, 1999].

В этот же период в глубоководной части вод южной части озера было найдено:

- эпизодическое появление аммонийного и нитритного азота как в трофогенном слое, так и в

глубинных горизонтах (ранее даже в период максимального развития фитопланктона они не обнаруживались и в трофогенном слое);

– начиная с 1986 г. в водах открытого Байкала обнаружены органические агрегаты, образованные на основе коллоидных частиц, поступающих со сточными водами БЦБК, тогда как ранее вода озера представляла собой «истинный раствор» даже в периоды массового развития планктонных организмов;

– нарушены закономерности сезонных изменений содержания взвеси, хлорофилла «а», органических форм углерода, азота и фосфора (вместо двух четко выраженных максимумов и двух минимумов их концентраций наблюдаются повышенные их величины в течение всего периода открытой воды);

– значительно увеличилось в 1986–1988 гг. по сравнению с 1968–1969 гг. среднегодовые величины концентрации взвешенного органического углерода как в общем количестве взвеси (в 5,75 раза), так и в общем количестве органического углерода (в 3 раза), а также азота (в 5 раз) и фосфора (в 3 раза);

– нарушена закономерность вертикального распределения содержания минеральных и органических форм азота и фосфора. Если до строительства БЦБК Байкал представлял из себя поистине природную лабораторию минерализации органического вещества планктонных организмов по вертикали, то в 1986–1989 гг. на горизонтах глубже 100 м наблюдалось синхронное изменение органических и минеральных форм азота и фосфора;

– и, наконец, обнаруженная обратная корреляция между зимним содержанием азота и весенней концентрацией хлорофилла «а» в 1986–1989 гг. свидетельствует о наличии токсикантов в озере, а увеличение содержания сульфатов в этот период – об их поступлении со сточными водами БЦБК. Это положило начало изучению стойких органических загрязнителей – полихлорированных дибензо-пара-диоксинов (ПХДД), дибензофуранов (ПХДФ) и бифенилов (ПХБ) в биоте озера и почве бассейна озера [Мамонтов, 2001; Мамонтова, 2001], что отражено в другом сообщении.

В 2004 г. нами продолжены наблюдения компонентов трофического статуса в пелагиали Южного Байкала. Мы на основе анализа систематических данных компонентов трофического статуса, полученных с 1965 по 2005 г., попытались оценить современный трофический статус пелагиали озера, изучить тренд их многолетних изменений и понять причины нарушения цикличности весенних диатомовых водорослей, развитие которых является благоприятным для любого водоема. Анализ величин атомных отношений биогенных элементов в зимний период, который определяет развитие весенних водорослей, показал, что развитие *Aulacoseira baicalensis* лимитируется кремнием и фосфором (отношение больше 90) [Тарасова, Мещерякова, 1992]. Развитие *Synedra acus* возможно при $Si : P$ меньше 70. При промежуточном отношении $Si : P = 70-90$ в зимнее время возможно совместное развитие указанных водорослей весной. Но, несмотря на оптимальные величины отношений биогенных элементов для развития *Aulacoseira baicalensis* зимой 1986 г., развитие этой водоросли весной 1987 г. не было отмечено. Обратная зависимость весенней концентрации хлорофилла «а» от зимних величин содержания азота в трофогенном слое Южного Байкала в 1986–1987 гг. (–0,78 при ошибке 10 %, числе пар 98) позволила высказать предположение о том, что нарушение цикличности развития *Aulacoseira baicalensis* связано с присутствием в водах токсичных веществ.

Содержание общего количества взвеси, кремния, нитратного азота и $C_{орг}$ в нефльтрованной воде в 2004–2005 гг. уменьшилось, так как снизилась доля крупных диатомовых водорослей, а возросла численность мелких цианобактерий. Развитие последних в большей степени лимитируется азотом, нежели фосфором, в периоды их развития найдены низкие величины минеральных форм $N : P = 9-10$. Содержание $P_{мин.}$ в нефльтрованной воде практически не изменилось. Количество $P_{орг.}$ было на том же уровне, как и в 1986–1989 гг., но выше, чем в период развития крупных форм диатомовых водорослей. Заметно возросло содержание $N_{орг.}$ во взвеси, причина, по-видимому, в массовом развитии азотфиксирующих цианобактерий. Восстановление прежних закономерностей по сезонам в распределении углерода, азота и фосфора после 1986 г. не произошло: наблюдается одновершинный пик максимума (в июле) и минимума (в декабре) в содержании их органических форм. Восстановление прежних закономерностей вертикального распределения содержания минеральных

и органических форм азота и фосфора в 2004–2005 гг. также не произошло: на горизонтах глубже 100 м наблюдалось синхронное изменение органических и минеральных форм азота и фосфора. Наблюдаемые повышенные содержания органического вещества в глубинной области обусловлены согласно достоверной корреляции между взвешенным веществом и хлорофиллом «а» на горизонтах 0 ($r = 0,67$), 400 ($r = 0,41$), 900 ($r = 0,64$) и 1100 ($r = 0,85$) м тем, что поступление загрязняющих веществ происходит с поверхности. Повышенное содержание сульфатов (до 6,2–6,9 мг/л) на этих горизонтах дает основание предполагать, что это поступление идет со сточными водами БЦБК. Причина такого явления – своеобразие динамики водных масс.

О том, что в настоящее время в водах Южного Байкала находятся токсиканты, можно судить по обратной корреляции между зимней концентрацией азота в 2004 г. и весенним содержанием хлорофилла «а» в 2005 г. в районе м. Толстого ($-0,96$) и у Б. Котов ($-1,00$). Действительно, в настоящее время достаточно полно исследовано и найдено высокое содержание диоксинов и родственных соединений в биоте Байкала.

Каждое озеро имеет свое стехиометрическое атомное отношение С : N : P, которое может служить показателем трофности водоема. Экспериментально найдено, что сообщества зеленых мелких клеток водорослей имеют эти отношения 40 : 7 : 1, для больших диатомовых водорослей: 318 : 40 : 1. Действительно, в оз. Мичиган С : N : P = 780 : 54 : 1, а в эвтрофном оз. Эри оно было 76 : 11 : 1. В пелагиали оз. Байкал изменение стехиометрического атомного отношения С : N : P во взвеси от 200 : 16 : 1 в 1983–1984 гг., 107 : 31 : 1 в 1986–1988 гг. до 79 : 31 : 1 в 2004–2005 гг. свидетельствует о повышении уровня трофности озера. Судя по критериям, принятым исследователями [Forsberg, Ryding, 1980], по которым водоем можно отнести к эвтрофному: прозрачность по диску Секки – не более 2 м (в пелагиали Байкала она не понижается менее 5 м), содержание хлорофилла «а» – до 20 мкг/л (по нашим данным величины хлорофилла «а» достигали максимума 11,5 мкг/л только в июле на горизонте 5 м, в среднем за год – 0,40 мкг/л), общий фосфор – 20 мкг/л (в Байкале увеличение общего фосфора с 1967 по 2004–2005 гг. составляло от 15 до 19 мкг/л), азот общий – 600 мкг/л (в Байкале – 180 мкг/л), пелагиаль оз. Байкал не может быть отнесена к эвтрофному водоему. Вода озера остается пока достаточно чистой, но тенденция повышения трофности озера явно прослеживается.

Многолетние исследования хлорофилла «а», органического вещества и биогенных элементов в водах Байкала в разные периоды антропогенного воздействия и в годы массового развития эндемичных водорослей; анализ изменчивости атомных стехиометрических величин отношений С : N : P; зависимость содержания биогенных элементов зимой от весенней концентрации хлорофилла «а» позволили предсказать нахождение токсикантов в водах озера, развитие того или иного вида фитопланктона и, наконец, уровень трофического статуса озера. Те изменения, что произошли в экосистеме озера, можно представить так: токсиканты (диоксины и родственные им соединения) в озере, которые в подледный период, в основном, поступают в трофогенный слой (согласно разной температуре сточных вод и вод озера), способствуют угнетению развития эндемичных весенних диатомовых водорослей. После вскрытия ото льда с увеличением ветрового перемешивания содержание токсикантов в трофогенном слое уменьшается, величины отношений биогенных элементов достигают оптимальных величин для развития пикоцианобактерий, что и приводит к повышению уровня трофности озера.

Проведенные исследования показывают, что для приостановления процесса увеличения трофности пелагической части оз. Байкал необходимо прекращение сброса токсичных сточных вод БЦБК в воды озера, для чего необходим переход работы комбината на замкнутый цикл. Контроль за состоянием экосистемы озера должен быть постоянным согласно комплексному систематическому мониторингу как компонентов ионного состава и компонентов трофического статуса, так и диоксинов и родственных соединений в биоте озера, содержание которых уже сейчас является небезопасным как для самой экосистемы озера, так и для здоровья человека при потреблении байкальской рыбы [Мамонтова, 2001].

Учитывая достаточно большое влияние хозяйственной деятельности человека на экосистему оз. Байкал, для принятия мер для сохранения уникальной системы озера необходимо продолжить химический мониторинг, обратив особое внимание на отбор проб воды (не реже одного раза в месяц) и методы анализа. Среди макрокомпонентов химического состава следует обязательно определять сульфаты. Чтобы оценить тренд химических компонентов, следует определение производить в не-

фильтрованной воде. Объектом мониторинга диоксинов и родственных соединений в экосистеме озера может служить голомянка.

Огромное влияние, глубокая заинтересованность, ценные советы и предложения по исследованию Байкала Б.А. Скопинцева вдохновили авторов на проведение настоящих исследований. Серьезная поддержка в выполнении настоящей работы получена от Г.И. Галазия, которому в этом году 5 марта исполнилось бы 90 лет, и М.И. Кузьмина.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 04-05-64870, 07-05-00697, 10-05-00663, INTAS 2000-00140, фонда Макартуров.

Литература

- Агафонов Б.П., Кузьмин В.А., Снытко В.А., Тарасова Е.Н. Одно из свидетельств техногенного давления на геосистему Байкала // География и природ. ресурсы. 1995. № 2. С. 179–181.
- Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал // Тр. Байкал. лимнол. ст. АН СССР. 1961. Т. 20. 311 с.
- Вотинцев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал // Тр. ЛИН СО АН СССР. 1965. Т. 8 (28). 495 с.
- Галазий Г.И., Линевиц А.А., Тарасова Е.Н. и др. Современное состояние экосистемы озера Байкал // Состояние и перспективы развития методологических основ химического и биологического мониторинга поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону, 1987. С. 115.
- Дышко Т.В., Скопинцев Б.А. Содержание органического азота в водах рек и озер Подмосковья и крупных рек Советского Союза // Гидрохим. материалы. 1959. Т. 28.
- Кожова О.М., Кобанова Г.И. Аномальное явление в структуре фитопланктона Байкала // Оценка состояния водных и наземных экологических систем. Новосибирск: Наука, 1994. С. 24–29.
- Кожова О.М., Измestьева П.Р., Павлов Б.К. и др. Методология оценки состояния экосистем. Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Изд-во ЦВВР, 2000. 128 с.
- Крылова Л.П., Скопинцев Б.А. Содержание органического углерода в водах рек и озер Подмосковья и крупных рек Советского Союза // Гидрохим. материалы. 1959. Т. 28.
- Мамонтов А.А. Полихлорированные дибензо-пара-диоксины и родственные соединения в экосистеме озера Байкал. М.: Академия наук о Земле, 2001. 68 с.
- Мамонтова Е.А. Гигиеническая оценка загрязнения диоксинами и родственными соединениями окружающей среды Иркутской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 141 с.
- Настоящее и будущее Байкальского региона (возможности устойчивого развития). Часть 1: Природный комплекс. Новосибирск: Студия Дизайн ИНФОЛИО, 1996. 112 с.
- Поповская Г.И., Бельх О.И. Этапы изучения автотрофного текопланктона озера Байкал // Гидробиол. журн. 2003. Т. 39, № 6. С. 12–24.
- Тарасова Е.Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 148 с.
- Тарасова Е.Н., Мещерякова А.И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1992. 144 с.
- Толмачев В.А. Некоторые гидрохимические показатели внутреннего водообмена в Байкале // Докл. АН СССР. 1957. Т. 113, № 3. С. 1011–1013.
- Forsberg C., Ryding S.O. Eutrophication parameters and trophic state in 30 Swedish waste-receiving lakes // Archiv fur Hydrobiologie. 1980. Vol. 89. P. 180–207.
- Kilham S.S. Relationship of Phytoplankton and Nutrients to Stoichiometric Measures // Large Lakes. Ecological Structure and Function / Eds. Max M. Tilzer, Colette Serruya. Springer-Verlag, 1990. P. 403–413.
- Watanabe Y., Drucker V.V. Phytoplankton blooms in Lake Baikal, with reference to the Lake's present state of eutrophication // Ancient Lake: their Cultural and Biological Diversity / Eds. H. Kavanabe, G.W. Coulter and A.C. Roosevelt. 1999. P. 217–225.

ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В ВОДЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

В.М. Домышева, М.Н. Шимараев, М.В. Сакирко, Н.А. Онищук

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

e-mail: hydrochem@lin.irk.ru

Озеро Байкал, расположенное в Восточной Сибири, является самым древним (25 млн лет), глубоким (1637 м) и крупным (23 тыс. км³) резервуаром чистой, пресной воды на планете. Озеро внесено в список Участков Мирового Наследия и имеет важное стратегическое значение как крупнейший источник питьевой воды. Тенденция увеличения концентрации углекислого газа в