

К. К. ВОТИНЦЕВ, Г. И. ПОПОВСКАЯ

## ОСОБЕННОСТИ БИОТИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

(Представлено академиком С. С. Шварцем 18 II 1974)

Озеро Байкал и его бассейн находятся в условиях резко континентального климата (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>). Годовая амплитуда температур воздуха в бассейне Байкала достигает 70°. Господство антициклональных условий в зимний период делает его продолжительным и холодным. Среднесуточные отрицательные температуры воздуха держатся до мая. Лето относительно прохладное, нередки заморозки, особенно в высокогорных районах. Наибольшей континентальностью отличается климат Байкало-Становой области, приближающейся к холодным частям Якутии. Близок к нему и климат Забайкалья.

Благодаря огромной водной массе, климат котловины Байкала несколько более мягок. Однако гидрологический режим самого озера суров. Воды Байкала за лето не успевают хорошо прогреться. Температура воды в период максимального прогрева не поднимается в удаленных от берегов участках озера на поверхности выше 15—16°, а обычно бывает еще ниже. Снижаясь с глубиной, она на 25 м не поднимается выше 7—9°, а на 250—300 м составляет в течение круглого года 3,6—3,8°, опускаясь на максимальных глубинах до 3,0°. Суровый климат и связанный с ним температурный режим Байкала не могут не оказывать влияния на биологические процессы, протекающие как в толще воды, так и в донных отложениях озера. С другой стороны, большая прозрачность атмосферы над Байкалом, большое число солнечных дней в году, а также высокая прозрачность воды и льда при относительно тонком снеговом покрове на льду зимой и наличии больших площадей, вообще лишенных снега, также имеют значение при формировании биотического круговорота в Байкале.

В Лимнологическом институте проводятся широкие исследования биологической продуктивности Байкала и влияния на его природные комплексы хозяйственной деятельности человека. Полученные новые данные позволили вскрыть главнейшие особенности биотического круговорота в Байкале.

Одним из важнейших условий, сформировавших биом Байкала, следует признать необычайно большие размеры и глубины озера и его огромную водную массу. Благодаря этому, несмотря на суровость климата, Байкал очень поздно замерзает (в южной части в половине января). Позднее замерзание озера при частых сильных осенних штормах обеспечивает хороший вертикальный водообмен, захватывающий все слои воды до дна. В результате, глубинные слои воды Байкала насыщаются растворенным кислородом, а запасы соединений биогенных элементов, накопленные в глубинной зоне озера, поднимаются в верхнюю фотическую зону, обогащая ее.

Оптимальное сочетание абиотических условий в зоне фотосинтеза привело в процессе длительного эволюционного развития к становлению в Байкале комплекса видов фитопланктона, развивающегося в массе зимой подо льдом. Начало вегетации видов указанного комплекса приурочено

к концу февраля — первой половине марта. Оно продолжается до вскрытия озера ото льда и завершается бурной вспышкой развития в мае — июне. Массовая вегетация этих водорослей происходит при температурах воды в трофогенном слое подо льдом, близких к  $0^{\circ}$ . При этом водоросли усваивают достаточно большой процент падающей на поверхность ледяного покрова солнечной радиации. Например, мелозира в отдельные дни может усваивать до 0,5%, а гимнодиниум — до 3,0% суммарной суточной солнечной радиации, падающей на ледяной покров. В соответствии с этим суточные П/Б коэффициенты достигают у гимнодиниума до 1,3.

Нельзя не отметить значительную мощность трофогенного слоя Байкала — летом до 25—30 м, а также то, что процесс фотосинтеза протекает здесь до глубин 60—70 м, некоторые же виды донных водорослей обитают до глубин 115 м (3).

Важной особенностью биотического круговорота в Байкале, обусловленной также оптимальным сочетанием абиотических факторов, является высокая величина первичной продукции в расчете на  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности озера — в среднем  $127 \text{ г } C_{\text{орг}}$  в год. Таким образом, в суровых гидрологических условиях ультраолиготрофного водоема уровень первичного продуцирования органического вещества приближается к его значениям для мезотрофных водоемов.

Не менее важным фактором, в результате которого сформировалась эндемичная флора и фауна Байкала, является большая древность этого водоема, стабильность условий среды и масштабы протекающих в нем процессов.

Древность Байкала и его огромные размеры обуславливают, в частности, стабильность ионного состава воды, относительное постоянство сезонных и межгодовых изменений содержания ряда биогенных элементов и микроэлементов, а также органического вещества в толще вод. Большие глубины обеспечивают минерализацию значительной доли органического детрита еще в толще вод, благодаря чему в донных осадках озера содержание органического вещества оказывается весьма невысоким. Это обстоятельство, в свою очередь, приводит к тому, что и поступление из донных отложений продуктов распада органических веществ в водные массы озера оказывается небольшим.

Следовательно, в отличие от обычных мелководных озер, в которых донные отложения играют большую роль в формировании химического состава воды, в Байкале их значение невелико.

Аллохтонное органическое вещество, поступающее в Байкал с водами его притоков, напротив, имеет несравненно большее значение. Несмотря на то, что по отношению к автохтонному органическому веществу, создаваемому в Байкале главным образом в результате жизнедеятельности фитопланктона, оно составляет около 10%, тем не менее за счет этого источника Байкал ежегодно получает 12,3 тыс. т минерального и 23,8 тыс. т органического азота и 1,3 тыс. т минерального и 4,2 тыс. т органического фосфора. Общее же количество органического вещества, вносимого с водами рек, в пересчете на  $C_{\text{орг}}$  составляет 300 тыс. т в год. Из этого количества до 100 тыс. т  $C_{\text{орг}}$  вносится в озеро в форме взвешенных органических остатков, а также водорослей. Количество последних составляет до 59,2—76,5 тыс. т сырого веса или 1,5—1,9 тыс. т  $C_{\text{орг}}$ .

Баланс органического вещества в Байкале показывает, что в среднем в течение года в озеро вносится последнего в 4 раза больше, чем выносится с водами р. Ангары — единственного стока из озера (4). Этот фактор имеет большое значение в накоплении соединений биогенных элементов в толще вод Байкала. Действительно, если учесть, что в течение года в Байкал с водами его притоков поступает в среднем 36,1 тыс. т азота в его минеральных и органических соединениях и 5,5 тыс. т фосфора, выносится же соответственно 17,9 и 2,3 тыс. т, то в озере ежегодно накапливается 18,2 тыс. т азота и 2,3 тыс. т фосфора (табл. 1).

Общие запасы минеральных и органических соединений азота в толще вод Байкала по нашим подсчетам составляют в настоящее время 7308 тыс. т, фосфора — 725 тыс. т. Если принять, что баланс указанных биогенных элементов в прошлом был аналогичен современному, то для накопления ныне содержащегося в толще вод озера количества азота потребовалось около 400 лет, фосфора 226 лет. Несоответствие периодов накопления азота и фосфора объясняется, вероятно, седиментацией части фосфора из вод озера в форме нерастворимых фосфорсодержащих минералов, в частности фосфорнокислого железа. Нетрудно подсчитать, что

Таблица 1

Баланс минеральных и органических соединений азота и фосфора в оз. Байкал (тыс. т в год)

Компонент	Мин	Орг	Сумма	Мин	Орг	Сумма
Поступает в Байкал	12,3	23,8	36,1	1,3	4,2	5,5
Вносятся из Байкала	8,0	9,9	17,9	1,1	1,2	2,3
Остается в Байкале	4,3	13,9	18,2	0,2	3,0	3,2

в этом случае в течение года в донные отложения Байкала переходит в среднем 1,4 тыс. т фосфора в его минеральных и органических формах. Весьма интересно, что время накопления в Байкале современных запасов соединений азота хорошо согласуется со средним периодом водообмена в этом озере<sup>(5)</sup>, оцениваемым также в 400 лет.

Иначе складывается в Байкале круговорот кремния. За счет питающих озеро вод в Байкал ежегодно поступает 631 тыс. т двуокиси кремния. С водами р. Ангары выносятся 136 тыс. т этого компонента. Следовательно, в Байкале ежегодно накапливается 495 тыс. т двуокиси кремния. Это огромное количество, как показывают исследования, не остается в толще вод озера в растворенном состоянии. Потребляясь диатомовыми водорослями, кремний после отмирания последних увлекается в форме их створок в донные отложения, где и захороняется. Изучение динамики байкальского фитопланктона показывает, что, в зависимости от урожая диатомей, в донные отложения озера ежегодно переходит от 400 до 800 тыс. т двуокиси кремния. Этот процесс обеспечивает низкое содержание кремния в водах Байкала — от 2,3 мг/л в поверхностных слоях воды до 5,0 мг/л на максимальных глубинах озера при среднем содержании двуокиси кремния в питающих Байкал водах около 9,5 мг/л. Если бы в Байкале не происходило седиментации кремния, то его современные запасы в толще вод могли бы сформироваться всего за 60 лет.

Ранее<sup>(6)</sup> было показано, что в современную эпоху скорость осадко-накопления, вычисленная по балансу кремния в Байкале, составляет 4,2 см в 1000 лет. Нетрудно подсчитать, что при современной скорости седиментации Байкал будет заполнен осадками лишь через 18—20 млн лет.

Следует отметить также и то, что, несмотря на низкие температуры воды, процесс деструкции органического вещества протекает в Байкале с большой интенсивностью. В течение первого года деструкции подвергается до 75% от суммарного органического вещества (автохтонного и аллохтонного), поступающего в озеро в течение года. Исключая небольшую долю его, подвергающуюся седиментации и захороняющуюся здесь, — около 1,5—2,3 г/м<sup>2</sup> или 2,8% за год, остальная масса его деструктируется в последующие 5—6 лет. Таким образом, в Байкале наблюдается подвижное равновесие между поступлением и деструкцией органического вещества. В среднем многолетнем аспекте процессы деструкции даже преобладают над процессами накопления органического вещества. Для обеспечения разложения его требуется 354 г О на 1 м<sup>2</sup> поверхности озера в

год. За счет фотосинтеза фитопланктона Байкал получает 338 г О на 1 м<sup>2</sup> поверхности озера в год. Следовательно, за счет атмосферной аэрации на деструкцию органического вещества ежегодно должно затрачиваться 16 г О на 1 м<sup>2</sup>.

Увеличение поступления органического вещества в Байкал, происходящее в настоящее время главным образом за счет хозяйственной деятельности человека, ведет к дополнительному накоплению в нем устойчивых к окислению соединений. Такое накопление может явиться причиной нарушения баланса органического вещества.

В отличие от многих других озер, в Байкале большую часть года наблюдается лишь слабое температурное расслоение водных масс. Это обеспечивает хорошую перемешиваемость всех слоев воды и пополнение трофогенного слоя биогенными элементами. Только в летний период, в августе — начале сентября, когда температурный скачок оказывается выраженным наиболее отчетливо, верхние слои воды озера оказываются более изолированными от нижележащих слоев. Именно в это время трофогенный слой озера обедняется минеральными соединениями биогенных элементов, активно потребляемых летним фитопланктоном. Нитратный азот при этом полностью или почти полностью исчезает из верхнего 10—25-метрового слоя воды, а фосфатный фосфор присутствует лишь в количествах 2—3 мг/м<sup>3</sup>.

История становления современной экосистемы Байкала складывалась в условиях взаимной изоляции эндемичной фауны этого озера и фауны общепалеарктической. Это привело к созданию экологического барьера и так называемой «несмешиваемости» обеих указанных фаун. В результате виды современной палеарктической фауны, за немногими исключениями, не живут в открытых районах Байкала, а эндемичные байкальские виды — за пределами этого озера. Это обстоятельство привело к формированию в Байкале своеобразных экологических комплексов и обусловило массовое развитие лишь относительно небольшого числа видов растений и животных. Весьма важно, что при этом в Байкале создались такие высоко специализированные экологические группировки, которые обеспечивают очень высокий процент утилизации энергии в трофической цепи. Особенно резко это проявляется в экосистеме пелагиали озера, где степень утилизации энергии составляет на каждом трофическом уровне 25—30% продукции нижестоящего трофического звена, а на последнем трофическом уровне — голомянка — пера — еще более (7, 8). Такая хорошая сбалансированность, несомненно, является результатом длительной эволюции биома пелагиали озера. Поэтому можно ожидать, что всякие нарушения установившегося баланса могут отрицательно сказаться на всей экосистеме Байкала.

Лимнологический институт  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Лиственичное Иркутской обл.

Поступило  
25 I 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. П. Алисов, Климат СССР, М., 1956. <sup>2</sup> Н. И. Михайлов, Горы Южной Сибири, М., 1961. <sup>3</sup> Г. И. Поповская, А. П. Скабичевский, ДАН, т. 181, № 3 (1968). <sup>4</sup> К. К. Вогинцев, Г. И. Поповская, Круговорот вещества и энергии в озерах и водохранилищах. Третье совещание, 2—8 сентября 1973 г. Краткое содержание докладов, Сборн. 1, 1973. <sup>5</sup> Г. Ю. Верещагин, Байкал, М., 1949. <sup>6</sup> К. К. Вогинцев, И. В. Глазунов, А. П. Толмачева, Тр. Лимнол. инст. СО АН СССР, т. 8 (28) (1965). <sup>7</sup> К. К. Вогинцев, В. Д. Пастухов, Г. И. Поповская, ДАН, т. 184, № 5 (1969). <sup>8</sup> К. К. Вогинцев, Зоол. журн., т. 50, в. 2 (1971).