

**ОЦЕНКА ВКЛАДА ПЛАНКТОНОВ В ФОРМИРОВАНИЕ
СЕДИМЕНТАЦИОННОГО ПОТОКА В ОЗЕРЕ КОТОКЕЛЬ
(ВОСТОЧНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)**

Р.Е. Романов¹, Н.И. Ермолаева²

¹*Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, ул. Золотодолинская, 101.
Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: romanov_r_e@ngs.ru*

²*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Новосибирский филиал,
пр. Морской, 2, Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: hope@iwep.nsc.ru*

Работа посвящена определению уровня биологической продуктивности озера Котокель, выявлению состава и биомассы доминирующих видов – основных продуцентов органического вещества (фито- и зоопланктона, макрофитов) и оценке интенсивности осадения планктона и растительного детрита для характеристики гидробиологических условий формирования донных отложений в озере в настоящее время. Показано, что вклад биотической составляющей в седиментационный поток составляет примерно 8,7 %.

**ASSESSING THE CONTRIBUTION OF PLANKTON IN SEDIMENTARY FLUX
FORMATION IN LAKE KOTOKEL (EASTERN BAIKAL REGION)**

R.E. Romanov¹, N.I. Yermolaeva²

¹*Central Siberian Botanical Garden, SB RAS, 101 Zolotodolinskaya Str.,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: romanov_r_e@ngs.ru*

²*Institute for Water and Environmental Problems, Novosibirsk Department, SB RAS,
2 Morskoy Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: hope@iwep.nsc.ru*

The level of the biological productivity of the Lake Kotokel, composition and biomass of dominant species of the main organic matter producers (phytoplankton, zooplankton and macrophytes) were determined for plankton and plant detritus precipitation intensity assessment as a hydrobiological characteristic of the present formation conditions of lake sediments. It is shown that the contribution of biotic component in the sedimentary flux is approximately 8.7 %.

Сапропель – это органико-минеральные донные отложения пресноводных водоемов. Во всем мире сапропели являются объектом детальных исследований таких фундаментальных направлений как биологическое, экологическое, химическое, геологическое, технологическое. Сложность их строения и происхождения объясняет многообразие классификаций и типологических характеристик сапропелей. Исходным сапропелообразующим материалом в водоемах служат остатки водных организмов – планктона, бентоса, макроскопических водорослей и высших водных растений, а также поступающие с водосбора органические и минеральные вещества (Остроумов, Колесов, 2010). Химический состав иловых донных отложений сложен, разнообразен и включает продукты трансформации автохтонных и аллохтонных веществ (Никаноров, Страдомская, 2006). Для понимания формирования группового и компонентного состава природных органических и минеральных веществ сапропелей необходимы исследования седиментационных процессов. Для территории Российской Федерации характерен процесс интенсивного образования

сапропелевых отложений в озерах, причем для многих водоемов он приобретает прогрессирующий характер. Примером такого водоема может служить озеро Котокель.

Озеро Котокель (в литературе также Котокельское, реже – Катакел) является одним из крупных в Забайкалье и самым большим по площади в Прибайкалье. Озеро расположено между устьями рек Турка и Кика вдоль восточного побережья Байкала, имеет длину 15 км и ширину 6 км, среднюю глубину 4,0–4,5 м, объем воды 281 км³; сезонные и многолетние колебания уровня не превышают 1 м, условный водообмен равен 6 годам (Озеро..., 2013). В озеро впадают около 20 ручьев и ключей – Черемуховый, Мостовой, Голый и другие. Вытекает одна река Исток, впадающая в реку Каточик (Хаптанов, Башкуев и др., 2013).

Мелководность озера способствует значительному прогреванию воды в летний период. Согласно опубликованным данным, температура воды в озере может достигать 25–26 °С. В связи с постоянным ветровым перемешиванием водных масс заметной разницы между поверхностной и придонной температурами нет (Кузьмич, 1988). Ветровое перемешивание, очевидно, способствует также ресуспензии донных отложений, и, в итоге, уменьшению прозрачности воды, а также обогащению водной толщи биогенными элементами, содержащимися в осадках. Это позволяет рассматривать воздействие ветра как ведущий фактор для формирования условий водной среды и качества воды в озерах такого типа (Мартынова, 2007; Tammeorg et al., 2013). Питание оз. Котокель осуществляется преимущественно талыми водами и атмосферными осадками. Поскольку озеро покрыто льдом с октября по май, в короткий летний период, в условиях относительно высоких температур на поверхности воды при повышении содержания биогенов (см. ниже), наблюдается массовое цветение. Воды оз. Котокель относятся к гидрокарбонатно-кальциевым, маломинерализованным (не более 60 мг/дм³), мягким (Озеро..., 2013).

Озеро Котокель было объектом комплексных исследований в последние годы в связи с недавней вспышкой Гаффской болезни (Озеро..., 2013). Исключительной особенностью озера, водоема с низким значением отношения площади акватории к площади водосбора (акватория – 70 км², водосбор – 183 км²), является своеобразие гидрологического режима в сезонном аспекте, что приводит к стоку болотных вод из прибрежья в озеро во второй половине лета и обогащению вод биогенными элементами. Выявлена стратификация водной толщи, что контрастирует с сильным воздействием ветра на озеро. Выделяются 3 слоя воды с различными электрофизическими свойствами, приводящими к наличию отражения зондирующего сигнала от горизонтов 2,0 и 3,5 м. Стратификация водной толщи замедляет обменные процессы и может приводить к застойным явлениям (Хаптанов, Башкуев, 2013). При исследовании донных осадков отмечено, что они практически не содержали видимого терригенного материала (Кострова и др., 2012).

В сентябре 2012 года проведено комплексное исследование оз. Котокель. Измеряли физико-химические показатели воды: прозрачность, цветность, температуру. Концентрация растворенного кислорода и биохимическое потребление кислорода определяли по методу Винклера. Для определения трофического статуса и характеристики интенсивности проходящих в озере процессов были поставлены эксперименты для определения величины первичной продукции, образуемой фитопланктоном. Пробы фитопланктона отбирали из поверхностного слоя воды в прибрежной, юго-западной и центральной частях озера, фиксировали формалином, доводя его концентрацию до 2–3 %, концентрировали прямой фильтрацией через мембранные фильтры «Владипор» марки МФАС-МА № 6 с диаметром пор 0,3 мкм. Обилие фитопланктона определяли счетно-объемным методом (Руководство..., 1992). Параллельно учитывали клетки и индивиды – колонии, ценобии, нити, трихомы и т.п. без учета числа составляющих их клеток, то есть одновременно получали численности клеток и индивидов. Пробы зоопланктона отбирали путем процеживания 100 л воды через сеть Апштейна с диаметром ячеек 64 мкм. Фиксацию и камеральную обработку зоопланктонных проб проводили по общепринятым методикам (Руководство...,

1992). Расчет продукции проводили по стандартным методикам (Винберг, 1984) для каждой группы зоопланктона отдельно.

Для определения состава и обилия осаждающейся озерной взвеси и количественных параметров (потоки вещества на единицу площади дна) поставлен эксперимент с седиментационными ловушками. В качестве ловушек использовали пластиковые пробирки объемом 50 мл с диаметром входного отверстия 28 мм. Связку из 4 пробирок устанавливали на тросе на глубине 1 м от поверхности водоема, чтобы исключить попадание придонной неконсолидированной взвеси при ветроволновом перемешивании. Ловушка стояла на якорю 24 часа. Такая относительно кратковременная экспозиция позволила оценить интенсивность седиментации отдельных видов водорослей и цианопрокариот. Затем содержимое одной пробирки изучали под микроскопом. Содержимое еще 2 ловушек взвешивали, выясняя сырой и сухой вес осадка. Для этого использовали мембранные фильтры «Владипор» марки МФАС-МА № 6 с диаметром пор 0,3 мкм. Фильтры предварительно кипятили в дистиллированной воде, затем высушивали до постоянного веса. Сначала измеряли вес сухого фильтра, затем через него фильтровали дистиллированную воду под давлением 1,5 атм, мокрый фильтр взвешивали. На следующем этапе фильтровали содержимое ловушки при том же давлении, затем взвешивали фильтр с осадком. Наконец, в сушильном шкафу при температуре 50 °С высушивали фильтр до постоянного веса и вновь взвешивали. Чтобы исключить влияние процессов испарения при взвешивании сырых фильтров, их запечатывали в герметичные пластиковые пакеты с предварительно определенной массой.

Обилие осаждающегося фитопланктона и количество пеллет в единице объема осадка определяли счетно-объемным методом при 400-кратном увеличении в камерах Горяева и Фукс-Розенталя. Учитывая широкий спектр размеров клеток, нитей и колоний цианопрокариот и водорослей, мелкие формы просчитывали в небольшом объеме воды, крупные формы – в существенно большем для получения достоверных величин их обилия. Достоверная идентификация каждой клетки диатомовых водорослей не всегда возможна в водном препарате, также как и каждого трихома *Dolichospermum* sp. без акинет, поэтому оценка их осадения выполнена по различимым при помощи световой микроскопии агрегированным компонентам. Присутствие в толще воды и, в большей степени, в седиментационной ловушке значительного количества панцирей диатомовых, пустых или с остатками протопласта, не позволяет выявить обилие отдельных видов в материале, очищенном от органических веществ, используемом для идентификации представителей этой группы. Пересчет сырой биомассы (биообъема) фитопланктона на сухой вес выполнен по отделам. Учитывая состав фитопланктона озера, для цианопрокариот принят коэффициент 0,456, диатомовых – 0,553, зеленых водорослей и прочих, малообильных групп – 0,333 (Reynolds, 2006). Пересчет сырой биомассы зоопланктона на сухую проведен отдельно по каждой группе (Rotifera, Cladocera, Copepoda) в соответствии с рекомендациями по расчету продукции зоопланктона (Методические рекомендации..., 1982).

Температура воды в момент исследования составляла 15,2–15,4 °С. Прозрачность по диску Секки в прибрежье не превышала 0,2 м, а в центральной части озера 0,6 м. Концентрация кислорода составила 5,01–5,02 мгО₂/дм³, а БПК₅ – 2,04–2,12 мгО₂/дм³, что соответствует 4 классу качества воды (загрязненные воды) по комплексной экологической классификации качества вод суши (Оксиюк и др., 1993). Валовая первичная продукция составила 0,065 мгО₂/дм³·ч, чистая первичная продукция 0,052 мгО₂/дм³·ч, деструкция – 0,013 мгО₂/дм³·ч. Таким образом, продукция практически в 4 раза превышала деструкцию. Невысокая прозрачность воды, обычно не превышающая 1 м, характерна для озера в летний период и отражает высокое обилие фитопланктона (Бочкарев, Карноухов, 1936; Егоров, 1950; Купчинский, 1987; Белых и др., 2009; Belykh et al., 2011; Озеро..., 2013). Во второй половине 1960-х годов прозрачность воды летом составляла около 2 м (Антипова, Помазкова, 1971).

Таблица 1

Биомасса и интенсивность седиментации осеннего фитопланктона оз. Котокель

Таксон	Биомасса, г/м ³			Интенсивность седиментации	
	Прибрежье	Центральная часть	Ловушка	абс., г/м ² сут	отн., %
Cyanoprokaryota	32,9	18,4	23,9	5,5	30
Chlorophyta s.l.	2,82	1,86	7,49	5,63	303
Euglenophyta	0,40	0,22	0,22	~0	~0
Bacillariophyta	0,12	0,58	20,9	20,3	3500
Cryptophyta	0,44	0,14	не обн.	–	–
Dinophyta	не обн.	не обн.	0,08	–	–
Неидентифицированные клетки	0,69	0,11	0,17	0,06	54
Всего	37,4	21,3	51,1	29,8	140

Примечание: абсолютная величина интенсивности седиментации – разность между удельными величинами биомассы фитопланктона, зарегистрированной в ловушке в конце экспозиции и в поверхностном слое воды в центральной части озера; относительная величина – процент от последней величины. Для отделов, представители которых не были обнаружены в толще воды или в ловушке (не обн.), интенсивность седиментации не определена (–).

Во время обследования озера наблюдали цветение воды, вызванное цианопрокариотами, преимущественно потенциально токсичным видом *Microcystis aeruginosa*. Численность фитопланктона составляла 1,7 трлн. кл./дм³, 47 млн./инд. дм³ в прибрежной части и 1,2 трлн. кл./дм³, 100 млн. инд./дм³ в центральной части. Основу фитопланктона по численности и биомассе составляли мелкоклеточные колониальные цианопрокариоты, колонии которых концентрировались в поверхностном слое воды и образовывали непрочные агрегаты. Обилие цианопрокариот было выше в прибрежной части озера (табл. 1), возможно, в результате нагона воды. В прибрежной части доминировал *Microcystis aeruginosa*, обилие которого составило 60 % численности клеток фитопланктона, 51 % численности индивидов и 67 % биомассы. По численности индивидов также была заметна роль *Pseudanabaena voronichinii* (22 %). В центральной части также доминировал *M. aeruginosa*, формировавший 40 % численности клеток фитопланктона, 81 % численности индивидов и 58 % биомассы. По численности клеток была существенно роль *Aphanocapsa* cf. *conferta* (21 %), *A. holsatica* (11 %) и *Aphanothece bachmannii* (10 %), по биомассе – *Dolichospermum lemmermannii* (10 %). Примечательно, что колонии *M. aeruginosa* имели облик разрушающихся, в прибрежной части количество клеток в колониях было выше (в среднем 42,5) по сравнению с центральной частью озера (в среднем 5,8), где также были очень обильны одиночные клетки этого вида.

Во многих случаях максимальные за вегетационный период величины приблизительно в 3–4 раза превышают средние за сезон, и в эвтрофных озерах отмечаются в летне–осенние месяцы (Трифонова, 1990). Предполагая, что полученная величина биомассы фитопланктона может быть близкой к максимальным величинам для этого озера, можно предположить, что средняя за вегетационный сезон биомасса может быть величиной порядка 5–9 г/м³ для оз. Котокель. Это позволяет отнести оз. Котокель к категории эвтрофных озер по шкале И.С. Трифоновой (1990), что вполне соответствует оценке трофического статуса озера по данным предыдущих исследований (Кузьмич, 1988; Полонных, 1988; Озеро..., 2013).

Летнее цветение воды цианопрокариотами по имеющимся данным является характерной чертой оз. Котокель (Пантелеев, 1927; Бочкарев, Карноухов, 1936 – по-видимому, указаны как зеленые водоросли; Кордэ, 1968; Полонных, 1988); первые данные о нем

относятся к началу 1900-х гг. (Dorogostaïsky, 1905; Дорогостайский, 1906), когда наиболее обильный вид приведен как *Microcystis olivacea* Kütz. В разные годы отмечен не идентичный состав наиболее обильных цианопрокариот (Кожов, 1938, 1948, 1950; Егоров, 1950; Кордэ, 1968; Антипова, Помазкова, 1971; Кузьмич, 1988; Белых и др., 2008; Belykh et al., 2011; Озеро..., 2013; ориг. данные). Значительную роль в планктоне озера играет также представитель диатомовых *Aulacoseira granulata*, который и во время цветения воды является обильным.

Полученные величины обилия осеннего фитопланктона являются максимальными за весь период исследований оз. Котокель и могут отражать концентрирование фитопланктона в поверхностном слое в штилевую погоду. Значение этих данных для характеристики возможных изменений экосистемы озера трудно оценить по имеющимся спорадическим наблюдениям за фитопланктоном в последние годы (Белых и др., 2008; Belykh et al., 2011; Озеро..., 2013).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии седиментации фитопланктона в целом и у обильных групп, выраженном концентрировании зеленых водорослей и очень сильной седиментации диатомовых водорослей. Наибольшая удельная интенсивность осаднения выявлена для колониальных мелкоклеточных цианопрокариот *Aphanocapsa delicatissima*, *A. holsatica*, зеленых водорослей рода *Pediastrum*, диатомовых водорослей (табл. 2). Кроме трихомов оседали также акинеты цианопрокариот *Dolichospermum lemmermannii* и их скопления. Отрицательные величины интенсивности седиментации, означающие преимущественное рассеивание из ловушки, а не оседание, получены для цианопрокариот, клетки которых содержат азротопы (газовые вакуоли), а также для вида *Pseudanabaena voronichinii*, который развивался в толще колониальной слизи *M. aeruginosa*. В планктоне присутствовали относительно обильные трихомы *P. voronichinii*, которые попали в водную толщу, очевидно, в результате разрушения колоний хозяина. Возможно седиментация клеток *Aulacoseira granulata* отчасти объясняет максимальное обилие этого вида в придонном слое, отмеченное при предыдущих исследованиях озера (Полонных, 1988).

Осаждающиеся клетки цианопрокариот и водорослей являются одним из основных источников формирования планктоногенного сапропеля в исследованном водоеме, также как и в оз. Очки в западном Прибайкалье (Бобров и др., 2010) и оз. Фролиха в восточном Прибайкалье (Леонова и др., 2012). В донных осадках оз. Котокель чередуются разные по продолжительности формирования слои с преобладанием остатков и акинет цианопрокариот и с большим количеством панцирей диатомовых *Ellerbeckia arenaria* (Moore ex Ralfs) Crawford var. *arenaria* et var. *teres* (Brun) Crawford в ранних слоях, сменяющимися *Aulacoseira granulata* в поздних слоях, что отражает разную интенсивность и продолжительность развития этих групп в зависимости от изменения климатических факторов (Korde, 1966; Кордэ, 1965, 1968). В относительно недавних слоях существенна также роль хлорококковых (Korde, 1966; Кордэ, 1968). Таким образом, есть основания предполагать, что массовое развитие цианопрокариот, цветение воды и эвтрофный статус сохраняются на протяжении значительного промежутка времени существования озера и не появились в его истории как результат антропогенного воздействия.

Зоопланктон оз. Котокель был представлен в момент исследования всего 27 видами (табл. 3): 10 видов Rotifera, 9 – Cladocera и 8 видов Соперода. В сообществе зарегистрировано 44 % космополитов, 30 % палеарктов и 26 % голарктических видов. Т.е. практически все виды широко распространены. Эндемичных видов не обнаружено.

Доминировали в центральной части озера *Keratella cochlearis*, *Daphnia cucullata* (по мнению Шевелевой Н.Г. и Кривенковой И.Ф. (2013) дафния в оз. Котокель является гибридом *Daphnia galeata* и *Daphnia cucullata*) и *Cyclops vicinus*. В прибрежье – *Trichocerca longiseta*, *Trichocerca similis*, *Bosmina longirostris*, *Ceriodaphnia pulchella*. Численность и биомасса как отдельных групп, так и зоопланктона в целом на разных участках озера также были различными (табл. 4). Наибольшие значения отмечены в центральной части озера, где ко-

Таблица 2

Численность, биомасса и интенсивность седиментации наиболее обильных и наиболее сильно оседающих компонентов осеннего фитопланктона оз. Котокольское

	Численность клеток, тыс. кл./дм ³		Численность индивидов, тыс. инд./дм ³		Биомасса, г/м ³		Интенсивность седиментации	
	Толща воды	Ловушка	Толща воды	Ловушка	Толща воды	Ловушка	абс.	отн., %
<i>Dolichospermum circinale</i> (Rabenh. ex Born. et Flah.) Wacklin, Hoffmann et Komárek (<i>Anabaena circinalis</i> Rabenh. ex Born. et Flah.) + <i>Dolichospermum curvum</i> (Hill) Wacklin, Hoffmann et Komárek (<i>A. curva</i> Hill)							-1,60	-86
<i>Dolichospermum lemmermannii</i> (Richter in Lemm.) Wacklin, Hoffmann et Komárek (<i>A. lemmermannii</i> Richter in Lemm.)	13,2×10 ³	30,6×10 ³	1,47×10 ³	1,38×10 ³	2,11	7,10	4,99	237
<i>Aphanocapsa cf. conferta</i> (W. et G.S. West) Kom.-Legn. et Cronberg	247×10 ³	1,42×10 ⁶	630	2,19×10 ³	0,43	2,97	2,54	599
<i>A. delicatissima</i> W. et G.S. West	32,4×10 ³	578×10 ³	1,16	1,69×10 ³	0,008	0,15	0,14	1737
<i>A. holsatica</i> (Lemm.) Cronberg et Komárek	126×10 ³	1,52×10 ⁶	469	1,10×10 ³	0,008	0,09	0,08	1042
<i>Aphanothece bachmannii</i> Kom.-Legn. et Cronberg	141×10 ³	1,08×10 ⁶	1,21 103	1,27×10 ³	0,007	0,05	0,04	666
<i>Chroococcus minutus</i> (Kütz.) Nag.	не обн. (< 29)	3,86×10 ³	не обн. (< 29)	404	не обн. (<0,02)	1,93	-	-
<i>Cyanodictyon reticulatum</i> (Lemm.) Geitl.	12,3×10 ³	32,8×10 ³	147	507	0,001	0,004	0,003	167
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kütz.) Kütz.	471×10 ³	101×10 ³	80,9 10 ³	288	12,4	3,15	-9,26	-74,6
<i>M. viridis</i> (A. Braun in Rabenh.) Lemm.	не обн. (< 29)	50,8×10 ³	не обн. (< 29)	115	не обн. (<0,02)	3,00	-	-
<i>Pseudanabaena voronichinii</i> Anagn.	25,4×10 ³	8,56×10 ³	7,19 10 ³	910	0,11	0,05	-0,06	-53
<i>Woronichinia compacta</i> (Lemm.) Komárek et Hindák	23,17×10 ³	131×10 ³	264	1,10×10 ³	0,29	1,52	1,23	431
<i>Pediastrum boryanum</i> var. <i>longicornis</i> Reinsch	469	5,65×10 ³	29,3	346	0,15	4,50	4,35	2811
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Sim. + <i>A. cf. italica</i> (Ehr.) Sim.	293	4,56×10 ³	147	1,18×10 ³	0,58	14,9	14,35	2489
<i>Nitzschia</i> sp. + <i>Synedra</i> sp.	58,7	1,73×10 ³	58,7	1,73	0,004	1,60	1,60	37176

Примечание: см. табл. 1; обилие видов приведено для толщи воды центральной части озера; интенсивность седиментации не определяли для видов, которые не были обнаружены в толще воды (не обн.).

Таблица 3

Видовой состав зоопланктона озера Котокель (сентябрь 2012 г.)

Виды зоопланктона	Зоогеографическое распространение*		Сапробность**
Rotifera			
<i>Euchlanis dilatata</i> Ehrb.	К	+	О-β
<i>Keratella cochlearis</i> (Gosse)	К	++	β
<i>Polyarthra dolichoptera</i> Idels	П	+	О-β
<i>Polyarthra major</i> Burckhardt	Г	+	β
<i>Pompholyx complanata</i> Gosse	К	+	β
<i>Trichocerca longiseta</i> (Schrank)	К	++	
<i>Trichocerca capucina</i> (Wierz. et Lack.)	Г, А	+	О
<i>Trichocerca cylindrica</i> (Imhof)	Г	+	О
<i>Trichocerca similis</i> (Wierz.)	Г, А	++	О
<i>Trichocerca (Diurella) tenuior</i> (Gosse)	К	+	О-β
Cladocera			
<i>Alona affinis</i> Leydig	К	+	О
<i>Alona rectangula</i> Sars (<i>Coronatella rectangula</i> Sars)	К	+	О-β
<i>Bosmina longirostris</i> (Müller)	К	++	β-α
<i>Ceriodaphnia pulchella</i> Sars	П	++	О-β
<i>Chydorus sphaericus</i> (Müller)	К	+	β-α
<i>Daphnia cucullata</i> Sars	П	++	β
<i>Monospilus dispar</i> Sars	Г	+	О
<i>Disparalona rostrata</i> (Koch)	Г	+	-
<i>Sida crystallina</i> (Müller)	П	+	О
Copepoda			
<i>Eucyclops serrulatus</i> (Jurine)	К	+	О-β
<i>Cyclops kolensis</i> Lill.	П	+	β-α
<i>Cyclops vicinus</i> Uljan.	П	++	β
<i>Macrocyclus albidus</i> (Jurine)	К	+	β
<i>Mesocyclops leuckarti</i> Claus	П	+	β
<i>Mesocyclops crassus</i> (Fisch.)	К	+	β-α
<i>Microcyclops varicans</i> (Sars)	Г	+	-
<i>Paracyclops fimbriatus</i> (Fisch.)	П	+	О
Всего видов в озере		28	

Примечания. * – К – космополиты; Г – Голарктическая область; П – Палеарктическая область;

А – Австралийская область (по Афонина Е.Ю., Итигилова М.Ц., 2009);

** – по Ермолаевой Н.И., 2007, Шевелевой Н.Г., Кривенковой И.Ф., 2013.

личество взвеси, образованной фитопланктоном, было значительно меньше, чем в прибрежье. По сравнению с предыдущими исследованиями (Шевелева, Кривенкова, 2013), в составе зоопланктона не отмечено множество ранее обнаруженных олигосапробных видов. Ранее соотношение видов, соответствующих олигосапробной и β-мезосапробной зонам составляло соответственно 51:49 %, а в момент наших наблюдений 26:74 % соответственно. Количественные показатели зоопланктона совпадают с максимальными показателями, указанными для июля – августа 1986 г. (Дзюменко, 1988) и 2009 г. (Шевелева, Кривенкова, 2010, 2013). Возможно, это связано не только с повышением трофического статуса озера, но и со сроками исследования.

Таблица 4

Показатели численности (N), биомассы (B) и продукции (P) зоопланктона озера Котокель по данным за сентябрь 2012 г.

Таксон	Центральная часть озера		Юго-западное побережье	
	N, экз./м ³	B, мг/м ³	N, экз./м ³	B, мг/м ³
Rotifera	12000	5,6	3300	3,0
Cladocera	50440	516,0	2050	126,2
Copepoda	112000	42014,4	15150	427,3
Всего	174440	4336,0	20500	556,5
P, мг/м ³ × год	74027,7		15220,7	
P/B	15,6		27,4	

При пересчете продукции зоопланктона в сутки на сухой вес была получена приблизительная величина биомассы, включающейся в седиментационный процесс при отмирании зоопланктона. Она была подтверждена и уточнена изучением содержимого седиментационных ловушек. Основу отмирающего зоопланктона составляли коловратки и веслоногие рачки. Величина вклада отмирающего зоопланктона составила 7,31 г/м²·сут.

Помимо формирования непосредственно биомассы, включающейся в итоге в состав сапропеля, зоопланктон активно участвует в процессах седиментации, отфильтровывая фито- и бактериопланктон. Оседание в воде биогенных частиц в виде фекальных комочков (пеллет), имеющих гидравлическую крупность, значительно большую, чем взвесь, потребляемая водными животными-фильтраторами, во многих лимнических водоемах играет значительную роль в осадконакоплении. По имеющимся оценкам (Гутельмахер, Алимов, 1979), в зависимости от трофности водоема зоопланктон ежедневно фильтрует от 5 до 90 % объема воды озера. Фекальный материал зоопланктона активно поставляет в сапропели органическое вещество. Оболочка пеллет копепоид не позволяет материалу рассеиваться в пространстве и тормозит его бактериальную переработку. Пеллеты кладоцер чаще всего подвергаются копрофагии и перерабатываются вторично, что ускоряет минерализацию содержащихся в них биогенов. Так как плотность минеральных веществ составляет 2,2–5,3 г/см³, а плотность пеллет веслоногих рачков (1,19–1,22 г/см³) и пеллет кладоцер (1,06–1,16 г/см³) значительно ниже, они некоторое время держатся в верхних слоях неконсолидированной взвеси (или жидкого ила), подвергаясь неоднократному ветро-волновому перемешиванию (Деренговская, Остапеня, 2006). В связи с этим уже в ловушке наблюдается слоистость залегания частиц с разной плотностью. Скорости оседания пеллет, приводимые в разных источниках, колеблются от 4.3 до 19.8 м/сут (O'Brien et al., 2003). Учитывая малую глубину озера, практически весь поток вещества, формирующийся в течение суток в верхних слоях, успевает достичь дна, почти не подвергаясь минерализации в толще воды. Дальнейшая трансформация как фекального, так и отмирающего биологического материала происходит на дне в результате жизнедеятельности бактерий и бентосных организмов. Полученные нами величины пеллетного седиментационного потока в оз. Котокель составили 4,2 г сухой массы/м²·сут.

На основе полученных данных была рассчитана величина седиментационного потока сухого вещества в озерах, включающая вклад фито- и зоопланктона. Общий седиментационный поток (валовое содержимое ловушек) составил 303,55 г сухой массы/м²·сут. Учитывая вклад фитопланктона (14,91 г/м²·сут), отмирающего зоопланктона (7,31 г/м²·сут) и пеллетного потока (4,2 г/м²·сут), получаем, что суточный вклад биотической составляющей в седиментационный поток составляет примерно 8,7 %. В настоящее время основное осадконакопление в оз. Котокель происходит за счет активного развития и отмирания

цианопрокариот, что подтверждено в работах других исследователей, изучавших состав донных отложений озера (Корде, 1968; Леонова, Бобров, 2012, 2013). Основную часть содержимого ловушек составляло перезахоронение отложений предыдущих месяцев и прошлых лет (ресуспендированная взвесь). Следует отметить, что приведенные цифры являются ориентировочными, поскольку в расчет не были включены продукция бактерий, бентоса и фитоперифитона. По нашим данным продукция бентоса в сапропелевых озерах юга Сибири может составлять от 0,1 до 5% общей продукции зоо- и фитоценозов.

Полученные нами относительные величины интенсивности седиментации сопоставимы с таковыми для Нарочанских озер (Беларусь) (Деренговская, Остапеня, 2006) и существенно больше, чем для холодных глубоководных водоемов, таких как оз. Байкал (Остроумов, Колесов, 2010). По-видимому, в глубоких водоемах при большей глубине экспозиции на величине седиментационного потока сильнее отражаются разрушение и выедание клеток и мелких организмов и бактериальная минерализация органических частиц (Hamilton-Taylor et al., 1984).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-05-00655 и при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 125 «Условия формирования, закономерности размещения и рациональное природопользование сапропелей Сибири».

ЛИТЕРАТУРА

- Антипова Н.Л., Помазкова Г.И. 1971.** О планктоне оз. Котокель // Исследования гидробиологического режима водоемов Восточной Сибири. Иркутск. С. 27–40.
- Афонина Е.Ю., Итигилова М.Ц. и др. 2009.** Озера и реки Забайкалья / Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Т. 2. Новосибирск: Наука. С. 473–552.
- Белых О.И., Тихонова И.В., Сорокикина Е.Г., Гладких А.С., Калюжная О.В. 2009.** Выявление токсичных *Microcystis* в озере Котокельское (Бурятия) // Вестник Томского государственного университета. № 330. С. 172–175.
- Бобров В.А., Леонова Г.А., Федорин М.А., Кривоногов С.К., Бычинский В.А., Краснобаев В.А. 2010.** Элементный состав органических осадков озера Очки (Прибайкалье), сформировавшихся в голоцене // Успехи органической геохимии: Материалы Всерос. науч. конф. (11–15 окт. 2010 г.). Новосибирск: ИНГ СО РАН. С. 40–44.
- Бочкарев П.Ф., Карноухов А.С. 1936.** Гидрохимические исследования оз. Катакел // Изв. Биол.-геогр. науч.-исслед. ин-та при Восточносибирском гос. ун-те. Т. VII, в. 1–2. Иркутск: ОГИЗ Восточносибирское краевое издательство. С. 52–69.
- Винберг Г.Г. 1984.** Зоопланктон и его продукция // Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Л.: ГосНИОРХ, ЗИН АН СССР. С. 1–34.
- Гутельмахер Б.Л., Алимов А.Ф. 1979.** Количественные закономерности фильтрационного питания водных животных // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука. С. 57–78.
- Деренговская Р.А., Остапеня А.П. 2006.** Зоопланктон и седиментация взвешенных веществ в озерах // Сибирский экологический журнал. Т. 13, № 1. С. 43–54.
- Дзюменко З.М. 1988.** Продуктивность зоопланктона озера Котокель // Биопродуктивность евтрофных озер Ирканы и Котокель бассейна озера Байкал. Л.: ГосНИОРХ. С. 78–87. (Тр. ГосНИОРХ. Вып. 279).

- Дорогостайский В.Ч. 1904.** Материалы для альгологии оз. Байкала и его бассейна // Изв. Вост.-Сиб. отд. Императ. Русск. геогр. об-ва. Т. 35, вып. 1. Казань: Тип. Императ. Ун-та. С. 1–44.
- Егоров А.Г. 1950.** Озеро Котокель (промыслово-биологический очерк) // Изв. Биол.-геогр. науч.-исслед. ин-та при Иркутском гос. ун-те Т. 11, вып. 1. С. 1–38.
- Кожов М.М. 1938.** Озеро Котокель (гидробиологический очерк) // Изв. Биол.-геогр. науч.-исслед. ин-та при Иркутском гос. ун-те. Т. 8, вып. 1–2. С. 1–45.
- Кожов М.М. 1948.** Биологические и рыбопромысловые исследования водоемов Восточной Сибири (Итоги и очередные задачи науки в области рыбного хозяйства Байкала и других водоемов Восточной Сибири). Иркутск: Обл. гос. изд-во. 35 с.
- Кожов М.М. 1950.** Пресные воды Восточной Сибири (Бассейн Байкала, Ангары, Витима, верхнего течения Лены и Нижней Тунгуски). Иркутск: Обл. гос. изд-во. 367 с.
- Кордэ Н.В. 1965.** Остатки водорослей в отложениях современных водоемов как экологический показатель состояния этих водоемов в прошлом // Проблемы современной биологии. Т. 1. М.-Л.: Наука. С. 105–107.
- Кордэ Н.В. 1968.** Биостратиграфия отложений озера Котокель // Мезозойские и кайнозойские озера Сибири. М.: Наука. С. 150–170.
- Кострова С.С., Майер Х., Чаплыгин Б., Безрукова Е.В. 2012.** Изотопные исследования озера Котокель // Современные проблемы геохимии: Материалы Всеросс. совещ. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. Т. 1. С. 159–162.
- Кузьмич В.Н. 1988.** Эколого-продукционная характеристика озер Иркана и Котокель // Биопродуктивность евтрофных озер Иркана и Котокель бассейна озера Байкал. Л.: ГосНИОРХ. С. 131–146. (Тр. ГосНИОРХ. Вып. 279).
- Купчинский Б.С. 1987.** Лещ водоемов Байкало-Ангарского бассейна. Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та. 144 с.
- Леонова Г.А., Бобров В.А. 2012.** Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов. Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 308 с.
- Леонова Г.А., Кондратьева Л.М., Богуш А.А., Кривоногов С.К., Мальцев А.Е. 2012.** Биогеохимия раннего диагенеза донных осадков оз. Духовое (Южное Прибайкалье) // Современные проблемы геохимии: Материалы Всеросс. совещ. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. Т. 1. С. 171–174.
- Леонова Г.А., Бобров В.А. 2013.** Биогеохимическая роль планктона – универсального представителя живого вещества гидросферы // Международная молодежная Школа-семинар «Геохимия живого вещества», посвященная 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского, г. Томск, 2–5 июня 2013 г. С. 82–89.
- Мартынова М.В. 2007.** Влияние взмучивания донных отложений на экосистемы водоемов // География и природные ресурсы. № 4. С. 38–41.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. 1982.** Л.: ГосНИОРХ, ЗИН РАН. 33 с.
- Никаноров А.М., Страдомская А.Г. 2006.** Химический состав органических и минеральных веществ иловых донных отложений незагрязненных водных объектов // водные ресурсы. Т. 33, № 1. С. 71–77. / Nikanorov A.M., Stradomskaya A.G. 2006. Chemical composition of organic and mineral substances in silt bottom sediments of non-contaminated water bodies // Water Resources. Vol. 33, N 1. P. 64–70.

- Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология 2013.** Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 340 с.
- Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. 1993.** Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. Т. 29, № 3. С. 42–76.
- Остроумов С.А., Колесов Г.М. 2010.** О роли биогенного детрита в аккумуляции элементов в водных системах // Сиб. экол. журн. № 4. С. 525–531
- Пантелеев К.Н. 1927.** Озеро Катакел // Бурятияведение. Бюллетень Бурят-Монгольского научного общества им. Д. Банзарова. № 3-4. Верхнеудинск. С. 21–29.
- Полонных А.К. 1988.** Фитопланктон озер Иркана, Котокель и его продукция // Биопродуктивность евтрофных озер Иркана и Котокель бассейна озера Байкал. Л.: ГосНИОРХ. С. 17–24. (Тр. ГосНИОРХ. Вып. 279).
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем 1992.** / Под ред. Абакумова В.А. СПб.: Гидрометеоздат. 318 с.
- Трифонова И.С. 1979.** Состав и продуктивность фитопланктона разнотипных озер Карельского перешейка. Л.: Наука. 168 с.
- Хаптанов В.Б., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. 2013.** Структура водной толщи и донных отложений озера Котокель по данным георадарного зондирования // Вестник СибГАУ. № 5(51). С. 143–146.
- Шевелева Н.Г., Кривенкова И.Ф. 2010.** Состав и структура зоопланктона озера Котокельское // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. № 3. С. 278–291.
- Шевелева Н.Г., Кривенкова И.Ф. 2013.** Зоопланктон // Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология. Улан-Удэ: Изд-во БЦН СО РАН. С. 177–187.
- Belykh O.I., Sorokovikova E.G., Fedorova G.A., Kaluzhnaya O.V., Korneva E.S., Sakirko M.V., Sherbakova T.A. 2011.** Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (*Anabaena* and *Microcystis*) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal Region) // Hydrobiologia. V. 671. P. 241–252.
- Dorogostaïsky V. 1905.** Matériaux pour servir à l'algologie du lac Baïkal et de son bassin // Bulletin de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou. 1904. Nov. sér. T. 18, № 2-3. Moscou: Typo-lithogr. de la Société J. N. Kouehnéreff et C-ie. P. 229–265.
- Hamilton-Taylor J., Willis M., Reynolds C.S. 1984.** Depositional fluxes of metals and phytoplankton in Windermere as measured by sediment traps // Limnology and Oceanography. V. 29, № 4. P. 695–710.
- Korde N.W. 1966.** Algenreste in Seesedimenten. Zur Entwicklungsgeschichte der Seen und umliegenden Landschaften // Archiv für Hydrobiologie, Beihefte, Nr. 3. Ergebnisse der Limnologie. H. 3. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. S. 1–38.
- O'Brien K.R., Ivey G.N., Hamilton D.P., Waite A.M., Visser P.M. 2003.** Simple mixing criteria for the growth of negatively buoyant phytoplankton // Limnology and Oceanography. V. 48, N 3. P. 1326–1337.
- Reynolds C. 2006.** Ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press. 535 p.
- Tammeorg O., Niemistö J., Möls T., Laugaste R., Panksep K., Kangur K. 2013.** Wind-induced sediment resuspension as a potential factor sustaining eutrophication in large and shallow Lake Peipsi // Aquatic Science. V. 75. P. 559–570.