

Меромиктический режим и сезонная динамика вертикальной структуры озера Учум (Южная Сибирь)

Д. Ю. РОГОЗИН^{1,2}, В. В. ЗЫКОВ¹, Е. А. ИВАНОВА², Т. Н. АНУФРИЕВА², Ю. В. БАРХАТОВ¹,
Е. Б. ХРОМЕЧЕК¹, И. Ю. БОТВИЧ¹

¹ Институт биофизики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 50
E-mail: rogozin@ibp.ru

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Статья поступила 27.03.2017

Принята к печати 28.08.2017

АННОТАЦИЯ

Впервые детально исследована сезонная динамика вертикальной структуры небольшого соленого оз. Учум, расположенного в степной аридной зоне Юга Сибири (Красноярский край). Показано, что оно является меромиктическим водоемом. Выявлено неоднородное вертикальное распределение планктонных организмов и плотное скопление пурпурных серных бактерий в редокс-зоне, а также таксономический состав и сезонная динамика фито- и зоопланктона. Предположительно, меромиксия оз. Учум обусловлена притоком пресной воды на поверхность соленого водоема в период подъема его уровня в начале XX в., аналогично озерам Шира и Шунет, расположенным поблизости. Процессы вытеснения соли в раствор при образовании льда, и выпадение солей в осадок в зимнее время также способствуют поддержанию перманентной стратификации. Полученные сведения о современном состоянии озера могут оказаться полезны для реконструкции климата по донным отложениям, и для создания моделей качества воды и изучения лечебных свойств озерных грязей.

Ключевые слова: меромиксия, сероводород, стратификация, соленое озеро, фототрофные серные бактерии, фитопланктон, зоопланктон, донные отложения.

Меромиктическим называется водоем, в котором отсутствует полная циркуляция водной толщи, т. е. придонный слой воды, так называемый монимолимнион, отличающийся по химическим свойствам, сохраняется в течение как минимум одного годового цикла [Hutchinson, 1957]. В нем, как правило, развивается анаэробия и накапливается сероводород. Несмотря на то, что меромиксия является типичным явлением, такие озера

довольно редки во всех регионах мира [Boehrer, Schulze, 2008]. К настоящему времени на обширной территории Сибири описано всего три меромиктических озера: Шира и Шунет в Хакасии [Rogozin et al., 2010; Rogozin и др., 2010, 2012] и оз. Доронинское в Забайкальском крае [Борзенко и др., 2015].

Интерес к данным озерам обусловлен несколькими причинами. Во-первых, устойчивое распределение микроорганизмов разных

физиологических типов вдоль вертикальных градиентов физико-химических факторов делает их удобными природными лабораториями для изучения экологии этих микроорганизмов *in-situ* [Tonolla et al., 2003; Matyugina, Belkova, 2015]. Во-вторых, донные отложения меромиктических озер обладают наиболее выраженной годичной слоистостью, поэтому являются ценным объектом для высокоразрешающих реконструкций палеоклимата [Overmann et al., 1993; Ravasi et al., 2012]. Особенно ценными для палеорекострукции являются бессточные озера, так как уровень воды в них чутко отражает изменения влажности климата. В-третьих, нарушение меромиксии может сопровождаться существенным ухудшением качества воды из-за “выбросов” биогенных элементов, накапливающихся в мониолимнионе, в поверхностные воды [MasIntyre, Jellison, 2001]. Поэтому понимание причин возникновения, поддержания и нарушения данного необходимо для прогнозов состояния водоемов в условиях глобальных изменений климата и антропогенных воздействий.

Систематически проводятся многолетние наблюдения за меромиктическими озерами Ши́ра и Шунет, расположенными в этом же географическом регионе, на территории Республики Хакасия [Рогозин и др., 2012; Рогозин и др., 2016]. Донные отложения оз. Ши́ра являются объектом для реконструкции влажности палеоклимата по динамике уровня озера [Kalugin et al., 2013; Hildebrandt et al., 2015]. Однако достоверность палеорекострукций может быть существенно повышена, если изучается не одно, а несколько озер на данной территории. Поэтому поиск бессточных водоемов с устойчивой стратификацией является актуальной задачей для реконструкции палеоклимата региона Северо-Минусинской котловины и всей Южной Сибири. Озеро Учум особенно ценно в этом отношении, поскольку здесь, так же как и на оз. Ши́ра, действует пост Гидрометеослужбы, на котором постоянно осуществляются наблюдения за уровнем его вод.

В придонных водах относительно глубоких водоемов сероводород может появляться временно, в летнее или зимнее время, и исчезать в периоды весеннего и/или осеннего

перемешивания. Поэтому наличие сероводорода летом еще не является доказательством меромиксии, и для ее диагностирования требуется исследование вертикальной структуры водной толщи в течение года. Такое исследование проведено для соленого оз. Учум, расположенного в степной зоне на юге Красноярского края. Несмотря на то, что данное озеро описано в литературе [Кривошеев, Хасанов, 1990], режим его сезонной циркуляции до сих пор детально не исследован.

В сообщении приводятся новые данные о вертикальной структуре физико-химических свойств и биоты озера, свидетельствующие о сильно выраженных меромиктических свойствах. Тем самым выявлен интересный объект как для реконструкции палеоклимата, так и для изучения фундаментальных вопросов водной экологии. Проведено сравнение с двумя другими меромиктическими водоемами, расположенными в данном регионе, а также показано сходство с озерами, расположенными в аналогичных климатических условиях Канады. Высказаны гипотезы относительно общих причин происхождения меромиксии в этих водоемах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Описание объекта. Оз. Учум (55°05,670' с. ш., 89°43,390' в. д.) расположено в Чебаково-Балахтинской котловине, являющейся частью Минусинской межгорной котловины, в 30 км к югу от г. Ужур (Красноярский край) и в 70 км к северо-западу от оз. Ши́ра (Хакасия), на территории Ужурского р-на Красноярского края. Климат данной местности резкоконтинентальный. Средняя температура июля около +18 °С, января около -19 °С. Горный хребет Кузнецкого Алатау препятствует проникновению влажных воздушных масс с западного направления, поэтому потенциальное испарение на данной территории ($600 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$) превышает среднегодовое количество осадков ($300 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$). Аридный климат способствует формированию на данной территории бессточных озер с повышенной минерализацией [Parnachev et al., 2002]. Озеро Учум имеет овальную форму $1,5 \times 4 \text{ км}$, площадь поверхности около 4 км^2 , максимальную глубину 7,9 м (2015 г.) (рис. 1). Водоем бессточный,

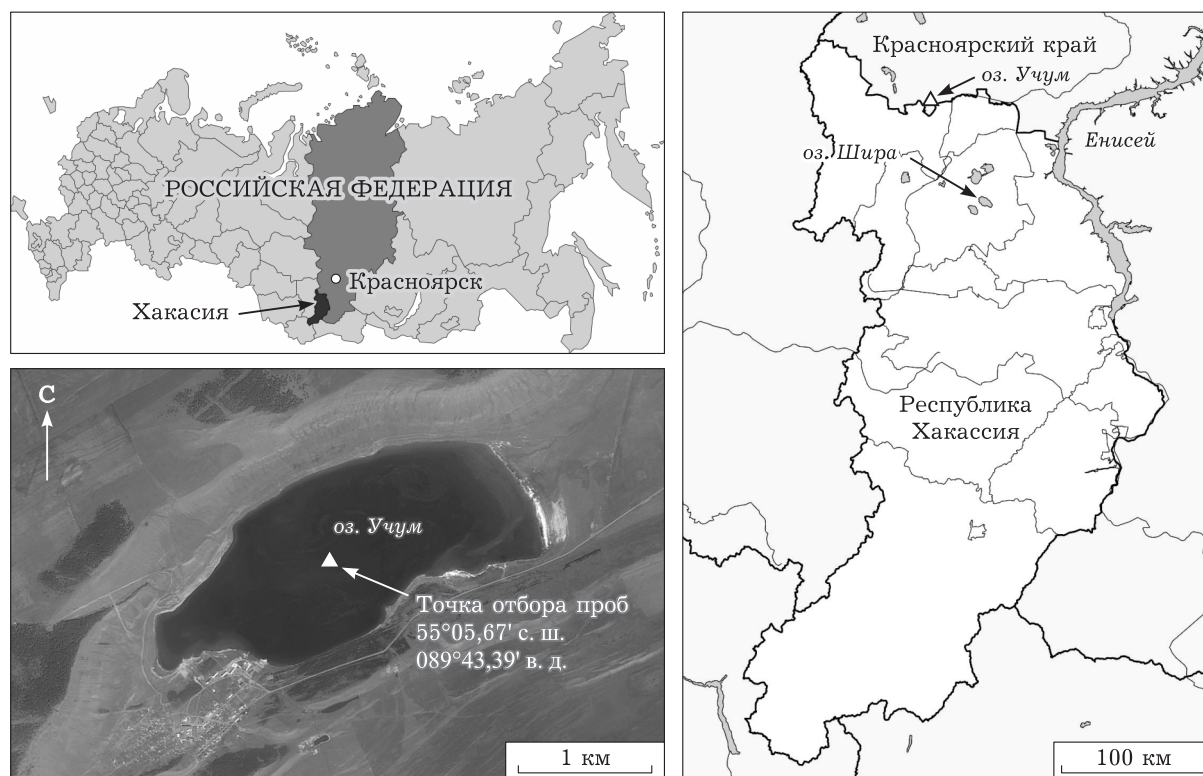


Рис. 1. Географическое положение оз. Учум и точки отбора проб

основное поступление воды за счет атмосферных осадков и подземных вод. Вода озера имеет сульфатно-хлоридный, натриево-калиевый ионный состав [Кривошеев, Хасанов, 1990]. Соленость в верхних слоях миксолимниона в период летней стратификации в 2015 и 2016 гг. составляет около $24 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, в придонных слоях – $34 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ (рис. 2). Озеро покрыто льдом с ноября по конец апреля – начало мая. Максимальная толщина льда из зарегистрированных 137 см (1985 г.), в среднем около 1 м (данные Гидрометеослужбы РФ). Водоем обладает бальнеологическими свойствами, на его берегу функционирует популярный курорт “Озеро Учум”.

Отбор проб и аналитические процедуры. В течение 2015–2016 гг. осуществлено пять полевых выездов, приуроченных к основным гидрологическим сезонам: 4 августа (летняя стратификация), 28 октября 2015 г. (осенняя циркуляция), 11 марта (зимняя стратификация), 25 мая (после схода льда) и 6 августа 2016 г. (летняя стратификация). Все отборы и измерения профилей физико-химических характеристик воды проводили в центральной части озера в районе максимальной глу-

бины, в точке с координатами $55^{\circ}05,676' \text{ с. ш.}, 89^{\circ}43,388' \text{ в. д.}$

Перед отбором проб вертикальные профили температуры, кондуктивности и редокс-потенциала измеряли с помощью погружного многоканального зонда YSI 6600 (Yellow Springs, Ohio, USA). Кондуктивность, измеренная в озере при температуре *in situ*, пересчитывали в кондуктивность при постоянной температуре 25°C (K_{25}) по формуле, рекомендованной международной организацией по стандартизации (International Organization for Standardization (ISO), 1985) [Boehrer, Schulze, 2008], модифицированной для оз. Шира [Рогозин и др., 2016]. В зимнее время отбор проб и измерения осуществляли через отверстие во льду. Пробы воды отбирали стандартным батометром объемом 0,5 л. Кроме того, в августе 2015 г. для прецизионного отбора проб из редокс-зоны применяли многошприцевой пробоотборник, позволяющий одновременно отбирать 15 проб воды через интервал 5 см [Rogozin, Degermendzhi, 2008].

Концентрацию сульфида определяли иодометрическим методом, для чего образцы фиксировали основным карбонатом цинка [Волков,

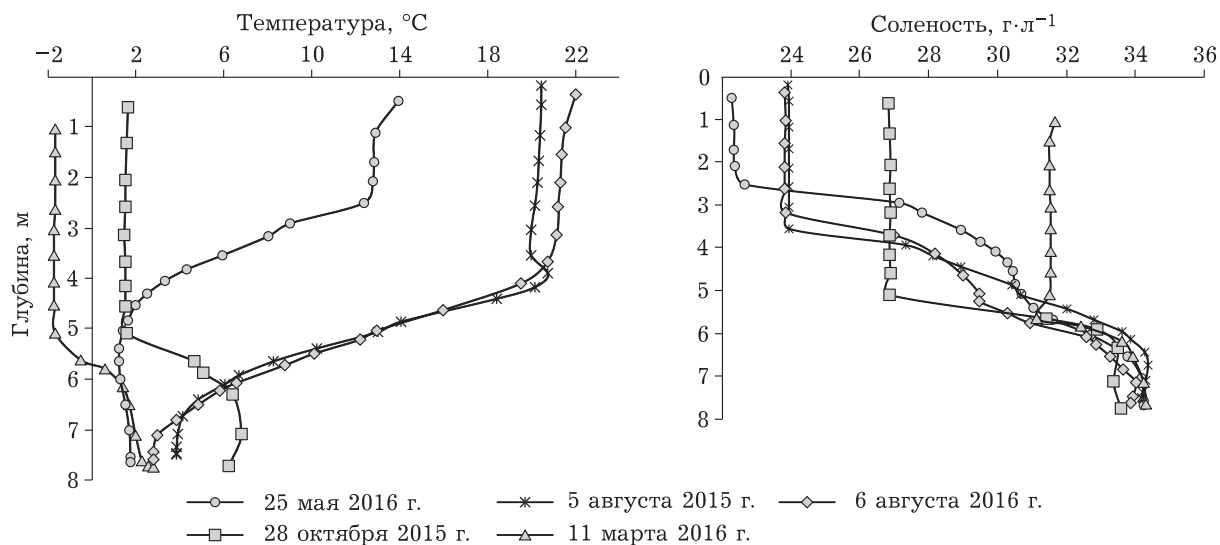


Рис. 2. Вертикальные распределения температуры (слева) и солености (справа) в центральной части оз. Учум в 2015–2016 гг.

Жабина, 1990]. Анализ хлорофилла *a* и бактериохлорофилла *a* проводили по спектрам поглощения в ацетоновых экстрактах по ранее описанной методике [Рогозин и др., 2010].

Счет проб фито- и протозоопланктона проводили после фиксации раствором Кузьмина [Кузьмин, 1975] (1%-я конечная концентрация). Фиксирование выполняли непосредственно во время отбора проб, с минимальной временной задержкой. С помощью метода отстаивания [Радченко и др., 2010] пробы сгущали до объема 28–50 мл. Для их счета использовали камеру Фукса – Розенталя (объем 0,0032 мл) под микроскопами Axiostar plus (Zess, Germany) и МБИ-11 при увеличении $\times 400$ и $\times 1000$. Для определения биомассы применяли счетно-объемный метод, для которого постоянно в каждой пробе проводили замер линейных размеров водорослей с помощью окуляр-микрометра. Для определения видового состава фитопланктона использовали определители [Голлербах и др., 1953; Забелина и др., 1954; Дедусенко-Щеголева и др., 1959; Комаренко и др., 1975; 1978; Царенко, 1990; Komárek J., Anagnostidis K., 1999; 2005], монографии А. А. Еленкина [1936], О. А. Коршикова [1953], а также сайт AlgaeBase (<http://www.algaebase.org/>), где представлена информация по современной классификации водорослей.

В центральной части озера пробы зоопланктона отбирали методом процеживания через

планктонную сеть Джеди столба воды 5,5 м, объем пробы составлял 173 л. В береговой зоне (в биотопах литораль, заросли макрофитов) – методом зачерпывания воды с поверхностного слоя (0–0,5 м) и фильтрации ее определенного объема через качественную сеть Апштейна (размер ячеек планктонного газа 68 мкм), объем пробы составлял 100 л. Пробы фиксировали 40%-м формалином до получения 4%-го раствора, после чего просматривали при помощи бинокулярного микроскопа МБС-10 ($\times 32$) [Руководство..., 1992].

Построение глобальной климатической карты мира проведено на основе данных о среднемесячных температурах января, июля, разности количества выпавших осадков и испаряемости. Создание карт среднемесячных значений температур января и июля выполнено по данным метеостанций за период с 1961 по 1991 г. [Leemans, Cramer, 1991]. Для построения карты разности осадков и испаряемости использовали карты годового количества выпавших осадков [Leemans, Cramer, 1991] и среднегодовых значений потенциальной испаряемости [Food and Agriculture Organization of the United Nations].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сезонная динамика вертикальной структуры водной толщи. Динамика вертикальных профилей солености и температуры, выяв-

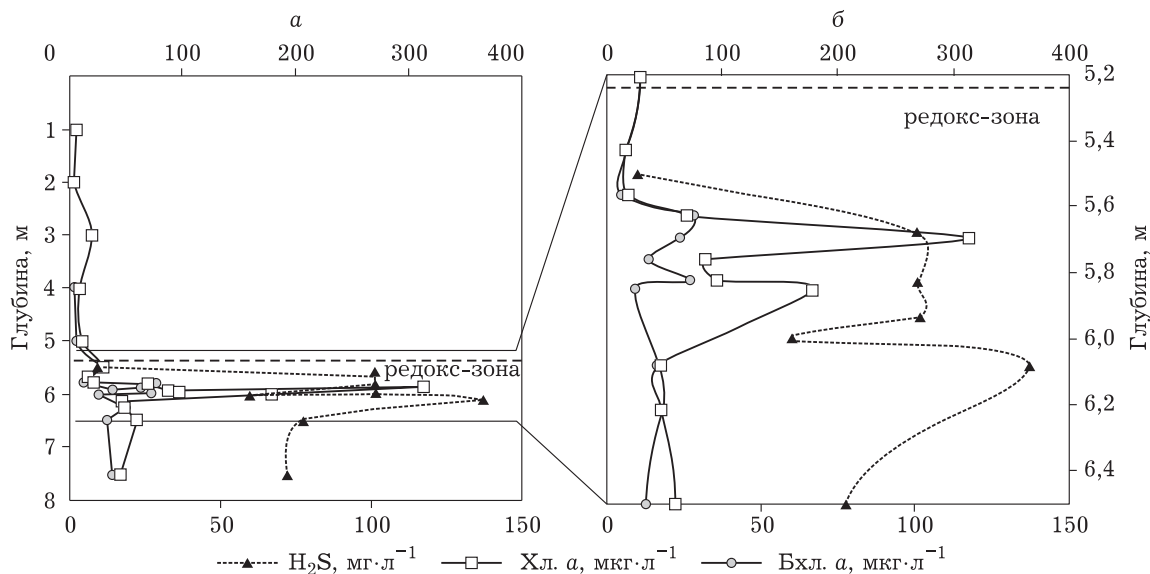


Рис. 3. Вертикальные распределения хлорофилла *a*, бактериохлорофилла *a* и сероводорода в водной толще оз. Учум в августе 2015 г. (а); то же в интервале глубин 5,5–6,5 м (б)

ленная по результатам ежесезонных измерений, показала, что в течение 2015–2016 гг. оз. Учум характеризовалось устойчивой стратификацией водной толщ (см. рис. 2). В мае, в результате таяния льда формировался относительно распресненный поверхностный слой. В нем от поверхности до глубины 2,5 м профили температуры и солености оказались практически равномерными, следовательно, данный слой подвергался перемешиванию под действием ветра (эпилимнион). К августу эпилимнион углублялся до 3,0–3,5 м. При этом соленость в нем увеличивалась за счет перемешивания с более солеными нижележащими слоями. К октябрю, за счет конвективного перемешивания, вызванного остыванием воды, соленость и температура выравнивались до глубины около 5 м. В ледовый период за счет вытеснения соли из льда в раствор возникала термогалинная конвекция, в результате которой перемешивание продолжалось, соленость в миксолимнионе повышалась, а миксолимнион достигал максимальной глубины (около 6 м). Положения галоклина и термоклина в миксолимнионе практически совпадали по глубине во все сезоны. В придонной части глубже 6 м профили солености оставались фактически неизменными во все сезоны, следовательно, данная часть водной толщ не захватывалась сезонной циркуляцией (см. рис. 2). Летние профили, измеренные в августе 2015 и 2016 гг.,

являлись практически идентичными. Таким образом, на основе круглогодичного мониторинга вертикальной структуры показано, что оз. Учум в 2015–2016 гг. являлось меромиктическим водоемом, сезонное перемешивание наблюдалось в интервале глубин от поверхности до 6 м (миксолимнион), водная толща глубже 6 м являлась монимолимнионом.

Вертикальное распределение сероводорода и фототрофных серных бактерий. В монимолимнионе озера во все сезоны присутствовал сероводород (рис. 3). Редокс-зона, определяемая как граница перехода от аэробных к анаэробным условиям по изменению знака редокс-потенциала, варьировала по сезонам в интервале глубин 4,4–5,6 м. Максимальная концентрация сероводорода (около $180 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$) зарегистрирована в марте в придонном слое (рис. 4). В октябре и марте его содержание монотонно нарастало от редокс-зоны ко дну, тогда как в остальные даты максимальная концентрация (около $100 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$) зарегистрирована выше придонного горизонта. В частности, в августе обоих лет она наблюдалась непосредственно под редокс-зоной, снижаясь по направлению ко дну. По-видимому, максимум продукции сероводорода (бактериальной сульфатредукции) сопряжен с максимумом интенсивности продукционных процессов в редокс-зоне, как это показано для других стратифицированных озер, в том числе для оз. Шира [Kosolapov et al., 2003].

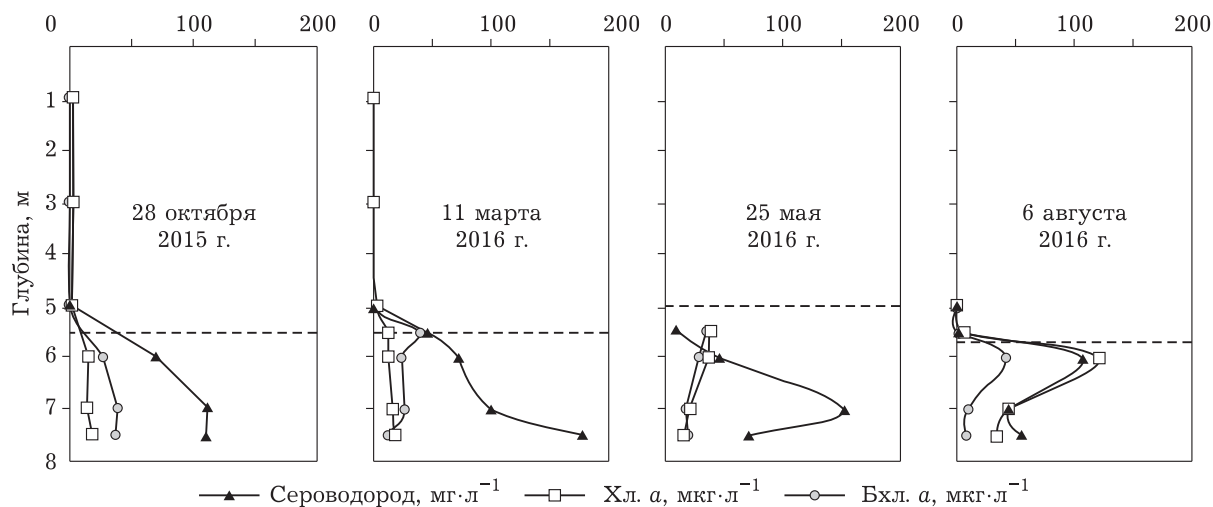


Рис. 4. Вертикальные распределения хлорофилла *a*, бактериохлорофилла *a* и сероводорода в центральной части оз. Учум. Пунктиром показана редокс-зона

Спектрофотометрический анализ показал, что во все сезоны в анаэробной зоне озера присутствовали пурпурные серные бактерии (рис. 5). В спектрах поглощения ацетоновых экстрактов образцов сестона ($> 0,2$ мкм) из редокс-зоны и мнимомлимниона присутствовал отчетливый пик бактериохлорофилла *a* на 772 нм, а также пик на 486 нм с “плечом” на 510 нм, характерный для каротиноида окенона (см. рис. 5). Данный спектр аналогичен спектру штамма *Thiocapsa* sp. *Shira_1* (AJ633676 в EMBL/GenBank) (см. рис. 5), выделенного ранее из анаэробной зоны оз. Шира [Рогозин и др., 2010], а также спектрам

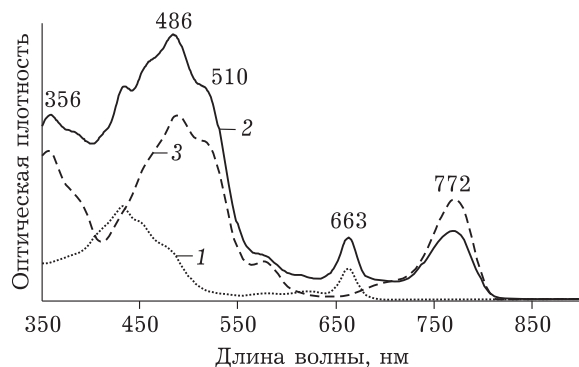


Рис. 5. Спектры поглощения ацетоновых экстрактов сестона ($> 0,2$ мкм) из оз. Учум и штамма *Thiocapsa* sp. *Shira_1*, выделенного из оз. Шира: 1 – оз. Учум с глубины 3 м; 2 – оз. Учум из “пурпурного слоя” (глубина 5,8 м); 3 – штамм *Thiocapsa* sp. *Shira_1* [Рогозин и др., 2010]

штаммов *ShAm01* и *ShNAм02* из озера Шира и Шунет соответственно [Лунина и др., 2007а, б], морфологически и филогенетически полностью сходных друг с другом и со штаммом *Thiocapsa* sp. *Shira_1*. ПСБ, доминирующие в оз. Учум, также по морфологическим признакам сходны с вышеупомянутыми штаммами.

На всех глубинах оз. Учум присутствовал хлорофилл *a*, как следует из наличия характерного пика поглощения на 663 нм (см. рис. 5), причем в летнее время в редокс-зоне наблюдался заметный максимум его концентрации, обусловленный, возможно, оседанием клеток отмершего фитопланктона из верхних слоев, а также массовым развитием цианобактерий (см. далее). Пигменты зеленых серных бактерий спектрофотометрическим методом не выявлены, что свидетельствует о минорной роли ЗСБ в данном озере в период исследований. Вертикальное распределение бактериохлорофилла *a* во все даты, кроме октября, характеризовалось максимумом в редокс-зоне. Прецизионный отбор проб с помощью многосприцевого пробоотборника в августе 2015 г. показал, что максимум бактериохлорофилла *a* сформирован в редокс-зоне в виде взвешенного слоя толщиной порядка 5 см (см. рис. 3). В августе 2016 г. данный слой также визуально различался в пробе воды, отобранной прозрачным батометром из редокс-зоны. Под ней концентрация бак-

териохлорофилла *a* снижалась во все даты, кроме октября. По-видимому, в октябре интенсивность микробных процессов в редокс-зоне оказалась ниже, чем в остальные сезоны, из-за конвективного перемешивания, разрушающего ее во время остывания водной толщи. Этим объясняется отсутствие в октябре локальных максимумов содержания Бхл. *a*, Хл. *a* и сероводорода в редокс-зоне, наблюдаемых в остальные сезоны.

Фитопланктон и протозоопланктон. В аэробной зоне оз. Учум во все сезоны присутствовали мелкие цианобактерии *Synechocystis salina* (размер 1 мкм), достигая максимальной численности в октябре (табл. 1). Во всех горизонтах выше редокс-зоны отмечались криптофитовые *Rhodomonas salina* (Wislouch) D. R. A. Hill & R. Wetherbee (см. табл. 1), мелкие, вытянутые клетки длиной 10–12 мкм, а толщиной – 6 мкм. Другие водоросли в осенне-зимний период практически отсутствовали (см. табл. 1).

В мае на поверхности картина оставалась такой же, однако на глубинах около 4 м в массовом количестве развивались зеленые водоросли *Chlorella vulgaris* Beijerinck – одноклеточные, часто собранные в свободные группы, но хаотично, напоминающие хлореллу в культуре, 6–8 мкм в диаметре. Биомасса данного вида достигала $23,8 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, что вызывало глубинное “цветение” воды. Также на глубине 4 м отмечалось массовое развитие криптофитовых водорослей (см. табл. 1). Кроме того, в мае появлялась цианобактерия *Chondrocystis sarcinoides* (Elenkin) Komárek & Anagnostidis (старое название *Chlorogloea sarcinoides* (Elenkin) Troickaja), образующая пластинки из клеток, по литературным данным она участвует в формировании лечебных грязей [Жизнь растений, 1977]. В небольшом количестве отмечена *Dunaliella salina* (Dunal) Teodoresco, а также нитчатые цианобактерии из семейства Oscillatoriaceae, которые не удалось определить до рода. Диатомовые *Achnanthes* sp. и *Navicula* sp. встречались единично только в мае. Также только в данный период отмечено наличие в пелагиали озера инфузорий в массовом количестве, численностью более $300 \text{ кл} \cdot \text{мл}^{-1}$ на глубине 4 м, представленных единственным видом *Cyclidium* sp. (см. табл. 1).

В августе появлялась цианобактерия *Lyngbya* sp. Ag., и зеленая водоросль *Chlorosarcina* sp. (см. табл. 1), а также выявлено массовое развитие цианобактерии *Chondrocystis sarcinoides* (Elenkin) Komárek & Anagnostidis в редокс-зоне (см. табл. 1).

Зоопланктон. Во все сезоны как в пелагиали, так и в береговой зоне оз. Учум преобладали копеподы *Arctodiaptomus salinus* (Daday). Кладоцеры-галофилы *Moina mongolica* (Daday) отсутствовали в сообществе большее время года, однако их массовое развитие выявлено в августе (табл. 2), когда мoinны распространялись по всему водоему и присутствовали как в пелагиали, так и в береговой зоне в зарослях макрофитов. Группы копепод и коловраток более разнообразны таксономически, но за исключением *Arctodiaptomus salinus*, *Hexarthra fennica* (Zwander) и *Brachionus plicatilis* (Muller) в зоне открытой воды практически не встречались.

В фитофильном сообществе за счет видов, приуроченных к обитанию в зарослях, разнообразие богаче, чем в пелагической части озера. В зарослях макрофитов зарегистрированы циклопы *Diacyclops bisetosus* (Rehberg), коловратки *Keratella quadrata* (Muller), *Notholca acuminata* (Ehrenberg). Так как данные виды тяготеют к обитанию в пресных водах, можно предположить наличие распресненных участков в литорали озера как следствие влияния пресных ключей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная динамика фитопланктона и зоопланктона. Она характеризуется зимним минимумом и ярко выраженным весенним максимумом. В мае цветение зеленых водорослей *Chlorella vulgaris* Beijerinck и криптофитовых *Rhodomonas salina* (Wislouch) D. R. A. Hill & R. Wetherbee в глубинных слоях в непосредственной близости от хемоклина, вероятно, обусловлено тем, что водоросли из-за глубины не могли выедаться планктонными беспозвоночными. Способность *Chlorella vulgaris* доминировать в соленых озерах отмечали и другие авторы [Лабунская, Бухарицин, 2007]. Инфузории *Cyclidium* sp. также присутствуют только в мае, причем в массовом количестве. Следует отметить, что в данный пери-

Таксономический состав и вертикальное распределение численности фитопланктона и протозоопланктона в оз. Учум в весенне-летний период 2016 г, кл. · мл⁻¹

	Глубина	28.10.2015 г.					11.03.2016 г.					25.05.2016 г.					06.08.2016 г.				
		1 м	3 м	5 м	6 м	2 м	4 м	2 м	4 м	Редокс 5,3 м	2 м	4 м	Редокс 4,4 м	2 м	4 м	Редокс 4 м	2 м	4 м	Редокс 5,6 м		
Суаобас- teria	<i>Synechocystis salina</i> Wislouch	13 020	4620	3000	-	2775	3150	2340	675	-	4924	2756	1365								
	Нитчатые цианобактерии семейства Oscillatoriaceae	-	-	-	-	-	-	-	1406	-	-	-	3754								
	<i>Chondrocystis sarcinoides</i> (Elenkin) Komárek & Anagnostidis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	615	-	109 590								
	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (Lemmermann) Komárek	-	-	-	-	-	-	-	-	-	487	-	-								
	<i>Lyngbya</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	256	-								
Бациллярно- phyta	<i>Achnanthes</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	56	-	38	-	-								
	<i>Navicula</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-								
Еуглено- phyta	<i>Euglena</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14								
Chloro- phyta	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	-	-	-	-	-	-	-	89 100	-	20 910	-	-								
	<i>Dunaliella salina</i> (Dunal) Teodoresco	-	-	-	-	-	-	-	84	4715	-	-	2291								
	<i>Oocystis borgei</i> J. W. Show	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-								
	<i>Chlorosarcina</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1706	28	-								
СRYPTO- phyta	<i>Rhodomonas salina</i> (Wislouch)	59	95	58	17	3	10	154	1861	16	165	285	37								
	D. R. A. Hill & R. Wetherbee	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Сiliophora	<i>Cyclidium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	309	6	-	-	-								

Численность и биомасса зоопланктона в водной толще оз. Учум в 2015–2016 гг.

Дата	Биотоп	Численность, тыс. экз · м ⁻³			Биомасса, мг · м ⁻³		
		Cladocera	Copepoda	Rotifera	Cladocera	Copepoda	Rotifera
28.10.2015 г.	0–5,5 м	0	66	18	0	33 190	97
11.03.2016 г.	0–5,5 м	0	80	0,6	0	3164	1,8
25.05.2016 г.	0–5,5 м	0	183	17,9	0	3498	148
	Тростник	0	114	1,8	0	272	2
06.08.2016 г.	0–5,5 м	30	168	458	519	3820	965
	Тростник	0,3	55	5,3	18	1294	11

од прозрачность по диску Секки (3 м) существенно меньше, чем в августе (6 м), что, очевидно, обусловлено весенним максимумом численности планктонных микроорганизмов.

В августе 2015 г. развитие цианобактерии *Chondrocystis sarcinoides* (Elenkin) Komárek & Anagnostidis, вероятно, обусловило максимум концентрации хлорофилла *a* в редокс-зоне, выявленный при прецизионном отборе проб, когда состав фитопланктона не анализировали (см. рис. 3). К концу лета повышение прозрачности воды вызывалось, по-видимому, снижением численности фитопланктона в результате фильтрующей деятельности ветвистоусых рачков *Moina mongolica* (Daday), численность которых значительно возросла. Летний пик численности данного вида, очевидно, обусловлен прогревом воды, так как этот вид является теплолюбивым.

Сравнение с меромиктическими озерами Ши́ра и Шунет. Инфузория *Cyclidium* sp. – один из доминирующих видов в расположенных поблизости озерах Ши́ра и Шунет, где обычно образует глубинные пики численности, однако в целом состав протозоопланктона там значительно разнообразнее [Природный комплекс..., 2011], что, по-видимому, объясняется меньшей соленостью в миксолимнионе этих водоемов.

Таксономическая структура зоопланктона оз. Учум и ее сезонная динамика в целом аналогичны таковым в меромиктических соленых озерах Ши́ра и Шунет [Природный комплекс..., 2011]. Однако в отличие от них, в оз. Учум не обнаружены гаммариды (Crustacea: Amphipoda), что, вероятно, также объясняется большей соленостью в миксолимнионе данного озера.

Сезонная динамика вертикальной структуры водной толщи оз. Учум в общих чертах идентична ранее описанной для меромиктических озер Ши́ра [Rogozin et al., 2010] и Шунет [Рогозин и др., 2012], обладающих схожим составом солей и, вероятно, имеющих схожую историю.

Озеро Учум по разности солености между миксолимнионом и монимолимнионом (24–34 г · л⁻¹) занимает промежуточное положение между слабо стратифицированным оз. Ши́ра (15–19 г · л⁻¹) [Rogozin et al., 2010] и сильно стратифицированным оз. Шунет (20–80 г · л⁻¹) [Рогозин и др., 2012] (табл. 3).

В оз. Учум выявлена стратификация фототрофных серных бактерий, характерная для большинства меромиктических озер, в том числе для озер Ши́ра и Шунет. Судя по пигментному составу и морфологическим признакам, в оз. Учум доминировал тот же или близкородственный вид, что и в вышеуказанных водоемах. По концентрации бактериохлорофилла *a*, отражающей биомассу ПСБ, оз. Учум занимает промежуточное положение между оз. Ши́ра, где концентрация Бхл. *a* на порядок меньше [Рогозин и др., 2016] и оз. Шунет, где она примерно на порядок выше [Рогозин и др., 2012] (см. табл. 3). В озерах Ши́ра и Шунет также ПСБ доминируют над ЗСБ [Рогозин и др., 2010, 2016]. Основные факторы, обуславливающие существование фототрофных серных бактерий в редокс-зонах стратифицированных озер – это свет, сероводород и устойчивость стратификации. В свою очередь, количество света зависит от глубины редокс-зоны и светопоглощающих свойств водной толщи миксолимниона. Температура также является важным фактором, влияющим на продукцию бактерио-

Характеристики вертикальной структуры и условий в редокс-зоне меромиктических озер Минусинской котловины в период летней стратификации

Озеро	$S_{\text{микс}}, \text{г} \cdot \text{л}^{-1}$	$S_{\text{мон}}, \text{г} \cdot \text{л}^{-1}$	$\text{H}_2\text{S}, \text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$	$H, \text{м}$	Секки, м	ФАР $\mu\text{E} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$T, ^\circ\text{C}$	Бхл. $a, \text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$
Шира*	14–17	18–19	10–35	11–14	3,5–4,0	0,4–2,0	0–8	5–30
Учум	23–30	34	50–180	5,2–5,6	3–6,2	–	10–14	40–70
Шунет	13–25	80–85	200–900	5,0–5,1	3,75	50–90	8–17	300–1000

П р и м е ч а н и е. *Данные за период 2000–2014. $S_{\text{микс}}, S_{\text{мон}}$ – соленость в миксолимнионе и монимолимнионе соответственно; концентрация сероводорода приведена для придонного горизонта, H – положение редокс-зоны по глубине; остальные характеристики приведены для глубины редокс-зоны.

планктона, в том числе и фототрофных серных бактерий. Из табл. 3 видно, что оз. Учум по всем вышеперечисленным факторам занимает промежуточное положение между озерами Шира и Шунет, этим, вероятно, объясняется характерная величина численности ПСБ в данном озере. Интенсивность ФАР в летнее время не измеряли, однако существенно более высокая прозрачность по диску Секки свидетельствует, что на глубине редокс-зоны световые условия даже лучше, чем в оз. Шунет, где зарегистрирована рекордная для региона, и вторая в мире плотность популяции ПСБ в редокс-зоне [Рогозин и др., 2010]. Вероятно, более слабый градиент плотности в ней обуславливает меньшую гидрофизическую стабильность, и как следствие – в меньшей степени способствует накоплению ПСБ в тонком взвешенном слое. Кроме того, более слабый поток сероводорода в редокс-зону, вероятно, лимитирует рост ПСБ сильнее, чем в оз. Шунет.

Происхождение меромиксии в оз. Учум.

Как показано выше, основным фактором, определяющим неравномерное по вертикали распределение минерализации в верхних слоях озера, является ежегодное образование толстого ледового покрова и его таяние. В связи с этим представляет интерес поиск существующих аналогов среди озер мира. Очевидно, что толстый ледовый покров формируется на всех озерах, расположенных на широтах, близких или более высоких, чем широта исследуемой части Сибири, а в горных областях – и значительно южнее. На указанных широтах соленые озера достаточно редки, поскольку они образуются только в аридном климате, в результате испарительного концентрирования солей в бессточных бассейнах. Климат же большинства регионов

на данных широтах не является аридным, поэтому многие озера проточные, следовательно – пресные. Таким образом, на Земле не так много территорий с резко-континентальным аридным типом климата, подобных Северо-Минусинской котловине (Хакасия). Авторами проведен поиск регионов, аналогичных по температурному режиму и балансу осадков и испарения. Заданы следующие условия, близкие к таковым для Хакасии: среднемесячная температура января $-20,5^\circ\text{C}$; среднемесячная температура июля $+16,5^\circ\text{C}$; количество осадков, выпавших за год – 200 мм; годовая величина испаряемости в год – 653 мм; разность количества выпавших осадков и испаряемости – 453 мм. Искомые климатические условия сконцентрированы в основном в двух местах – это центр Евразийского материка, куда относится и Северо-Минусинская котловина, и внутренние области Канады. Очевидно, схожесть климата обусловлена одинаковым широтным расположением, удаленностью от морей и сходством рельефа. В северной части Великих равнин Северной Америки (провинции Саскачеван и Манитоба, Канада), на обширных степных территориях существует огромное количество соленых озер [Last, Ginn, 2005], среди которых описаны несколько меромиктических по происхождению, химическому составу солей и экологии фототрофных серных бактерий, являющихся аналогами озер Шира, Шунет и Учум. К числу наиболее изученных относятся озера Дэдмус, глубиной 48 м, и Вальдси, глубиной 14 м, а также ряд более мелких водоемов [Parker et al., 1983; Hammer, 1994]. В них доминирующими ионами являются SO_4^{2-} и Na^+ , pH 8–9, и толщина льда достигает одного метра, т. е. условия аналогичны таковым в озерах Шира, Шунет

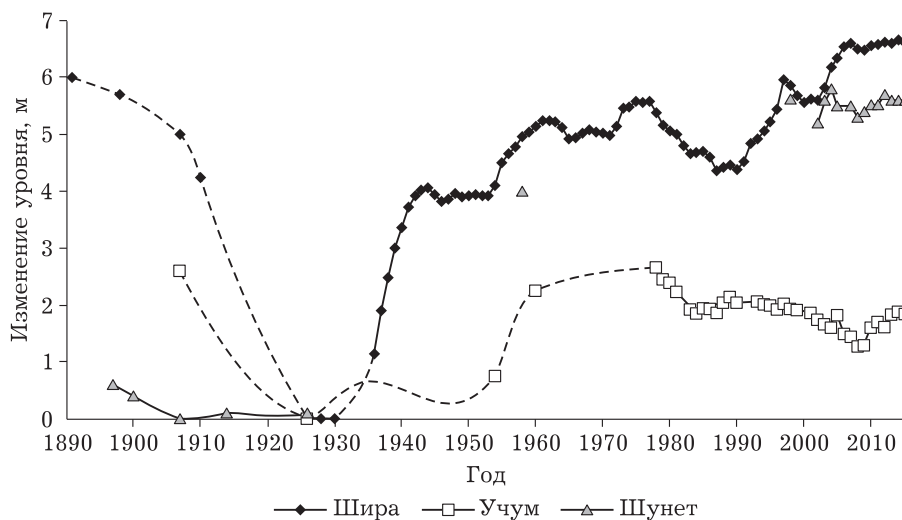


Рис. 6. Многолетние изменения уровня озер Шира, Шунет и Учум. Уровень озер Шира и Учум по данным Гидрометеослужбы, изменения уровня оз. Шунет – по максимальной глубине, до 1998 г. – по литературным данным [Природные воды..., 2003], далее – по собственным измерениям глубины с помощью регистрирующего зонда

и Учум. Как показали многолетние исследования стратификации вышеуказанных канадских озер, меромиксия в этих водоемах имеет экзогенное происхождение, обусловленное поднятием уровня за счет поверхностного притока пресной воды. Так, в оз. Вальдси уровень поднялся на 4 м в период с 1960-х до 1980-х гг. в результате повышенного выпадения снега в зимнее время, что привело к существенному снижению солености в поверхностных слоях и возникновению меромиксии в 1970-е гг. Аналогичным образом она возникла в оз. Дэдмус [Hammer, 1994].

Уровень воды в оз. Учум и соленость менялись в общих чертах аналогично двум другим бессточным меромиктическим озерам Минусинской котловины – Шира и Шунет (рис. 6). С начала XX в. и до 1910–1920 гг. наблюдалось снижение уровня всех озер, сопровождавшееся увеличением их солености. В 1926 г. зарегистрирован наименьший уровень вод и соответственно – наибольшая соленость [Кривошеев, Хасанов, 1990]. Позже уровень озер возростал, наибольший ежегодный прирост наблюдался в 1930–1940-е гг., а соленость, соответственно, снижалась. Для оз. Шира расчеты показали, что уменьшение солености происходит в обратной зависимости от роста объема [Кривошеев, Хасанов, 1990; Rogozin et al., 2010]. Схожая динамика уровня и солености всех трех озер

указывает, что количество воды в них определялось климатическими факторами, а именно – балансом осадков и испарения в данной местности. Поэтому в оз. Учум подъем уровня и снижение солености вызывались поступлением пресной воды, что, вероятно, и является одним из механизмов поддержания вертикального градиента солености, и, следовательно – меромиксии. Данный тип ее возникновения называется экзогенным по классификации Хатчинсона [Hutchinson, 1957], или экзогенным I типа по классификации Уолкера и Ликенса [Walker, Likens, 1974], т. е. обусловлен притоком пресной воды в соленый водоем. Для оз. Шира данный вывод сделан авторами ранее [Rogozin et al., 2010].

Существуют и внутренние механизмы, способствующие возникновению и поддержанию градиента солености. Во-первых, ежегодное увеличение солености подо льдом вследствие вытеснения солей при замерзании и, соответственно, ее снижение в верхних слоях после таяния льда обеспечивают неоднородность показателя в верхних слоях, как это продемонстрировано выше (см. рис. 2). В достаточно мелководном озере соленость должна выравниваться по вертикали каждую зиму, но при увеличении уровня воды осеннее и зимнее перемешивание может не захватить придонные слои, и повышенная концентрация солей в них сохранится до следующего

года, т. е. возникнет меромиксия. Очевидно, что данный эндогенный механизм в сочетании с подъемом уровня усиливает действие эктогенного механизма.

Во-вторых, при концентрации свыше $30 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ и температурах, близких к замерзанию, сульфат натрия выпадает в осадок в виде кристаллов мирабилита, которые остаются на дне, и затем, при повышении температуры, растворяются в придонных слоях, повышая их соленость. Данное явление отмечено в вышеописанных канадских озерах [Hammer, 1994].

В оз. Учум в прошлом, при более высокой солености, кристаллы мирабилита осаждались, поскольку такие кристаллы обнаружены в его донных отложениях. Возможно, их постепенное растворение поддерживает повышенную соленость монимолимниона и в настоящее время. В оз. Шунет данный механизм также работает, судя по историческим данным и наличию мирабилита в донных отложениях.

Есть сведения, что в 1965 г. соленость оз. Учум у дна оказалась почти в два раза выше, чем на поверхности [Кривошеев, Хасанов, 1990]. В настоящее время разница солености существенно снизилась (см. табл. 3; рис. 2), что указывает на постепенное смешивание монимолимниона с миксолимнионом, либо на увеличение солености миксолимниона за счет испарения, так как в 1956 г. уровень оз. Учум был выше современного. Таким образом, современный градиент солености в денном водоеме должен ослабевать в условиях постоянного либо снижающегося уровня, однако при низком уровне он может вновь усилиться за счет выпадения солей в осадок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые показано, что оз. Учум является меромиктическим водоемом. По динамике вертикальной структуры водной толщи и составу планктонного сообщества данный водоем имеет сходство с расположенными поблизости озерами Ши́ра и Шунет. Наиболее вероятно, что меромиксия оз. Учум является эктогенной, т. е. обусловлена притоком пресной воды на поверхность соленого водоема.

Кроме того, эндогенный механизм перераспределения солей, обусловленный сезонным замерзанием озера также способствует формированию градиента солености – следовательно – меромиксии.

Выявление нового меромиктического озера расширяет возможности для высокоразрешающих палеоклиматических реконструкций влажности климата Южной Сибири в позднем голоцене по донным отложениям стратифицированных озер. Озеро Учум является особенно ценным объектом благодаря наличию постоянно действующего гидропоста Гидрометеослужбы РФ, а следовательно, – наличию инструментального ряда данных, позволяющего сопоставлять динамику уровня с метеорологическими факторами. Кроме того, его бальнеологические свойства, возможно, в существенной степени определяются характером стратификации водоема, следовательно – полученные сведения о современном состоянии озера могут оказаться полезными как для реконструкции климата по донным отложениям, так и для создания моделей качества воды и изучения лечебных свойств озерных грязей.

Авторы благодарны сотрудникам Средне-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Красноярск) за предоставленную информацию о многолетних изменениях уровня озер Ши́ра и Учум, а также анонимному рецензенту за ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00091), а также при частичном финансировании Совета по грантам Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-9249.2016.5).

ЛИТЕРАТУРА

- Борзенко С. В., Замана Л. В., Носкова Е. В. Меромиксия озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Успехи соврем. естествознания. 2015. № 1-3. С. 420–425.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Метод определения восстановленных соединений серы в морской воде // Океанология. 1990. Т. 30, № 5. С. 778–782.
- Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. Синезеленые водоросли. М.: Сов. наука, 1953. 652 с.
- Дедусенко-Щеголева Н. Т., Матвиенко А. М., Шкорба-тов Л. А. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. Вып. 8: Зеленые водоросли. 230 с.

- Еленкин А. А. Синезеленые водоросли СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. 680 с.
- Жизнь растений. Лишайники / под ред. М. М. Голлербаха. М.: Просвещение, 1977. Т. 3: Водоросли. Лишайники. 487 с.
- Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1954. Вып. 4: Диатомовые водоросли. 619 с.
- Комаренко Л. Е., Васильева Н. И. Пресноводные диатомовые и синезеленые водоросли водоемов Якутии. М.: Наука, 1975. 423 с.
- Комаренко Л. Е., Васильева Н. И. Пресноводные зеленые водоросли водоемов Якутии. М.: Наука, 1978. 480 с.
- Коршиков О. А. Определитель пресноводных водорослей Украинской ССР. Подкласс протококковые. Киев: Изд-во АН УССР, 1953. 440 с.
- Кривошеев А. С., Хасанов А. П. Лечебные озера Красноярского края. Красноярск: Кн. изд-во, 1990. 190 с.
- Кузьмин Г. В. Фитопланктон. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. С. 73–84.
- Лабунская Е. Н., Бухарицин П. И. Эколого-географическая характеристика фитопланктона западных подступных озер Прикаспийской низменности // Вестн. АГТУ, 2007. № 3 (38), С. 66–71.
- Лунина О. Н., Брянцева И. А., Акимов В. Н., Русанов И. И., Рогозин Д. Ю., Баринаева Е. А., Пименов Н. В. Сезонные изменения структуры сообщества аноксигенных фототрофных бактерий озера Шунет (Хакасия) // Микробиология. 2007а. Т. 76, № 3. С. 416–428 [Lunina O. N., Bryantseva I. A., Akimov V. N., Rusanov I. I., Rogozin D. Yu., Barinova E. S., Lysenko A. M., Pimenov N. V. Seasonal changes in the structure of the anoxygenic photosynthetic bacterial community in lake Shunet, Khakassia // Microbiology. 2007a. Vol. 76, N 3. P. 368–379].
- Лунина О. Н., Брянцева И. А., Акимов В. Н., Русанов И. И., Баринаева Е. А., Лысенко А. М., Рогозин Д. Ю., Пименов Н. В. Сообщество аноксигенных фототрофных бактерий озера Ширы (Хакасия) // Там же. 2007б. Т. 76, № 4. С. 533–544 [Lunina O. N., Bryantseva I. A., Akimov V. N., Rusanov I. I., Barinova E. S., Lysenko A. M., Rogozin D. Yu., Pimenov N. V. Anoxygenic phototrophic bacteria community of lake Shira (Khakassia) // Ibid. 2007b. Vol. 76, N 4. P. 469–480].
- Природные воды Ширинского района Республики Хакасия / под ред. В. П. Парначева. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 183 с.
- Природный комплекс и биоразнообразие участка “Озеро Ширы” заповедника “Хакасский” / под ред. В. В. Непомнящего. Абакан: Хакас. кн. изд-во, 2011. 420 с.
- Радченко И. Г., Капков В. И., Федоров В. Д. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона. М.: Мордвинцев, 2010. 60 с.
- Рогозин Д. Ю., Трусова М. Ю., Хромечек Е. Б., Дегерменджи А. Г. Микробное сообщество хемоклина меромиктического озера Шунет (Хакасия, Россия) в период летней стратификации // Микробиология. 2010. Т. 79, № 2. С. 277–285 [Rogozin D. Y., Trusova M. Y., Khromechek E. B., Degermendzhy A. G. Microbial community of the chemocline of meromictic lake Shunet during summer stratification // Microbiology. 2010. Vol. 79, N 2. P. 253–261].
- Рогозин Д. Ю., Зыков В. В., Дегерменджи А. Г. Экология пурпурных серных бактерий в сильно стратифицированном меромиктическом озере Шунет (Сибирь, Хакасия) в период 2002–2009 гг. // Там же. 2012. Т. 81, № 6. С. 786–795 [Rogozin D. Y., Zikov V. V., Degermendzhi A. G. Ecology of purple sulfur bacteria in the highly stratified meromictic lake Shunet (Siberia, Khakassia) // Ibid. 2012. Vol. 81, N 6. P. 727–735].
- Рогозин Д. Ю., Зыков В. В., Тарновский М. О. Динамика пурпурных серных бактерий в соленом меромиктическом озере Ширы (Сибирь, Хакасия) в период 2007–2013 гг. // Там же. 2016. Т. 85, № 1. С. 73–82. [Rogozin D. Y., Zikov V. V., Tarnovsky M. O. Dynamics of purple sulfur bacteria in saline meromictic lake Shira (Khakassia, Siberia) for the period 2007–2013 // Ibid. 2016. Vol. 85, N 1. P. 93–101].
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
- Царенко П. М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР. Киев: Наук. думка, 1990. 208 с.
- Boehrer B., Schulze M. Stratification of lakes // Rev. Geophys. 2008. N 46.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>
- Hammer U. T. Life and times of five Saskatchewan saline meromictic lakes // Int. Rev. Gesamten Hydrobiol. 1994. Vol. 79. P. 235–248.
- Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I. A., Darin A. V., Wagner M., Rogozin D. Y., Tarasov P. E. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2015. Vol. 426. P. 75–84.
- Hutchinson G. E. A Treatise on Limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. New York: John Wiley and Sons, Inc.; London: Chapman and Hall, Ltd., 1957. 1015 p.
- Kalugin I., Darin A., Rogozin D., Tretyakov G. Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia // Quaternary Int. 2013. Vol. 290–291. P. 245–252.
- Komárek J., Anagnostidis K. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota: 1. Teil/1st Part: Chroococcales. Heidelberg; Berlin: Spektrum, Akademischer, 1999. Vol. 19. P. 1–548.
- Komárek J., Anagnostidis K. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota: 2. Teil/2nd Part: Oscillatoriales. München: Elsevier Spektrum Akademischer, 2005. Vol. 19. P. 1–759.
- Kosolapov D. B., Rogozin D. Yu., Gladchenko I. A., Kopylov A. I., Zakharova E. E. Microbial sulfate reduction in brackish meromictic steppe lake // Aquatic Ecol. 2003. Vol. 37, N 3. P. 215–226.
- Last W. M., Ginn F. M. Saline systems of the Great Plains of western Canada: An overview of the limnogeology and paleolimnology // Saline systems. 2005. Vol. 1, N 10. P. 1–38.
- Leemans R., Cramer W. The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid. Research Report

- RR-91-18. November 1991. Laxenburg: International Institute of Applied Systems Analyses, 1991. 61 p.
- MacIntyre S., Jellison R. Nutrient fluxes from upwelling and enhanced turbulence at the top of the pycnocline in Mono Lake, California // *Hydrobiologia*. 2001. Vol. 466. P. 13–29.
- Matyugina E. B., Belkova N. L. Distribution and diversity of microbial communities in meromictic soda Lake Doroninskoe (Transbaikalia, Russia) during winter // *Chinese Journ. Oceanol. Limnol.* 2015, Vol. 33, N 6. P. 1378–1390.
- Overmann J., Sandmann G., Hall K. G., Northcote T. Fossil carotenoids and paleolimnology of meromictic Mahoney Lake, British Columbia, Canada // *Aquatic Sci.* 1993. Vol. 55. P. 1015–1621.
- Parker R. D., Lawrence J. R., Hammer U. T. A comparison of phototrophic bacteria in two adjacent saline meromictic lakes // *Hydrobiologia*. 1983. Vol. 105. P. 53–62.
- Parnachev V. P., Degermendzhy A. G. Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakasia, Southern Siberia // *Aquatic Ecol.* 2002. Vol. 36. P. 107–122.
- Ravasi D. F., Peduzzi S., Guidi V., Peduzzi R., Wirth S. B., Gilli A., Tonolla M. Development of a real-time PCR method for the detection of fossil 16S rDNA fragments of phototrophic sulfur bacteria in the sediments of Lake Cadagno // *Geobiology*. 2012. Vol. 10. P. 196–204.
- Rogozin D. Y., Degermendzhy A. G. Hydraulically-operated thin-layer sampler for sampling heterogeneous water columns // *J. Sib. Fed. Univ.* 2008. Vol. 1, N 2. P. 111–117.
- Rogozin D. Y., Genova S. V., Gulati R. D., Degermendzhy A. G. Some generalizations on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009 // *Aquatic Ecol.* 2010. Vol. 44, N 3. P. 485–496.
- Tonolla M., Peduzzi S., Hahn D., Peduzzi R. Spatio-temporal distribution of phototrophic sulfur bacteria in the chemocline of meromictic lake Cadagno (Switzerland) // *FEMS. Microbiol. Ecol.* 2003. Vol. 43. P. 89–98.
- Walker K. F., Likens G. E. Meromixis and reconsidered typology of lake circulation patterns // *Verh. Int. Verein. Limnol.* 1974. Vol. 19. P. 442–458.

Meromixis and Seasonal Dynamics of Vertical Structure of Lake Uchum (South Siberia)

D. Y. ROGOZIN^{1,2}, V. V. ZYKOV¹, E. A. IVANOVA², T. N. ANUFRIEVA², Y. V. BARKHATOV¹,
E. B. KHROMECHER¹, I. Y. BOTVICH¹

¹ *Institute of Biophysics, Siberian Division, RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/50
E-mail: rogozin@ibp.ru*

² *Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79*

For the first time the seasonal dynamics of the vertical structure of small salt Lake Uchum, located in the steppe arid zone of the South of Siberia (the Krasnoyarsk Krai), has been studied in detail. It is shown that this lake is a meromictic water body. A heterogeneous vertical distribution of plankton organisms and a dense population of purple sulfuric bacteria in the redox zone were revealed. The taxonomic composition and seasonal dynamics of phyto- and zooplankton were described. Presumably, the meromixis of Lake Uchum is due to the inflow of fresh water to the surface of the saline water body during the rise of its level in the early 20th century, similar to Shira and Shunet lakes located nearby. The processes of salt displacement into the solution during the formation of ice, as well as the precipitation of salts in the winter, also contribute to the maintenance of permanent stratification. Obtained information on the current state of the lake can be useful for reconstructing the climate by bottom sediments, as well as for creating models of water quality and studying the therapeutic properties of lake mud.

Key words: meromixis, hydrogen sulphide, stratification, salt lake, phototrophic sulfur bacteria, phytoplankton, zooplankton, bottom sediments.