

Анализ диатомовых водорослей водной толщи и донных отложений озера Ши́ра (Хакасия, Россия)

Г. Н. БОЛОБАНЩИКОВА¹, Д. Ю. РОГОЗИН^{1,2}, А. Д. ФИРСОВА³, Е. В. РОДИОНОВА³,
Н. Н. ДЕГЕРМЕНДЖИ⁴, А. В. ШАБАНОВ⁵

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

² Сибирский Федеральный Университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: rogozin@ibp.ru

³ Лимнологический институт СО РАН
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
E-mail: firsova@lin.irk.ru, rodionova@lin.irk.ru

⁴ Красноярский государственный медицинский университет им. В. Ф. Войно-Ясенецкого
660022, Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1
E-mail: nd1947@yandex.ru

⁵ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/38
E-mail: alexch@nikel.akadem.ru

Статья поступила 28.11.2013

Принята к печати 23.06.2014

АННОТАЦИЯ

Меромиктические озера представляют собой интересные объекты с точки зрения палеолимнологии. Озеро Ши́ра является одним из таких озер. В мае 2011 г. со дна озера взяли керн и изучили видовой состав биоиндикатора состояния и развития озера – диатомовых водорослей. Кроме того, в течение 2012 г. отобраны и проанализированы на видовой состав диатомовых сезонные пробы воды и материалы седиментационных ловушек. Результаты анализа проб воды и седиментационного материала показали, что на данный момент в озере, как и в предыдущие годы исследований, доминирует вид *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad. В исследованном керне диатомовые водоросли обнаружены дважды перед белыми карбонатными слоями. В других слоях стратиграфически диатомовые отсутствовали. До первого белого слоя наблюдались виды, обитающие в озере и в настоящее время, в том числе и доминирующая в озере на данный момент *C. choctawhatcheeana*, что, предположительно, свидетельствует о неизменности видового состава диатомей озера с 1946 г. [Рогозин и др., 2005], а вместе с тем и состояния водоема в целом. До второго белого карбонатного слоя доминирующими видами, судя по количеству створок, являлись *Aulacoseira valida* (Grunow) Krammer и *A. ambigua* (Grunow) Simonsen. Помимо них на этих глубинах, датирующихся приблизительно 1655–1690 гг., встречались *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) W. Smith, *Fragilaria construens* var. *venter* (Ehrenberg) Grunow. Данные виды являются пресноводными и относятся к группе диатомей арктических, альпийских и умеренных широт, развивающихся в мелководных водоемах в умеренных температурных условиях, что свидетельствует о том, что оз. Ши́ра в середине и конце XVII в. являлось менее соленым, чем в настоящее время.

Ключевые слова: палеолимнология, диатомовые водоросли, меромиктический водоем, седиментация, *Cyclotella choctawhatcheeana*, *Aulacoseira valida*, *Aulacoseira ambigua*.

© Болобанщикова Г. Н., Рогозин Д. Ю., Фирсова А. Д., Родионова Е. В., Дегерменджи Н. Н., Шабанов А. В., 2015

Озеро Ши́ра (54°30' с. ш., 90°11' в. д., пос. Жемчужный, Ширинский район, Республика Хакасия, Россия) расположено в северной части Республики Хакасия в 17 км от районного центра пос. Ши́ра. Водоем является меромиктическим, слабосоленым и слабощелочным (рН от 8,9 до 9,2). В летнее время, когда наблюдается наиболее выраженная плотностная стратификация, минерализация в миксолимнионе составляет около 15 г/л, в монимолимнионе – около 19 г/л (2002–2012 гг.) [Рогозин и др., 2005].

Площадь озера составляет 39,5 км², максимальная глубина – около 24 м. Озеро бессточное, питание его осуществляется за счет р. Сон, а также атмосферных, подземных и антропогенных поступлений [Макеева, Науменко, 2012]. Начиная с глубины 12–13 м, озеро характеризуется устойчивой анаэробной зоной, концентрация сероводорода в придонных слоях воды колеблется около 15–20 мг/л. Для изучения донных отложений с целью реконструкции палеоклимата необходимо сопоставление индикаторов состояния озера, которые могли бы охарактеризовать его как в прошлом, так и в настоящий момент. Диатомовые остаются одним из лучших биоиндикаторов водной экосистемы, поэтому диатомовый анализ как метод получил широкое применение [Белякова, 2006; Tracey et al., 1996].

В оз. Ши́ра ранее проводились работы по изучению видового состава и вертикальной структуры фитопланктона. По данным предыдущих исследований (1946–2009 гг.) видовой состав микроводорослей включал 30–74 вида четырех отделов (синезеленые, диатомовые, зеленые и пиррофитовые). Все авторы отмечали преобладание синезеленых водорослей [Макеева, Науменко, 2012]. На 1996 г. было известно, что из диатомей в оз. Ши́ра присутствуют следующие виды: *S. choctawhatcheeana*, ранее известная как *S. tuberculata* Makarova & Loginova [Genkal, 2012], *Diatoma vulgaris* Vory, *Navicula* sp., *Nitzschia* sp., *Stephanodiscus* sp. [Зотина, Толмеев, 1996], из них в летнее время явное преобладание имела *S. choctawhatcheeana* [Зотина, Толмеев, 1996]. Кроме того, *S. choctawhatcheeana* является массовым видом, и во все годы исследований видового состава фитопланктона в озере отмечена как доминирующий вид диатомовых, а также как доминирующий вид фитопланктона в общем

[Александровская и др., 1959; Дегерменджи и др., 1996; Черепнина, 1997]. В апреле 1997 и марте 1998 гг. в нижней кромке льда доминировали пеннатные диатомеи – *Navicula lanceolata* Ehrenberg и *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith. [Зотина, 2000]. По данным В. И. Колмакова с соавт. [1993], диатомовые водоросли наиболее разнообразно представлены в юго-восточной части озера около места впадения р. Сон. Река Сон привносит в озеро богатую альгофлору с доминированием диатомеи *Stephanodiscus hantzschii* Grunow.

Анализ водной толщи с 2006 по 2009 г. [Макеева, Науменко, 2012] показал, что диатомовые составляют 59,4 % общего видового состава озера. В центральной части озера, в планктоне пелагиали идентифицировано пять видов Bacillariophyta, доминантом среди которых по-прежнему является *S. choctawhatcheeana*.

Ранее донные отложения в пелагиали центра озера не изучались. В связи с этим поставлена задача изучить ископаемый диатомовый состав донных отложений меромиктического оз. Ши́ра (Хакасия) и сравнить его с современным с целью получения еще одного ряда данных для реконструкции палеоклимата.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Анализ водной толщи. С целью последующего анализа остатков диатомовых водорослей в донных отложениях проведено исследование фитопланктона в толще оз. Ши́ра. Отбор проб проводился весной (25.05.12), летом (11.07.12) и осенью (04.09.12) в центральной части озера с различных глубин (0, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 м).

Для отбора проб использовали планктонную сеть Джели (газ № 70), пробы фиксировали 70%-ным спиртом. Концентрировали с помощью сифона до объема 30–50 мл и проводили подсчет клеток на разлинованном стекле 0,1 см³ [Вассер и др., 1989] под световым микроскопом (AxioStar Plus Ziss, Германия). Для определения мелкоклеточных видов водорослей пробы собирали на фильтры с диаметром пор 1,2 мкм (Millipore, США),

напыляли золотом и анализировали на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200 (FEI Company).

Анализ осадочного материала. Седиментационные ловушки представляли собой открытые с верхнего конца полипропиленовые цилиндры длиной 580 мм, диаметром 103 мм с прозрачным днищем из плексигласа. Ловушки экспонировались в центральной глубоководной части озера вблизи точки с координатами 54°30'350" с. ш., 90°11'350" в. д. в следующие периоды: 14 марта – 27 мая, 26 мая – 7 июля, 8 июля – 4 сентября, 4 сентября – 24 октября 2012 г. Вышеуказанные периоды экспозиции условно обозначены как “Март – Май”, “Июнь – Июль”, “Июль – Сентябрь”, “Сентябрь – Октябрь”.

Ловушки размещались на одном капроновом шнуре, установленном на якоре, с буюм на верхнем конце для придания шнуру вертикального положения. Буй располагался на глубине 2–3 м от поверхности воды для снижения воздействия волн, а также во избежание превращения в лед. В летний и осенний периоды к бую с помощью тонкого шнура крепился дополнительный сигнальный буй объемом 1,5 л, плавающий на поверхности и служащий для обнаружения ловушек. Ловушки, установленные в марте под лед, обнаруживали и извлекали в мае с помощью траления с двух лодок. В период “Март – Май” ловушки размещались на горизонтах 15 и 20 м, в остальные периоды – на горизонтах 13, 15 и 20 м. На каждом горизонте располагали по две ловушки, полученные данные для каждого горизонта усредняли.

После экспозиции и транспортировки на берег ловушки выдерживали в вертикальном положении 4 ч, затем сливали верхнюю часть воды через сливные отверстия, расположенные на уровне 100 мм от днища. Остаток тщательно размешивали в оставшемся объеме воды, равном 900 мл, полученную суспензию переливали в пластиковые емкости и герметично закрывали без пузырька воздуха.

Из каждой ловушки было взято по три пробы объемом 1,5 мл, которые высушивались в сушильном шкафу в течение суток при температуре 100 °С. Высушенный осадок обрабатывался 30%-ным раствором перекиси водорода при нагревании на твердотельном термостате до температуры 90 °С в течение

4 ч при постоянном добавлении перекиси [Вассер и др., 1989]. После охлаждения, пробы отмывались от перекиси дистиллированной водой при помощи центрифугирования 5 раз и разбавлялись дистиллированной водой до конечного объема 1,5 мл. Из полученного объема бралась аликвота объемом 20 мкл, наносилась в виде капли на покровное стекло и высушивалась. Площадь капли определяли как площадь эллипса. В капле производили подсчет количества клеток диатомей на флуоресцентном микроскопе (Karl Zeiss FL 40) под увеличением $\times 100$ с использованием иммерсионного масла. Препараты предварительно фиксировались канадским бальзамом [Вассер и др., 1989]. Количество клеток в капле пересчитывали на количество клеток во всем осадочном материале ловушки, взвешенном в объеме 900 мл. Седиментационный поток рассчитывали исходя из общего количества клеток в ловушке, времени экспозиции ловушки и площади ее сечения.

Для определения видового состава пробы анализировались на ТЭМ (Table Microscope 3000 Hitachi, увеличение от 20 до 30000, КНЦ СО РАН г. Красноярск) на общем предметном столе диаметром 10 см, но с соблюдением всех объемов и пропорций (капля диаметром ≈ 1 см, объем пробы 20 мкл + 10 мкл этилового спирта, высушивались феном).

Анализ керна. Проба длиной 400 мм бралась в мае 2011 г. коробчатым дночерпателем, разработанным в Институте биологии внутренних вод РАН (ИБВВ) (пос. Борок), захватывающим квадратный участок дна размером 160 \times 160 мм, максимальная глубина погружения в донные осадки 440 мм.

Из пробы, отобранной коробчатым дночерпателем, сразу же после транспортировки на берег отбирали керны с помощью пластиковых трубок внутренним диаметром 45 мм. Трубки герметично закрывали с обоих концов и хранили в вертикальном положении при температуре +4 °С. В лаборатории, керн разрезали вдоль и разделяли пополам с помощью двух тонких пластин из нержавеющей стали, вставленных в разрез. После разделения керна пластины удалялись сдвигом в поперечном направлении, что позволяло сохранить ненарушенными поверхности разреза с видимыми горизонтальными слоистыми нео-

днородностями. Половинки кернов выдерживали на воздухе при слабом освещении в течение суток, чтобы цветовые различия проявились наилучшим образом. Затем делалось цветное фото каждого керна с закрепленной миллиметровой линейкой. Половинки керна разделялись затем на поперечные образцы (слайсы) с шагом 5–10 мм. Все образцы хранились при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в темноте в полиэтиленовых пакетах с выдвинутым воздухом [Рогозин и др., 2011].

В процессе отбора верхние слои керна были размыты и утеряны, поэтому для приведения образцов к единой шкале глубины в качестве реперной точки использовалась верхняя граница первого “белого” слоя, которая принималась за 130 мм от поверхности раздела “вода – донные отложения”. Точное положение вышеупомянутой границы определено ранее [Kalugin et al., 2012]. Визуальным подсчетом слоев показано, что верхняя граница первого “белого” слоя соответствует 1945 г. [Kalugin et al., 2012]. Первый белый карбонатный слой начинался на глубине 130 мм – условная граница первого белого слоя, определенная по пробе “ящик 2010”, и заканчивался на глубине 160 мм, а второй белый слой начинался с глубины 360 мм (рис. 1).

Возраст изученных интервалов оценивался по подсчету индивидуальных слоев, годичная природа которых подтверждалась положением в разрезе пика искусственного радиоактивного изотопа ^{137}Cs , отвечающего 1963 г. – году максимальных глобальных выпадений от ядерных испытаний [Рогозин и др., 2011; Kalugin et al., 2012].

После разделения керна на слайсы получилось 62 пробы, которые обрабатывались по стандартной методике, с использованием 30%-ной перекиси водорода [Диадомовые водоросли..., 2002; Черепнина, 1977]. Качественный анализ проб производился на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200 (FEI Company) (ЛИН СО РАН, лаборатория ультраструктуры клетки). Обработанные пробы анализировались на СЭМ следующим образом. На нержавеющей стерильный столик диаметром 1 см наносили 10 мкл этилового спирта и добавляли 20 мкл образца + 10 мкл этилового спирта. Столики с образцами высушивались под лампой накаливания в тече-

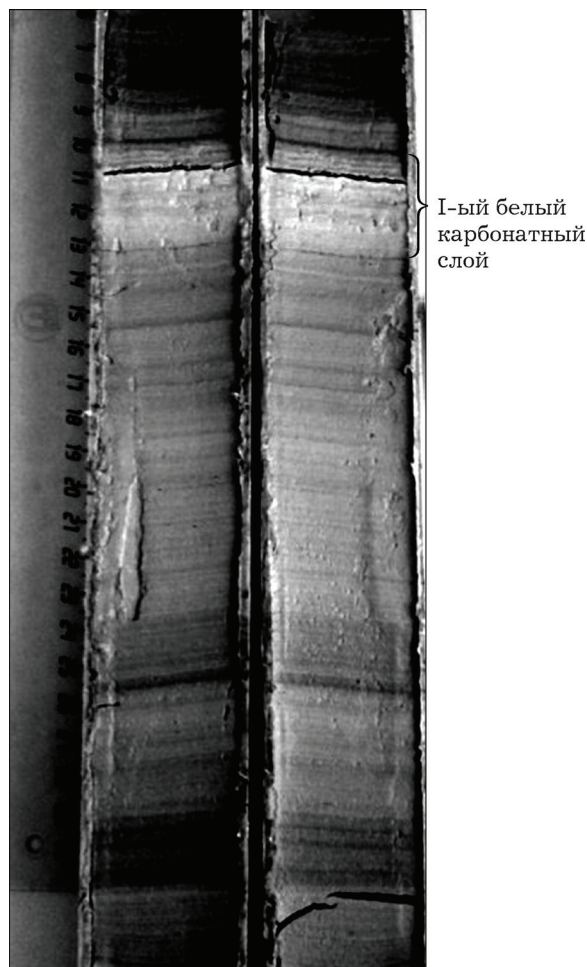


Рис. 1. Керн верхней части донных отложений оз. Шира (Хакасия), май 2011 г.

ние часа. После чего производилось напыление золотом. Столики помещались в СЭМ, где просматривались под увеличением от 1500 до 5000 раз. С помощью СЭМ керн проанализирован до глубины 190–195 мм. Последующие образцы керна анализировались на настольном электронном микроскопе ТМ-3000 Hitachi, а для более точного определения видового состава некоторые пробы просматривались на СЭМ Hitachi S-5500 (Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Центр коллективного пользования КНЦ СО РАН).

Для определения диатомовых водорослей использовали определители и систематические сводки [Забелина и др., 1951; Диадомовые водоросли..., 2002; Генкал, Трифонова, 2009; Lange-Bertalot, 2001; Levkov, 2009]. Для уточнения авторов видов использовали сайт <http://algaebase.org>.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Диатомовые водной толщи. В весенних (25.05.12) пробах на горизонтах 0, 2, 3, 5, 7, 9, 11 м доминировали четыре вида водорослей: *Planktolynghya contorta* (Lemmermann) Anagnostidis & Komárek (*Cyanobacteria*), *C. choctawhatcheeana* (*Bacillariophyta*), *Oocystis lacustris* Chodat (*Chlorophyta*) и *Rhodomonas salina* (Wislouch) D. R. A. Hill & R. Wetherbee (*Cryptophyta*). Наибольшая численность и биомасса *C. choctawhatcheeana* наблюдалась в слое 3 м (129,5 тыс. кл./л и 77,9 мг/м³ соответственно). Наибольшее развитие *C. choctawhatcheeana* отмечено осенью (численность – 657 тыс. кл./л, биомасса 128 мг/л) в слое 9 м. На рис. 2 представлен видовой состав в весенний, летний и осенний периоды.

На глубине 13 м вблизи перехода к анаэробным условиям (зона хемоклина) количество доминирующих видов резко снижается, уступая место мелкоклеточным цианобактериям рода *Synechocystis*. Весь видовой состав диатомовых планктона озера за 2012 г. представлен в таблице.

Диатомовые в седиментационном материале. Качественный анализ материала ловушек показал, что доминирующим видом во все исследованные периоды среди диатомей, как и в водных образцах, является *C. choctawhatcheeana*. Наряду с доминирующим видом, в ловушках единично присутствовали следующие виды: *Amphora* sp., *A. aequalis*, *Synedra* sp., *Navicula menisculus* и др. (рис. 3).

Сезонная динамика количества диатомей в ловушках показывает, что наибольшее число клеток диатомей оседало в весенне-летний период (май – июль на рис. 4). В это время максимальный седиментационный поток клеток составил $(9,6 \pm 4,5) \cdot 10^8$ кл./м² · сут) (см. ловушку 20 м на рис. 4).

Следующими по количеству осевших клеток диатомей являются ловушки летнего периода (июль–сентябрь), поток клеток в которых был примерно равнозначен и имел численное значение $(4,7 \pm 2,2) \cdot 10^8$ кл./м² · сут), $(4,4 \pm 2,1) \cdot 10^8$ кл./м² · сут), $(4,3 \pm 2,0) \times 10^8$ кл./м² · сут) соответственно глубинам 13, 15, 20 м.

Осенние ловушки (сентябрь – октябрь) отличались наиболее равномерным распределением на протяжении всех глубин. Пиковое

значение потока было зафиксировано на глубине 20 м – $(2,7 \pm 1,3) \cdot 10^8$ кл./м² · сут).

В весенних ловушках (март – май) на глубине 15 м диатомей не обнаружены, а в ловушке на 20 м поток клеток равен $(2,7 \pm 1,3) \cdot 10^8$ кл./м² · сут).

Результаты анализа керна. Впервые диатомовые в керне встречаются перед первым карбонатным белым слоем, на глубинах от 60 до 70 мм, что датируется примерно 1980–1975 гг. (рис. 5) [Рогозин и др., 2011]. Наличие хоть и сильно разрушенных створок *C. choctawhatcheeana*, а также осколков створок представителей родов *Cocconeis* sp., *Nitzschia* sp. (см. рис. 5) говорит о предположительном сходстве с современным составом. Более точно сделать вывод о схожести видового состава можно будет после просмотра проб других кернов. В слоях от 75 до 95 мм альгофлора не обнаружена.

Следующие глубины, где встречаются створки диатомовых, начинаются с 85 мм и заканчиваются на 110 мм, датируемые примерно 1967–1955 гг. В этих слоях встречаются те же представители альгофлоры, что и раньше: *Cyclotella* sp., *Nitzschia* sp., *Cocconeis* sp. (рис. 6). С глубины 120 мм и вплоть до 310 мм (включая первый белый слой 130–160 мм) диатомовые не обнаружены.

До второго белого карбонатного слоя на глубине 310–315 мм, что датируется примерно 1690–1683 гг., единично встречалась *Nitzschia sigmoidea*, структура которой сохранилась в хорошем состоянии (рис. 7).

А на глубине 335–355 мм (приблизительно 1655–1627 гг.) доминирующими видами, являлись *Aulacoseira ambigua* и *A. valida* (рис. 8, 9).

Помимо них на этой глубине (310–355 мм – примерно 1690–1683 гг.) встречались *Fragilaria construens* var. *venter* (рис. 10).

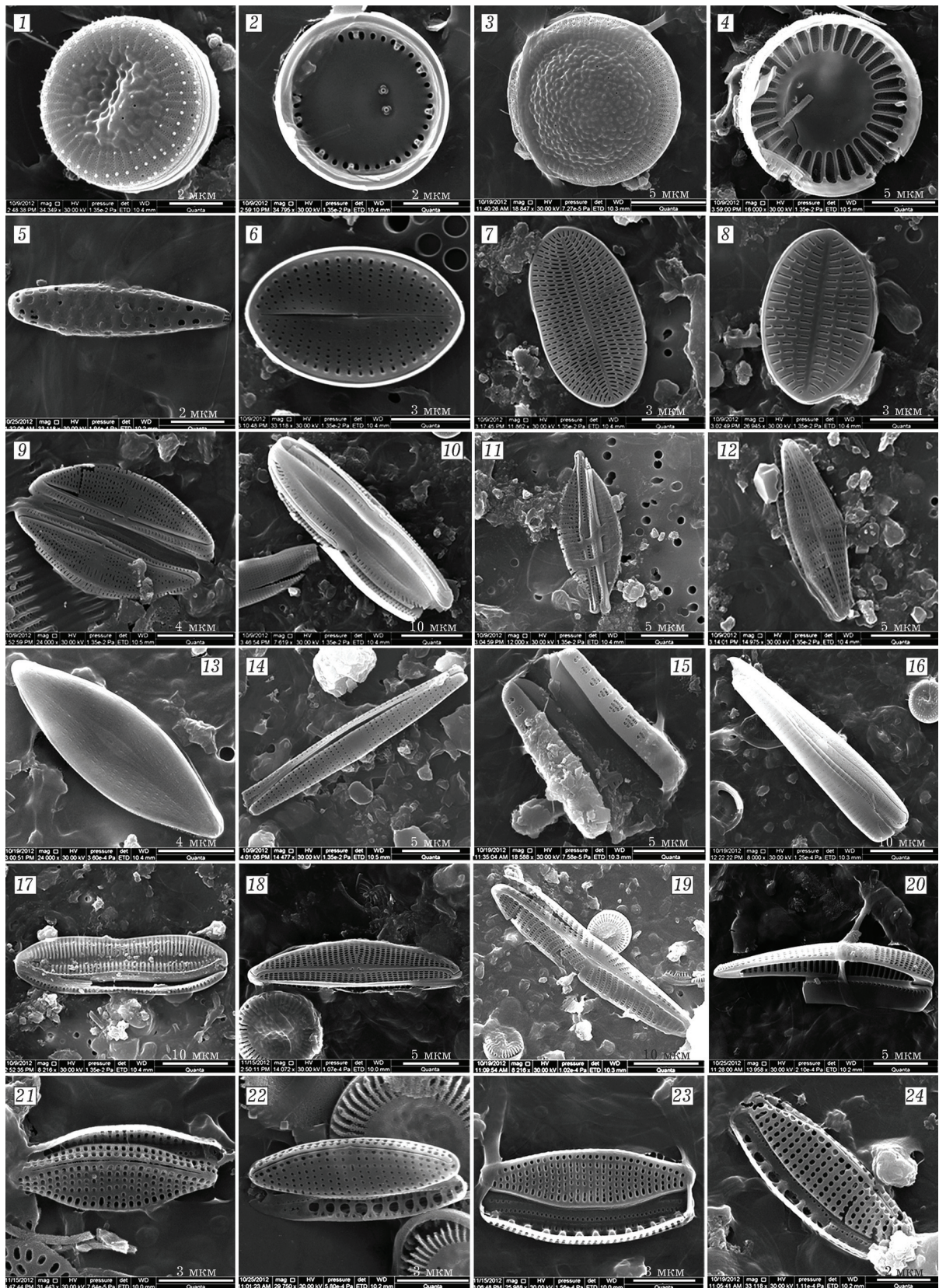
Анализ проб воды и седиментационного материала показал, что видовой состав диатомовых оз. Ширы начиная с 1946 г. [Попова, 1946] остается неизменным. Доминирующим видом, как и в предыдущие годы исследований, остается *C. choctawhatcheeana*, которая является планктонным, солоноводным и морским видом, широко распространенным в эвтрофных водоемах [Genkal, 2012]. Присутствовавшие в пробах бентосные виды, такие как *Amphora aequalis*, *Cocconeis euglyptoides*, *C. placentula* являются индифферентными ви-

Видовой состав диатомовых водорослей водной толщи оз. Шира

Таксон	Гал.	pH	гео	м
1	2	3	4	5
Отдел Bacillariophyta				
Класс Centrophyceae				
Семейство Aulacoseiraceae Moisseeva				
Род <i>Aulacoseira</i> Thwaites				
<i>Aulacoseira valida</i> (Grunow) Krammer	ind	alf	б	п
<i>A. ambigua</i> (Grunow) Simonsen	ind	alf	б	п, д
Семейство Stephanodiscaceae Makarova				
Род <i>Cyclotella</i> (Kützing) Brébisson				
<i>Cyclotella</i> sp.	–	–	–	–
<i>C. meneghiniana</i> Kützing	hl	i	k	п
<i>C. choctawhatcheeana</i> Prasad	hl		ha	п
Род <i>Stephanodiscus</i>				
<i>Stephanodiscus</i> sp.	Ind	alb	б	п
<i>S. hantzschii</i> Grunow	Ind	alb	б	п
Класс Pennatophyceae				
Порядок Araphales				
Семейство Fragilariaceae (Kützing) De Toni				
Род <i>Fragilaria</i> Lyngbye				
<i>Fragilaria</i> sp.	ind	alf	б	о
<i>F. construens</i> var. <i>venter</i> (Ehrenberg)	ind	alf	k	о
Род <i>Martyana</i> Round				
<i>Martyana martyi</i> (Héribaud) Round	–	–	–	–
Род <i>Opephora</i> Petit				
<i>Opephora olsenii</i> Møller	hl	–	–	о
Род <i>Synedra</i> Ehrenberg				
<i>Synedra</i> sp.	–	–	–	–
Семейство Diatomaceae Dumortier				
Род <i>Diatoma</i> Bory				
<i>Diatoma vulgare</i> Bory	ind	alf	б	о
Порядок Rhaphales				
Семейство Naviculaceae West.				
Род <i>Cocconeis</i> Ehrenberg				
<i>Cocconeis</i> sp.	–	–	–	–
<i>C. euglyptoides</i> (Geitler) Lange-Bertalot	ind	alf	k	п, д
<i>C. placentula</i> Ehrenberg var. <i>placentula</i>	ind	alf	alf	п, д
<i>C. placentula</i> var. <i>lineata</i> (Ehrenberg) Van Heurck	ind	alf	–	
Род <i>Navicula</i> Bory				
<i>Navicula</i> sp.	–	–	k	–
<i>N. cincta</i> (Ehrenberg) Ralfs	hl	alf	k	–
<i>N. cryptocephala</i> Kützing	hl	alf	k	д
<i>N. lanceolata</i> Ehrenberg <i>radiosa</i> Kützing	hl	alb	k	д
Порядок Naviculales				

1	2	3	4	5
Семейство Diadesmidaceae				
Род <i>Diademsis</i> Kützing				
<i>Diademsis</i> sp.	Ind	i		д
Семейство Rhoicospheniaceae Mann				
Род <i>Rhoicosphenia</i> Grunow				
<i>Rhoicosphenia curvata</i> (Kützing) Grunow				
Семейство Cymbellaceae (Kützing) Grunow				
Род <i>Amphora</i> Ehrenberg				
<i>Amphora</i> sp.	–	–	–	–
<i>A. aequalis</i> Krammer	–	–	–	–
<i>A. aff. aequalis</i> Krammer	–	–	–	–
Род <i>Halamphora</i> Kützing (Cleve) Levkov				
<i>Halamphora</i> sp.	mh	alf	k	д
<i>H. veneta</i> (Kützing) Levkov	hl	alf	k	д
<i>H. coffeaeformis</i> (C. Agardh) Levkov	mh	alf	k	д
Род <i>Seminavis</i> Mann				
<i>Seminavis pusilla</i> (Grunow) E. J. Cox & G.Reid	hl	i	k	о
Семейство Gomphonemataceae (Kützing) Grunow				
Род <i>Gomphonema</i> Ehrenberg				
<i>Gomphonema olivaceum</i> (Hornemann) Brébisson	ind	alf	k	о
Семейство Epithemiaceae Grunow				
Род <i>Epithemia</i> Brébisson				
<i>Epithemia sorex</i> Kützing	hl	alf	k	д
Семейство Rhopalodiaceae				
Род <i>Rhopalodia</i> O. Müller				
<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O. Müller	hl	alf	k	о
Семейство Nitzschiaceae				
Род <i>Nitzschia</i> Grunow				
<i>Nitzschia</i> sp.	–	–	–	–
<i>N. acidoclinata</i> Lange-Bertalot	–	–	–	д
<i>N. frustulum</i> var. <i>subsalina</i> Hustedt	–	–	–	д
<i>N. inconspicua</i> Grunow	–	–	–	д
<i>N. microcephala</i> Grunow	hl	alb	–	д
<i>N. palea</i> (Kützing) W. Smith	ind	i	б	д
<i>N. perminuta</i> (Grunow) M. Peragallo	hl	alb	б	д
<i>N. sigmoidea</i> (Nitzsch) W. Smith	ind	alf	k	д
Род <i>Tryblionella</i> W. Smith				
<i>Tryblionella acuminata</i> W. Smith	mh	alf	k	–
<i>T. angustata</i> W. Smith	ind	alf	б	д
<i>T. levidensis</i> W. Smith	hl	alf	б	д

П р и м е ч а н и е. Галобность: mh – мезогалобы, hl – галофилы, hb – галофобы, i – индифференты. Отношение к pH: alf – алкалофилы, alb – алкалобионты, acf – ацидофилы, ind – индифференты. Приуроченность к местообитанию (M): д – донный, п-д – планктонно-донный, п – планктонный. Географическая приуроченность (geo): k – космополит, б – бореальный, На – голарктический; прочерк – нет данных.



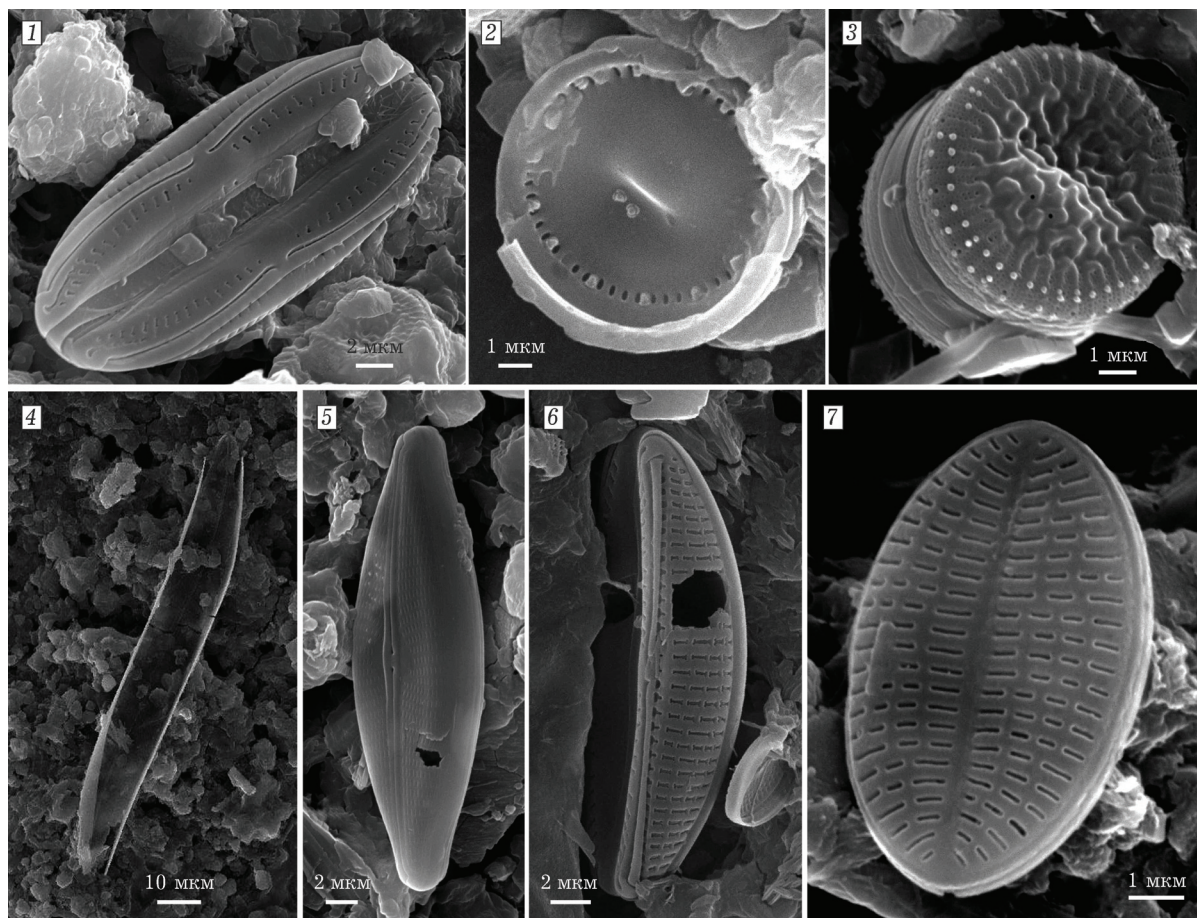


Рис. 3. Диатомовые седиментационных ловушек: 1 – *Amphora aequalis* Krammer; 2, 3 – *Cyclotella choctawhatcheeana*; 4 – *Synedra fasciculata* Ehrenberg; 5 – *Navicula menisculus* Schumann; 6 – *Amphora aequalis* Krammer; 7 – *Cocconeis euglyptoides* (Geitler) Lange-Bertalot

дами, т. е. могут развиваться при различных уровнях солености.

При исследовании керна выяснено, что вертикальный профиль численности диатомовых водорослей в верхней части донных отложений обладает неоднородностью. Перед карбонатными белыми слоями наблюдается всплеск не только численности, но и наличия диатомей. В других слоях диатомовые стратиграфически отсутствовали.

Сравнительный анализ проб воды и ловушечного материала с пробами керна показал, что видовой состав диатомей оз. Ши́ра приблизительно с 1946 г. [Александровская и др., 1959] схож с современным составом [Попова, 1946; Александровская и др., 1959; Черепнина, 1977; Колмаков и др., 1993; Дегерменджи и др., 1996; Зотина, Толмеев, 1997; Зотина, 2000; Levkov, 2009; Макеева, Науменко, 2012], а видовой состав диатомей прибли-

Рис. 2. Диатомовые водной толщи оз. Ши́ра в весенний, летний и осенний периоды: 1, 2, 3 – *Cyclotella choctawhatcheeana*; 4 – *C. meneghiniana* Kützing; 5 – *Martyana martyi* (Héribaud) Round; 6 – *Cocconeis placentula* var. *lineata* (Ehrenberg) van Heurck; 7 – *C. placentula* Ehrenberg var. *placentula*; 8 – *C. euglyptoides* (Geitler) Lange-Bertalot; 9 – *Halamphora* sp. (Kützing) Levkov; 10 – *Amphora aequalis* Krammer; 11 – *H. coffeaeformis* (C. Agardh) Levkov; 12 – *Navicula cryptocephala* Kützing; 13 – *N. menisculus* Schumann; 14 – *Fragilaria* sp.; 15 – *Opephora olsenii* Müller; 16 – *Gomphonema olivaceum* (Hornemann) Brébisson; 17 – *Tryblionella acuminata* W. Smith; 18 – *Seminavis pusilla* (Grunow) E. J. Cox & G. Reid; 19 – *N. cincta* (Ehrenberg) Ralfs; 20 – *Rhoicosphenia curvata* (Kützing) Grunow; 21 – *Nitzschia microcephala* Grunow; 22 – *N. acidoclinata* Lange-Bertalot; 23 – *N. perminuta* (Grunow) M. Peragallo; 24 – *N. frustulum* var. *subsalina* Hustedt.

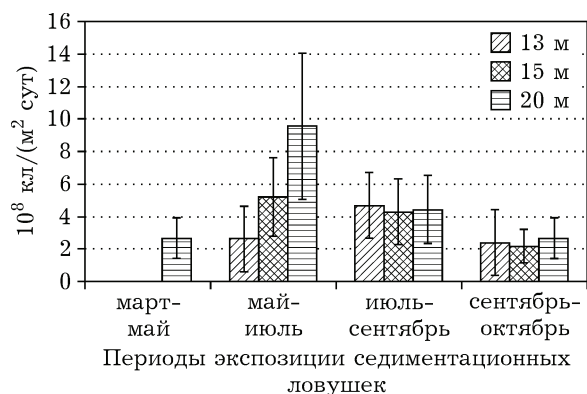


Рис. 4. Динамика седиментационного потока диатомей оз. Ширы в 2012 г. По оси абсцисс – периоды экспозиции седиментационных ловушек

зительно с 1690–1683 гг. и 1655–1627 гг. отличается от современного состава. Судя по наличию створок колониальных водорослей альпийских, арктических и умеренных широт: *Aulacoseira valida* (планктонный, мезо- и высоко эвтрофный вид, мелководных озер, индифферентный), *A. ambigua* (планктонный, донный, индифферентный, мезотрофный вид), *Fragilaria construens* var. *venter* (бентосный, индифферентный, олиготрофный вид), можно предположить, что оз. Ширы в середине и конце XVII в. представляло собой мезотрофный водоем с умеренной глубиной и слабощелочной средой, с меньшей соленостью, чем в настоящее время. Наличие аркто-аль-

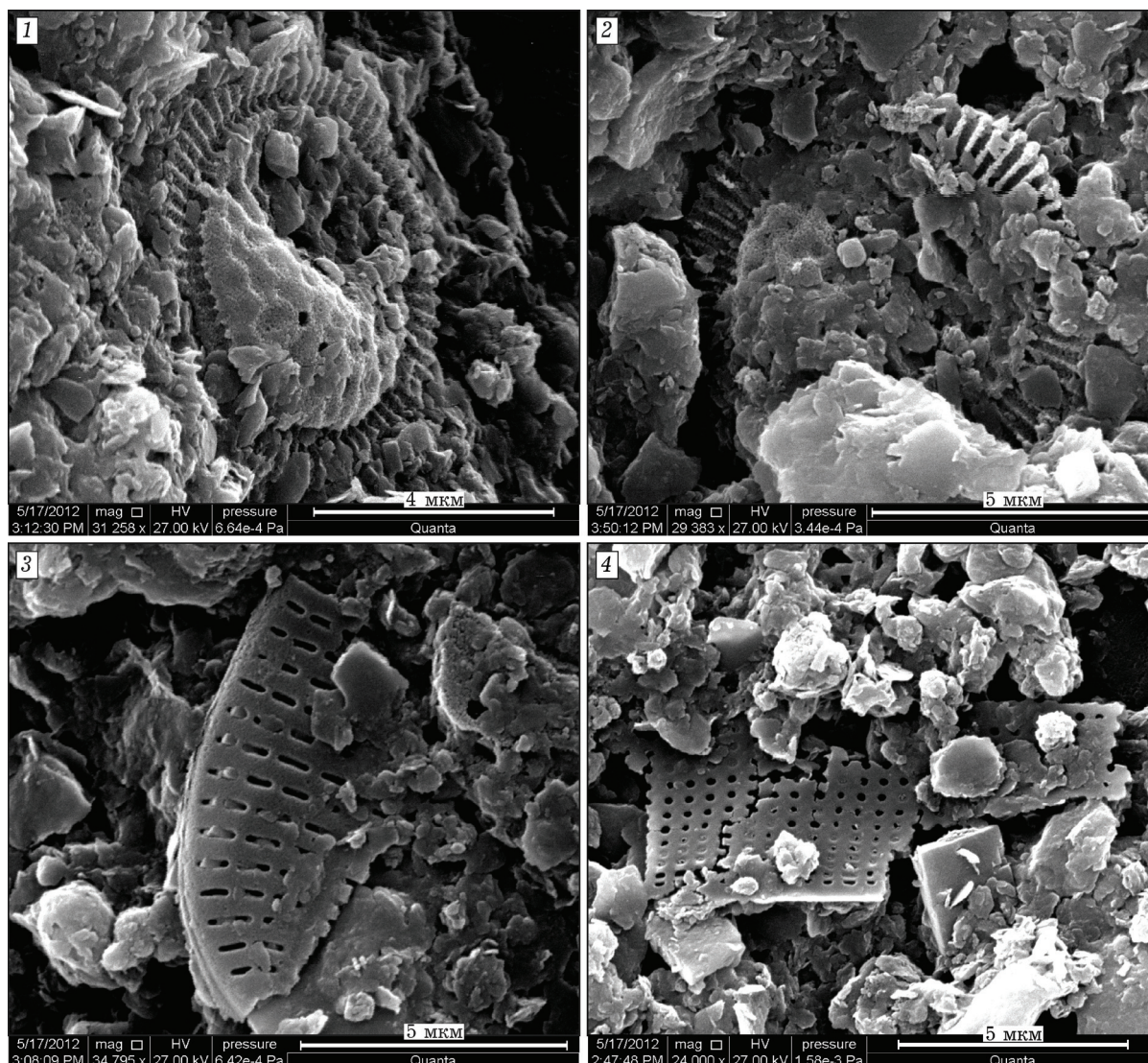


Рис. 5. Диатомовые в керне, глубина 60–70 мм (предположительно): 1, 2 – осколок створки диатомовой *C. choctawhatcheeana*; 3 – осколок створки диатомовой *Coscconeis* sp.; 4 – осколок створки *Nitzschia* sp.

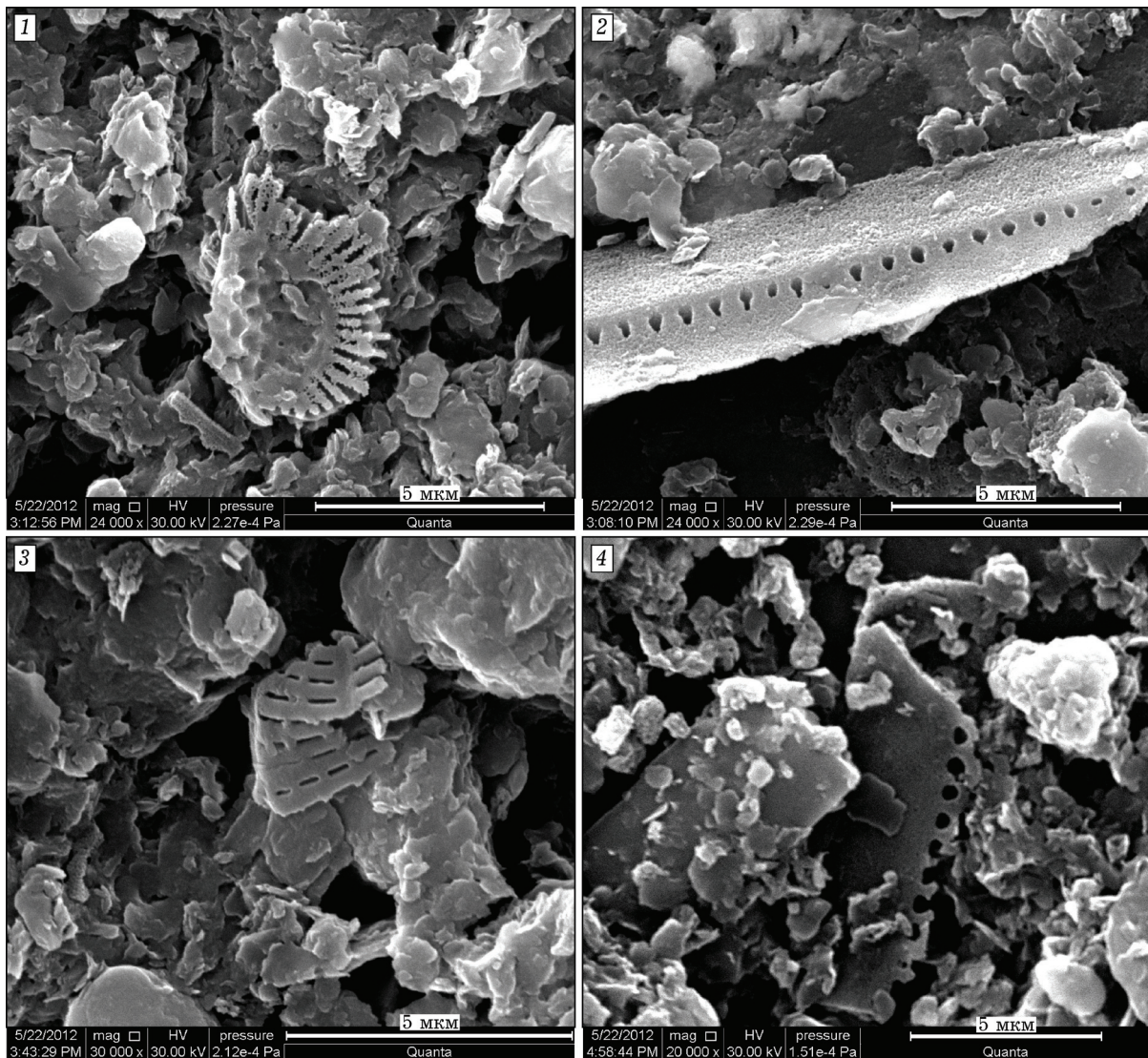


Рис. 6. Диатомовые в керне, глубина 85–110 мм (предположительно): 1 – *Cyclotella* sp.; 2, 4 – *Nitzschia* sp.; 3 – *Cocconeis* sp.

пийских видов *A. valida*, *A. ambigua*, *F. construens* var. *venter* говорит о том, что климатические условия, возможно, были более холодными, нежели в настоящий момент.

На различие в отношении уровня минерализации озера указывает качественный и количественный анализ проб керна. Представители диатомей до первого белого слоя представляют собой осколки створок, редко целые полустворки, еще реже целостные створки, тогда как створки диатомей до второго белого слоя очень хорошо сохранили свою структуру и внешний вид. Данное явление, по-видимому, связано с уровнем pH и минерализацией водных масс (в пресновод-

ных водоемах $\text{pH} \geq 7$), в настоящий момент в озере более агрессивная щелочная среда (pH колеблется от 8,9 до 9,2), которая успевает частично разрушить створки диатомовых за время их пребывания в иле донных слоев. Пик численности и разнообразия диатомей до первого белого слоя, приходится на глубины 105–110 и 110–115 мм, что датируется примерно 1967–1955 гг. Но и в них не наблюдается такого количества створок, как в максимуме численности диатомей до второго белого слоя – глубине 335–340 мм, что датируется приблизительно 1655–1627 гг. (см. рис. 1). Она отличается на несколько порядков: в пробе массой 0,06 г содержалось около $7,2 \cdot 10^5$

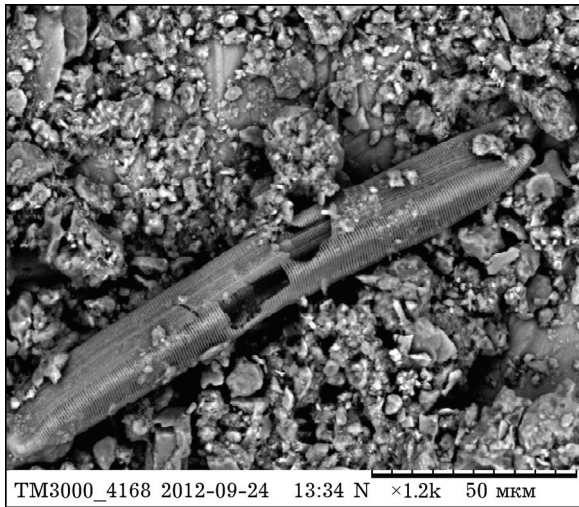


Рис. 7. Диатомовая в керне, глубина 310–315 мм:
Nitzschia sigmoidea

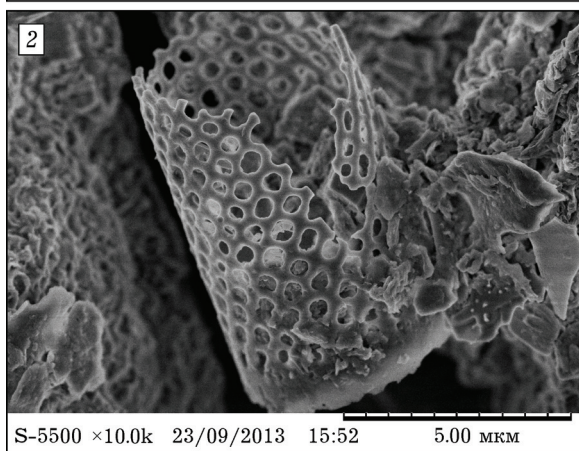
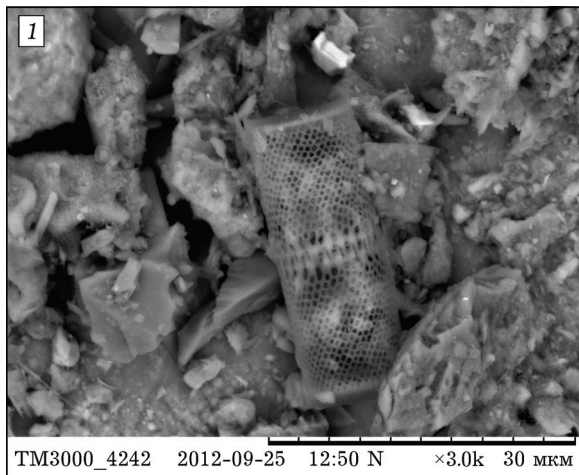


Рис. 8. Доминирующие виды диатомовых в керне, глубина 335–355 мм: 1 – *Aulacoseira valida*; 2 – *A. ambigua*

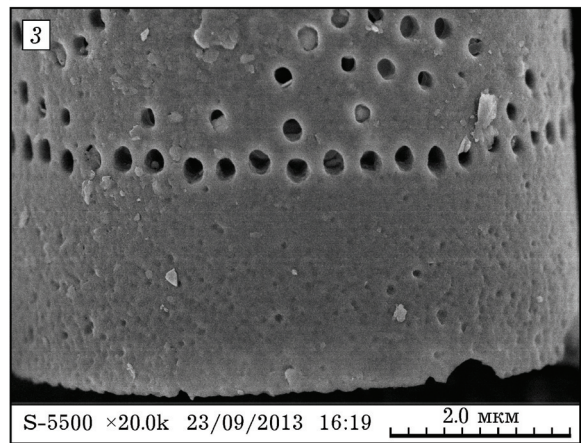
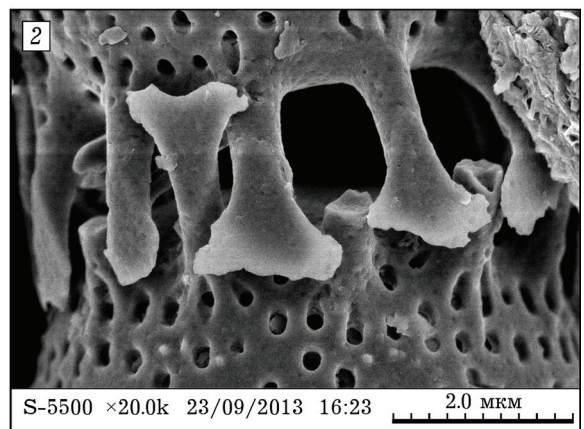
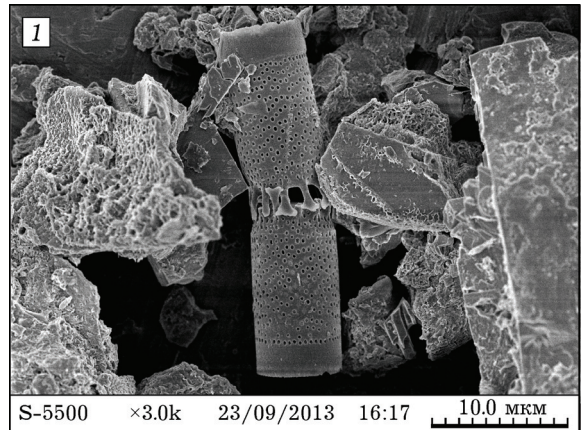


Рис. 9. Диатомовая в керне, глубина 335–355 мм:
1, 2, 3 – *Aulacoseira valida*

створок. Однако диатомовые водоросли одинаково хорошо развиваются как в пресных водоемах, так и в соленых, т. е. отличие в численности нельзя связать с уровнем минерализации озера как фактора, влияющего именно на разнообразие и численность клеток диатомей в водной толще озера.

По-видимому, небольшая численность в верхних донных отложениях объясняется не-

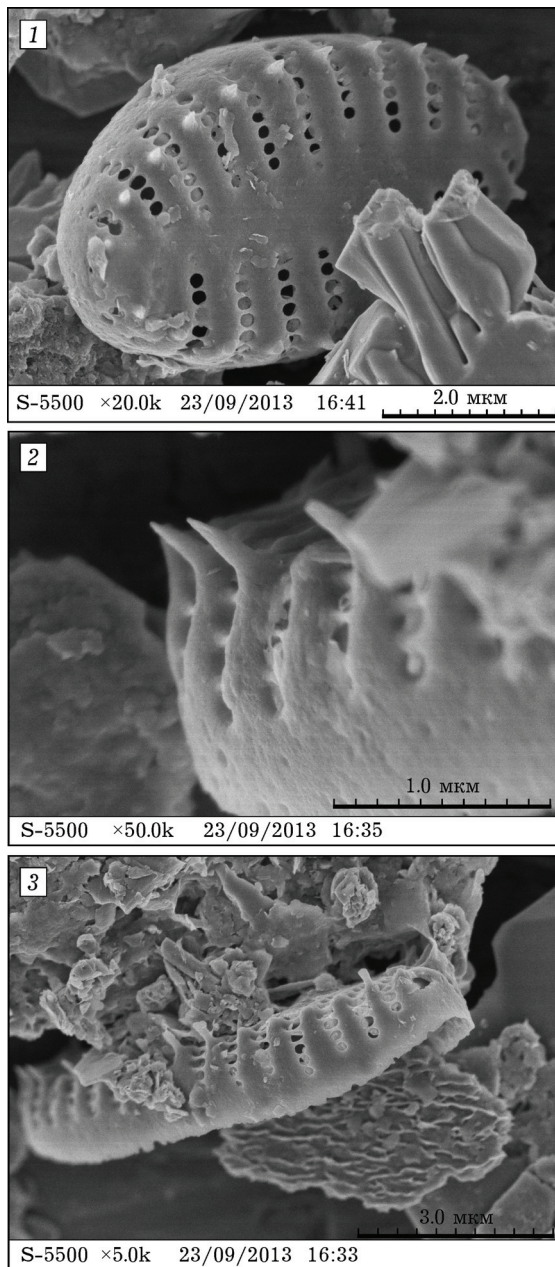


Рис. 10. Диатомовая в керне, глубина 335–355 мм:
1, 2, 3 – *Fragilaria construens* var. *Vente*.

гативным влиянием минерализации и pH воды на целостность створок диатомей, которые успевают разрушиться до такой степени, что в дальнейшем их сложно подвергать количественному учету. Для более точного объяснения этого явления необходимо провести расчет скорости осадконакопления по диатомовым водорослям, а также индексировать сапробность диатомовых, что будет сделано в дальнейшем при изучении донных отложений оз. Шира.

Авторы выражают глубокую благодарность анонимному рецензенту за ценные рекомендации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-05-00429-а) и программы фундаментальных исследований РАН “Биоразнообразие” (проект № 30.8).

ЛИТЕРАТУРА

- Александровская М. А., Гончарова М. Н., Комарова Н. М., Малахов А. М., Скорняков В. А., Чураков В. К., Цыцарин Г. В., Шмидеберг Н. А. Гидроминеральные ресурсы озера Шира (отчет о работах 1957–58 гг.). М.: Моск. гос. ун-т, 1959. Т. 1 (№ 117); Т. 2 (№ 118). 500 с.
- Белякова Г. А. Водоросли и грибы. Ботаника: в 4 т. М.: Изд. центр “Академия”, 2006. Т. 2. 320 с.
- Вассер С. П., Кондратьева Н. В., Масюк Н. П. и др. Водоросли: справочник. Киев: Наук. думка, 1989. 608 с.
- Генкал С. И., Трифонова И. С. Диатомовые водоросли планктона Ладожского озера и водоемов его бассейна. Рыбинск.: Изд-во ОАО “Рыбинский Дом печати”, 2009. С. 72.
- Дегерменджи Н. Н., Зотина Т. А., Толмеев А. П. Структурно-функциональные компоненты планктонного сообщества экосистемы озера Шира (обзор и эксперименты) // Сиб. экол. журн. 1996. № 5. С. 439–452.
- Диатомовые водоросли России и сопредельных стран. Ископаемые и современные / под ред. И. В. Макарова. СПб.: Изд-во СПб. ун-та. 2002. Т. 2, вып. 3. 193 с.
- Забелина М. М., Киселев И. А. и др. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1951. Вып. 4: Диатомовые водоросли. 619 с.
- Зотина Т. А. Вертикальное распределение фитопланктона соленого озера Шира // Гидробиол. журн. 2000. Т. 36, № 1. С. 38–46.
- Зотина Т. А., Толмеев А. П. Видовой состав и вертикальная структура фито- и зоопланктона озера Шира // Вестн. Хакас. гос. ун-та им. Н. Ф. Катанова. 1997. Вып. IV, сер. 4: Биология, медицина, химия. С. 69–71.
- Киселев И. А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1969. Т. 1. 658 с.
- Колмаков В. И., Гаевский Н. А., Гольд В. М. и др. Изучение фитопланктона озера Шира. Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 1993. 20 с. Деп. в ВИНТИ 26.10.93, № 2669-B93.
- Лихошвай Е. В., Помазкина Г. В., Никитеева Т. А. Центрические диатомовые водоросли из миоценовых отложений байкальской рифтовой зоны (Тункинская котловина) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 9. С. 1445–1452.
- Макеева Е. Г., Науменко Ю. В. Материалы к флоре Bacillariophyta озера Шира (Россия, Хакасия) // Сиб. экол. журн. 2012. № 3. С. 351–359 [Makeeva E. G., Naumenko Y. V. Data on the Flora of Algae Bacillariophyta of Shira Lake (Russia, Khakasia) // Contemporary Problems of Ecol. N 3. 2012. P. 351–359].
- Попова Т. Г. К познанию альгофлоры водоемов северной Хакасии // Изв. Зап.-Сиб. филиала АН СССР. 1946. Сер. биол. Ч. 1. С. 41–72.
- Рогозин Д. Ю., Зыков В. В., Калугин И. А., Дарьин А. В., Дегерменджи А. Г. Каротиноиды фототрофных организмов в донных отложениях меромиктического озе-

- ра Шира (Россия, Сибирь) как индикатор стратификации озера в прошлом // Докл. АН. 2011. Т. 439, № 2. С. 282–285.
- Рогозин Д. Ю., Пименов Н. В., Косолапов Д. Б., Чаньковская Ю. В., Дегерменджи А. Г. Тонкослойные вертикальные распределения пурпурных серных бактерий в зонах хемоклина меромиктических озер Шира и Шунет (Хакасия) // Там же. 2005. Т. 400, № 3. С. 426–429.
- Черепнина Г. И. Фитопланктон и его продукция на озерах юга Красноярского края // Крутоворот веществ и энергии в водоемах. Элементы биотического круговорота: Тез. докл. 4 Всесоюз. лимнол. совещ. Лиственичное на Байкале. 1977. С. 74–77.
- Genkal S. I. Morphology, taxonomy, ecology, and distribution of *Cyclotella choctawhatcheeana* prasad (Bacillariophyta) // *Inland Water Biology*. N 2. 2012. P. 169–177.
- 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 International*. 2013. Vol. 290–291C. P. 245–252.
- Lange-Bertalot H. *Navicula sensu stricto*. 10 Genera separated from *Navicula sensu lato*. *Frustulia* // *Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats*. 2001. Vol. 2. P. 1–526. A.R.G. Gantner Verlag. K.G.
- Levkov Z. *Amphora sensu lato* // *Ibid.* / ed. H. Lange-Bertalot. 2009. Vol. 5. P. 5–916. A.R.G. Gantner Verlag K.G.
- Tracey B., Lee N., Card V. Sediment indicators of meromixis: comparison of laminations, diatoms, and sediment chemistry in Brownie Lake, Minneapolis, USA // *J. Paleolimnol.* 1996. Vol. 15, N 2. P. 129–132.
- AlgaeBase – a database of information on algae that includes terrestrial, marine and freshwater organisms. <http://algaebase.org>

Analysis of Diatom Algae of the Water Column and Bottom Sediments of Lake Shira

G. N. BOLOBANSCHIKOVA¹, D. Yu. ROGOZIN^{1,2}, A. D. FIRSOVA³, E. V. RODIONOVA³,
N. N. DEGERMENGI⁴, A. V. SHABANOV⁵

¹ *Institute of Biophysics SB RAS*
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok str., 50/50
E-mail: galina.ibp@mail.ru

² *Siberian Federal University*
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79
E-mail: rogozin@ibp.ru

³ *Limnological Institute SB RAS*
664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 3
E-mail: firsova@lin.irk.ru, rodionova@lin.irk.ru,

⁴ *Krasnoyarsk State Medical University named after V. F. Vojno-Yasenetsky*
660022, Krasnoyarsk, Partizana-Zheleznyaka str., 1
E-mail: nd1947@yandex.ru,

⁵ *L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS*
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok str., 50/38
E-mail: alexch@nikel.akadem.ru

Meromictic lakes are interesting objects for paleolimnological study, and Lake Shira is one of such lakes. In May 2011 core samples were collected from the bottom of Lake Shira and the species composition of diatom algae, which serve as bioindicators of the state of the lake, were studied. Moreover, in the year 2012 seasonal water samples and material from sediment traps were collected and the species composition of diatoms in them was analyzed. The results of the analysis showed that the lake, as in previous years of research, was dominated by *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad. Diatoms were found twice in the studied core, above the white carbonate layers and were absent in other layers. Down to the first white layer the species living in the lake at present time were observed, including the predominant *Cyclotella choctawhatcheeana*. This fact, presumably, proves the consistency of the species composition of diatoms and the overall stable condition of the lake since 1946 [Popova, 1946]. Down to the second white carbonate layer the dominant species were *Aulcosira valida* (Grunow) Krammer and *Aulcosira italica* (Grunow) Simonsen. Besides them, *Nitzschia sigmodea* (Nitzsch) W. Smith, *Fragilaria construens* var. *venter* (Ehrenberg) Grunow were also observed at these depths, dating approximately to 1655–1690. These are freshwater species that belong to the diatoms of arctic, alpine and temperate latitudes which develop in shallow waters under moderate temperature conditions. This fact suggests that Lake Shira was less salty in the middle and the end of the 17th century than today.

Key words: paleolimnology, diatoms, meromictic lake, sedimentation, *Cyclotella choctawhatcheeana*, *Aulacoseira valida*, *Aulacoseira ambigua*.