

РЕКОНСТРУКЦИЯ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДЫ В ОЗЕРЕ ТЕЛЕЦКОЕ (Алтай, Россия) ПО СОСТАВУ И КОЛИЧЕСТВУ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Е.Ю. Митрофанова, О.С. Сутченкова, О.В. Ловцкая

Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

Представлены результаты исследования верхних 0—1000 мм керна донных отложений оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой. При скорости осадконакопления в данном районе дна озера в 0.3 мм/год (с учетом влажности осадка 0.45 мм/год) керн вскрывает осадки возрастом около 2000 лет. Выявлено 194 вида (212 разновидностей и форм) диатомовых водорослей. Анализ состава танатоценозов показал, что преобладают обитатели дна и обрастаний, широко распространенные по географической приуроченности, индифферентные по отношению к солености, предпочитающие слабощелочные условия, бета-мезосапробионтные виды. Количество створок диатомей варьировало от 0.86 до 64.40 млн ств./г при среднем 22.90 ± 0.78 млн ств./г. За последнее тысячелетие пики численности диатомей, особенно представителей холодолюбивого комплекса и основного доминанта *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haw., были приурочены к периодам с пониженной температурой воды в озере.

По соотношению количества створок видов-индикаторов pH условий была реконструирована величина pH для изученного временного отрезка, которая за период с 172 г. до н. э. до 2006 г. изменялась в пределах от 7.51 до 7.69 при среднем значении 7.580 ± 0.003 . Полученная с помощью спектрального (Фурье) анализа прогнозируемая до 2259 г. величина pH будет варьировать в пределах 7.53—7.63, при аналогичной средней величине 7.580 ± 0.001 . Анализ реконструированных и прогнозных значений pH показал, что их изменения находятся в очень узком диапазоне и соответствуют слабощелочной среде (7.0—8.5). Реконструкция и прогноз величины pH могут свидетельствовать о постоянстве условий среды в озере как в предыдущие временные отрезки, так и ближайшем будущем.

Диатомовые водоросли, донные отложения, индикаторы pH среды, реконструкция и прогноз pH, оз. Телецкое, Алтай.

LAKE TELETSKOYE (Altai, Russia): RECONSTRUCTION OF THE ENVIRONMENT AND PREDICTION FOR ITS CHANGES ACCORDING TO THE COMPOSITION AND QUANTITY OF DIATOMS IN THE BOTTOM SEDIMENTS

E.Yu. Mitrofanova, O.S. Sutchenkova, and O.V. Lovtskaya

We studied the upper 0–1000 mm of the bottom sediment core from the underwater Sofia Lepneva Ridge of Lake Teletskoye. The core sediments accumulated with a rate of 0.3 mm/year (with regard to their humidity, with a rate of 0.45 mm/year) and have an age of about 2000 years. A total of 194 species (212 varieties and forms) of diatoms have been revealed. Analysis of diatom composition in tanatocoenoses showed prevalence of species inhabiting the bottom and periphyton, widely distributed geographically, indifferent to salinity, and preferring a weakly alkaline environment, as well as beta-mesosaprobionts. The number of diatom valves ranged from 0.86 to 64.4 mln valves/g, with an average of 22.90 ± 0.78 mln valves/g. Over the last millennium, the peaks of the abundance of diatoms, especially representatives of the cold-water assemblage, including the main dominant *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haw., are referred to the periods with low water temperature. The pH value for the period from 172 BC to 2006 AD has been reconstructed from the proportion of the numbers of valves of pH-indicating diatom species, which varied from 7.51 to 7.69, with an average of 7.580 ± 0.003 . The pH value predicted up to 2259 AD was estimated by spectral (Fourier) analysis at 7.53–7.63, with a similar average of 7.580 ± 0.001 . Analysis of reconstructed and predicted pH values showed their insignificant changes and correspondence to a weakly alkaline environment (7.0–8.5). These pH values suggest stability of the lake environment both in the past periods and in the nearest future.

Diatoms, bottom sediments, pH-indicating species, reconstruction and prediction of pH, Lake Teletskoye, Altai

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При оценке экологического состояния водоемов широко применяют различные биологические показатели (разнообразие видов и их количественные характеристики), которые, в отличие от химических и физических, являются не одномоментным откликом, а «интегрирующими» величинами всех из-

© Е.Ю. Митрофанова[✉], О.С. Сутченкова, О.В. Ловцкая, 2016

[✉]e-mail: emit@iwep.ru

DOI: 10.15372/GiG20160907

менений в экосистеме за определенный период времени. Если для оценки состояния современных водоемов используют организмы, обитающие в настоящее время, то для характеристики изменений в прошедшие геологические периоды — только те, что сохраняются в донных отложениях и служат, таким образом, палеоэкологическими индикаторами. Свойство озер накапливать в течение длительного геологического периода осадочные толщи, содержащие информацию об эволюции флоры и фауны и экосистемы озера в целом, используется в палеоэкологии для изучения природных тенденций развития озерных экосистем и климата территорий.

К палеоэкологическим индикаторам в первую очередь относят водоросли, имеющие кремнистые образования на поверхности клеток: панцирь у диатомовых или чешуйки и стоматоцисты у золотистых. Но чешуйки золотистых водорослей очень плохо сохраняются в донных отложениях ввиду нежной структуры и мелких размеров. Стоматоцисты более сохранены в донных отложениях, но их отростки и различные выросты, которые присущи многим морфотипам цист, под воздействием давления и перетирания в большинстве случаев обламываются. А вот панцири диатомей можно найти и в самых древних по возрасту отложениях ввиду их большей прочности. Стратиграфический анализ остатков диатомовых водорослей в разных слоях донных отложений позволяет реконструировать условия окружающей среды, которые были в тот или иной период времени. Диатомеи образуют характерные экологические комплексы, приуроченные к разным биотопам водоемов и адаптированные к различным факторам среды. По составу и количеству диатомей, соотношению их основных групп (планктонные и бентосные, центрические и пеннатные), наличию видов-индикаторов можно реконструировать природные условия в предшествующие временные отрезки, а именно температурный режим, выделить периоды засухливости или повышенной увлажненности, оценить колебания уровня воды в водоеме, а также содержание водородного иона [Chipman et al., 2009; Wolin, Stone, 2010].

Изучению закисления вод отводится особое внимание ввиду всевозрастающей ацидификации водоемов в силу естественных и антропогенных причин [Renberg, Hellberg, 1982; Моисеенко и др., 1997]. Считается, что уровень pH в водоеме является не только важным, а даже фундаментальным фактором, объясняющим распределение пресноводных диатомей [Finkelstein et al., 2014]. pH влияет на физиологию клеток диатомовых, в том числе на проницаемость клеточной мембраны, межклеточный pH гомеостаза, содержание металлов, оксида кремния и биогенных элементов, фиксацию углерода и биоминерализацию кремния. Поэтому от уровня pH зависит состояние экосистемы водоема в целом.

Авторы исследовали донные отложения из оз. Телецкое, крупнейшего водоема в горах Алтая на юге Западной Сибири, расположенном между $51^{\circ}21'46''$ и $51^{\circ}48'36''$ с.ш. на высоте 434 м над ур. м. в верховье р. Обь (рис. 1). По глубине (максимальная 323 м, средняя 181 м) озеро занимает третье место в России после Байкала (1641 м) и Каспийского моря-озера (980 м) и 25-е место в мире [Selegei et al., 2001]. При длине озера 78.6 км и средней ширине 2.89 км (максимальная 5.2 км) объем пресной воды в озере составляет 41.1 км^3 , площадь водного зеркала 227.3 км^2 . Котловина трапециевидной формы состоит из южной меридиональной (длина около 48 км) и северной широтной (30 км) частей, разделенных подводным хребтом (длина 2.3 км, ширина 0.6—0.8 км), возвышающимся над дном до 211 м. Отличительной особенностью данного водоема является слабое развитие мелководных затишных участков. Площадь литорали с глубинами до 10 м составляет всего 7.8 % от площади дна озера [Яныгина и др., 2007]. Кроме того, для озера характерен повышенный внешний водообмен, когда полная смена воды происходит раз в 5.81 года [Селегей, 2009], на что может оказывать влияние как большая площадь водосборного бассейна ($20\,400 \text{ км}^2$), которая превосходит площадь зеркала озера в 91 раз, так и значительные абсолютные высоты территории водосбора (средняя высота 1940 м над ур. м.). Около 70 постоянных рек и более 150 временных водотоков впадает в оз. Телецкое [Селегей, Селегей, 1978].

По температурной классификации Ф. Фореля [Селегей, Селегей, 1978], Телецкое относится к озерам умеренного типа, где отмечена смена прямой и обратной стратификации, разделенных состоянием весенней и осенней гомотермии. Озеро холодное, так как вся толща воды в течение семи месяцев охлаждена ниже 4°C , а свыше пяти месяцев — ниже 3°C . По данным гидрохимических наблюдений 2010—2012 гг. установлено, что содержание биогенных элементов группы азота (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) в воде озера невысоко и доминирующей формой азота являются нитрат-ионы, содержание которых лежит в пределах 0.66—1.86 мг/л, что указывает на протекание в озере интенсивных процессов нитрификации в условиях избыточного кислородного насыщения. Концентрации нитритного азота крайне низки. Ионы аммония занимают промежуточное положение между нитрат- и нитрит-ионами с невысокими концентрациями (0.022—0.098 мг/л), характерными для олиготрофных озер. Содержание фосфат-ионов в водах оз. Телецкое незначительно и находится на уровне микрограммовых количеств, кремния — на один-два порядка превосходит содержание остальных биогенных элементов и составляет в среднем 2.18—2.90 мг/л [Зиновьев и др., 2012].

Последовательный анализ состояний экосистемы дает возможность не только понять и реконструировать закономерности изменений среды и климата во времени и пространстве, но и прогнозировать

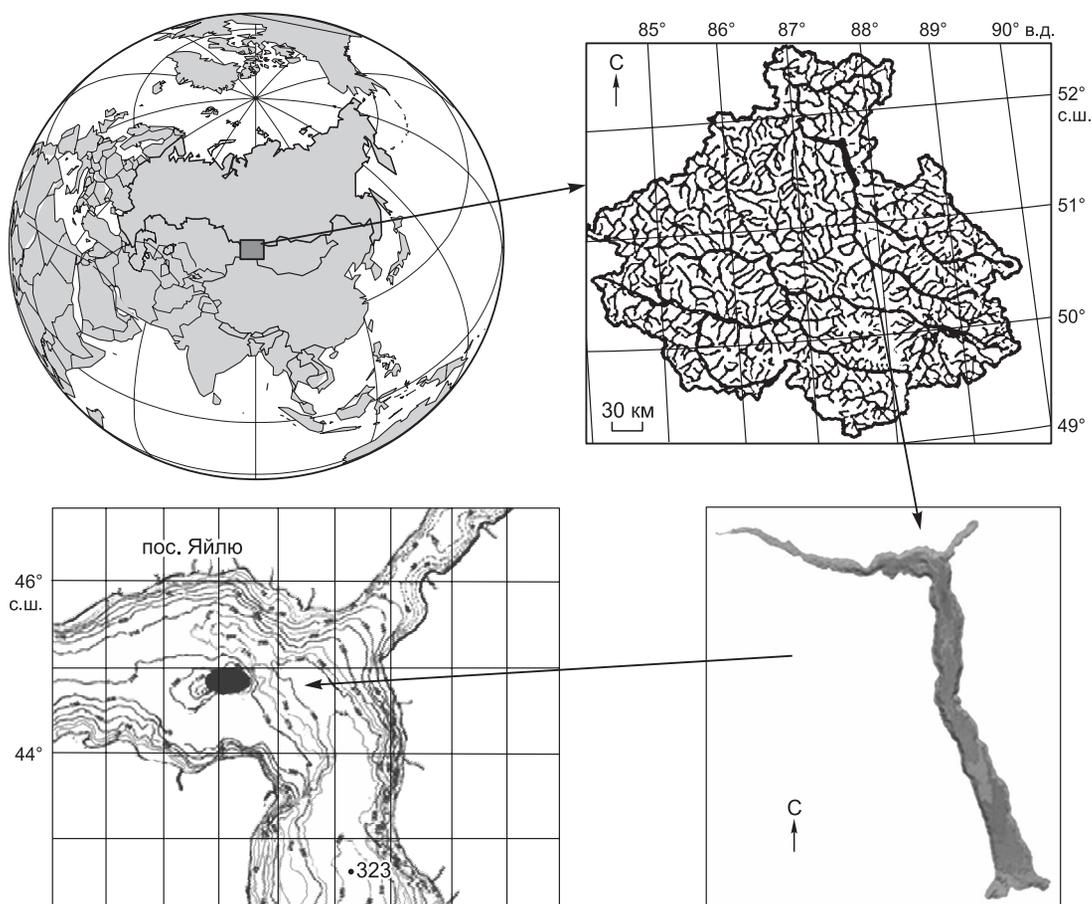


Рис. 1. Карта-схема расположения оз. Телецкое с указанием подводного хребта Софьи Лепневой.

Батиметрическая карта района исследования (внизу слева) приводится из книги В.В. Селегея [2011].

вать естественное направление их развития в будущем [Глобальные изменения..., 2008]. Цель работы — изучение состава и количества диатомовых водорослей в донных отложениях с подводного хребта в глубоком олиготрофном оз. Телецкое для реконструкции среды в последние 2000 лет и прогноза ее изменения до 2259 г.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Керн донных отложений длиной 1940 мм отобран в 2006 г. грунтовой трубкой с подводного хребта Софьи Лепневой (см. рис. 1), возвышающегося над дном глубиной 200—250 м в точке с координатами 51°44.99' с.ш. и 87°43.7414' в.д. (глубина воды 90 м) [Калугин и др., 2009]. В обрамлении оз. Телецкое выделяют Горно-Алтайский, Телецкий и Западно-Саянский геологические блоки [Selegei et al., 2001], которые представлены телецкими островодужными офиолитами, кремнисто-терригенными, туфогенно-терригенными и метаморфическими породами, зелеными сланцами и кремнисто-глинистыми осадками [Buslov et al., 1993]. Донные осадки в Телецком озере образованы бескарбонатными терригенными алевритистыми глинами с небольшим содержанием аллохтонного органического детрита (1.1 % валового углерода) и биогенного кремнезема (2.5 %). Придонный слой осадков окисленный, обычно коричневато-желтого цвета за счет оксидов железа. На возвышенности Софьи Лепневой мощность окисленной зоны достигает 5 см, в отличие от глубоководных участков, где она составляет 2—3 см. Окисленный осадок, как правило, в нижней части имеет один-два шоколадно-коричневых прослоя с содержанием MnO в среднем 3.1 %, в захороненном осадке эта величина снижается до среднего уровня в 0.2 %. Осадки имеют выраженную слоистость. Выделяются светлые зеленовато-серые и зеленовато-бежевые, темные буровато-зеленоватые и черно-зеленые слои, черные просечки и линзочки. Все это указывает на нестабильные условия осаждения частиц в среде типа подвижной суспензии при постоянном взмучивании и перемещении верхнего полужидкого слоя первичного осадка [Калугин и др., 2008]. По данным распределения изотопов ^{137}Cs , ^{210}Pb и ^{14}C , скорость осадконакопления в данном районе дна озе-

ра составляет 0.3 мм/год [Калугин и др., 2009], с учетом влажности осадка — 0.45 мм/год. Радиоуглеродное датирование кернов [Калугин и др., 2008] подтвердило равномерный характер осадконакопления в данном водоеме. Исследованные осадки имеют возраст около 2000 лет.

Керн разрезали послойно с интервалом в 5 мм, и каждый промежуток отражает примерно 11 лет жизни озера. Для анализа привлечены верхние 0—1000 мм керна (200 проб). Пробы для диатомового анализа подготавливали и обрабатывали стандартными методами [Диатомовые водоросли..., 1974; Водоросли..., 1989]. Препараты исследовали с помощью светового Nikon H550L и сканирующего электронного Hitachi S-3400N микроскопов. Идентификацию и систематизацию диатомей проводили с использованием классических и современных определителей, сводок и атласов. При подсчете створок в препаратах учитывали все встреченные панцири диатомовых водорослей, пересчет количества проводили на 1 г сух. осадка. Коэффициент встречаемости (R) рассчитывали по отношению количества проб, в которых вид был выявлен, к общему числу проб (%).

В 30-е годы XX в. Ф. Хустедт виды, чувствительные к изменению pH воды, объединил в 11 групп: от алкалибионтов, обитающих в водах с pH = 8 и более, до ацидобионтов, живущих в кислых водах с pH = 5 и менее [Барина и др., 2006]. На основании данной классификации среди диатомовых оз. Телецкое были выделены четыре группы видов-индикаторов pH, процентное соотношение которых в общем количестве створок диатомей-индикаторов необходимо для реконструкции pH в каждом исследованном слое донных отложений и получения общей картины изменения pH на исследованном отрезке керна. Это: alkph — алкалофилы, предпочитающие среду с $7.0 < \text{pH} < 8.5$, circ (ind) — циркумнейтралы (индифференты) (pH = 7), acph — ацидофилы ($5.5 < \text{pH} < 7.0$), acb — ацидобионты (pH < 5.5). Теоретическое значение pH вычисляли на основе уравнения линейной регрессии по индексу B, разработанному для озер Швеции [Renberg, Hellberg, 1982]: $B = (\% \text{ circ} + 5 \% \text{ acph} + 40 \% \text{ acb}) / (\% \text{ circ} + 3.5 \% \text{ alkph})$. Нами было использовано уравнение, полученное для одного из озер Кольского Севера, сходное с оз. Телецкое по уровню pH: $\text{pH} = 7.50 - 0.85 \lg B$ [Моисеенко и др., 1997].

Для выявления периодических зависимостей реконструированного ряда изменения величины pH и разработки сценарного прогноза для pH в ближайшем будущем был использован метод спектрального анализа на основе преобразования Фурье [Прогнозирование..., 2000]. С помощью спектрального фурье-анализа [Андерсон, 1976] реконструированный временной ряд величины pH был разложен на разнопериодные синусоидальные функции:

$$x(t_i) = \bar{x} + \sum_{k=1}^n \alpha_k \cos(2\pi f_k t_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k \sin(2\pi f_k t_i), \quad (1)$$

где k — гармоника ряда $k = \bar{1}, \bar{n}$, $f_k = k/N$ — частота k -й гармоники ряда, N — длина изучаемого ряда наблюдений, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i)$.

Коэффициенты α_k и β_k оценивались методом наименьших квадратов. Значимые гармоники выделялись по критерию Фишера:

$$\frac{I(f_k) / v_1}{S^2 / v_2} > F(\alpha, v_1, v_2), \quad (2)$$

где $v_1 = 2$ — число степеней свободы, приходящихся на гармонику ряда Фурье, $v_2 = N - 1$ — число степеней свободы всего ряда, $\alpha < 0.05$ — уровень значимости, $I(f_k) = \alpha_k^2 + \beta_k^2$ — интенсивность k -й гармоники, $S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(t_i) - \bar{x})^2$ — дисперсия ряда.

Для выполнения вычислений использован программный пакет Statistica 6.0 компании StatSoft.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В верхних 0—1000 мм керна было выявлено 194 вида (с учетом разновидностей и форм 212 таксонов) диатомовых водорослей из двух классов, шести порядков, 17 семейств и 59 родов. Ведущее место по количеству видов занимают роды: *Gomphonema* Ag. — 15 видов (18 внутривидовых таксонов), *Symbella* Ag. — 14 (14), *Navicula* Bory — 11 (16), *Fragilaria* Lyngb. — 10 (14), *Pinnularia* Ehr. — 10 (10), *Eunotia* Ehr. — 9 (9), *Nitzschia* Hass. — 9 видов (9 видов, разновидностей и форм). Впервые для донных отложений оз. Телецкое отмечено 64 вида (или 66 таксонов) диатомовых водорослей. Четверть видов, или 25.2 %, встречены нами единично, только в одном каком-то слое.

Количество видов в разных слоях кернa варьировало от 24 до 44, минимальное — на глубине 135—140 мм, максимальное — 710—715 мм, причем в интервалах с наименьшим количеством створок диатомей и число видов было незначительно, в то время как на участках с максимальным количеством створок разнообразие видов было почти в два раза выше и достигало максимальных отметок (рис. 2).

Эколого-географический анализ состава диатомей, выявленных в донных отложениях, показал, что по приуроченности водорослей к местообитанию из 165 видов (или 85 % от общего числа видов) с известной характеристикой большинство (70 %) относится к обитателям дна и обрастаний, менее многочисленны группы планктобентосных и планктонных видов (8.8 и 5.7 % соответственно). Географическое распространение известно для 168 видов (или 87 % от общего числа). Наибольшее число видов (43 %) относится к широко распространенным или космополитным видам, меньшее — к бореальным (31) и арктоальпийцам (12 %). Для 169 видов (или 87 % от общего числа) известны данные по отношению к солености. Самой многочисленной группой являются индифференты (64 %), меньшие доли имеют галофилы и галофобы (12 и 8.8 % соответственно) и менее всего мезогалофы (2.4 %). Показателями органического загрязнения являются 128 видов (или 66 % от общего числа видов). Наиболее представлены бета-мезосапробионты (37 %) и олигосапробионты (24 %), менее — ксеносапробионты (9.8 %) и альфа-мезосапробионты (6 %). Видов-индикаторов pH среды, данные по которым будут использованы как для реконструкции, так и прогноза, выявлено 161 вид (или 83 % от общего числа), преобладают алкалофильные виды (34 %), индифференты (30 %), менее многочисленны ацидофилы (10 %) и алкалобионты (9 %).

Количество створок диатомей на отрезке кернa 0—1000 мм варьировало в значительных пределах — от 0.86 (интервал 135—140 мм) до 64.20 млн ств./г (835—840 мм) (см. рис. 2) при среднем значении по отрезку кернa 22.90 ± 0.78 млн ств./г. Интервалы с низким содержанием створок (не более 5 млн ств./г; ранее в кернax из других участков дна озера было выявлено, что количество створок диатомовых водорослей в них редко превышает это значение) были немногочисленны: 135—140, 370—375, 375—380, 380—385 и 385—390 мм. К интервалам с максимальным количеством створок диатомовых водорослей относятся: 100—105, 510—515, 820—825, 830—835 и 835—840 мм. В целом среди общего числа проанализированных интервалов кернa (200) отмечено 19 (или 9.5 % от общего количества) с высоким количеством створок диатомовых водорослей (выше 40 млн ств./г), в большинстве из которых (13, или 6.5 % от общего количества) количество створок диатомей варьирует в диапазоне от 40 до 50 млн ств./г.

Планктонные представители диатомоценозов в большей степени центрические диатомеи, мало разнообразны по составу, но превосходят по численности бентосные виды и виды-обрастатели. Абсолютным доминантом по количеству створок в исследованных слоях кернa является *Aulacoseira subarctica*. Классифицированные ранее С.С. Воробьевой [Калугин и др., 1998] и нами [Кириллов и др., 1998] *Aulacoseira italica* var. *valida* (Grun.) Simonsen, а Н.А. Скабичевской [1998] *A. distans* var. *alpigena* (Grun.) Simonsen, вероятнее всего, являются *A. subarctica* (рис. 3). Ранее этот вид выделяли как вариант вида *A. italica* (Kütz.) Simonsen. По всем морфологическим признакам створок, выявленным с помощью СЭМ Hitachi S-3400N, мы считаем, что численно преобладающим видом в донных отложениях оз. Телецкое является именно *A. subarctica*, планктонная центрическая колониальная диатомея. Она представлена во всех слоях кернa с численностью от 0.2 млн ств./г (380—385 мм — один из слоев с наименьшим содержанием створок диатомей) до 53.1 млн ств./г в слое с максимальным количеством диатомей (835—840 мм) (см. рис. 2). Наибольшее количество створок этого вида отмечено в интервалах кернa 240—345, 390—540, 585—750 и 810—865 мм.

К субдоминантам относятся как планктонные *Cyclotella bodanica* Eulen., *Stephanodiscus alpinus* Hust., *Aulacoseira italica* (Kütz.) Sim., так и бентосные виды — *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* (Kütz.) Lang.-Bert., *Staurosirella pinnata* Ehr., *Synedra pulchella* (Ralfs) Kütz., *Cymbella ventricosa* Kütz., *Achnanthes minutissima* Kütz.

Количество створок *A. italica* варьирует по керну в пределах 0.04—2.24 млн ств./г. с максимумом на интервале 245—325 мм. Этот вид отсутствует в нижних слоях кернa. В этих же пределах изменяется численность крупноклеточной *Cyclotella bodanica* — от 0.04 млн ств./г (385—390 мм) до 2.24 млн ств./г (815—820 мм). Наибольшая ее численность наблюдается в нижней части кернa — на отрезке 785—925 мм, в средней части — 455—475 мм, в верхней части — на 205—330 мм. Не обнаружена *C. bodanica* только в слое с минимальной общей численностью диатомей (135—140 мм). Еще один представитель центрических, среднеразмерный *Stephanodiscus alpinus*, встречается лишь в верхней части кернa. Его численность на разных интервалах кернa варьирует от 0.04 млн ств./г (335—340 мм) до 2.96 млн ств./г (340—345 мм). Мелкоклеточные представители центрических диатомей, вносящие основной вклад в численность современного фитопланктона, в донных отложениях немногочисленны ввиду, вероятно, их плохой сохранности.

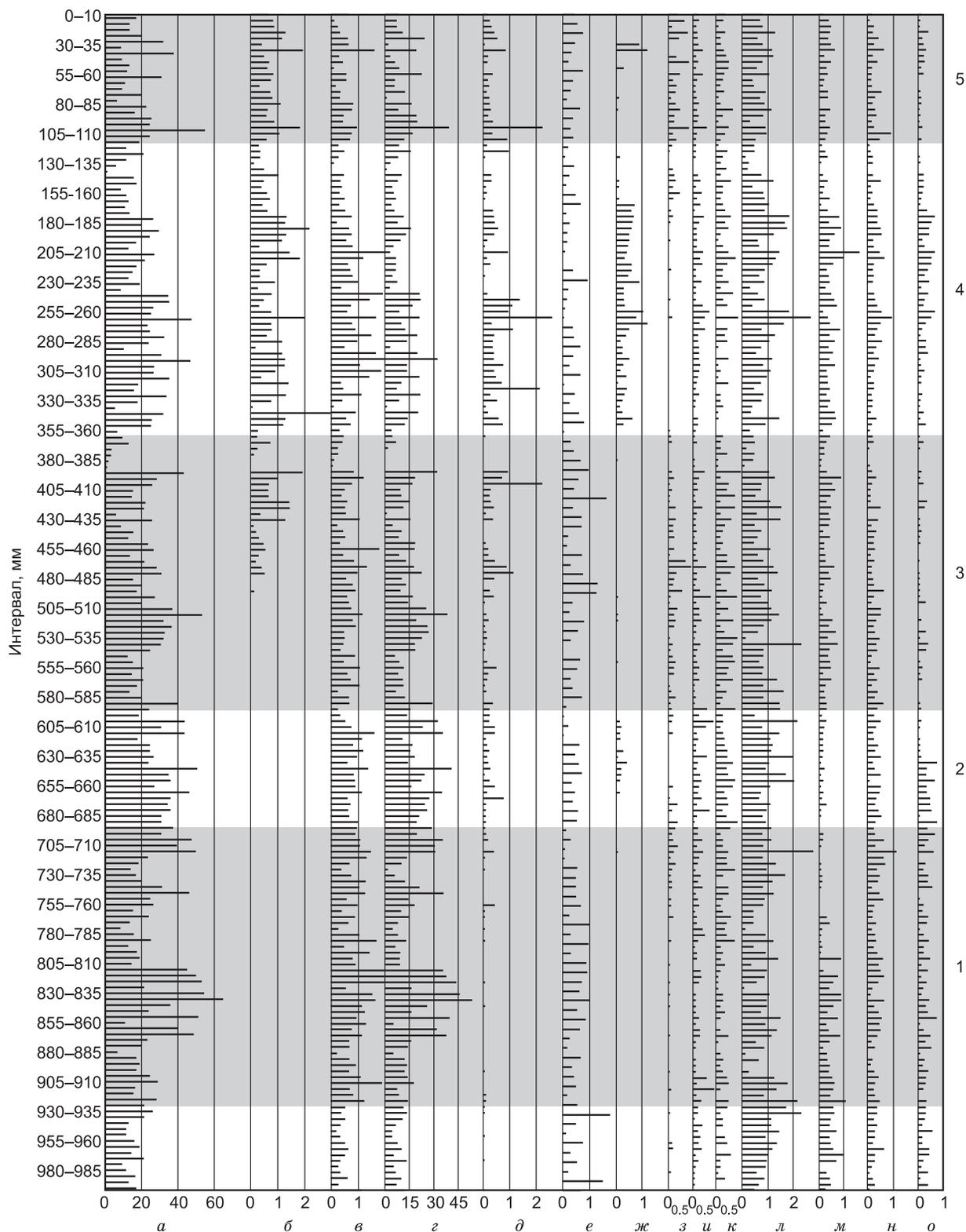


Рис. 2. Изменение количества створок (млн ств./г) видов с обилием более 2 % в исследованных образцах донных отложений оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой.

a — общее количество створок, *б* — *Stephanodiscus alpinus*, *в* — *Cyclotella bodanica*, *г* — *Aulacoseira subarctica*, *д* — *A. italica*, *е* — *Staurosirella pinnata*, *ж* — *Fragilaria pulchella*, *з* — *F. capucina* var. *rumpens*, *и* — *Ulnaria ulna*, *к* — *Cymbella sinuata*, *л* — *Encyonema ventricosa*, *м* — *Cocconeis placentula*, *н* — *Tryblionella angustata*, *о* — *Nitzschia fonticola*. 1—5 — отмечены наиболее значимые климатические события (пояснения см. на рис. 7).

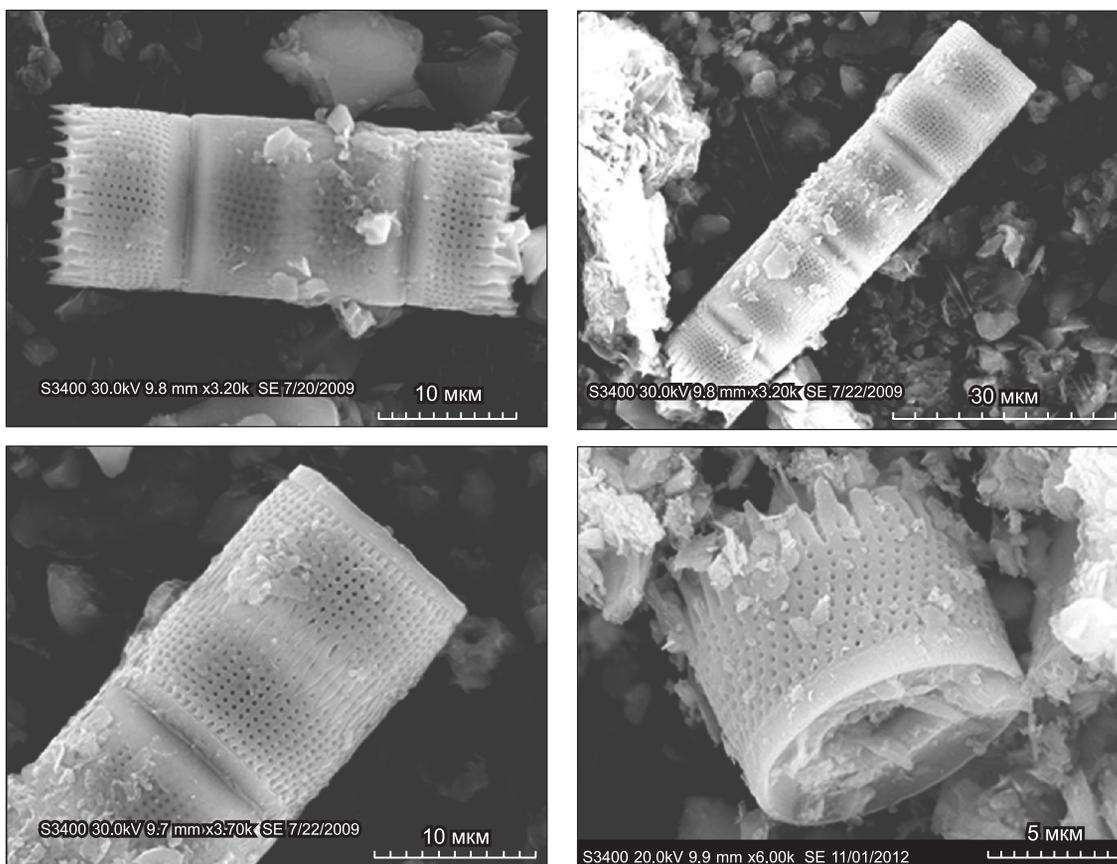


Рис. 3. Фотографии *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) E.Y. Haw. (СЭМ Hitachi S-3400N) из донных отложений оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой, слой 10—15 мм.

Для представителей дна и обрастаний характерно снижение количества створок в слоях с повышенной численностью представителей планктона. Пеннатные диатомеи *Fragilaria pulchella*, *F. capucina* var. *rumpens* и *Ulnaria ulna* представлены в донных отложениях в количестве, не превышающем 1 млн ств./г, причем первые два вида отсутствуют в нижних отрезках керна, а наибольшее их количество наблюдается в верхней части. Пик численности *F. capucina* var. *rumpens* приходится на глубину 470—475 мм и составляет 0.88 млн ств./г. Наибольшая численность *Ulnaria ulna* 0.92 млн ств./г, напротив, отмечена в нижней части керна — в 910—915 мм. Вид отсутствует на глубинах 135—140, 340—345, 370—375 и 805—810 мм.

Из представителей бентоса значительной численностью отличается и *Encyonema ventricosa* — очень распространенный в различных водоемах вид, количество которого изменяется от 0.04 (385—390 мм) до 2.76 млн ств./г (710—715 мм). Пики численности этого вида в нижних отрезках относятся к периодам относительного снижения общего количества диатомей (535—540, 710—715, 930—935 мм). В верхних интервалах наибольшее количество вида отмечается в слое относительного увеличения численности диатомовых водорослей (260—265 мм). Вид отсутствует только в интервале 890—895 мм. Количество *Stausirella pinnata* в керне изменяется от 0.04 до 1.96 млн ств./г (640—645 мм). Наибольшая численность вида отмечена в диапазонах 240—330 и 585—840 мм. Вид отсутствует на отрезке с минимальным количеством диатомей (135—140 мм) и в интервалах 340—345 и 630—635 мм. Число створок *Cymbella sinuata* в керне донных отложений варьирует в пределах 0.04—0.48 млн ств./г. Наибольшее их количество приходится на один из пиков общей численности диатомовых водорослей (390—395 мм). Обилие *Cocconeis placentula* составляет 0.024 (710—715 мм) — 1.640 млн ств./г (205—210 мм). Для представителей семейства Nitzschiaceae в целом отмечено увеличение их количества при относительном снижении общей численности диатомей в верхних и нижних отрезках керна. Наибольшее количество *Tryblionella angustata* 1.12 млн ств./г отмечено на интервале 710—715 мм, *Nitzschia fonticola* — 0.76 в 850—855 мм и 685—690 мм, т. е. в нижней части керна.

В целом по керну абсолютные значения числа створок бентосных видов были невелики, но доля их (от 4.5 в интервале 290—295 мм до 63.3 % — 385—390 мм) выше планктонных только в пяти слоях

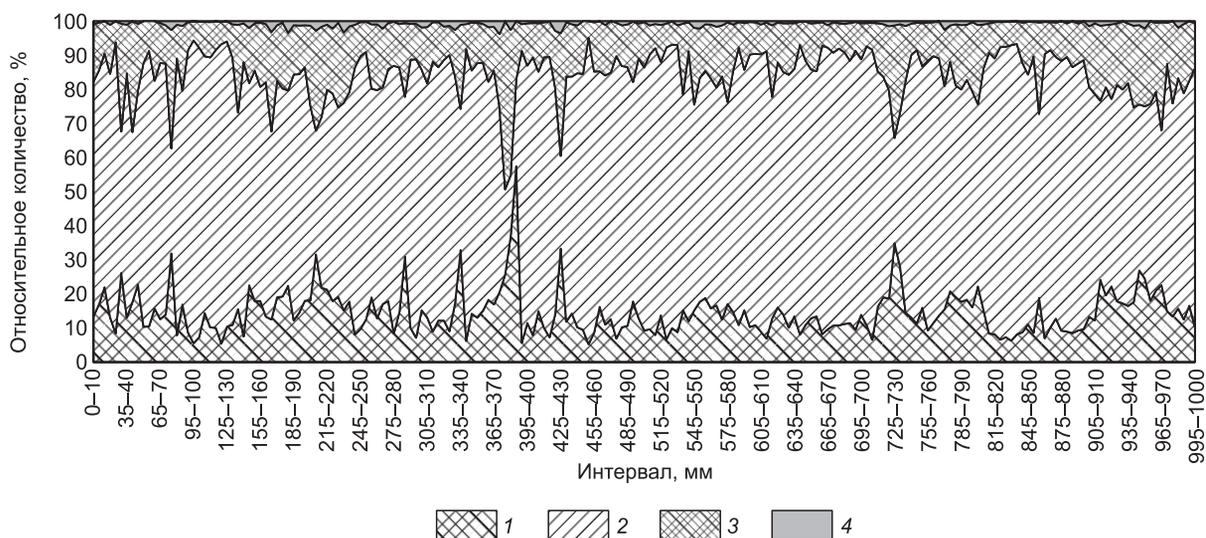


Рис. 4. Доля групп водорослей-индикаторов по отношению к рН в общем количестве их створок в керне донных отложений оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой.

1 — алкалибионты, 2 — алкалофилы, 3 — индифференты, 4 — ацидофилы.

исследованного керна. При этом доля планктонных видов варьировала от 25.3 (75—80 мм) до 89.6 % (570—575 мм) от общего количества, в том числе *A. subarctica* — 10.0—83.9 %. С одной стороны, это может свидетельствовать о незначительном вкладе литоральных видов и видов, развивающихся в притоках, в формировании танатоценозов на подводной возвышенности, с другой, — о сохранности видов, ведь некоторые пеннатные формы имеют длинный и узкий панцирь, который может ломаться, и обломки его могут измельчаться с течением времени. Планктонно-бентосные виды занимают промежуточное положение, виды с неясной экологией — еще меньше.

Планктонные комплексы диатомей в интервалах с наименьшим содержанием створок представлены в основном *A. subarctica*, встречающейся во всех слоях (коэффициент встречаемости $R = 100\%$), *C. bodanica* ($R = 80\%$), *S. alpinus* ($R = 60\%$) и *Fragilaria arcus* (Ehr.) Cl. ($R = 40\%$). Все эти виды являются типичными представителями современных альгоценозов оз. Телецкое и по размерным характеристикам относятся к группам средне- и крупноклеточных, по отношению к температурному фактору — к представителям холодолюбивого комплекса. На отрезках керна с максимальным количеством створок диатомей планктонные формы были представлены теми же видами: *A. subarctica* ($R = 100\%$), *C. bodanica* ($R = 100\%$), *F. arcus* ($R = 100\%$), *S. alpinus* ($R = 60\%$). Кроме того, еще были отмечены *F. capucina* var. *vaucheria* ($R = 60\%$) — вид очень широко распространенный (космополит), встречающийся в планктоне и литорали пресных, преимущественно эвтрофных вод (олигосапроб), иногда в солоноватых водах, и *C. antiqua* W. Sm. ($R = 20\%$) — пресноводный северо-альпийский вид, распространенный в северных и горных водоемах, особенно в болотах, но всегда в небольшом количестве.

При выделении видов-индикаторов рН было выявлено преобладание в общем количестве створок видов-алкалофилов, т. е. тех водорослей, которые предпочитают слабощелочную среду — от 50.7 % в слое 375—380 мм до 95.2 % (рис. 4) на глубине 450—455 мм — за счет развития абсолютного доминанта донных отложений *A. subarctica*, предпочитающей слабощелочную среду со значениями рН = 7.3. Коэффициент корреляции количества створок алкалофилов и общего числа створок диатомей составил 0.97, и эта зависимость носила линейный характер. Кроме *A. subarctica* к алкалофильным видам относятся *A. italica* (Ehr.) Simonsen, *Ulnaria ulna* (Nitzsch.) Comp., *Gomphonema olivaceum* (Horn.) Bréb., *Nitzschia fonticola* Grun. Эти виды в диатомоценозах донных отложений занимают субдоминирующие позиции. Подсчитанные для каждой группы видов, индикаторов рН среды, доли в общем количестве створок позволили реконструировать величину рН для каждого исследованного отрезка керна (рис. 5). Эта величина варьировала в пределах 7.51—7.69 при среднем значении 7.580 ± 0.003 , т. е. соответствовала слабощелочной среде. Наименьшее реконструированное значение рН приходится на интервал 380—385 мм при низком общем количестве створок диатомей (1.8 млн ств./г) и большем количестве ацидофилов, в то время как наибольшее рН было подсчитано для 450—455 мм, где зафиксировано близкое к среднему значению общее количество створок диатомей для исследованного отрезка керна при полном отсутствии ацидофилов (23.2 млн ств./г, среднее для керна 22.90 ± 0.78 млн ств./г).

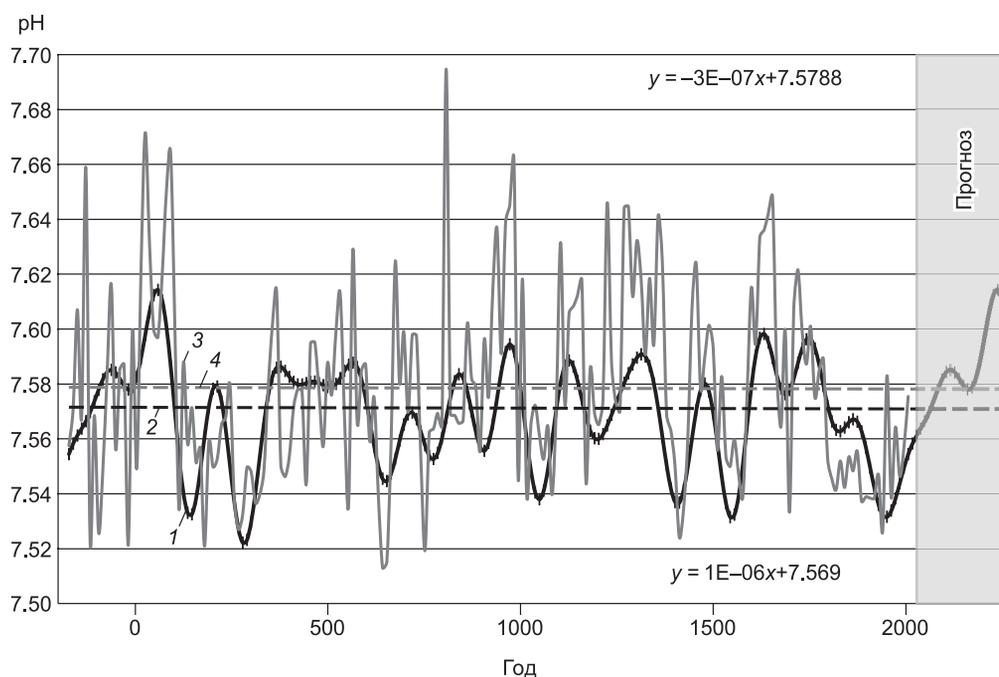


Рис. 5. Изменение величины рН, реконструированной по количеству створок диатомовых водорослей-индикаторов в керне донных отложений оз. Телецкое с 172 г. до н. э. до 2006 г., и прогноз ее поведения до 2259 г.

1 — расчет и прогноз, 2 — линейный тренд расчетной и прогнозной рН, 3 — реконструкция, 4 — линейный тренд реконструированной рН.

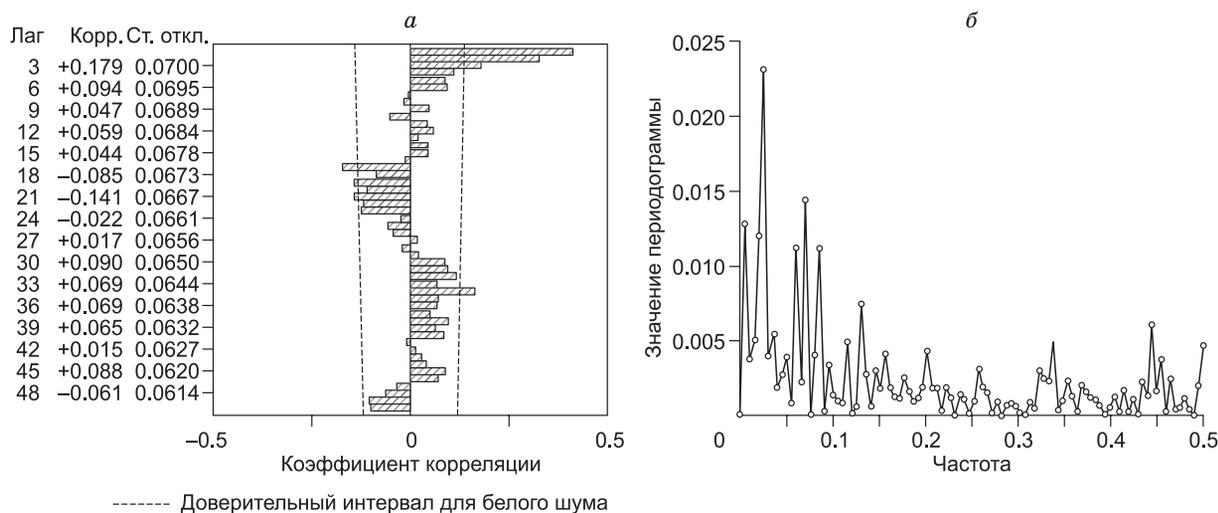


Рис. 6. Автокорреляционная функция (стандартные ошибки — оценки «белого шума») (а) и периодограмма (б) временного ряда значений рН в донных отложениях оз. Телецкое (спектральный анализ рН, число наблюдений 198, период ≈ 11 лет) Корр. — это корреляция между членами ряда со сдвигом (или лагом), указанным в столбце «Лаг».

Для выявления структуры ряда реконструированных значений рН рассмотрено 198 временных отрезков, где длина каждого соответствует примерно 11 годам (см. «Методика исследования») и построена автокорреляционная функция. Высокие значения коэффициентов автокорреляции с лагом τ свидетельствуют о наличии циклических колебаний с периодичностью τ . Если значения коэффициентов автокорреляции ряда на всем его протяжении не выходят за рамки доверительных интервалов, то можно считать данный ряд «белым шумом» (рис. 6, а). В соответствии с рекомендациями [Дэвис, 1990] лаги выше 1/4 длины изучаемого ряда не рассматриваются. Расчет автокорреляционной функции показыва-

ет, что существуют ее значения, превышающие пороговую оценку «белого шума», что указывает на наличие гармоник с определенными периодами.

В полученной периодограмме выделены пять циклов, вносящих наибольший вклад в периодическое поведение всего ряда — 49.5, 40.0, 16.0, 14.0, 12.0 (см. рис. 6, б). По выделенным основным гармоникам выполнен сценарный прогноз изменений величины рН для Телецкого озера на ближайшее будущее — до 2259 г. (см. рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемый керн донных отложений в оз. Телецкое был отобран на вершине подводного хребта Софьи Лепневой. Это единственная подводная возвышенность значительных размеров в озере, расположена она в его центральной части, в непосредственной близости от наибольших глубин (район устья р. Корбу). Величина средней линейной скорости накопления сухого вещества в этом районе дна оз. Телецкое в четыре и более раз меньше, чем на других участках дна озера, в то время как максимальная ее величина отмечена вблизи устья р. Чулышман (4—6 мм/год). Этот водоток определяет до 70—75 % общего притока в озеро. Ранее исследованные керны из района наибольшей депрессии дна озера (в устье р. Корбу [Калугин и др., 1998; Кириллов и др., 1998; Скабичевская, 1998, 2000]) отражали как процессы седиментации в пелагиали озера, так и «свал» или «снос» биообъектов и терригенного материала с берегов и участков литорали. На вершине подводного хребта формируются в большей степени осадки пелагической толщи. Поэтому, вероятно, в этой части дна озера по сравнению с другими участками скорость осадконакопления самая низкая.

Анализ таксономического состава выявленных диатомей показал, что преобладают обитатели дна и обрастаний, широко распространенные по географической приуроченности, индифферентные по отношению к солонности, предпочитающие слабощелочные условия, бета-мезосапробионтные виды по отношению к органическому загрязнению. Превосходство по составу бентосных видов может свидетельствовать о вкладе литорали озера и водоемов и водотоков водосборного бассейна в «поставку» в донные отложения разнообразных, в большей степени, бентосных диатомей, хотя литораль в озере развита слабо, но в озеро впадает 70 постоянных и 150 временных водотоков [Селегей, Селегей, 1978], приустьевые участки которых и являются основным местообитанием бентосных диатомей. Кроме того, диатомеи поступают в озеро со значительного по площади водосборного бассейна озера. Только диатомовые с их прочным кремнистым панцирем могут достичь озера в уцелевшем виде по бурным горным водотокам.

При большой значимости в видовом богатстве бентосных форм по количеству створок в донных отложениях оз. Телецкое доминируют планктонные формы. Такое преобладание истинных планктеров характерно для донных отложений многих озер, и в основном это виды с толстостенными панцирями. Так, например, в верхних слоях донных отложений оз. Байкал планктонные диатомовые водоросли, а именно эндемичные виды *A. baicalensis* (K. Meyer) Simonsen, *Cyclotella minuta* (Skv.) Antipova и *C. baicalensis* Skv., вносят основной вклад в общее количество створок диатомей в осадках озера. Вид *C. minuta* составляет до 30—50 % от общего количества створок диатомей, на *A. baicalensis* приходится до 55—87 %, максимальное относительное содержание *C. baicalensis* 27 % [Лихошвай и др., 2005]. Роль пеннатных диатомей, выносимых водами р. Селенга, основного притока озера, а также обитающих на Селенгинском мелководье, ограничивается только прибрежной зоной. Вклад бентосных диатомей в осадконакопление абиссали во всех котловинах Байкала в основном не превышает 1 %. В оз. Телецкое при численном преобладании в современном фитопланктоне мелкоклеточных центрических диатомей, которые плохо сохраняются в донных отложениях, и большом влиянии водоемов и водотоков водосборного бассейна (по площади он превосходит акваторию озера в 91 раз, в то время как для Байкала всего в 17 раз) доля бентосных форм в видовом разнообразии значительна, но по численности лишь в отдельных слоях донных отложений они могут составлять около 60 %.

A. subarctica широко распространена в донных отложениях озер бореальной зоны. Резкое снижение численности мезотрофной *A. subarctica* является первым сигналом повышения трофности озера на каком-нибудь этапе его развития [Лудикова, 2008]. Считается, что она является слабым конкурентом среди других видов этого рода при увеличении биогенной нагрузки [Striberger et al., 2012]. Так, исследование жизненного цикла *A. subarctica* в стратифицированном оз. Блейлхам Тарн (Англия) в период открытой воды показало, что недостаточная турбулентность в периоды термической стратификации или ледяного покрова не комфортна для данного вида; что сочетание высоких освещенности и температуры, а также истощение питательных веществ может привести к гибели клеток. Напротив, в большом, мутном и нестратифицированном оз. Лох-Ней (Северная Ирландия) при низкой освещенности и повторном ресуспензировании со дна *A. subarctica* может процветать [Gibson et al., 2003].

Большинство выявленных диатомей в керне с подводного хребта оз. Телецкое относится к группе широко распространенных, что может свидетельствовать об открытости водоема и его большой проточ-

ности (время водообмена составляет 5.81 лет), где нет эндемичной альгофлоры в отличие, например, от Байкала, в котором степень эндемизма водорослей достигает 8 % [Kozhova, 1987] и эндемики из центрических диатомей доминируют в планктоне по биомассе и численности [Поповская и др., 2002]. В начале 30-х годов XX в. в оз. Телецкое среди водорослей отмечали наличие трех условно эндемичных видов, причем все они были бентосными обитателями [Порецкий, Шешукова, 1953], которые в настоящее время практически не встречаются.

Значительная доля холодолюбивых видов, широко распространенных в водоемах бореальной зоны, является показателем суровости не столько условий окружающей среды на той высоте, где расположено оз. Телецкое (434 м над ур. м.), сколько суровости условий на его водосборном бассейне, 85 % его площади имеет высоты от 1501 до 3350 м над ур. м. при средней 1940 м. Вследствие поступления низкотемпературных вод с многочисленными притоками, а также больших глубин озеро имеет низкую температуру воды на протяжении всего года [Селегей, Селегей, 1978]. Кроме того, большой сток с водосбора приводит к значительному колебанию уровня воды в озере, амплитуда которого может составлять до 6 м/год, и нестабильности водной толщи. Все это влияет на развитие диатомовых водорослей в самом озере и привнос их извне.

Индикаторная значимость диатомовых водорослей для палеолимнологических и палеоклиматических исследований состоит в изменении их состава и количества в разных слоях донных отложений. Так

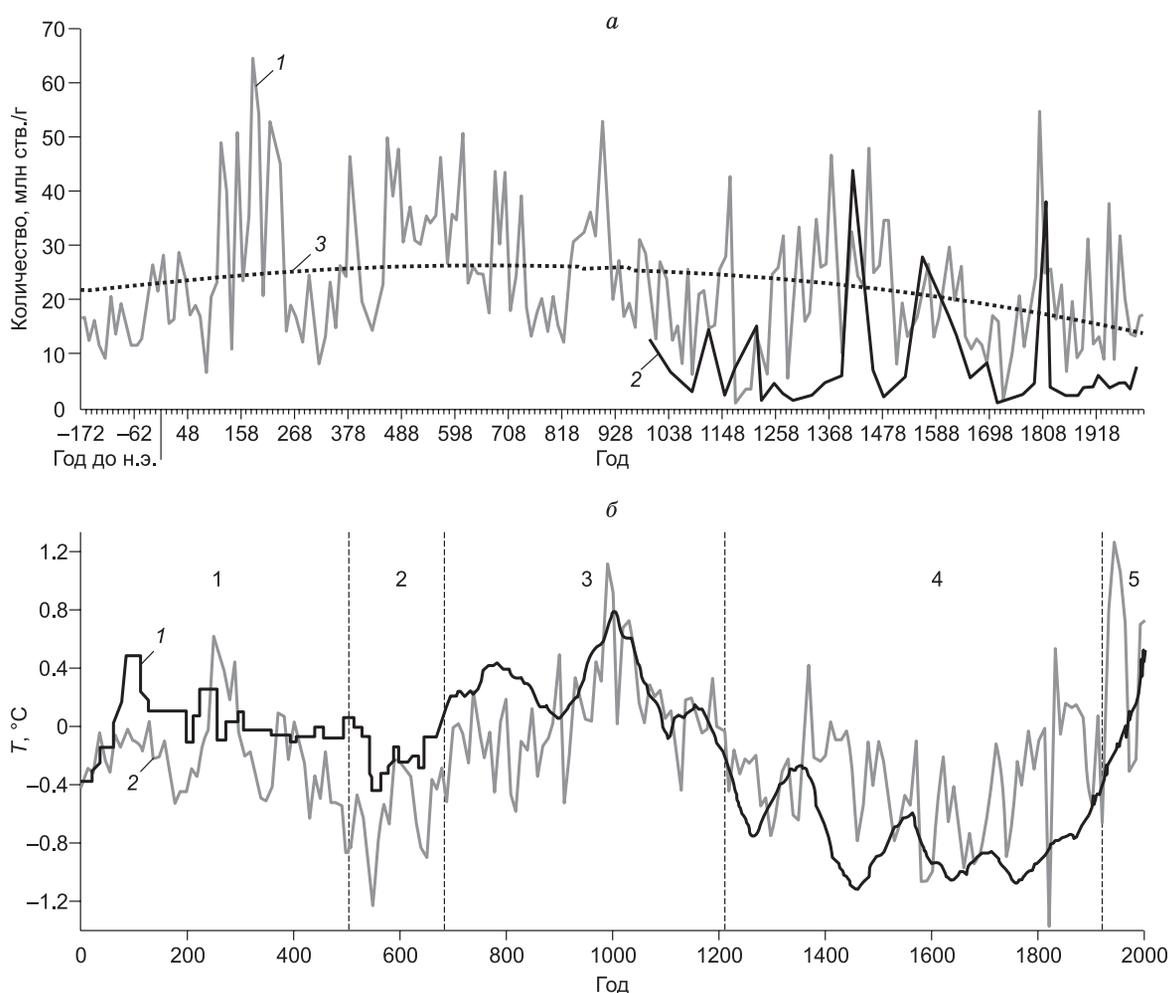


Рис. 7. Изменение количества створок диатомовых водорослей (млн ств./г) с линией тренда в донных отложениях оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой (1) и из района устья р. Корбу (2), по [Скабичевская, 2000] (а); реконструированные средние 100-летние температуры для района оз. Телецкое (1) и декадные температуры для Северо-Восточной Европы (2) (б).

а — 1 — возвышенность, 2 — впадина, 3 — полиномиальная возвышенность. 1—5 — наиболее значимые климатические события: 1 — римский оптимум; 2 — климатический пессимум раннего Средневековья (эпоха Великого переселения народов); 3 — средневековый оптимум; 4 — похолодание с малым ледниковым периодом; 5 — современное потепление. Температурные аномалии представлены в отклонениях от среднего за период 1961—1990 гг., по [Бабич и др., 2015].

как большинство диатомовых являются обитателями холодных или очень холодных вод, то при похолодании общее количество диатомей и доля холодолюбивых видов повышаются, при увеличении температуры, напротив, снижаются. Диатомовые могут практически полностью исчезать в озерах в периоды оледенений, как это выявили при исследовании донных отложений Байкала [Кузьмин, Хурсевич, 2012]. 600-метровые керны возрастом 8 млн лет показали наличие или отсутствие диатомей в слоях, соответствующих межледниковым и ледниковым периодам. Керны из оз. Телецкое не вскрывают столь старые отложения. Максимальный возраст изученных осадков составил 4000 лет, а анализируемые нами 0—1000 мм — немногим более 2000 лет. При этом возраст озера определяют в 320 тыс. лет [Лукина, 1991], и за это время оно не перемерзло, тем более в последние 2000 лет. Поэтому слои с полным отсутствием диатомей в донных отложениях озера не выявлены.

При сравнении полученных данных по количеству диатомовых в донных отложениях на вершине подводного хребта с таковыми для наибольшей депрессии дна в районе устья р. Корбу (320 м) [Скабичевская, 2000] отмечена большая сходимости результатов (рис. 7, а). При разной скорости осадконакопления, а в районе устья р. Корбу это 1.33 мм/год [Калугин и др., 2000], пики развития диатомей, особенно после 1200 г., отмечены в одни и те же временные периоды, но максимальные количества в донных отложениях с подводного хребта выше, чем в районе максимальных глубин.

Для оз. Телецкое и его района проводили реконструкции палеотемператур по особенностям геохимического состава озерных осадков, по палинологическим и дендрохронологическим данным [Калугин и др., 2009; Смолянинова, Калугин, 2013; Бабич и др., 2015]. Полученная кривая температурных аномалий, представленных в отклонениях от среднего за период 1961—1990 гг., имеет очевидное совпадение с температурной хронологией для Северо-Восточной Европы (см. рис. 7, б) [Клименко и др., 2013]. Авторы работы [Бабич и др., 2015] отмечают, что реконструированные температурные кривые совпадают как по общему тренду, так и по абсолютным температурным величинам и рубежам климатических перестроек. При этом на обеих реконструкциях отчетливо выражены исторические климатические события, которые находят отражение и в распределении диатомовых водорослей в анализируемых донных отложениях. Самые глубинные интервалы изученного отрезка керна относятся к римскому оптимуму, максимально проявившемуся в I—III вв. В этом интервале отмечены как периоды с максимумом развития диатомей, так и с незначительным их количеством. Как правильно замечает В.В. Бабич с соавторами [2015], крупные климатические события не сопровождались монотонным повышением или понижением температур, а представляли собой чередование более холодных и теплых периодов на фоне общего тренда потепления и похолодания. Максимальное количество створок диатомовых водорослей приходилось на период с 114 по 235 г. (810—870 мм), среднее составило 41.40 ± 4.56 млн ств./г, и максимальный вклад *A. subarctica* отмечен именно в этот период (см. рис. 2), несмотря на то, что это были не самые холодные времена. Кроме этого вида, установлены пики развития у *C. bodanica* и *Staurorsirella pinnata*, но с меньшими абсолютными значениями. Если *C. bodanica* так же, как и *A. subarctica*, относится к планктонному комплексу, то *S. pinnata* — типичный представитель донных ценозов, что свидетельствует о значительном и постоянном влиянии литорали озера и водотоков и мелководных водоемов его водосборного бассейна.

Второй пик развития диатомей приходится на следующий климатический период — пессимум раннего Средневековья (V—VII вв.), с 455 по 609 г. (645—710 мм), среднее количество створок диатомей 37.6 ± 1.92 млн ств./г при доминировании все той же *A. subarctica* и сопутствовании *C. bodanica* и *S. pinnata* (см. рис. 2). Во время средневекового оптимума (VII—XIII вв.) был достигнут температурный максимум [Бабич и др., 2015] и наметилась тенденция уменьшения общего количества створок диатомей, среднее составило 21.3 ± 1.83 млн ств./г. Отмечено два пика в развитии диатомей в первой и второй половине этого периода, но они были кратковременные при преобладании *A. subarctica*. Из донных форм несколько повышена была роль *Ulnaria ulna*, *Cymbella sinuata*, *Cocconeis placentula*. Далее наступает длительное похолодание с малым ледниковым периодом, которое продлилось с 1220 до 1920 г. В литературе приводятся различные границы малого ледникового периода. Так, Н.А. Скабичевская [2000] выделяет его по Х.Х. Лэму — с 1450 по 1850 г., а А. Маккей с соавторами [Mackay et al., 2005] — 1200—1800 гг., в том числе самый холодный период 1645—1715 гг. (Maunder Minimum). В первой половине малого ледникового периода при снижении температур наблюдалось увеличение количества диатомей, во втором при увеличении температур, напротив, спад в развитии диатомоценозов в озере. Среднее количество створок по сравнению с предыдущим периодом практически не уменьшилось и составило 21.0 ± 1.50 млн ств./г, потому что наблюдались как значительные пики, так и спады. Наметившийся тренд в снижении развития диатомовых в озере продолжился (см. рис. 7). Отмечено увеличение в развитии холодолюбивого планктонного вида *Stephanodiscus alpinus*, максимум его развития пришелся на конец предыдущего периода, но и в первой половине этот вид вносил существенную долю в общее количество диатомей. Повысилась численность и другого планктонного вида *A. italica*, которая в более ранних отложениях или отсутствовала совсем, или вклад ее был весьма незначительным. Но преоблада-

ла по количеству все же *A. subarctica*. Во время малого ледникового периода и вплоть до начала XX в. (1730—1907 гг., слой 50—130 мм) намечился некий подъем в развитии диатомовых водорослей в озере, даже со значительным пиком в конце XVIII в. (54.7 млн ств./г). Но кратковременное похолодание (см. рис. 7) сменилось потеплением, и развитие диатомей неуклонно изменялось в сторону снижения. Поэтому и среднее количество за этот период было меньше предыдущего — 19.30 ± 2.83 млн ств./г. На фоне лидирования планктонной *A. subarctica* появляются и становятся значимыми донные формы из *Fragilaria*, *Staurosirella* и пр. А с начала XIX в. и по настоящее время в период современного потепления развитие диатомей в озере продолжает снижаться, среднее значение за период составило 18.40 ± 3.35 млн ств./г. Донные формы и виды-обрастатели все больше вносят вклад в диатомоценозы озера. Как отмечает Н.А. Скабичевская [2000], за последнее тысячелетие пики численности диатомей, особенно представителей холодолюбивого комплекса, были приурочены именно к периодам с пониженной температурой воды в озере. Данные по диатомовым в исследованном керне подтвердили этот же вывод — общее количество и количество основного доминанта, холодолюбивого вида *A. subarctica*, повышается с понижением температуры и наоборот.

Кроме палеотемпературы, по данным, полученным при изучении кернов донных отложений, можно реконструировать и другие параметры среды, в том числе pH. В результате расчетов было выявлено, что реконструированная величина pH за период с 172 г. до н. э. до 2006 г. изменялась в пределах от 7.51 до 7.69 (см. рис. 5) при среднем значении 7.58. На основе реконструированных значений был произведен прогноз изменения этой величины в ближайшем будущем. Расчетная и прогнозируемая величина pH с 172 г. до н. э. до 2259 г. показала еще меньший разброс в значениях — 7.53—7.63 при аналогичной средней величине 7.58. Коэффициент корреляции для двух этих рядов данных составил 0.59. Линии тренда для реконструированной и прогнозной кривых практически параллельны оси X, т. е. нет ни увеличения, ни уменьшения на протяжении всего исследованного периода. Можно сделать вывод, что в озере в течение продолжительного времени сохраняются стабильные условия по pH фактору.

Если вычленить небольшой период вглубь от настоящего времени, а именно с 1929 (начало периода современного потепления) по 2006 г., и сравнить его с прогнозируемым до 2259 г. (рис. 8), то можно отметить, что на этом временном отрезке реконструированная и прогнозная величины pH имеют одинаковую направленность в сторону увеличения. При этом максимум реконструированной pH на данном отрезке составил 7.58, минимум — 7.52, среднее — 7.560 ± 0.007 . Изменение прогнозируемой величины с 2006 г. было в пределах от 7.56 до 7.61 при среднем значении 7.58 и увеличивающейся линии тренда. Прогноз показал, что начиная с 2006 г. величина pH в воде Телецкого озера будет постепенно увеличиваться вплоть до 2050 г., затем наступит незначительное ее снижение и вновь увеличение вплоть до 2259 г.

Для верификации полученные результаты сопоставлены с инструментальными данными по станции фонового комплексного мониторинга (СФКМ) в пос. Яйлю на оз. Телецкое за период с 1985 по

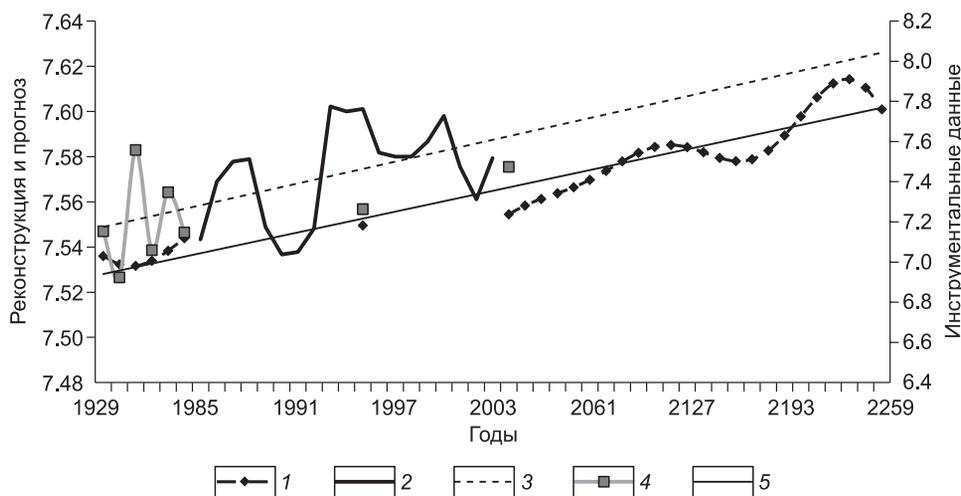


Рис. 8. Циклический тренд величины pH, реконструированной по количеству створок диатомовых водорослей-индикаторов pH в керне донных отложений с 172 г. до н. э. до 2006 г., и прогноз ее поведения до 2259 г., сопоставленный с инструментальными данными по СФКМ пос. Яйлю, оз. Телецкое (фрагмент с 1985 по 2003 г.).

1 — прогноз, 2 — инструментальные данные, 3 — линейный тренд (инструментальные данные), 4 — реконструкция, 5 — линейный тренд (прогноз).

2003 г. (см. рис. 8). Диапазон изменения рН оказался более широким — от 7.04 до 7.78, потому что здесь были представлены среднегодовые значения, а для реконструкции по керну использовали слой донных отложений 0.5 см, что соответствует временному периоду около 11 лет. Но среднее значение рН, полученное для временного периода 1985—2003 гг., было очень близко к реконструируемым и прогнозируемым значениям — 7.44 ± 0.06 и общий тренд в сторону повышения температуры сохраняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении верхних 0—1000 мм керна донных отложений оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой было выявлено 194 вида (212 разновидностей и форм) диатомовых водорослей. Анализ состава танатоценозов показал, что преобладают обитатели дна и обрастаний, широко распространенные по географической приуроченности, индифферентные по отношению к солености, предпочитающие слабощелочные условия бета-мезосапробионтные виды. Количество створок диатомей варьировало от 0.86 (глубина по керну 135—140 мм) до 64.4 млн ств./г (835—840 мм) при среднем значении по отрезку керна 22.90 ± 0.78 млн ств./г. За последнее тысячелетие пики численности диатомей, особенно представителей холодолюбивого комплекса, в том числе доминанта *A. subarctica*, были приурочены в основном к периодам с пониженной температурой воды в озере.

Реконструированная величина рН за период с 172 г. до н. э. до 2006 г. изменялась в пределах от 7.51 до 7.69 при среднем значении 7.580 ± 0.003 , прогнозируемая величина рН = 7.53—7.63 при аналогичной средней величине 7.580 ± 0.001 . Несмотря на то, что за последние 2000 лет температура изменялась в значительных пределах и наблюдались значимые климатические перестройки [Бабич и др., 2015], изменения рН условий были не столь кардинальны и даже минимальны. Колебания прогнозной величины рН так же, как и реконструированной, находятся в очень узком диапазоне и соответствуют слабощелочной среде (7.0—8.5), что может свидетельствовать о постоянстве среды в озере по данному фактору как в предыдущие временные отрезки, так и в ближайшем будущем.

Авторы признательны И.А. Калугину (ИГМ СО РАН) за предоставленный для исследований керн донных отложений оз. Телецкое с подводного хребта Софьи Лепневой и рецензентам за ценные советы и предложения по улучшению статьи.

Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта VIII.76.1.3. «Исследование внутриводоемных процессов и динамики экосистем водных объектов Сибири, включая субарктическую зону».

ЛИТЕРАТУРА

- Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М., Мир, 1976, 755 с.
- Бабич В.В., Рудая Н.А., Калугин И.А., Дарьин А.В. Опыт комплексного использования геохимических особенностей донных отложений и палинологических записей для палеоклиматических реконструкций (на примере оз. Телецкое, Российский Алтай) // Сибирский экологический журнал, 2015, № 4, с. 497—506.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, Pilies Studio, 2006, 498 с.
- Водоросли. Справочник / С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк, Г.М. Паламарь-Мордвинцева, З.И. Ветрова, Е.Л. Кордюм, Н.А. Мошкова, Л.П. Приходькова, О.В. Коваленко, В.В. Ступина, П.М. Царенко, В.П. Юнгер, М.И. Радченко, О.Н. Виноградова, Л.Н. Бухтиярова, Л.Ф. Разумна. Киев, Наук. думка, 1989, 608 с.
- Глобальные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / Отв. ред. А.П. Деревянко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, 511 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные) / Ред. А.И. Прошкина-Лавренко. Т. I. Л., Наука, 1974, 403 с.
- Дэвис Д.С. Статистический анализ в геологии. В 2 кн. М., Недра, 1990, кн. 1, 319 с.
- Зиновьев А.Т., Митрофанова Е.Ю., Третьякова Е.И., Марусин К.В., Дьяченко А.В., Блиннов В.В., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю. Комплексные исследования Телецкого озера: термический режим, гидрохимические и гидробиологические характеристики // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. В 3 т. Барнаул, Пять плюсов, 2012, т. 1, с. 43—47.
- Калугин И., Бобров В., Воробьева С., Кривоногов С., Селегей В., Щербов Б., Клеркс Ж., Вартель С. Осадконакопление в Телецком озере и проблема палеоклиматических реконструкций // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 1998, с. 209—221.
- Калугин И.А., Селегей В.В., Бобров В.А., Воробьева С.С., Кривоногов С. Паводковая периодичность осадконакопления в Телецком озере, обусловленная региональными колебаниями климата на

- юге Сибири за последние 570 лет // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Вып. 2. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2000, с. 269—281.
- Калугин И.А., Гольдберг Е.Л., Федорин М.А., Дарьин А.В., Золотарев К.В., Воробьева С.С., Смолянинова Л.Г.** Высокоразрешающая хронология осадконакопления в Телецком озере за последние 800 лет — отклик на климатические обусловленные вариации твердого притока // Глобальные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / Отв. ред. А.П. Деревянко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, с. 373—404.
- Калугин И.А., Дарьин А.В., Бабич В.В.** 3000-летняя реконструкция среднегодовых температур Алтайского региона по литолого-геохимическим индикаторам донных осадков оз. Телецкое // ДАН, 2009, т. 426, № 4, с. 520—522.
- Кириллов В.В., Скабичевская Н.А., Митрофанова Е.Ю., Кириллова Т.В., Ким Г.В.** Палеоэкологические сигналы альгоценозов экосистем озер и их водосборных бассейнов // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Вып. 1. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 1998, с. 222—233.
- Клименко В.В., Мацковский В.В., Дальман Д.** Комплексная реконструкция температуры Российской Арктики за последние два тысячелетия // Арктика: экология и экономика, 2013, 4 (12), с. 84—95.
- Кузьмин М., Хурсевич Г.** Диатомовая летопись Байкала // Наука в России, 2012, 3 (189), с. 56—64.
- Лихошвай Е.В., Помазкина Г.В., Костюковская А.О., Сергеева В.Н., Левина О.В.** Распределение диатомовых водорослей в верхнем слое донных отложений озера Байкал // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (1), с. 34—49.
- Лудикова А.В.** История развития и современное состояние водоемов Карельского перешейка и Санкт-Петербурга по материалам диатомового анализа донных отложений: Автореф. дис. ... к.г.н. СПб., Ин-т озероведения РАН, 2008, 25 с.
- Лукина Н.В.** Молодой грабен Телецкого озера // Природа, 1991, № 2, с. 56—64.
- Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Каган Л.Я.** Горные озера как индикаторы загрязнения воздуха // Водные ресурсы, 1997, т. 24, № 5, с. 600—608.
- Поповская Г.И., Генкал С.И., Лихошвай Е.В.** Диатомовые водоросли планктона озера Байкал: Атлас-определитель. Новосибирск, Наука, 2002, 168 с.
- Порецкий В.С., Шешукова В.С.** Диатомовые Телецкого озера и связанных с ним рек // Диатомовый сборник. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1953, с. 107—173.
- Прогнозирование** в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере. Учеб. пособие / В.П. Боровиков, Г.И. Ивченко. М., Финансы и статистика, 2000, 384 с.
- Селегей В.В.** Телецкое озеро: очерки истории. В 3 кн. Новосибирск, ЗАО ИПП «Офсет», 2009, кн. 1, 119 с.
- Селегей В.В.** Телецкое озеро: очерки истории. В 3 кн. Барнаул, Пять плюс, 2011, кн. 3, 244 с.
- Селегей В.В., Селегей Т.С.** Телецкое озеро. Л., Гидрометеиздат, 1978, 142 с.
- Скабичевская Н.А.** Диатомовые водоросли в донных отложениях Телецкого озера // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Вып. 1. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 1998, с. 270—276.
- Скабичевская Н.А.** Диатомеи Телецкого озера и климатические реконструкции последнего тысячелетия // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Вып. 2. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2000, с. 428—432.
- Смолянинова Л.Г., Калугин И.А.** Способ реконструкции палеоклимата по литолого-геохимическим свойствам донных отложений с использованием вейвлет-анализа и искусственных нейросетей на примере оз. Телецкое (Алтай) // Нейроинформатика, 2013, т. 7, № 1, с. 18—28.
- Яныгина Л.В., Ковешников М.И., Крылова Е.Н., Марусин К.В.** Пространственное распределение зообентоса Телецкого озера // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Минск, Изд. центр БГУ, 2007, с. 274.
- Buslov M.M., Berzin N.A., Dobretsov N.L., Simonov V.A.** Geology and tectonics of Gorny Altai. Novosibirsk, UIGGM Publ., 1993, 122 p.
- Chipman M.L., Clarke G.H., Clegg B.F., Gregory-Eaves I., Hu F.S.** A 2000 year record of climate change at Ongoke Lake, southwest Alaska // J. Paleolimnol., 2009, v. 41, № 1, p. 57—75.
- Finkelstein S.A., Bunbury J., Gajewski K., Wolfe A.P., Adams J.K., Devlin J.E.** Evaluating diatom-derived Holocene pH reconstructions for Arctic lakes using an expanded 171-lake training set // J. Quaternary Sci., 2014, 29 (3), h. 249—260.
- Gibson C., Anderson J., Haworth E.** Aulacoseira subarctica: taxonomy, physiology, ecology and palaeoecology // Eur. J. Phycol., 2003, v. 38, № 2, p. 83—101.

Kozhova O.M. Phytoplankton of Lake Baikal: structural and functional characteristics // Archiv fur Hydrobiologie Beihefte Ergebnisse der Limnologie, 1987, v. 25, p. 19—37.

Mackay A.W., Ryves D.B., Battarbee R.W., Flower R.J., Jewson D., Rioual P., Sturm M. 1000 years of climate variability in central Asia: assessing the evidence using Lake Baikal (Russia) diatom assemblages and the application of a diatom-inferred model of snow cover on the lake // Global Planet. Change, 2005, v. 46, № 1—4, p. 281—297.

Renberg J., Hellberg T. The pH history of lakes in south-western Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments // AMBIO, 1982, v. 11, p. 30—33.

Selegei V., Dehandschutter B., Klerks J., Vysotsky A. Physical and geological environment of Lake Teletskoye. Ann. Sci. Geol., 2001, v. 105, 310 p.

Striberger J., Björck S., Holmgren S., Hamerlík L. The sediments of Lake Lögurinn — a unique proxy record of Holocene glacial meltwater variability in eastern Iceland // Quaternary Sci. Rev., 2012, v. 38, p. 76—88.

Wolin J.A., Stone J.R. Diatoms as indicators of water-level change in freshwater lakes // The diatoms: applications for the environmental and earth Sciences / Eds. E.F. Stoermer, J.P. Smol. Cambridge University Press, 2010, p. 174—185.

*Рекомендована к печати 1 декабря 2015 г.
М.И. Кузьминым*

*Поступила в редакцию 26 марта 2015 г.,
после доработки — 9 октября 2015 г.*