УДК 551.89 DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ ОЗЕРА ТУРГОЯК (ЮЖНЫЙ УРАЛ) В ГОЛОЦЕНЕ

© 2018 г. А. В. Масленникова[1], В. Н. Удачин[2], В. В. Дерягин[3], М. В. Штенберг[1]

[1]Институт минералогии УрО РАН, 456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: adenophora@inbox.ru
[2]Южно-Уральский государственный университет, 454080, Челябинская обл., г. Челябинск, просп. Ленина, 76
[3]Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, 454080, Челябинская область, г. Челябинск, просп. Ленина, 69

Поступила в редакцию 12.08.2017 г., принята к печати 03.10.2017 г.

Объект исследования. В статье приведены данные комплексного исследования колонки донных отложений (265 см) оз. Тургояк в целях реконструкции основных этапов его развития и оценки роли палеоклимата голоцена в изменении физико-химических параметров воды озера. *Материалы и методы.* Для реконструкций использованы геохимические данные, данные радиоуглеродного датирования и результаты диатомового анализа колонки донных отложений. В статье предложены геохимические индексы, полученные на основе статистического анализа данных химического состава поверхностных отложений и гидрохимии 56 озер Южного и Среднего Урала: показатель содержания органического вещества ($OM = LOI_{550°C}/(Al_2O_3 + TiO_2 + Na_2O + K_2O)$) и модуль минерализации озерной воды ($MM = LOI_{950°C}/LOI_{550°C}$). *Результаты.* На основе радиоуглеродного датирования определено, что осадконакопление в оз. Тургояк началось более 12 тыс. к.л.н. (калиброванных лет назад). Установлена связь изменений литологии и геохимии колонки донных отложений оз. Тургояк с глобальными (11.8, 11.2, 8.2 тыс. к.л.н.) и региональными (12, 10.3 тыс. к.л.н.) климатическими событиями Северного полушария в голоцене. Реконструировано четыре основных этапа развития озера: 1) начало озерного осадконакопления (>12.1 тыс. к.л.н.); 2) этап мелководного озера с повышенной минерализацией (12.1–11.2 тыс. к.л.н.); 3) этап возрастания глубины и снижения минерализации (11.2–8.0 тыс. к.л.н.); 4) этап устойчивого увеличения содержания органического вещества в воде (<8.0 тыс. к.л.н.). *Выводы.* На основе оценки значений модуля минерализации и концентраций диатомей-мезогалобов в колонке донных отложений сделан вывод о резком возрастании минерализации воды озера в результате потепления климата в раннем голоцене (11.8–11.2 тыс. к.л.н). С помощью анализа показателя содержания органического вещества и индекса сапробности Пантле–Букка установлено начало возрастания содержания органического вещества в воде в ответ на потепление климата, начавшееся около 9–8 тыс. к.л.н. Таким образом, реконструированы неоднократные изменения физико-химических параметров оз. Тургояк в голоцене и неодинаковая реакция озерной экосистемы на потепление климата на разных этапах развития озера.

Ключевые слова: *озеро Тургояк, колонка донных отложений, реконструкция, голоцен, геохимический модуль, диатомеи, база данных озер Южного и Среднего Урала*

RECONSTRUCTION OF TURGOYAK LAKE (THE SOUTHERN URALS) ECOSYSTEM CHANGES IN HOLOCENE

Anna V. Maslennikova[1], Valerii N. Udachin[2], Vladimir V. Deryagin[3], Mikhail V. Shtenberg[1]

[1]Institute of Mineralogy UB RAS, Ilmeny State reserve, Miass, Chelyabinsk region 456317, Russia, e-mail: adenophora@inbox.ru
[2]South Ural State University, 76 Lenin av., Chelyabinsk 454080, Russia
[3]South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 69 Lenin av., Chelyabinsk 454080, Russia

Received 12.08.2017, accepted 03.10.2017

Object. Multi-proxy analysis of 265 cm long sediments core of Lake Turgoyak, one of the deepest lakes of the Southern Urals, is presented. *Materials and methods*. The lake ecosystem changes was reconstructed based on diatom, radiocarbon dating and geochemical analysis. Statistical treatment of the surface sediments composition and hydrochemistry data of 56 lakes from Southern and Middle Urals lakes database allowed to obtain geochemical indexes for reconstruction of water parameters: index of organic matter content ($OM = LOI_{550°C}/(Al_2O_3 + TiO_2 + Na_2O + K_2O)$) and index of salinity

Для цитирования: Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В. (2018) Реконструкция этапов развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене. *Литосфера*, **18**(6), 914-927. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927

For citation: Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. (2018) Reconstruction of Turgoyak Lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Litosfera*, **18**(6), 914-927. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927

(MM = $LOI_{950°C}/LOI_{550°C}$). *Results.* Radiocarbon dating shows that sedimentation in Lake Turgoyak was began more than 12 cal kyr BP ago. Each of six lithological units of sediments core is characterized by its own geochemical features and associated with global (11.8, 11.2, 8.2 cal kyr BP) and regional (12, 10.3 cal kyr BP) climate events of the Northern Hemisphere. Four main stages of Lake ecosystem development were identified: 1) the beginning of lake sedimentation (>12.1 cal kyr BP); 2) the stage of a subsaline shallow-water lake (12.1–11.2 cal kyr BP); 3) the stage of a freshwater lake with increased water-level (11.2–8.0 cal kyr BP); 4) the stage of water organic matter increase (<8.0 cal kyr BP). *Conclusions.* High content of mesohalobic diatoms and salinity module values showed significant increase of lake water salinity as response to Early Holocene climate warming (11.8–11.2 cal kyr BP). Pantle-Buck's Saprobity Index and OM values pointed to the lake water organic matter increase due to the next climate warming since 9–8 cal kyr BP. Thus, Lake Turgoyak water parameters were reapeatedly changed during the Holocene. However the response of lake ecosystem was different in different periods of its development.

Keywords: *Lake Turgoyak, sediments core, reconstruction, Holocene, geochemical index, diatoms, Southern and Middle Urals lakes database*

Acknowledgments

The authors are grateful to M.N. Malyarenok, G.F. Lonshchakova, L.G. Udachina, N.I. Valizer, Yu.F. Melnova, T.V. Semenova, K.A. Filippova, M.S. Svirenko for their help in the analysis of bottom sediments and waters of the investigated lakes.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 16-35-00103 мол_а. Construction of the age model and silicate analysis of the Lake Turgoyak sediments core. Turgoyak was carried out with the financial support of the complex program of basic research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. 18-5-5-43).

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Тургояк обладает статусом памятника природы областного значения с 1961 г. Однако исследования, проведенные в 1990–1996 гг., зафиксировали тенденцию потери озером олиготрофности в сравнении с 1963 г. Предполагаемые причины – забор воды для водоснабжения предприятий и возросшая рекреационная нагрузка [Ткачев и др., 1997; Рогозин, 1998]. Влияние климатических изменений на трансформацию озера не оценивалось. Между тем для прогноза реакции оз. Тургояк на антропогенное воздействие в условиях климатических флуктуаций важно исследовать его изменение в ответ на природные факторы. Целью настоящего исследования является реконструкция изменений физико-химических параметров оз. Тургояк в связи с колебаниями климата голоцена на основе палеолимнологического изучения колонки донных отложений.

Реконструкции условий голоцена и позднеледниковья Южного Урала позволили выделить несколько важных рубежей, фиксирующих наибольшие изменения обстановок осадконакопления: 12.0–11.7, 11.2–11.0, 9.8–10.3, 9.0–8.0, 6.3–5.6, 4.2 тыс. к.л.н. [Масленникова и др., 2012, 2014; Maslennikova et al., 2016]. Палеолимнологические исследования Южного Урала показали различную реакцию двух малых озер, расположенных на небольшом расстоянии, на одни и те же климатические колебания [Maslennikova, Udachin, 2017]. В нашем исследовании предполагается изучение особенностей реакции на климатические события голоцена озера Тургояк, которое в настоящее время характеризуется значительной глубиной и термической инертностью [Рогозин и др., 1998].

Сегодня для реконструкции обстановок осадконакопления применяется большое количество геохимических индикаторов. При исследовании терригенных пород используется целая система литохимических модулей, дающая возможность расшифровывать физико-химические и геодинамические особенности обстановок осадконакопления [Юдович, Кетрис, 2000; Маслов, 2005]. Однако в ней не учитываются биохемогенные процессы, играющие важнейшую роль в формировании донных отложений озер, что вызывает сложности в интерпретации литохимических модулей. Поэтому для некоторых территорий вычислены геохимические индексы, позволяющие реконструировать условия осадконакопления по озерным осадкам. Так, согласно исследованиям, проведенным на севере Китая, величины отношений $(K_2O + Na_2O + CaO + MgO)/(Fe_2O_3 + MnO)$ и K_2O/Na_2O связаны с аридизацией и гумидизацией климата [Liu et al., 2002], а уменьшение величины $(CaO + MgO + Na_2O)/Al_2O_3$ в озерной глине – с возрастанием химического выветривания [Sun et al., 2010]. Проверка данных индексов на донных отложениях озер Южного и Среднего Урала выявила необходимость регионального подхода в поиске информативных геохимических палеоиндикаторов. Для получения специфических геохимических модулей, пригодных для палеолимнологических реконструкций Южного и Среднего Урала, необходимо выявление связи геохимии донных отложений и физико-химических параметров обстановок осадконакопления. Для этого в работе использована база данных донных отложений и вод 56 озер Среднего и Южного Урала (рис. 1).

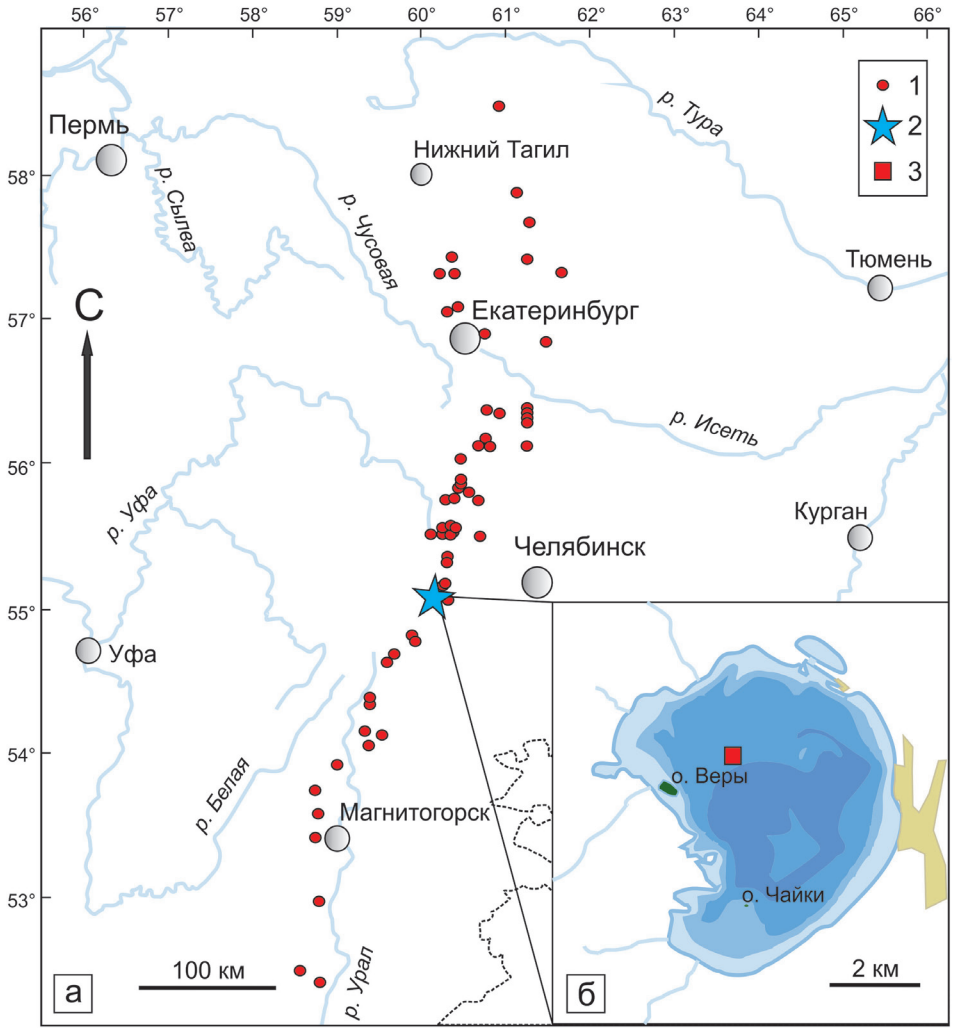

Рис. 1. Расположение озер из базы данных поверхностных озерных отложений Южного и Среднего Урала (а) и оз. Тургояк (б):

1 – озера Урала; 2 – оз. Тургояк; 3 – место отбора колонки донных отложений оз. Тургояк.

Fig. 1. Location of lakes from the Southern and Middle Urals surficial lake sediments and water database (a) and Lake Turgoyak (б):

1 – Urals lakes; 2 – Lake Turgoyak; 3 – a place of the lake sediments core selection.

Озеро Тургояк

Озеро Тургояк (55°09′ с.ш. 60°04′ в.д., 320 м над уровнем моря) имеет тектоническое происхождение. Площадь водного зеркала – 26.4 км^2, средняя глубина – 19.1 м, максимальная глубина – 32.5 м [Андреева, 1973]. Озеро Тургояк является проточным, в него впадает несколько рек (Липовка, Бобровка, Кулешка, Пугачевка) и вытекает р. Исток. Озеро обладает большой термической инертностью. Сильное ветровое воздействие способствует интенсивному турбулентному перемешиванию, что удлиняет периоды гомотермии, в результате чего водная толща летом стратифицирована только с июля по сентябрь [Рогозин, Ткачев, 1998].

Вода озера имеет высокую прозрачность по диску Секи, варьирующую по различным данным от 8.5 до 17.5 м (1940–1960 гг. – 8.5–17.5, 1994 г. – 9.9–11.3, в 2011 г. – 14–15 м) [Балабанова, 1964; Рогозин, Ткачев, 1998; Баянов, 2012]. Вода сульфатно-гидрокарбонатная магниево-кальциевая, пресная, с низкой минерализацией. Химический состав воды оз. Тургояк, по данным на 2005 г., характеризуется следующими формулами Курлова:

$$M0.12\frac{HCO_3 53 SO_4 34[Cl12]}{Ca62[Mg20Na18]}pH8.03 -$$

для поверхностной воды (глубина отбора 0.2 м),

$$M0.13\frac{HCO_3 55 SO_4 33[Cl12]}{Ca61[Mg20Na19]}pH7.75 -$$

для придонной воды (глубина отбора 28 м).

Озеро Тургояк локализовано в Тургоякском массиве, сложенном гранодиоритами, редко кварцевыми диоритами первой фазы и гранитами – второй. Вблизи Тургоякского массива распространены антигоритовые серпентиниты, кремнистые и кварцитовые сланцы, амфиболиты и известняки. Небольшие тела метаморфизованных ультрамафитов залегают к югу и северу от оз. Тургояк [Геологическая карта…, 1967; Петров и др., 2003].

База данных озер Южного и Среднего Урала

В ходе исследования проанализированы донные отложения 56 озер Свердловской и Челябинской областей, а также Республики Башкортостан (см. рис. 1). Самое южное, оз. Култубан, находится на широте 52°37'45", самое северное – Шайтанское – располагается на широте 58°18'24". Озера находятся в различных ландшафтно-климатических зонах и характеризуются широкой вариацией минерализации (54–2065 мг·л$^{-1}$), жесткости (0.53–10.47 ммоль·л$^{-1}$), кислотности (pH = 6.7–9.4), цветности (13–410° по Cr–Co шкале), катионно-анионного состава вод и химического состава донных отложений (табл. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые работы

В апреле 2014 г. на глубине 21 м со льда была отобрана колонка донных отложений оз. Тургояк. Неконсолидированные донные отложения отбирались пробоотборником гравитационного типа, остальную часть колонки извлекали поршневой трубкой с гидрозатвором (внутренний диаметр – 10 см). В зависимости от литологии колонки донных отложений интервал между образцами составлял от 1 до 5 см.

В июне 2014–2016 гг. были взяты пробы воды и поверхностных слоев отложений 56 озер. Придонные воды и донные отложения отбирались с помощью пробоотборника гравитационного типа с закрывающейся диафрагмой, а поверхностные воды – пластиковой бутылкой с глубины 0.5 м. На месте отбора проведено измерение ряда физико-химических параметров воды (pH, электропроводности (EC), температуры, содержания растворенного кислорода). Для измерений использованы откалиброванные портативные приборы: милливольтметр Yokogawa-82, оксиметр Hanna-9300, кондуктометр Hanna-Instrument.

Аналитические работы

Состав донных отложений и воды. Силикатный анализ выполнен из малых навесок 1.2 г по общепринятой методике [Унифицированные методы…, 1979]. Для оценки содержания органического вещества и карбонатов использовался метод определения потерь при прокаливании (LOI) [Dean, 1964; Heiri et al., 2001]. Анализ катионов и анионов выполнен в соответствии с традиционными методами гидрохимического анализа: сульфаты – гравиметрическим методом осаждения с $BaCl_2$; хлориды – титрованием с $AgNO_3$; гидрокарбонат-ион – титриметрией; Ca, Mg – атомно-абсорбционным методом в режиме ацетилен-воздух, K и Na – в эмисси-

Таблица 1. Содержание основных оксидов, серы сульфатов и потери при прокаливании (%) донных отложений оз. Тургояк и озер из базы данных, мас. %

Table 1. Content of main oxides, sulfates and losses on ignition of sediments of Lake Turgoyak and lakes from the database, wt %

Компонент	U1		U2		U3		U4		U5		U6		База данных озер
	Медиана	SD	Медиана	SD	Медиана	SD	Медиана	SD	Медиана	SD	Медиана	SD	
	n = 10		n = 5		n = 3		n = 6		n = 2		n = 2		n = 31–60
SiO_2	38.97	2.53	48.82	2.30	37.86	4.26	11.89	8.36	28.70	1.67	63.42	0.76	8.6–60
TiO_2	0.49	0.04	0.64	0.06	0.53	0.07	0.16	0.14	0.26	0.01	0.65	0.06	0.01–0.9
Al_2O_3	9.48	0.57	12.47	0.84	9.45	1.37	2.25	2.81	5.76	1.56	14.58	0.45	0.4–15.4
Fe_2O_3	5.69	1.23	6.70	0.43	4.76	0.55	2.10	1.17	3.14	0.17	4.87	0.76	1–11.2
MnO	0.09	0.02	0.13	0.03	0.16	0.02	0.14	0.02	0.12	0.01	0.08	0.01	0.07–1.7
MgO	1.85	0.24	2.64	0.24	2.32	0.05	2.38	0.48	1.15	0.18	1.81	0.08	0.6–5.2
CaO	1.56	0.26	1.72	2.91	8.35	5.04	38.12	8.77	11.41	8.56	1.89	0.30	0.8–34
Na_2O	0.84	0.28	0.93	0.15	0.86	0.09	0.34	0.18	1.02	0.74	2.65	0.02	0.09–3.04
K_2O	1.45	0.12	2.08	0.21	1.76	0.20	0.50	0.49	1.13	0.27	2.48	0.18	0.13–1.86
P_2O_5	0.27	0.06	0.22	0.02	0.25	0.08	0.21	0.03	0.20	0.03	0.16	0.04	<0–0.73
SO_3	0.37	0.22	0.62	0.11	1.06	0.39	2.31	1.03	2.40	1.66	0.44	0.11	0.06–2.26
$LOI_{950°C}$	0.09	0.09	0.35	1.88	4.57	2.47	27.23	9.06	6.92	6.78	0.11	0.02	0.76–24.5
$LOI_{550°C}$	31.54	3.05	11.37	4.32	17.02	5.02	9.78	3.48	33.18	11.03	2.76	0.28	6.7–82

Примечание. n – количество образцов, U1–U6 – литологические единицы колонки донных отложений, SD – стандартное отклонение.

Note. n – number of samples, U1–U6 – lithologic units of sediment core, SD – standard deviation.

онном режиме (атомно-абсорбционный спектрофотометр Perkin Elmer 3110, США). Определение содержания биогенного кремнезема в донных отложениях оз. Тургояк проведено методом инфракрасной Фурье спектроскопии. Препараты подготовлены путем прессования ≈1.8 мг навески вещества в таблетки с KBr. Спектры регистрировались на ИК Фурье спектрометре Nicolet 6700 Thermo Scientific (параметры съемки: диапазон 400–4000 см$^{-1}$, разрешение 4 см$^{-1}$, 32 скана). Оценка содержания биогенного кремнезема проведена по классической методике [Chester, Elderfield, 1968; Столповская и др., 2006]. Проба чистых диатомовых водорослей и стандартных смесей были любезно предоставлены Э.П. Солотчиной (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск). Погрешность определения составила ± 5%.

Диатомовый анализ. Приготовление препаратов для диатомового анализа осуществлялось нагреванием со смесью азотной и хлорной кислот с последующей декантацией, 3-кратным промыванием и центрифугированием. Препараты для светового микроскопа готовились с использованием среды Эльяшева (n = 1.67–1.68) [Диатомовые водоросли…, 1974]. Подсчет и определение видов диатомовых водорослей осуществлялся на световом микроскопе Микмед-6 вар. 7 при увеличении 1000 раз. За редким исключением (очень низкое содержание диатомей), подсчитывалось не менее 500 створок в препарате. Разделение видов на экологические группы по галобности и ацидофильности основано на классификациях Ф. Хустедта [Hustedt, 1939, 1957]. Индекс сапробности Пантле–Букка в модификации Сладечека использован для оценки изменений содержания органических веществ в воде в различные периоды развития озера [Pantle, Buck, 1955; Sladeček, 1967].

Хронология

Хронология колонки донных отложений оз. Тургояк определена на основе ускорительной масс-спектрометрии (AMS ^{14}C), выполненной для пяти образцов (лаборатория радиоуглеродного датирования университета г. Лунд, Швеция) (табл. 2). Расчет календарного возраста произведен с помощью калибровочной кривой IntCal13 [Reimer et al., 2013]. Исходя из данных анализа профиля активности ^{210}Pb короткой колонки донных отложений оз. Тургояк, отобранной в 2010 г., нижняя граница индустриального периода оценена приблизительно в 17 см [Удачин и др., 2014]. Вся хронологическая информация включена в модель возраст–глубина, построенную в программном комплексе Bacon (version 2.2) [Blaauw, Christen, 2011] (рис. 2).

Таблица 2. Данные AMS ^{14}C датирования донных отложений оз. Тургояк. Интервал калиброванного возраста приведен с 95.4%-й вероятностью

Table 2. AMS ^{14}C measurements from Lake Turgoyak. Calibrated ages are given with 95.4% probability

Глубина, см	Лабораторный номер	Датированный материал	AMS ^{14}C возраст, ^{14}C л.н.	Калиброванный возраст, к.л.н.
62	LuS 11128	Сапропель	2315 ± 35	2180–2423
128	LuS 11127	Фрагмент растения	5195 ± 45	5769–6152
212	LuS 12094	Сапропель	9505 ± 55	9588–11090
228	LuS 11125	Фрагмент растения	9945 ± 50	11228–11701
257	LuS 11124	То же	1013 ± 80	11404–12027

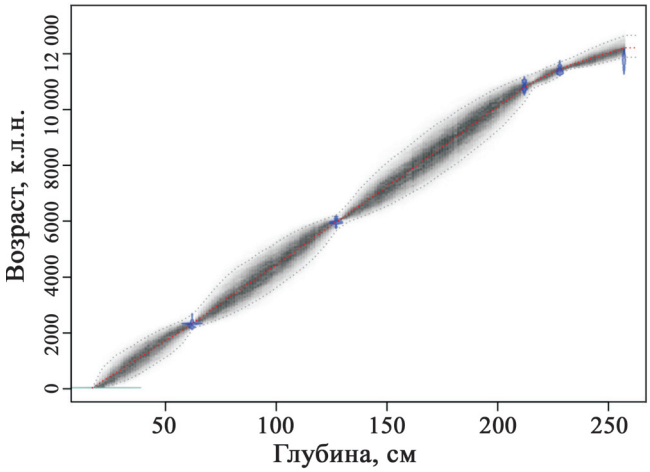

Рис. 2. Модель возраст–глубина колонки донных отложений оз. Тургояк, полученная с помощью программного комплекса Bacon (версия 2.0) [Blaauw, Christen, 2011].

Красная центральная кривая соответствует “наилучшей” модели, построенной на основе среднего взвешенного возраста. Затенение вокруг центральной кривой показывает все возможные модели возраст–глубина.

Fig. 2. Age–depth model of Lake Turgoyak sediment core produced by the Bacon software package [Blaauw, Christen, 2011].

Grey shading indicates all likely age–depth models; red central curve shows single “best” model based on the mean weighted age for each depth.

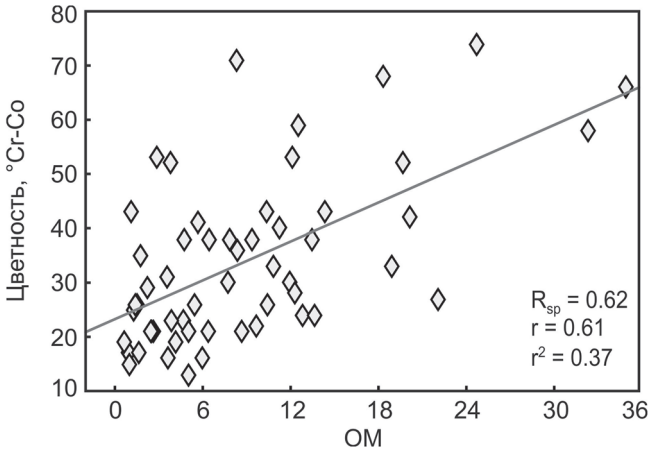

Рис. 3. Диаграмма рассеяния, показывающая корреляцию цветности озерных вод и показателя содержания органического вещества (OM).

Fig. 3. Scatter plot of water color against values of organic matter content index (OM).

Статистический анализ

Статистическая обработка данных по физико-химическим параметрам вод и химическому составу донных отложений озер состояла в выполнении параметрического и непараметрического корреляционного анализа в программе Statistica 10.0. Для этого использованы результаты силикатного анализа, определения потерь при прокаливании при 550 и 950°C и данные гидрохимического анализа. На основе расчета ранговых коэффициентов корреляции Спирмена (R_{sp}) определялась связь между переменными. Для индикаторных модулей рассчитаны также коэффициенты корреляции Пирсона (r) и коэффициенты детерминации (r^2). Визуализация данных проведена с помощью диаграмм рассеяния.

Оценка изменений химического состава донных отложений оз. Тургояк выполнена с помощью анализа главных компонент (PCA) [Ter Braak, Prentice, 1988] в программе CANOCO 4.5 [Ter Braak, Smilauer, 2002]. Геохимические данные были логарифмически трансформированы по формуле, приведенной в работе [Leps, Smilauer, 2003]. Полученные координаты для разновозрастных образцов (sample score) в PCA-ординационном пространстве отображались в стратиграфическом порядке в виде графиков в программе C2 [Juggins, 2016] (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск индикаторных модулей

В результате сравнения состава донных отложений и параметров вод 56 озер Южного и Среднего Урала определена корреляция цветности вод озер с перманганатной окисляемостью (R_{sp} = 0.54), содержанием NH_4^+ (R_{sp} = 0.67) и PO_4^+ (R_{sp} = 0.5) в воде. Кроме того, установлено, что цветность вод, перманганатная окисляемость и содержание NH_4^+ характеризуются отрицательной корреляцией (R_{sp} = –0.5...–0.6) с содержанием Al_2O_3, TiO_2, Na_2O, K_2O и имеют положительную связь с $LOI_{550°C}$ (R_{sp} = 0.4–0.61) озерных отложений. На основе полученных данных предложен показатель содержания органических веществ в воде: OM = $LOI_{550°C}$/(Al_2O_3 + TiO_2 + Na_2O + K_2O). В результате визуализации данных корреляционного анализа в виде диаграммы рассеяния обнаружены и исключены выбросы, уменьшающие (озера Исетское, Щитовское, Молтаево) и увеличивающие (вдхр. Аятское) корреляцию. Для данных озер характерна цветность, превышающая 180 градусов по Cr–Co шкале.

Показатель содержания органического вещества (OM) характеризуется значимой положительной связью с цветностью вод (R_{sp} = 0.62, r = 0.61, r^2 = 0.37) (см. рис. 3), перманганатной окисляемостью (R_{sp} = 0.47, r = 0.4, r^2 = 0.16), содержанием NH_4^+ в поверхностной (R_{sp} = 0.48, r = 0.41, r^2 = 0.17) и придонной (R_{sp} = 0.67, r = 0.63, r^2 = 0.39) воде.

В оз. Тургояк отмечаются горизонты с повышенным содержанием карбонатов и очень низким содержанием химических элементов литофильной ассоциации. Показатель содержания органического вещества для таких отложений часто завышается. Поэтому для карбонатных отложений было решено включить $LOI_{950°C}$ в формулу расчета показателя содержания органического вещества.

В базе данных, по которой рассчитывался OM, донные отложения были представлены в основном сапропелем с различной зольностью. Торфянистые осадки отмечены только у вдхр. Аятское, которое отнесли к “выбросам” в результате визуализации данных корреляционного анализа. Для отложений вдхр. Аятское была отмечена завышенная величина OM в сравнении с цветностью и другими показателями содержания органического вещества в воде.

Для минерализации озерных вод отмечается прямая связь с содержанием карбонатов в донных отложениях $LOI_{950°C}$ (R_{sp} = 0.56) и обратная с $LOI_{550°C}$ (R_{sp} = –0.55). Выбросами, уменьшающими корреляцию, являются данные по озерам с минерализацией больше 1000 мг $л^{-1}$ (озера Б. Сунгуль, Б. Куяш, Червяное, Карагуз, Атавды). Исходя из этих данных, получен модуль минерализации вод для озер с минерализацией меньше 1000 мг·$л^{-1}$: MM = $LOI_{950°C}$/$LOI_{550°C}$ (R_{sp} = 0.74, r = 0.68, r^2 = 0.46) (рис. 4). При интерпретации данных необходимо учитывать, что MM карбонатных отложений может быть завышен. Так, модуль минерализации вод оз. Карабалык, в котором накапливается карбонатный сапропель, по составу близкий к контрастно-слоистому сапропелю оз. Тургояк (U4), завышен в сравнении с другими озерами с такой же минерализацией.

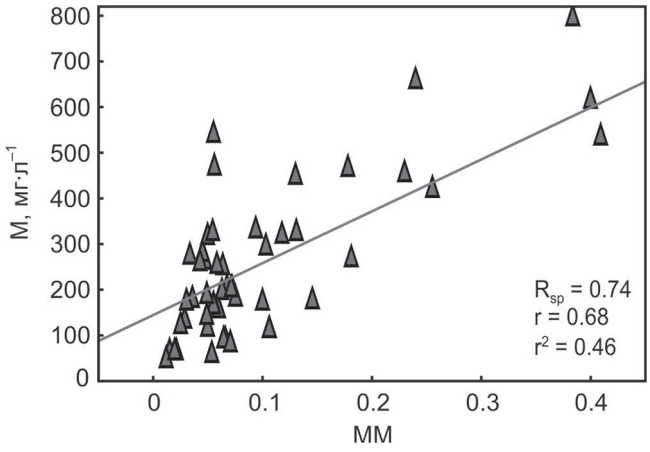

Рис. 4. Диаграмма рассеяния, показывающая корреляцию минерализации (M) озерных вод и показателя минерализации (MM).

Fig. 4. Scatter plot of lakes water salinity (M) against values of salinity index (MM).

Геохимия колонки донных отложений оз. Тургояк

Особенности литологии колонки донных отложений оз. Тургояк отражаются в изменениях концентрации трех групп химических элементов. Первая ассоциация связана с терригенным сносом и включает Al_2O_3, TiO_2, K_2O, Na_2O, SiO_2, Fe_2O_3 и S. Наибольший коэффициент ранговой корреляции Спирмена характерен для Al_2O_3, TiO_2 и K_2O (R_{sp} = 0.94). Fe_2O_3 ассоциирует с TiO_2 (R_{sp} = 0.8) и серой сульфидов (R_{sp} = 0.78), Na_2O с K_2O (R_{sp} = 0.78), а SiO_2 с Al_2O_3 (R_{sp} = 0.89). Вторая ассоциация связана с карбонатонакоплением и включает и себя CaO, MgO, MnO, $LOI_{950°C}$ и серу сульфатов. Карбонаты характеризуются наибольшей связью с серой сульфатов (R_{sp} = 0.85) и CaO (R_{sp} = 0.81), MgO с MnO (R_{sp} = 0.57), а MnO с $LOI_{950°C}$ (R_{sp} = 0.65). Для третьей ассоциации, включающей $LOI_{550°C}$ и P_2O_5 (R_{sp} = 0.65), характерна отрицательная связь со второй группой (рис. 5).

Нижняя часть колонки донных отложений, представленная глиной (U6) (табл. 3), характеризуется высоким содержанием химических элементов первой ассоциации, особенно Na_2O и K_2O (см. табл. 1). Показатель содержания органического вещества (OM) и содержание биогенного кремнезема характеризуются минимальными значениями (см. рис. 5).

Черный торфянистый сапропель (U5), так же как и контрастно-слоистый карбонатный сапропель с раковинами (U4), отличается возрастанием роли второй геохимической ассоциации. Увеличиваются концентрации MnO, CaO, $LOI_{950°C}$, серы сульфатов и снижаются содержания литофильных элементов. Кроме того, для торфянистого сапропеля характерно резкое возрастание содержания органики ($LOI_{550°C}$), биогенного кремнезема, повышение концентрации сульфидной серы.

Контрастно-слоистый сапропель (U4) отличается максимальным содержанием CaO, углерода карбонатов, серы сульфатов и резким повышением показателя минерализации вод (MM).

Неясно-слоистый сапропель (U3) отличается снижением величины MM, содержания CaO, карбонатов, серы сульфатов, возрастанием значения OM, содержания органического вещества, серы сульфидов, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, Fe_2O_3 Na_2O и K_2O.

Для серого сапропеля (U2) характерно еще большее, в сравнении с U4, снижение значений MM, содержания CaO, CO_2, серы сульфатов, возрастание роли сульфидной серы, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2 и Fe_2O_3.

Буровато-оливковый сапропель (U1) отличается повышением содержания органического вещества, биогенного кремнезема и максимальной величиной OM.

Диатомовый анализ колонки донных отложений оз. Тургояк

В результате диатомового анализа образцов сапропеля из различных горизонтов колонки донных отложений определено 83 вида и разновидности диатомовых водорослей (табл. 4). Они представлены в основном алкалифильными индифферентными бентосными диатомеями. Обнаружено большое количество северо-альпийских видов, что связано с холодноводностью оз. Тургояк. По отношению к содержанию органического вещества в воде по системе Ватанабе [Watanabe, 1990] виды представлены в основном сапроксенами и в меньшей степени эврисапробами. Индекс сапробности Пантле–Букка варьирует от 0.8 до 1.26, что соответствует олигосапробной зоне самоочищения [Оксиюк и др., 1993; Баринов и др., 2006].

В нижней части колонки донных отложений (U6) диатомовых водорослей не обнаружено. В торфянистом сапропеле (U5) доминирует *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round, обнаруженная также в большом количестве в донных отложениях начала голоцена озер Уфимское [Maslennikova, Udachin, 2017] и Иткуль [Масленникова и др., 2014]. Кроме того, в большом количестве встречаются бентосные диатомеи *Staurosira construens f. venter* (Ehrenberg) Bukhtiyarova, *Cocconeis placentula* Ehrenberg, *Amphora pediculus* (Kützing) Grunow ex A. Schmidt и *Amphora inariensis* Krammer. Величина индекса сапробности (S) составляет 0.8.

В контрастно-слоистом сапропеле (U4) доминирует *Gomphonema dichotomum* Kützing. Наибольшее обилие данного вида в комплексе с *Gomphonema angustum*, согласно нашим данным по озерам Южного Урала, отмечалось в озерах с минерализацией 400–500 мг/л. В данном горизонте существенно воз-

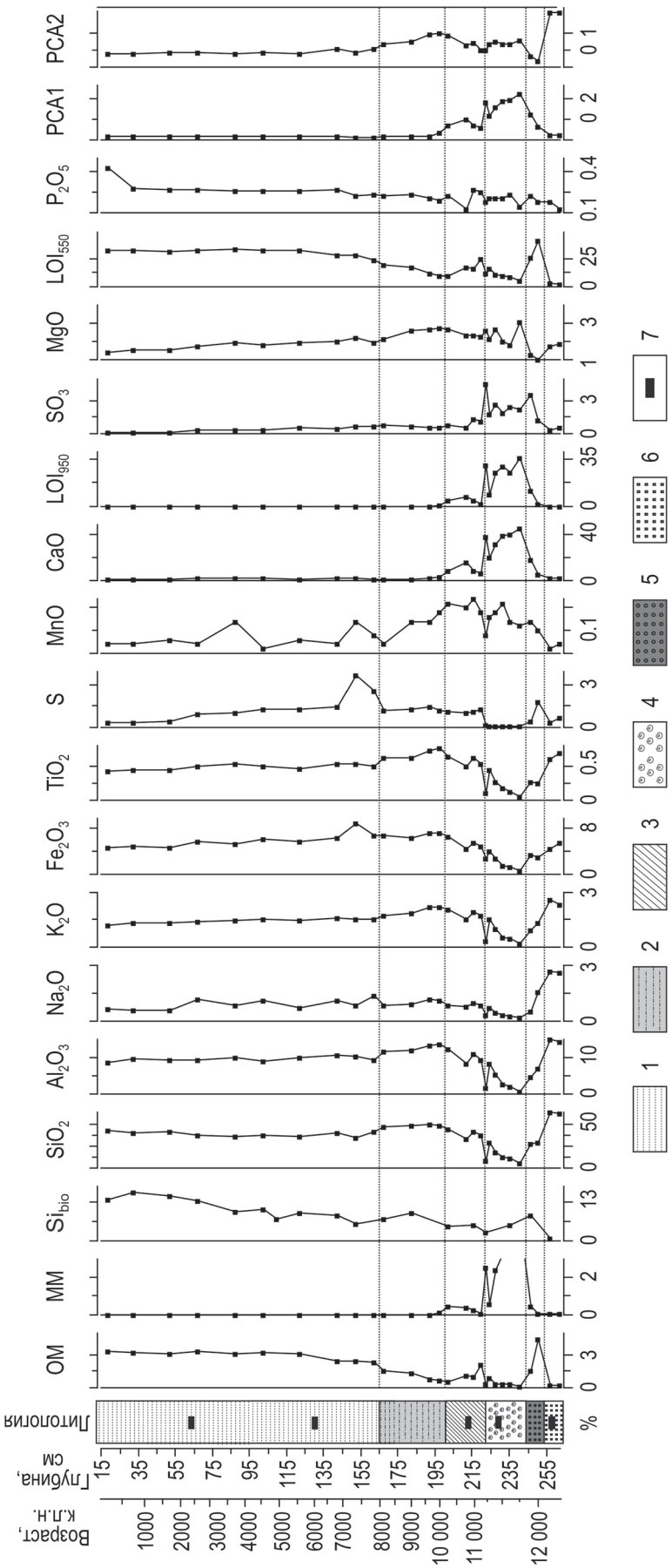

Рис. 5. Литология и геохимия донных отложений оз. Тургояк, совмещенные с графиками осей PCA1, 2, объясняющими соответственно 84 и 8.5%-ю дисперсии.

1–6 – литологические единицы U1–U6 (см. табл. 3); 7 – место отбора проб для AMS ^{14}C датирования.

Fig. 5. Lithology and geochemistry of the Lake Turgoyak sediment core and PCA axis 1, 2 sample scores.

1–6 – lithological units U1–U6 (see Table 3); 7 – radiocarbon dated (AMS ^{14}C, BP) sediment samples.

Таблица 3. Литология колонки донных отложений оз. Тургояк

Table 3. Lithology of the Lake Turgoyak sediments core

Название	Глубина, см	Возраст, к.л.н.	Описание
U1	0–165	0–8100	Буровато-оливковый, оливковый сапропель. В нижней части с заметным осветлением
U2	165–205	8100–10 300	Серый, оливково-серый пелит, переходящий к концу интервала в серый алеврит
U3	205–222	10 300–11 200	Неясно-слоистый сапропель с чередованием торфянистых и серых минерализованных слоев мощностью 2–4 мм
U4	222–244	11 200–11 800	Контрастно слоистый сапропель с чередованием серовато-бурого, темно-серого, светло-серого. На всем интервале с раковинами
U5	244–254	11 800–12 100	Черный торфянистый сапропель с раковинами и макроостатками растений
U6	254–265	12 100–12 400	Глина с остатками макрофитов

Таблица 4. Относительное содержание основных видов диатомовых водорослей в донных отложениях оз. Тургояк

Table 4. Diatoms of the Lake Turgoyak sediments core

Литологическая единица	U5	U4		U3	U2	U1			
Глубина, см	246	235	222	216	167	152	122	55	19
Возраст, к.л.н.	11942	11667	11247	10996	8232	7374	5725	1950	60
Ellerbeckia arenaria (G. Moore ex Ralfs) R.M. Crawford	–	–	1.63	15.81	26.51	17.42	4.06	5.50	19.31
Puncticulata radiosa (Grunow) Håkansson	0.18	0.20	1.02	–	0.18	0.32	–	3.59	3.46
Pseudostaurosira brevistriata (Grunow) D.M. Williams & Round	62.15	19.08	8.94	46.98	37.54	7.10	19.27	20.30	30.28
Staurosira construens Ehrenberg	–	–	–	4.65	1.78	2.26	1.01	–	0.61
Staurosira construens f. venter (Ehrenberg) Bukhtiyarova	7.22	0.60	1.42	1.50	4.45	5.16	25.35	25.79	11.18
Staurosirella lapponica (Grunow) D.M. Williams & Round	–	0.40	–	3.26	1.42	10	33.87	25.16	10.57
Staurosirella pinnata (Ehrenberg) D.M. Williams & Round	1.58	–	–	1.50	1.42	1.29	0.41	0.42	8.74
Cocconeis neodiminuta Krammer	–	–	–	1.86	0.71	–	1.83	1.27	2.85
Cocconeis neothumensis Krammer	–	–	–	–	–	26.77	0.20	0.21	–
Cocconeis placentula Ehrenberg	3.52	1.20	9.76	–	–	–	–	–	–
Karayevia clevei (Grunow) Round & Bukhtiyarova	–	0.40	0.61	4.65	21.89	13.87	–	–	0.41
Amphora pediculus (Kützing) Grunow ex A. Schmidt	5.28	3.82	4.27	9.30	1.78	4.84	5.07	2.75	3.25
Amphora inariensis Krammer	2.46	1.00	0.41	–	–	1.94	3.45	0.85	–
Cymbella affinis Kützing	0.53	3.01	–	–	–	–	–	–	–
Cymbella cymbiformis C. Agardh	–	–	2.03	–	–	–	–	–	–
Gomphonema dichotomum Kützing	0.53	30.72	53.86	0.93	–	0.65	–	–	–
Rhoicosphenia abbreviata (C. Agardh) Lange-Bertalot	–	2.61	–	–	–	–	–	–	–
Gyrosigma attenuatum (Kützing) Rabenhorst	–	–	–	1.86	1.96	2.90	2.03	0.42	1.42
Mastogloia smithii Thwaites ex W. Smith	1.94	6.83	3.66	0.47	–	0.32	–	–	–
Mastogloia elliptica (C. Agardh) Cleve	0.70	7.63	2.64	–	–	–	–	–	–
Navicula oblonga Kützing	1.94	1.41	5.08	–	–	–	–	–	–
Denticula kuetzingii Grunow	1.58	3.61	0.20	–	–	–	–	–	–
Epithemia argus (Ehrenberg) Kützing	0.88	8.03	1.63	–	–	–	–	–	–

растает роль диатомей-мезогалобов (рис. 6), представленных *Mastogloia smithii* Thwaites ex W. Smith и *Mastogloia elliptica* (C. Agardh) Cleve. Индекс сапробности немного возрастает (0.98–1.08) (рис. 7).

В неясно-слоистом (U3) и сером сапропеле (U2) преобладает *Pseudostaurosira brevistriata,* а также *Ellerbeckia arenaria* (G. Moore ex Ralfs) R.M. Crawford, часто обитающая на камнях, скалах и в горных потоках. Резко уменьшается роль диатомей-мезогалобов. Для U2 отмечено возрастание индекса сапробности до 1.24.

Диатомовые сообщества буровато-оливкового сапропеля (U1) характеризуются доминированием *Pseudostaurosira brevistriata, Staurosira construens*

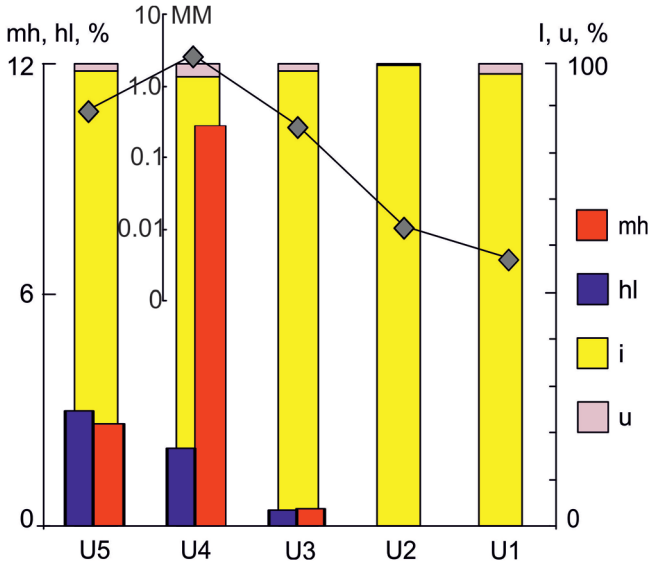

Рис. 6. Соответствие изменений значений модуля минерализации (ММ) относительным содержаниям различных групп диатомовых водорослей: mh – мезогалобы, hl – галофилы, i – индифференты, u – виды с неизвестной экологией.

U1–U5 – литологические единицы колонки донных отложений оз. Тургояк (см. табл. 3). На линейном графике показано изменение величины модуля минерализации (ММ) (логарифмическая шкала).

Fig. 6. The changes of salinity index values (MM) and proportions of various groups of diatoms: mh – mesohalobic diatoms, hl – halophills, i – indifferents, u – species with unknown ecology.

U1–U5 – lithological units (see Table 3). The linear graph shows changes in the magnitude of the salintiy index (MM) (logarithmic scale).

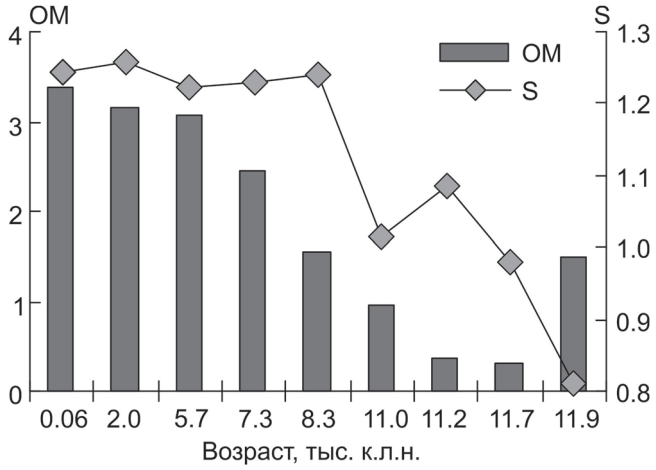

Рис. 7. Соответствие изменений значения модуля содержания органического вещества в воде (ОМ) индексу сапробности Пантле–Букка в модификации Сладечека (S).

Fig. 7. The matches of values of index of the content of organic matter in water (OM) and the Pantle–Buck's Saprobity index in the Sladeček modification (S).

f. *venter* и *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams & Round. Индекс сапробности составляет 1.22–1.26.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Индикаторы физико-химических параметров озер Южного и Среднего Урала

Сравнение индекса сапробности Пантле–Букка, рассчитанного на основе данных диатомового анализа донных отложений оз. Тургояк, и предложенного нами показателя содержания органического вещества в воде (ОМ), полученного по результатам статистического анализа базы данных 56 озер Южного и Среднего Урала, показало их удовлетворительное соответствие. Нарушение соответствия может быть связано как с недостатками метода расчета индекса сапробности [Шитиков и др., 2003], так и с относительно слабой изменчивостью содержания органического вещества в оз. Тургояк. Так, в течение всей истории развития озера вода в нем относилась к олигосапробной зоне. Кроме того, отмечено, что величина показателя содержания органического вещества в воде для торфянистого сапропеля оз. Тургояк завышена (11.9 тыс. к.л.н.) (см. рис. 7).

Сопоставление изменений значений показателя минерализации вод (ММ) оз. Тургояк с процентным соотношением различных групп галобности диатомовых водорослей, позволило сделать вывод о соответствии содержания мезогалобов и величины ММ. Содержание галофилов, которые действительно тяготеют к озерам с повышенной электропроводностью и минерализацией (*Cyclotella meneghiniana* Kützing, *Ctenophora pulchella* (Ralfs ex Kützing) D.M. Williams et Round, *Anomoeoneis sphaerophora* Pfitzer), изменялось в соответствии с ММ. *Staurosira pinnata* также относится к галофилам, однако на ее содержание оказывают большее влияние другие факторы [Schmidt et al., 2004], поэтому ее присутствие в группе галофилов нарушало соответствие с ММ.

Основные этапы развития озера Тургояк

Применение PCA-анализа позволило определить суммарные изменения химического состава донных отложений оз. Тургояк и выявить их соответствие литологическим единицам колонки (см. рис. 5). Определено четыре этапа развития озера:

Начало озерного осадконакопления (>12.1 тыс. к.л.н.).

В это время в озере накапливается глина с высоким содержанием литофильных элементов (Al, Na, K, Si) и низкой концентрацией органического вещества и биогенного кремнезема.

Мелководное озеро с повышенной минерализацией (12.1–11.2 тыс. к.л.н.).

Около 12 тыс. к.л.н. начинается накопление торфянистого сапропеля, появляются диатомовые водоросли и возрастает концентрация биогенного кремнезема. Данный возраст границы между сапропелем и глиной отмечен также для оз. Уфимское [Maslennikova, Udachin, 2017].

В интервале 11.8–11.2 тыс. к.л.н. накапливается слоистый сапропель с высоким содержанием кальцита, характеризующийся наибольшим показателем минерализации воды и максимальным количеством диатомей-мезогалобов (см. рис. 6). Граница 11.8 тыс. к.л.н. отмечена на диатомовой диаграмме оз. Уфимское, причем изменения диатомовых комплексов свидетельствуют о потеплении климата [Maslennikova, Udachin, 2017].

Возрастание глубины и снижение минерализации (11.2–8.0 тыс. к.л.н.).

Граница 11.2 тыс. к.л.н. отражена в палинологических летописях многих озер Южного и Среднего Урала [Масленникова и др., 2014]. Синхронные изменения растительности достаточно обширной территории свидетельствуют о резком изменении климата, в результате которого в оз. Тургояк начинает накапливаться неясно-слоистый сапропель. Чередование слоев связано с нестабильностью палеоклимата, а возрастание содержания литофильных элементов, уменьшение показателя минерализации и содержания диатомей-мезогалобов свидетельствуют о повышении уровня водоема. С этим же процессом связано и возрастание содержания органического вещества в воде, определяемое по увеличению значений индекса сапробности и ОМ.

Граница 10.3–10.4 тыс. к.л.н., фиксирующая в оз. Тургояк начало накопления серого сапропеля с повышенным содержанием литофильных элементов, была отмечена ранее для колонки донных отложений озер Сырыткуль и Таватуй и связывалась с аридизацией климата [Масленникова и др. 2016; Maslennikova et al., 2016]. Кроме того, исследование торфяников Среднего Урала выявило существование сухих и теплых условий около 10.2–9.5 и 9.4–8.9 тыс. к.л.н. [Антипина и др., 1924; Зарецкая и др., 2014; Panova, Antipina, 2015]. Однако, согласно данным по оз. Тургояк, в это время, скорее, происходит похолодание климата, поскольку показатель содержания органического вещества в воде и индекс сапробности характеризуются минимальными значениями (см. рис. 7), снижается величина показателя минерализации воды и исчезают диатомеи-мезогалобы (см. рис. 6). Около 9.2–9.0 тыс. к.л.н. возрастает содержание органического вещества в осадке и ОМ. Эти изменения, судя по всему, отражают начало потепления, зафиксированного не только по донным отложениям озер Южного Урала [Maslennikova, Udachin, 2017], но и в различных палеолетописях Северного полушария [Marcott et al., 2013].

Возрастание содержания органического вещества в воде (<8.0 тыс. к.л.н.).

В это время накапливается буро-оливковый сапропель, характеризующийся повышением содержания органического вещества и биогенного кремнезема, максимальным значением ОМ и индекса сапробности. Эти изменения являются ответом на продолжающееся потепление климата, наиболее четко отмеченное по спорово-пыльцевым спектрам колонки донных отложений оз. Таватуй [Масленникова и др., 2016].

ВЫВОДЫ

1. На основе палеолимнологических исследований оз. Тургояк, проведенных для реконструкции отклика физико-химических параметров его водной массы на изменения климата голоцена, определено уменьшение минерализации озера в результате гумидизации климата около 11.2–11.0 тыс. к.л.н. и увеличение содержания органического вещества в воде в периоды потепления и увлажнения климата. На основе оценки суммарных изменений химического состава донных отложений оз. Тургояк определено их соответствие литологическим единицам колонки и выделено четыре этапа развития озера, начало которых связано с климатическими изменениями 11.8, 11.2–11.0, 8.2–8.0 тыс. к.л.н.

2. Сравнение полученных значений по оз. Тургояк и созданной для 56 озер Среднего и Южного Урала базы данных позволили тестировать предложенные на ее основе специфические геохимические палеоиндикаторы для озер с цветностью вод <80° по Cr–Co шкале и минерализацией <1000 мг·л$^{-1}$: показатель содержания органического вещества в воде ($ОМ = LOI_{550°C}/(Al_2O_3 + TiO_2 + Na_2O + K_2O)$) и модуль минерализации озерной воды ($ММ = LOI_{950°C}/LOI_{550°C}$) с удовлетворительным результатом.

Авторы выражают благодарность М.Н. Маляренок, Г.Ф. Лонщаковой, Л.Г. Удачиной, Н.И. Вализер, Ю.Ф. Мельновой, Т.В. Семеновой, К.А. Филипповой, М.С. Свиренко за помощь в анализе донных отложений и вод исследованных озер.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00103 мол_а. Построение возрастной модели и силикатный анализ колонки донных отложений оз. Тургояк выполнены при финансовой поддержке комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 18-5-5-43).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреева М.А. (1973) Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 272 с.

Антипина Т.Г., Панова Н.К., Чаиркина Н.М. (2013) Динамика природной среды в голоцене по данным комплексного анализа VI разреза Горбуновского торфяника. *Известия Коми НЦ УрО РАН*, **4**(16), 89-97.

Балабанова З.М. (1964) Горное озеро Тургояк. *Труды Уральского отделения ГосНИОРХ*, **6**, 61-83.

Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. (2006) Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 498 с.

Баянов Н.Г. (2012) Трофический статус и экологическое состояние некоторых озер Челябинской области. *Проблемы географии Урала и сопредельных территорий*. Челябинск: Край Ра, 60-67.

Геологическая карта Урала. 1 : 200 000. (1967) Лист N41VIIG (Ред. И.Д. Соболев). ГУГК.

Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные. (1974) (Ред. А.И. Прошкина-Лавренко). Л.: Наука, Т. 1, 373 с.

Зарецкая Н.Е., Панова Н.К., Жилин М.Г., Антипина Т.Г., Успенская О.Н., Савченко С.Н. (2014) Геохронология, стратиграфия и история развития торфяных болот Среднего Урала в голоцене (на примере Шигирского и Горбуновского торфяников). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **22**(6), 84-108.

Масленникова А.В., Дерягин В.В., Удачин В.Н. (2012) Реконструкция условий голоценовой озерной седиментации на восточном склоне Южного Урала. *Литосфера*, (2), 21-32.

Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. (2014) Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 136 с.

Масленникова А.В., Удачин В.Н., Пирогов Д.В., Хворов П.В. (2016) Реконструкция обстановок озерного седиментогенеза в позднеледниковье и голоцене Среднего Урала. *Литосфера*, (6), 166-176.

Маслов А.В. (2005) Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 289 с.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И. (1993) Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. *Гидробиол. журнал*, **29**(4), 62-77.

Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н. Горлова Л.И., Забелкина Л.Г., Григорова Т.Б., Никольский В.Ю., Шалагинова В.И., Петрова А.С., Середа В.В. (2003) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Лист N-41-VII (объяснительная записка). Челябинск: МПР России по Челябинской области. 167 с.

Рогозин А.Г., Такачев В.А. (1998) О некоторых гидрологических особенностях озера Тургояк. *Изв. Челябинского научного центра*, **1**, 70-75.

Рогозин А.Г. (1998) Сравнительная сапробиологическая характеристика озер Тургояк и Большое Миассово. *Изв. Челябинского научного центра*, **1**, 75-81.

Столповская В.Н., Солотчина Э.П., Жданова А.Н. (2006). Количественный анализ неглинистных минералов донных осадков озер Байкал и Хубсугул методом ИК-спектроскопии (в связи с палеоклиматическими реконструкциями). *Геология и геофизика*, **47**(6), 778-788.

Ткачев Б.А., Рогозин А.Г., Гавриликина С.В., Миронов Б.А., Гордиенко Н.С., Митюхляев Д.В., Кривопалова Т.Ф., Танаева Г.В. (1997) Состояние экосистем оз. Тургояк. *Проблемы экологии и экологического образования в Челябинской области*. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 64-65.

Удачин В.Н., Аминов П.Г., Филиппова К.А. (2014) Геохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 252 с.

Унифицированные методы анализа силикатных горных пород с применением комплексонометрии. Инструкция № 163-Х. (1979) М.: Мин-во геол. СССР, 43 с.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. (2003) Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 463 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 480 с.

Blaauw M., Christen A.J. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, **6**(3), 457-474.

Chester R., Elderfield H. (1968) The infrared determination of opal in siliceous deep-sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (32), 1128-1140.

Dean W.E.Jr. (1974) Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *J. Sed. Petrol.*, **44**, 242-248.

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.*, **25**, 101-110.

Hustedt F. (1939) Systematisch und okologische Untersuchungen uber die Diatomeenflora von Java, Bali und Sumatra. *Archive für Hydrobiologie*, **16**, 274-394.

Hustedt F. (1957) Die Diatomeenflora des Flußsystems der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen. *Abhandlungen Naturwissenschaftlichen Verein zu Bremen*, **34**, 181-440.

Juggins S. (2016) C2 Version 1.7. Unpublished program available at: https://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/software/C2Home.htm

Leps J., Smilauer P. (2003) Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University press, 267 p.

Liu H., Xu B., Cui H. (2002) Holocene history of desertification along the woodland-steppe border in northern China. *Quat. Res.*, **57**(2), 259-270.

Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. (2013) A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, **339**, 1198-1201.

Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. (2016) Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, diatom, geochemical records from the Lake Syrytkul sediments. *Quat. Int.*, **420**(28), 65-75.

Maslennikova A.V., Udachin V.N. (2017) Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies. *The Holocene*, **27**(6), 847-859.

Panova N.K., Antipina T.G. (2015) Late Glacial and Holocene environmental history on the eastern slope of the Middle Ural mountains, Russia. *Quat. Int.*, **420**(28), 76-89.

Pantle F., Buck H. (1955) Die biologische Überwachung der Gewasser und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas und Wasserfach*, **18**, 1-604.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Back J.W. (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55**(4), 1869-1887.

Schmidt R., Kamenik C., Lange-Bertalot H., Klee R. (2004) Fragilaria and Staurosira (Bacillariophyceae) from sediment surfaces of 40 lakes in the Austrian Alps in relation to environmental variables, and their potential for palaeoclimatology. *J. Limnol.*, **63**(2), 171-189.

Sladeček V. (1967) System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie*, **7**, 1-218.

Sun Q., Wang S., Zhou J., Chen Z., Shen J., Xiuping X., Wu F., Chen P. (2010) Sediment geochemistry of Lake Daihai, north-central China: implications for catchment weathering and climate change during the Holocene. *J. Paleolimnol.*, **43**, 75-87.

Ter Braak C.J.F., Prentice I.C. (1988) A theory of gradient analysis. *Adv. Ecol. Res.*, **18**, 271-317.

Ter Braak C.J.F., Smilauer P. (2002) CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Ithaca: Microcomputer Power, 500 p.

Watanabe T. (1990) Attached diatoms in Lake Mashuu and its value of the diatom assemblage index of organic water pollution (DAIpo). *Diatom.*, **5**, 21-31.

REFERENCES

Andreeva M.A. (1973) *Ozera Srednego i Juzhnogo Urala* [Lakes of the Middle and Southern Urals]. Chelyabinsk, Southern Urals books press Publ., 272 p. (In Russian)

Antipina T.G., Panova N.K., Chairkina N.M. (2013) The dynamics of the environment in the Holocene according to the multi-proxy analysis of the VI section of Gorbunovo Peat Bog. *Izvestiya Komi NTs UrO RAN*, **4**(16), 89-97. (In Russian)

Balabanova Z.M. (1964) Mountain Lake Turgoyak. *Trudy Ural'skogo otdeleniya GosNIORKh*, **6**, 61-83. (In Russian)

Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anissimova O.V. (2006) *Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy* [Diversity of Algal Indicators in Environmental Assessment]. Tel'Aviv, Pilies Studio Press, 418 p. (In Russian)

Bayanov N.G. (2012) Trophic and ecological status of several lakes in the Chelyabinsk region. *Problemy geografii Urala i sopredel'nykh territorii* [Problems of the geography of the Urals and adjacent territories]. Chelyabinsk, Krai Ra Publ., 60-67. (In Russian)

Blaauw M., Christen A.J. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, **6**(3), 457-474.

Chester R., Elderfield H. (1968) The infrared determination ofopal in siliceous deep-sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (32), 1128-1140.

Dean W E.Jr. (1974) Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *J. Sed. Petrol.*, **44**, 242-248.

Diatomovye vodorosli SSSR. Iskopaemye i sovremennye. (1974) (Red. A.I. Proshkina-Lavrenko) [Diatoms of the USSR. Fossil and modern (Ed. A.I. Proshkina-Lavrenko)]. St-Petersburg, Nauka Publ., V. 1, 373 p. (In Russian)

Geologicheskaya karta Urala. (1967) 1 : 200 000. List N-41-VIIG (Red. I.D. Sobolev) [Geological map of the Urals. 1 : 200 000. List N-41-VIIG (Ed. I.D. Sobolev)]. GUGK. (In Russian)

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.*, (25), 101-110.

Hustedt F. (1939) Systematisch und okologische Untersuchungen uber die Diatomeenflora von Java, Bali und Sumatra [Systematic and ecological studies on the diatom flora of Java, Bali and Sumatra]. *Archive für Hydrobiologie*, **16**, 274-394. (In German)

Hustedt F. (1957) Die Diatomeenflora des Flußsystems der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen [The diatom flora of the river system of the Weser in the territory of the Bremen City]. *Abhandlungen Naturwissenschaftlichen Verein zu Bremen*, **34**, 181-440. (in German)

Juggins S. (2016) C2 Version 1.7. Unpublished program available at: https://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/software/C2Home.htm

Leps J., Smilauer P. (2003) Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University press, 267 p.

Liu H., Xu B., Cui H. (2002) Holocene history of desertification along the woodland-steppe border in northern China. *Quat. Res.*, **57**(2), 259-270.

Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. (2013) A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, **339**, 1198-1201.

Maslennikova A.V., Deryagin V.V., Udachin V.N. (2012) Reconstruction of Holocene lake sedimentation conditions of Southern Urals east slope. *Litosfera*, (2), 21-32. (In Russian)

Maslennikova A.V., Udachin V.N. (2017) Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies. *The Holocene*, **27**(6), 847-859.

Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. (2016) Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, diatom, geochemical records from the Lake Syrytkul sediments. *Quat. Int.*, **420**(28), 65-75.

Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. (2014) *Paleoekologiya i geokhimiya ozernoi sedimentatsii golotsena Urala* [Palaeoecology and geochemistry of lakes sedimentation of Holocene in Urals]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 136 p. (In Russian)

Maslennikova A.V., Udachin V.N., Pirogov D.V., Khvorov P.V. (2016) Paleolimnological reconstruction of Late Glacial and Holocene environments of Middle Urals. *Litosfera*, (6), 166-176. (In Russian)

Maslov A.V. (2005) *Osadochnye porody: metody izucheniya i interpretatsii poluchennykh dannykh* [Sedimentary rocks: methods for studying and interpreting the data]. Ekaterinburg, USMU Press Publ., 289 p. (In Russian)

Oksiyuk O.P., Zhukinskii V.N., Braginskii L.P. Linnik P.N., Kuz'menko M.I. (1993) Complex ecological classification of surface water quality. *Gidrobiologicheskii Zhurnal*, **29**(4), 62-77. (In Russian)

Panova N.K., Antipina T.G. (2015) Late Glacial and Holocene environmental history on the eastern slope of the Middle Ural mountains, Russia. *Quat. Int.*, **420**(28), 76-89.

Pantle F., Buck H. (1955) Die biologische Überwachung der Gewasser und die Darstellung der Ergebnisse [The biological monitoring of the waters and the presentation of the results]. *Gas und Wasserfach*., **18**, 1-604. (In German)

Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N., Gorlova L.I., Zabelkina L.G., Grigorova T.B., Nikol'skii V. YU., Shalaginova V.I., Petrova A.S., Sereda V.V. (2003) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 200 000. List N-41-VII (ob"yasnitel'naya zapiska)* [State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 200 000. List N-41-VII]. Chelyabinsk, MPR Rossii po Chelyabinskoi oblasti Publ., 167 p. (In Russian)

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A. Back J.W. (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon,* **55**(4), 1869-1887.

Rogozin A.G. (1998) Comparative saprobiological characteristics of the lakes Turgoyak and Bolshoe Miassovo. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, (1), 75-81. (In Russian)

Rogozin A.G., Tkachev B.A. (1998) About some hydrological features of Lake Turgoyak. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, (1), 70-75. (In Russian)

Schmidt R., Kamenik C., Lange-Bertalot H. Klee R. et al. (2004) Fragilaria and Staurosira (Bacillariophyceae) from sediment surfaces of 40 lakes in the Austrian Alps in relation to environmental variables, and their potential for palaeoclimatology. *J. Limnol.*, **63**(2), 171-189.

Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. (2003) *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii* [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Tol'yatti, IEVB RAS Publ., 463 p. (In Russian)

Sladecek V. (1967) System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie*, **7**, 1-218.

Stolpovskaya V.N., Solotchina E.P., Zhdanova A.N. (2006) Quantitative IR spectroscopic analysis of non-clay minerals from bottom sediments of lakes Baikal and Hovsgol (in relation to paleoclimatic reconstructions. *Geol. Geofis.*, **47**(6), 778-788. (In Russian)

Sun Q., Wang S., Zhou J., Chen Z., Shen J., Xiuping X., Wu F., Chen P. (2010) Sediment geochemistry of Lake Daihai, north-central China: implications for catchment weathering and climate change during the Holocene. *J. Paleolimnol.*, (43), 75-87.

Ter Braak C.J.F., Prentice I.C. (1988) A theory of gradient analysis. *Adv. Ecol. Res*., **18**, 271-317.

Ter Braak C.J.F., Smilauer P. (2002) CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Ithaca, Microcomputer Power, 500 p.

Tkachev B.A., Rogozin A.G., Gavrilikina S.V., Mironov B.A., Gordienko N.S., Mityukhlyaev D.V., Krivopalova T.F., Tanaeva G.V. (1997) State of the ecosystems of the Lake Turgoyak. *Problemy ekologii i ekologicheskogo obrazovaniya v Chelyabinskoi oblasti.* Miass, IGZ UrO RAN Publ., 64-65. (In Russian)

Udachin V.N., Aminov P.G., Filippova K.A. (2014) *Geokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala* [Geochemistry of mining technogenesis in the Southern Urals]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 252 p. (In Russian)

Unifitsirovannye metody analiza silikatnykh gornykh porod s primeneniem kompleksonometrii. Instruktsiya № 163-X [Uniform methods of analysis of silicate rocks using plex mesurement. Instruction number 163-X]. Min. Geol. SSSR Publ., 43 p. (In Russian)

Watanabe T. (1990) Attached diatoms in Lake Mashuu and its value of the diatom assemblage index of organic water pollution (DAIpo). *Diatom.*, **5**, 21-31.

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St.Petersburg, Nauka Publ., 480 p. (In Russian)

Zaretskaya N.E., Panova N.K., Zhilin M.G., Antipina T.G., Uspenskaya O.N., Savchenko S.N. (2014) Geochronology, Stratigraphy, and Evolution of Middle Uralian Peatlands during the Holocene (Exemplified by the Shigir and Gorbunovo Peat Bogs). *Stratigr. Geol. Korrel.*, **22**(6), 632-654. (In Russian)