

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ ОЗЕРА ИТКУЛЬ В ГОЛОЦЕНЕ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

А.В. Масленникова, В.В. Дерягин

ГУ «Институт Минералогии Уральского отделения Российской академии наук», г. Миасс;
ГОУ ВПО «Челябинский педагогический университет», г. Челябинск

Ключевые слова и фразы: геохимический анализ; донные отложения; диатомеи; история озера; палеоклимат; спорово-пыльцевой анализ.

Аннотация: Приведены результаты спорово-пыльцевого, диатомового, геохимического анализов колонки донных отложений озера Иткуль (Средний Урал). На основе спорово-пыльцевого анализа и абсолютных датировок AMS ^{14}C определён возраст озера (поздний дриас), проведено разделение колонки на периоды. На основе микроэлементного анализа (ICP-MS) выявлено соответствие изменений палеоклиматов и отношений La/Yb и Sr/Rb(Cs). Отмечено значительное повышение концентрации Cd, Pb, Cu, Ni, Co, Zn, Bi, Sb, в верхних 30 см колонки, что обусловлено аэральным переносом техногенных халькофильных элементов от ЗАО «Уфалейникель». С помощью диатомового анализа сделаны выводы о колебании трофности, минерализации, уровня стояния озера. Отмечена корреляция содержания диатомовых створок и концентрации общего кремнезёма, определённого силикатным анализом.

Комплексное изучение донных отложений с использованием спорово-пыльцевого, диатомового, химического анализов и надёжных радиоуглеродных датировок позволяет с достаточно высокой надёжностью восстановить историю накопления донных отложений и выполнить реконструкции палеоклиматических условий водосборной территории.

Большое количество предприятий горно-промышленного профиля, сосредоточенных на Южном Урале, делает регион перспективным для изучения истории озёр (включая техногенный этап развития), прогнозирования их дальнейшего развития в условиях горнопромышленного техногенеза.

Результаты исследования озёр Урала освещены в трудах А.П. Жузе (1939 г.), А.И. Прошкиной-Лавренко (1945 г.), Г.А. Благовещенско-го (1940 г.), В.Н. Сукачёва и Г.И. Поплавской (1946 г.). В дальнейшем Институтом озероведения АН СССР были выполнены диатомовый, пыльцевой, химический анализ донных отложений, а также исследованы ландшафты водосборов озёр Южного Урала (Ландшафтный фактор, 1978 г., Хомутова и др., 1995 г.).

Нами был проведён комплексный анализ оз. Иткуль. Предыдущими лимнологическими исследованиями данное озеро не было затронуто. Озеро представляет интерес не только как источник информации об истории развития водосборной территории на протяжении голоцена. Близость расположения оз. Иткуль и ЗАО «Уфалейникель» (г. Верхний Уфалей), где сосредоточена металлургическая плавка никелевых руд, даёт возможность анализировать изменения химического состава донных отложений, вызванные техногенным воздействием. Колонки озёр Урала, изученные предыдущими исследователями (А.П. Жузе, 1939 г., В.Н. Сукачёв, 1946 г., В.И. Хомутова и др., 1995 г., Н.Н. Давыдова, 1978 г.), вследствие необходимости получения материала торфяных прослоев, пригодных для радиоуглеродного датирования, были взяты в сублиторали озера. Колонка донных отложений оз. Иткуль была отобрана на большей глубине, в профундали озера. Для датировки использовался высокоточный метод ускорительной масс-спектрометрии AMS ^{14}C .

Материалы и методы

Оз. Иткуль расположено на восточном макросклоне Уральского хребта на севере Челябинской области, в 20 км к северо-востоку от г. Верхний Уфалей. Площадь акватории озера 30,1 км², максимальная глубина 16,6 м. Вода в озере пресная, с минерализацией около 167 мг/л. Водосбор оз. Иткуль относится к горнолесной зоне, подзоне сосново-лиственных пород (Челябинская область, 1995 г.).

Нами выполнены спорово-пыльцевой, диатомовый и химический анализы донных осадков. Колонка отложений длиной 470 см была отобрана со льда в первых числах апреля 2008 г. Неконсолидированные донные отложения верхней части колонки мощностью 30 см отобраны пробоотборником гравитационного типа с закрывающейся диафрагмой. Остальную часть колонки отбирали поршневой трубкой с гидрозатвором.

Верхнюю 30-сантиметровую часть колонки опробовали с шагом 1–2 см для геохимических исследований. Методом спорово-пыльцевого анализа было изучено 87 образцов (интервал отбора – 5 см). Приготовление проб осуществлялось методом обработки малой навески материала с использованием фтористоводородной кислоты (И.В. Хазина, 2006 г.). Процентное содержание пыльцы и спор подсчитано по отношению к общей сумме пыльцы и спор, принимаемой за 100 %.

Для диатомового анализа было отобрано 40 образцов с шагом 5–20 см в зависимости от интенсивности изменения диатомовых комплексов. Приготовление препаратов осуществлялось обработкой смесью азотной и хлорной кислот, с последующим силилированием (Г.В. Калмычков, В.Н. Кострова, 2005 г.). Всего подсчитывалось не менее 500 створок в препарате. При расчёте концентрации диатомей использовалась количественная методика (Н.Н. Давыдова, 1985 г.). В изученной колонке диагностировано 94 вида диатомовых водорослей. Названия таксонов уточнялись по Краммеру и Ланге-Берталоту (1986 г.). Род *Synedra* и род *Fragillaria* рассматривались по книге «Диатомовый анализ» (1950 г.). Экологические характеристики видов взяты из нескольких источников (С.С. Барина и др., 2006 г., Н.Н. Давыдова, 1985 г.).

Анализ микроэлементов в высушенных и измельченных пробах выполняли после кислотного вскрытия методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, аналитик Д.В. Киселёва, Институт геологии и геохимии УрО РАН). Кислотное вскрытие проб из навесок 50 мг выполняли в автоклавах с однокамерной реакционной ёмкостью из фторопласта при температуре 150°С в течение 6 часов смесью 2 мл HF, 3 мл HCl и 1 мл HNO₃.

Деструкцию фторидных комплексов проводили двукратным выпариванием сухого остатка пробы в 4 мл концентрированной HNO₃ при температуре 110°С. После добавления раствора индия (внутренний стандарт) и 2 мл 5н HNO₃ раствор ещё раз упаривали деионизированной водой (установка Millipore), сводили к аликвоте 100 мл при конечной концентрации азотной кислоты 0,5 н. Все кислоты дополнительно очищали на установке дистилляции Berghof. Анализ подготовленных растворов выполнялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Perkin Elmer ELAN 9000. Всего на микроэлементы проанализировано 39 проб.

Силикатный анализ 18 проб выполнен по стандартной методике из малых навесок 1,2 г по общепринятой методике (Унифицированные методы анализа, 1979 г.).

Радиоуглеродные датировки были получены по двум пробам, отвечающим интервалам 150–155 см (кора дерева) и 455–460 см (раковина двустворчатого моллюска). Для датировки использовали навески 15 мг, которые после стандартных процедур препарирования анализировались методом ускорительной масс-спектрометрии AMS ¹⁴C в университете г. Лунд (Швеция, аналитик М. Лундгрэн).

Результаты и обсуждение.

Колонка осадков оз. Иткуль имеет однородное строение и представлена толщей тёмно-бурого слабо стратифицированного сапропеля. Степень консолидированности возрастает с глубиной, вскипание с HCl не наблюдается на протяжении всей колонки.

Возрастная модель колонки донных отложений, полученная корреляцией спорово-пыльцевых диаграмм с колонкой оз. Увильды (В.И. Хомутова и др., 1995 г.), была уточнена двумя абсолютными датировками (155 см, 460 см).

Спорово-пыльцевые спектры (СПС) самой нижней части колонки донных отложений (470–460 см) соответствуют СПС позднего дриаса (Dr₃) оз. Увильды. Донные отложения с глубины 460 см оз. Иткуль датируются

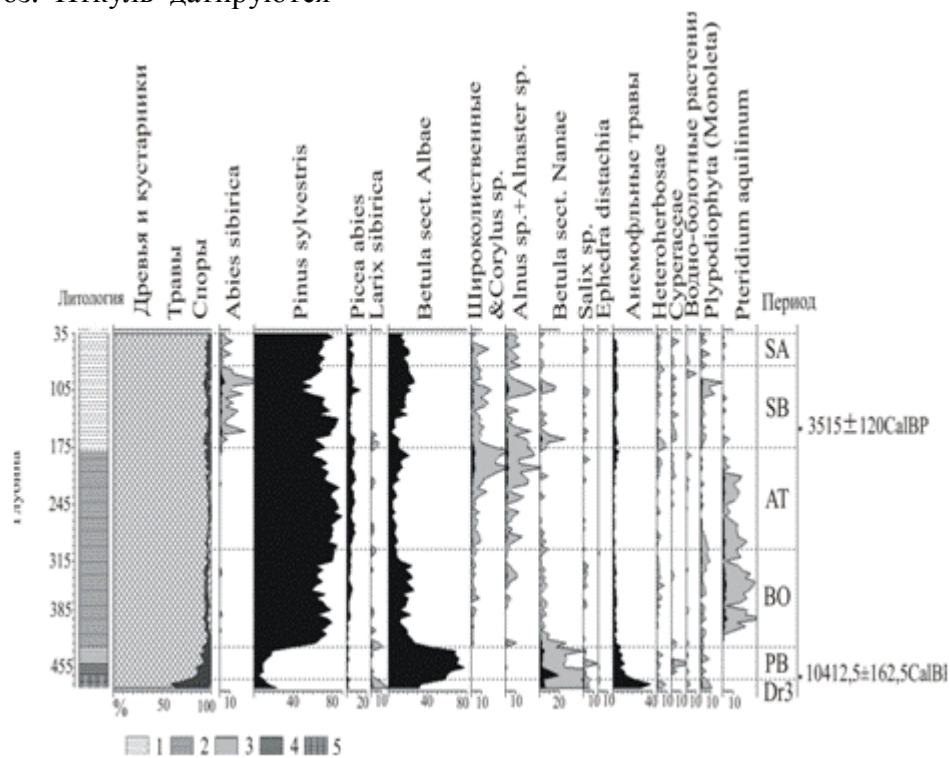


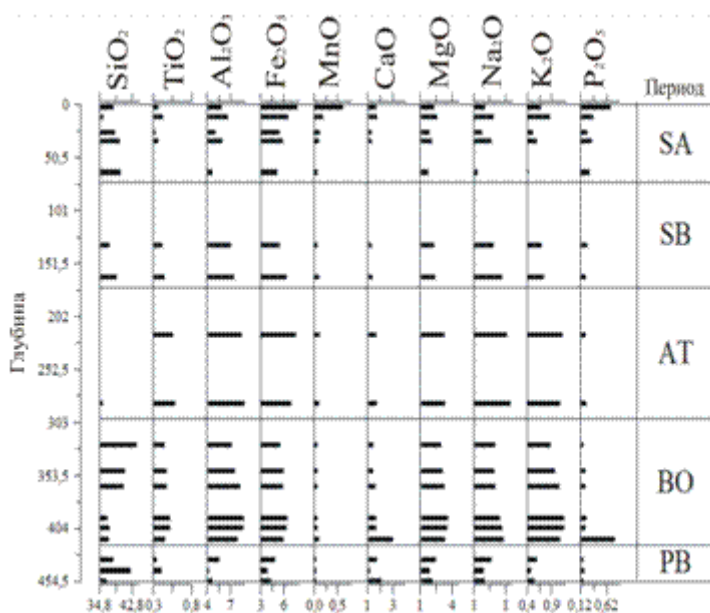
Рис. 1. Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений оз. Иткуль:

1 – тёмно-бурый, однородный консолидированный сапропель; 2 – тёмно-бурый, плотный сапропель; 3 – сапропель буро-оливкового цвета, зернистый, пелит-алевритового состава, неясно слоистый; 4 – буро-оливковый сапропель, ясно-слоистый; 5 – пеллит-алевритовый, зернистый буро-оливковый сапропель.

10 575–10 250 ¹⁴C ВР. СПС характеризуются пиком максимума содержания пыльцы травянистых растений, низким процентом пыльцы древесных пород, наличием пыльцевых зёрен *Ephedra distachia* L., *Betula* sect. *Nanae* (рис. 1). Такие особенности СПС говорят о холодных континентальных условиях позднего дриаса.

В отложениях конца позднего дриаса численность диатомовых водорослей в 1 г воздушно-сухого образца достигает 52 млн. Для оз. Кисегач (Н.Н. Давыдова, 1978 г.) и оз. Увильды (В.И. Хомутова, 1995 г.) характерно гораздо более низкое содержание диатомей в этот период, что вероятно объясняется тем, что колонки донных отложений этих озёр были взяты вблизи берега. Несмотря на достаточно большую концентрацию диатомей в осадках позднего дриаса оз. Иткуль, видовой состав их обеднён.

Сообщество диатомовых водорослей представлено алкалофильными эпифитами (рис. 2), среди которых доминируют *Fragillaria pinnata* Ehr. и *Fragillaria brevistriata* Grun. Встречаются также *Fragillaria construens* (Ehr.) Grun, *Achnanthes minutissima* var. *minutissima* Ktz, *Achnanthes exigua* Grun, *Amphora pediculus* (Ktz.) Grun. (рис. 3). Значения индексов сапробности по Пантле-Буку ($S = 0,76 - 0,96$) и по Т. Ватанабе ($DA_{pro} = 64 - 72$) свидетельствуют о низком трофическом статусе водоёма (С.С. Баринаева, 2006).



Периоды похолодания характеризуются уменьшением отношений этих элементов повышением отношений $\text{La}(\text{Ce})/\text{Yb}(\text{Y})$.

Рис. 4. Результаты силикатного анализа донных отложений оз. Иткуль

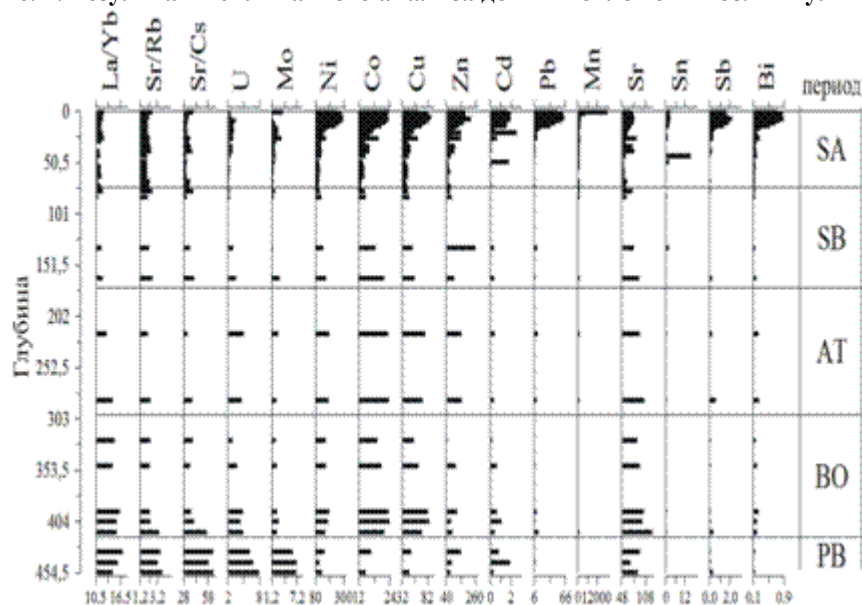


Рис. 5. Результаты микроэлементного анализа (ICP-MS) донных отложений оз. Иткуль

Для озера Иткуль, хорошее соответствие климатических реконструкций по СПС и микроэлементам на протяжении голоцена достигается только при сравнении отношений La/Yb и $\text{Sr}/\text{Rb}(\text{Cs})$. Однако пики отношений $\text{Sr}/\text{Rb}(\text{Cs})$, которые в донных отложениях оз. Байкал свидетельствуют о потеплении климата, в донных отложениях оз. Иткуль соответствуют холодным условиям. Соответственно для пребореала (геохимических данных для дриаса не получено) отмечены наибольшие значения отношений La/Yb и $\text{Sr}/\text{Rb}(\text{Cs})$ (рис. 5).

Продолжающийся тренд потепления и увлажнения климата отразился на СПС бореала (BO, интервал 420–300 см) появлением эмпирических кривых широколиственных пород, ольхи, повышением процентного содержания пыльцы ели, многообразием пыльцы разнотравья, спор папоротников. В течение бореального периода пыльца осок и водно-болотных растений практически не встречается.

Для бореального периода характерно сокращение численности видов р. *Fragillaria*, появление *Cyclotella ocellata* Pant., *Epithemia frickei* Krammer, *Navicula scutelloides* W. Sm., *Diploneis elliptica* (Ktz.) Cl. увеличение содержания створок *Cyclotella bodanica* Grun., *Stephanodiscus minutulus* (Ktz.) Cl, *Ellerbeckia arenaria* (Moore) Crawford. В течение бореального периода продолжает увеличиваться процент планктонных и бентосных диатомей. К концу бореала появляются галофильные *Navicula cari* Ktz., *Navicula oblonga* Ehr., *Anomoeoneis sphaerophora* (Ehr.) Pfitz., *Epithemia turgida* (Ehr.) Ktz., концентрация створок падает. В течение периода индексы сапробности растут, в конце резко падает процент сапроксенов (рис. 2). Таким образом, в начале бореала уровень водоёма повышался, однако к концу периода увеличивается трофность и минерализация озера.

Для начала бореального периода характерны пики P_2O_5 , CaO, Sr. Содержание U, Mo уменьшается, а концентрация MnO увеличивается, что возможно, указывает на преобладание окислительных условий осадконакопления.

Главными особенностями СПС атлантического периода (АТ, интервал 300–175 см) являются обилие и разнообразие пыльцы широколиственных пород (*Corylus* sp., *Quercus* sp., *Tilia* sp., *Ulmus* sp.), многообразие пыльцы группы *heteroherbosae* (*Asteraceae*, *Cyperaceae*, *Polygonaceae*, *Ranunculaceae*, *Rosaceae*, *Typhaceae*, *Urticaceae* и др.). Характерно значительное повышение содержания пыльцы широколиственных пород в середине периода и резкий спад в конце. Такие особенности спорово-пыльцевых спектров свидетельствуют об относительно тёплых и влажных условиях атлантического периода.

Для рассматриваемого времени характерна наименьшая численность диатомовых водорослей (до 439 тыс.), только в конце периода содержание створок возрастает до 155 млн. В сообществе диатомей доминируют галофильная *Epithemia turgida*, *Navicula scutelloides*, *Ellerbeckia arenaria*, *Gyrosigma attenuatum*, *Stephanodiscus minutulus*. В начале периода на глубине 275 см резко возрастает концентрация диатомей, особенно *Stephanodiscus hantzschii* Grun. Процент эпифитов снижается, увеличивается процент планктонных и бентосных диатомей, уменьшается процентное содержание галлофобов, отмечается мезогалоб *Navicula halophila* (Grun.) Cl. Процентное содержание галофилов уменьшается за счёт снижения численности эпифитной *Fragillaria pinnata*. Отмечается увеличение индекса S (до 1,58), и соответственно уменьшение индекса DA_{lpo} (до 61). Эти данные указывают на сокращение зарослей макрофитов, повышение минерализации и трофности озера. В конце атлантического периода восстанавливаются заросли макрофитов, служащие субстратом для эпифитов (*Fragillaria pinnata*, *F. brevistriata*, *F. construens* и др.), увеличивается процент обрастателей, снижается содержание бентосных и планктонных диатомей, значительно повышается концентрация диатомей (рис. 3).

В отложениях, сформированных в данный период, отмечено понижение содержания SiO_2 , что соответствует снижению численности диатомей. Уменьшение отношений Sr/Rb(Cs) ещё раз подтверждает потепление климата (рис. 5).

Нижняя граница суббореала (SB, интервал 175–75 см) проводится на уровне спада кривой широколиственных пород и появления эмпирической кривой *Abies sibirica* Ledeb. Согласно абсолютной датировке глубина 155 см соответствует возрасту 3 635–3 395¹⁴ С ВР (рис. 1). Высокое содержание пыльцы *Abies sibirica* и *Picea abies* (L.) Karst. в течение суббореала (175–75 см.), а также большое разнообразие спор папоротников (*Pteridium aquilinum*, *Athyrium filix-femina* (L) Roth., *Diplazium* sp., *Dryopteris filix-mas* (L.) Schot., *Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenkins) отражают увеличение роли тёмнохвойных лесов в формировании растительного покрова водосбора оз. Иткуль. Для СПС суббореала характерен высокий процент пыльцы *Betula sect. Nanae* (2,9 %). Данные особенности СПС индицируют похолодание климата.

В суббореальное время содержание диатомей продолжает повышаться (до 240 млн). В начале суббореала доминируют обрастатели, процент планктонных диатомовых водорослей снижен. Во второй половине суббореала увеличивается процентное содержание и абсолютная концентрация планктонных диатомей (*Aulacoseira ambigua*, *Aulacoseira granulata*, *Cyclotella bodanica*), растёт процент индифферентов, появляются ацидофилы (*Neidium dilatatum* (Ehr.) Cl.,

Tabellaria flocculosa (Roth) Ktz.). Возрастает индекс сапробности Пантле-Бука, уменьшается индекс сапробности по Т. Ватанабе, увеличивается процент сапрофиллов. Таким образом, в прохладных условиях начала суббореала уровень стояния озера несколько понизился, во второй половине периода происходит увеличение трофии и глубины озера.

Повышение отношений Sr/Rb(Cs) в начале суббореала подтверждает похолодание климата. В середине периода отношения Sr/Rb(Cs) понижаются, что указывает на некоторое потепление климата.

Суббореально-субатлантический рубеж проводится на глубине 75 см. Уменьшение содержания пыльцы *Abies sibirica* и низкий процент пыльцы широколиственных пород в СПС субатлантики (SA) отражают дальнейшее похолодание климата. В субатлантический период концентрация диатомей на 1 г. воздушно-сухого осадка меняется в широком диапазоне 63–238 млн. В сообществе доминируют *Aulacoseira ambigua*, *Aulacoseira granulata*, *Cyclotella bodanica*, довольно много видов рода *Fragillaria*, увеличивается содержание *Synedra ulna* (Nitzsch) Ehr. Данный период характеризуется большим разнообразием видов диатомовых водорослей. Процентные содержания экологических групп диатомовых сходны с таковыми для второй половины суббореала.

В субатлантическом периоде начинается индустриальный этап. Для верхних 30 см колонки характерно значительное повышение концентрации Cd, Pb, Cu, Ni, Co, Zn, Bi, Sb, что, вероятно, связано с деятельностью ЗАО «Уфалейникель» (рис. 5).

Таким образом, в холодных континентальных условиях позднего дриаса осадконакопление осуществлялось в заросшем мелководном, олиготрофном водоёме. В пребореальном и бореальном периодах отмечается тренд потепления и увеличения влажности, уровень озера и его трофический статус растёт. В условиях климатического оптимума атлантического времени продолжает увеличиваться продуктивность озера, однако численность диатомовых водорослей резко падает. С конца атлантического периода озеро вновь зарастает макрофитами, его уровень падает. В начале суббореала отмечается похолодание, сменившееся кратковременным потеплением, с середины периода уровень озера поднимается. В субатлантическом периоде продолжается уменьшение температуры среды, трофность и глубина озера соответствуют показателям суббореального периода. С середины субатлантического периода заметным становится антропогенное влияние.

Список литературы

1. Баринова, С.С. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды / С.С. Баринова, Л.А. Медведева, О.В. Анисимова. – Тель Авив : PiliesStudio, 2006. – 498 с.
2. Благовещенский, Г.А. История лесов Восточного склона Среднего Урала / Г.А. Благовещенский // Сов. Ботаника. – 1946. – № 6. – С. 4–16.
3. Гольдберг, Е.Л. Декадно-разрешённая летопись отклика Восточной Сибири на резкие климатические изменения в Атлантике за последний ледниково-межледниковый цикл / Е.Л. Гольдберг, М.А. Федорин, Е.П. Чебыкин, О.М. Хлыстов, Н.А. Жученко // ДАН. – 2008. – Т. 241. – № 4. – С. 542–545
4. Давыдова, Н.Н. Диатомовые водоросли в отложениях озёр / Н.Н. Давыдова // Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озёр Южного Урала. – Л., 1978. – С. 228–237.
5. Давыдова, Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоёмов в голоцене / Н.Н. Давыдова. – Л. : Наука, 1985. – 253 с.
6. Жузе, А.П. Палеогеография водоёмов на основе диатомового анализа / А.П. Жузе // Тр. Верхневолж. экспед. – 1939. – № 4. – С. 42–49.
7. Калмычков, Г.В. Способ выделения створок диатомовых водорослей из донных осадков для определения их кислородного изотопного состава и реконструкции палеоклимата / Г.В. Калмычков, С.С. Кострова // Геохимия. – 2005. – № 12. – С. 1358–1360.
8. Перельман, А.И. Геохимия / А.И. Перельман. – М. : Высш. шк., 1989. – 528 с.

9. Прошкина-Лавренко, А.И. Альгофлора сапропелей озёр Среднего Урала / А.И. Прошкина-Лавренко // Докл. АН. СССР. – 1945. – Т. 50. – С. 471–474.
10. Сукачёв, В.Н. Очерк истории озёр и растительности Среднего Урала в течение голоцена по данным изучения сапропелевых отложений / В.Н. Сукачёв, Г.И. Поплавская // Бюлл. Комисс. по изучению четвертич. периода. – 1946. – № 8. – С. 5–37.
11. Хазина, И.В. Реконструкция природно-климатических обстановок среднего-позднего голоцена новосибирского Приобья / И.В. Хазина // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 8. – С. 971–978.
12. Хомутова, В.И. Южный Урал. Озеро Увильды / В.И. Хомутова, М.А. Андреева, Н.Н. Давыдова, И.Ю. Неуструева, В.Ю. Радаева, Д.А. Субетто // История озёр Севера Азии. – Л., 1995. – Часть II. – С. 22–40.
13. Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных водорослей / отв. ред. А.И. Прошкина-Лавренко. – Л. : Госгеолиздат, 1950. – Т. 3 – 511 с.
14. Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озёр Южного Урала / отв. ред. Г.В. Назаров. – Л. : Наука, 1978. – 248 с.
15. Унифицированные методы анализа силикатных горных пород с применением комплексонометрии / Инструкция № 163-Х. – М : Мин-во геол. СССР, 1979. – 43 с.
16. Челябинская область. Краткий географический справочник / отв. ред. М.А. Андреева. – Челябинск : Русское геогр. о-во, 1995. – 80 с.
17. Krammer, K. Bacillariophyceae. Subvasserflora von Mitteleuropa : in 4 t. / K. Krammer, H. – Lange-Bertalot. – Jena : VEB, 1986.

Sedimentation Conditions Reconstruction of Lake Itkul over Holocene Based on Complex Analysis of Bottom Deposits

A.V. Maslennikova, V.V. Deryagin

*Institute of Mineralogy Ural Affiliate of Russian Academy of Science, Miass;
Chelyabinsk Teachers' Training University, Chelyabinsk*

Key words and phrases: geochemical analysis; sediment beds; diatoms; lake history; paleoclimate; sporo-pollen analysis.

Abstract: The paper presents the results of sporo-pollen, diatomic and geochemical analyses of sediment core of Lake Itkul (Middle Urals). On the basis of sporo-pollen analysis and absolute datings AMS ^{14}C the age of the lake (late trias) has been identified; the sediment core has been divided into periods. On the basis of (ICP-MS) microelement analysis the correlation between paleoclimate shift and proportion of La/Yb and Sr/Rb(Cs) has been revealed. It shows the considerable increase in concentration of Cd, Pb, Cu, Ni, Co, Zn, Bi, Sb in upper 30 sm of the sediment core which is caused by aerial transfer of industrial chalcophile elements emitted by «Ufaleinickel» Ltd. With the help of diatomic analysis the conclusions on the trophicity fluctuation, mineralization and the level of lake standing are made. The correlation between diatomic valves and total silica specified by silicate analysis has been outlined.