

*На правах рукописи*



**МАСЛЕННИКОВА Анна Валерьевна**

**ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ПАЛЕОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ ГОЛОЦЕНА  
ЮЖНОГО УРАЛА**

25.00.36 – геоэкология

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск

2012

**Работа выполнена в** Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук»

**Научный руководитель:** Удачин Валерий Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Страховенко Вера Дмитриевна, доктор геолого-минералогических наук, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Жорняк Лина Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры геоэкологии и геохимии

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет»

**Защита диссертации** состоится 26 декабря в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, аудитория 504 учебного корпуса № 20

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2012 г.

Ученый секретарь совета,  
д. г.-м. н., профессор



С.И. Арбузов

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследований.** Значительные климатические перестройки, происходящие в настоящее время, диктуют необходимость исследования изменений палеоклимата голоцена, как относительно недавнего прошлого. Несмотря на рост количества и уровня палеоклиматических исследований, по-прежнему ощущается недостаток достоверных данных по изменениям внутриконтинентального климата. Малые озера в отличие от крупных озер являются менее устойчивыми системами и более чутко реагируют на колебания климата [Солотчина, 2009]. Пограничное расположение Урала, как климатораздела, делает исследования палеоклимата на данной территории особенно актуальными. Высокая концентрация горнопромышленных предприятий на Южном Урале определяет необходимость исследования развития экосистем под воздействием естественных и антропогенных факторов. Донные отложения озер являются аккумуляторами тяжелых металлов, что делает их важным объектом в решении геоэкологической проблемы индикации степени загрязнения при горнопромышленном техногенезе. Использование донных отложений для индикации техногенного воздействия требует изучения процессов их формирования в доиндустриальном периоде, под воздействием естественных факторов.

Большое количество работ посвящено палеореконструкциям по донным отложениям озер Южной Сибири [Безрукова, 2005; Кузьмин и др., 1993; Гольдберг и др., 2008; Солотчина, 2009; Скляр и др. 2011], Северо-запада России [Давыдова, 1976; Хомутова, 1989; Субетто, 2009]. В ряде работ затрагивается проблема выявления особенностей распределения элементов-примесей в донных отложениях техногенного периода [Гавшин и др., 1999; Даувальтер, 2004; Леонова, 2005; Гребенщикова, 2008; Страховенко, 2011; Удачин и др., 1998].

Реконструкция палеоклимата на Урале в голоцене осуществлялась в основном с помощью спорово-пыльцевого анализа торфяных отложений [Нейштадт, 1957; Хотинский, 1977; Панова, 1987 и др.]. Комплексное исследование озерных осадков до наших исследований проведено лишь по нескольким озерам [Ландшафтный фактор..., 1978; Радаева, 1995; Хомутова и др., 1995; Дерягин, 1999]. Изучение донных отложений Южного Урала с использованием высокоточного радиоуглеродного датирования методом ускорительной масс-спектрометрии из малых навесок обеспечивает получение летописи изменения внутриконтинентального палеоклимата на данной территории. Выявление этапов развития и корреляция голоценовых разрезов донных отложений озер, находящихся в различных ландшафтно-климатических обстановках, дает ответ на вопрос о синхронности климатических событий голоцена, роли локального фактора в формировании состава озерных осадков. Определение геохимических и минералогических критериев индикации палеообстановок седиментогенеза делает реконструкции палеоклимата на Южном Урале более достоверными.

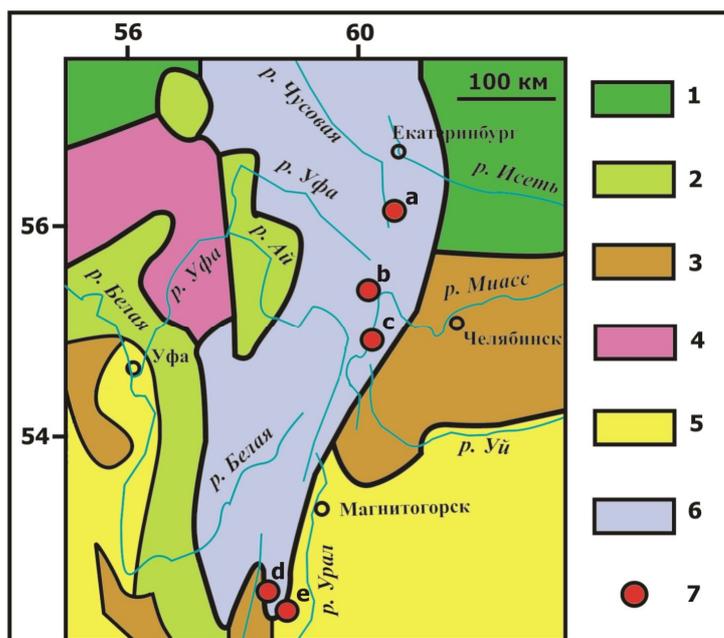
**Цель работы:** реконструкция условий озерного седиментогенеза голоцена Южного Урала на основе комплексного анализа донных отложений озер.

### **Задачи:**

1. Реконструкция палеообстановок озерного седиментогенеза с помощью спорово-пыльцевого и диатомового анализов.
2. Изучение геохимии и минералогии донных отложений озер контрастных ландшафтно-климатических обстановок.
3. Поиск геохимических и минералогических индикаторов, определение условий их палеоклиматической информативности для различных озер.
5. Выявление изменений вещественного состава озерных отложений периода горнопромышленного техногенеза.

**Объекты исследования** представлены донными отложениями озер различных ландшафтно-климатических обстановок: оз. Иткуль, оз. Уфимское и оз. Сырыткуль

(горные леса), оз. Талкас (граница горных лесов и лесостепи), оз. Култубан (степи) (рис. 1).



**Рис. 1. Карта-схема расположения изученных разрезов донных отложений [по Степанову, 1957].**

1 – хвойные леса на подзолистых и дерново-подзолистых почвах; 2 – лиственные леса на серых лесных почвах; 3 – лесостепи на выщелоченных и оподзоленных черноземах; 4 – смешанные леса на серых лесных почвах; 5 – черноземные степи; 6 – горные леса на горно-подзолистых и горно-лесных почвах; 7 – изученные озера: а – оз. Иткуль; б – оз. Уфимское; с – оз. Сырыткуль; d – оз. Талкас; e – оз. Култубан.

**Научная новизна.** Впервые с использованием высокоточного датирования (ускорительная масс-спектрометрия AMS  $^{14}\text{C}$ ) проведена корреляция разрезов донных отложений и установлена общая картина изменения палеоклимата в голоцене на изученной территории. В ходе исследования донных отложений озер Иткуль, Уфимское, Сырыткуль, наравне с событиями голоцена, определенными для данной территории другими исследователями, выявлена аридизация климата второй половины бореала, а для степи и лесостепи Южного Урала отмечено ритмическое чередование периодов аридизации и гумидизации климата, связанное с лимитирующим значением фактора влагообеспеченности. На основе изотопного анализа карбонатной части разреза оз. Сырыткуль сделан вывод о возможности использования отношений стабильных изотопов углерода и кислорода в качестве индикаторов изменения влажности климата. Установлены геохимические и минералогические индикаторы условий озерного осадконакопления на Южном Урале, выявлена группа химических элементов – индикаторов техногенеза. С помощью комплексного анализа донных отложений озер доказано наличие естественного и техногенного закисления оз. Уфимское и оз. Серебры, находящихся в зоне воздействия сернокислотных эмиссий медеплавильного комбината г. Карабаш. Впервые изучено строение и закономерности распространения фрамбоидального пирита в донных отложениях озер Южного Урала.

#### **Защищаемые положения**

1. На основе комплексного изучения колонок донных отложений озер Южного Урала определено, что основными событиями голоцена являются: похолодание позднего дриаса, половецкое потепление, пребореальная осцилляция, похолодание и аридизация климата второй половины бореала, климатический оптимум конца атлантического периода, похолодание и аридизация климата начала суббореала и середины субатлантика. Выявлена многократная смена периодов аридизации и гумидизации климата в суббореальном и субатлантическом периодах южной части изученной территории.

2. Стадии развития озер, выделенные на основе диатомового анализа, соответствуют пыльцевым зонам, и характеризуются комплексом признаков, главными из которых являются содержание  $\text{C}_{\text{неорг.}}$ , Ca, Sr, Mn, Na, Mo,  $\text{C}_{\text{орг.}}$ , значения отношений Mo/Co, (Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), щелочного, плагиоклазового модулей, нормированной щелочности, присутствие кальцита и минералов терригенного сноса.

3. При наличии техногенного воздействия в донных отложениях озер этапа горнопромышленного техногенеза резко повышается обогащение Cu, Cd, Pb, Bi, Sb, Te. Техногенная ацидификация выражается в значительном снижении pH поровых вод, увеличении содержания Fe, Cu, Cd, Pb, Ni, Co в поровых водах, достижении максимального содержания диатомей-ацидофилов, пика концентрации *Tabellaria flocculosa*.

#### **Практическая значимость**

Полученные данные об особенностях изменения состава донных отложений озер позволили реконструировать палеообстановки озерного седиментогенеза голоцена Южного Урала. Результаты исследования могут быть использованы для расчленения и корреляции разрезов отложений голоцена, а также при создании глобальных моделей изменения внутриконтинентального палеоклимата. Выявление сигналов палеоклимата, индикаторов техногенеза позволит в будущем быстро осуществлять палеореконструкции голоцена изученной территории. На основе полученных данных возможен прогноз развития озер в условиях возрастающего техногенного воздействия на фоне естественных климатических ритмов.

**Фактический материал и методы исследования.** Исходный материал для данной работы собран в составе экспедиций 2008–2011 г.г. Института минералогии УрО РАН, организованных совместно с сотрудниками Челябинского педагогического университета. Колонки донных отложений отбирались от границы вода-дно на всю мощность толщи озерных отложений до ложа озера: на оз. Иткуль (мощность колонки 470 см), оз. Уфимское (451 см), оз. Сырыткуль (572 см), оз. Талкас (196 см), оз. Култубан (48 см). Образцы, отобранные с интервалом 1–5 см, в зависимости от литологии колонки подвергались следующим видам анализа:

1. Определение влажности для расчета концентрации пыли и диатомовых водорослей на грамм сухого и сырого веса образца (654);
2. Отжим и анализ поровых вод на сульфаты, серу, тяжелые металлы и pH (43);
3. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой - ICP-MS (Perkin Elmer ELAN 9000. (140);
4. Силикатный анализ по стандартным методикам (72);
5. Анализ на органический углерод (52);
6. Анализ на CO<sub>2</sub> (48);
7. Рентгенофазовый анализ (Shimadzu XRD-6000 (50));
8. Оптическая микроскопия (Olympus BX 50 x1000 – аншлифы (35), бинокулярный микроскоп (МБС x56.87) – высушенные донные осадки (35));
9. Электронная микроскопия (РЭММА 202 МВ (20), Jeol 6460 (25), TE SCAN VEGA 3 (15));
10. Спорово-пыльцевой анализ (280);
11. Диатомовый анализ (110);
12. Ускорительная масс-спектрометрия AMS <sup>14</sup>C (10);
13. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS) (20);
14. Изотопия углерода и кислорода (40).

#### **Личный вклад автора.**

Автором выполнена вся предварительная пробоподготовка (сушка, измельчение образцов до порошкообразного состояния), определение влажности, отжим поровых вод, анализ на органический и неорганический углерод, оптическая микроскопия минералов, спорово-пыльцевой и диатомовый анализ. На основании комплекса методов автором осуществлялась интерпретация данных.

#### **Связь работы с научными программами и научно-исследовательскими темами.**

Исследования выполнены при финансовом содействии Интеграционного проекта ДВО-СО-УрО РАН (№ 09-С-5-1001), проектов поддержки фундаментальных исследований УрО РАН (№ 12-И-5-2018 и № 12-М-45-2051) грантов поддержки аспирантов и молодых ученых УрО РАН, гранта РФФИ № 10-05-96012-р-урал\_а), Тематического плана ЮУрГУ № 1.908, ФЦП Минобрнауки «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (проект ГК N П237).

**Объем работы:** диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, содержит 206 страниц машинописного текста, иллюстрируется 46 рисунками, 8 таблицами. Список литературы включает 202 наименования.

**Благодарности:** Автор выражает благодарность своему руководителю В.Н. Удачину за ценные советы и конструктивную критику, а также В.В. Дерягину, Г.Ф. Лоншаковой, Л.Г. Удачиной, М.Н. Маляренко., Ю.Ф.Мельниковой, Т.В. Семеновой, В.А. Котлярову, В.В. Ершову, В.А. Блинову, Н.П. Ивановой, И.А. Кислюк, В.В. Масленникову, С.П. Масленниковой, В.О. Гулакову, Н.И. Вализер, П.Г. Аминову, К.А. Филиповой за помощь в научной работе, внимательное отношение и поддержку.

**Публикации:**

**В журналах перечня ВАК**

1. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В. Реконструкция условий осадконакопления оз. Иткуль (Средний Урал) на базе комплексного анализа донных отложений // Вопросы современной науки и практики. Институт имени В. И. Вернадского, 2009. № 12. С. 8–18.
2. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В., Удачин В.Н. Реконструкция условий голоценовой озерной седиментации на восточном склоне Южного Урала // Литосфера, 2012. № 2. С. 21–32.
3. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В., Удачин В.Н. Корреляция голоценовых разрезов донных отложений озер Южного и Среднего Урала // Вестник Института геологии Коми, 2012. № 3. С. 6–8.
4. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В., Удачин В.Н. Изотопная геохимия донных отложений оз. Сырыткуль (Южный Урал) // Вестник Томского педагогического университета, 2012. № 7. С. 79–82.
5. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В., Удачин В.Н. Стабильные изотопы углерода и кислорода в донных отложениях озера Сырыткуль (Южный Урал) как индикаторы палеоклиматических условий голоцена // Вестник Оренбургского государственного университета, 2012. № 6. С. 124–127.

**В других изданиях:**

1. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В. Первые данные о составе колонки донных отложений оз. Иткуль // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: Материалы III Межрегиональной научно-практической конференции (Челябинск, 15–17 мая 2008 г.). Челябинск, 2008. С. 75–77.
2. **Масленникова А.В.**, Удачин В.Н., Дерягин В.В. Первые данные о геохимии и палеоэкологии донных отложений озера Иткуль (Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов-2009. Модели рудообразования и оценка месторождений. Миасс: ИМин. УрО РАН, 2009. С. 324–327.
3. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В. Динамика растительности на водосборе оз. Иткуль (Средний Урал) в голоцене // Почвы и растительный мир горных территорий. Товарищество науч. изд. КМК, 2009. С. 222–224.
4. Udachin V.N., Kitagawa R., Deryagin V.V., **Maslennikova A.V.** Clay and carbonate minerals in lake sediments of Southern Urals witnesses of paleoklimatic events of pleistocene and Holocene // Int. clay conference. Moskow, 2009. P.118.
5. **Масленникова А.В.**, Ершов В.В. Изменение минерального состава донных отложений оз. Уфимское (Южный Урал) в позднеледниковье-голоцене // Уральский минералогический сборник. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. №17. С. 140–142.
6. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В., Лоншакова Г.Ф. Геохимические ассоциации элементов в донных отложениях оз. Уфимское (Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 282–285.
7. **Масленникова А.В.** Загрязнение донных отложений озер Урала при горнопромышленном техногенезе // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIV международного симпозиума имени академика М.А. Усова (Томск, 4–9 апреля 2009 г.). Томск: ТПУ, 2010. – Т.2. – С. 117–119.
8. **Масленникова А.В.** Реконструкция условий осадконакопления в оз. Уфимское (Южный Урал) на основе спорово-пыльцевого и диатомового анализа // География, геоэкология, геология: опыт научных исследований: Материалы VII Международной

научной конференции (Днепропетровск, 11–14 мая 2010 г.). Днепропетровск: ИМА, 2010. – В. 7. – С. 82–83.

9. **Масленникова А.В.**, Удачин В.Н., Дерягин В.В. Палеоклиматические условия позднеледниковой и голоценовой седиментации озера Уфимское (Южный Урал) // Актуальные вопросы литологии: Материалы 8 Уральского литологического совещания (Екатеринбург, 19–21 октября 2010 г.). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. С. 209–211.

10. **Масленникова А.В.**, Удачин В.Н. Оценка влияния процессов горнопромышленного техногенеза на акватории озер Южного Урала // Антропогенная трансформация природной среды: Материалы международной конференции (Пермь, 18–21 октября 2010 г.). Пермь: Перм. гос. ун-т., 2010. Т.1. Ч.2. С. 30–35.

11. **Масленникова А.В.**, Солотчина Э.П., Дерягин В.В. Минеральный состав донных отложений озер Урала как выражение условий озерного седиментогенеза в позднеледниковье-голоцене // Минеральные индикаторы литогенеза: Материалы российского совещания с международным участием (Сыктывкар, 14–17 марта 2011 г.). Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 82–83.

12. Дерягин В.В., **Масленникова А.В.**, Дерягин А.В. Осадконакопление в озере Сырыткуль (Южный Урал) // География: проблемы науки и образования: LXIV Герценовские чтения: Материалы ежегодной Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 25–23 апреля 2011 г.). СПб.: Астерион, 2011. С. 232–234.

13. **Масленникова А.В.**, Дерягин В.В. Геохимические индикаторы условий голоценового седиментогенеза на Урале // Современные проблемы геохимии: Материалы конференции молодых ученых (Иркутск, 12–17 сентября 2011 г.). Иркутск: Изд-во ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2011. С. 181–185.

14. **Масленникова А.В.**, Котляров В.А., Удачин В.Н. Дерягин В.В. Возможности электронной микроскопии для изучения минерального состава донных отложений озер Среднего и Южного Урала // Минералогия Урала. Сборник научных статей: VI Всероссийское совещание (Миасс, 22–26 августа 2011 г.). Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 193–196.

15. **Масленникова А.В.**, Удачин В.Н. Дерягин В.В. Минералы донных отложений озер Южного и Среднего Урала // Уральская минералогическая школа: Всероссийская конференция (Екатеринбург, 14–17 сентября 2011 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 125–126.

16. Дерягин В.В., **Масленникова А.В.**, Дерягин А.В. Режимы осадконакопления в озерах Серебры и Сырыткуль (Южный Урал) // Вестник ЧелГУ, 2011. №5. С. 24–30.

**Апробация:** Основные положения диссертационной работы доложены на научных конференциях: «Проблемы географии Урала и сопредельных территорий» (Челябинск, 2008), «Металлогения древних и современных океанов» (Миасс, 2009, 2010), «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2010), «Актуальные вопросы литологии» (Екатеринбург, 2010), «Наука, природа, общество» (Миасс, 2010), «Минералогия Урала» (Миасс, 2011). «Уральская минералогическая школа» (Екатеринбург, 2011).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит обзор литературных данных по палеогеографии голоцена и состоянию изученности донных отложений озер Южного Урала, а также анализ работ по выявлению геохимических и минералогических индикаторов осадконакопления.

Вторая глава включает сведения о физико-географической и геологической позиции изученных озер. Приведены данные о составе пород водосборов, а также морфометрические параметры озер.

В третьей главе описаны использованные методы изучения донных отложений: методика отбора колонок донных отложений, первичной пробоподготовки, подготовки проб для анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), силикатного, диатомового, спорово-пыльцевого анализов, методы

минералогического изучения донных отложений (рентгенофазовый анализ, оптическая и электронная микроскопия).

Четвертая глава посвящена спорово-пыльцевому и диатомовому анализу донных отложений озер Иткуль, Уфимское, Сырыткуль, Талкас, Култубан. На основе данных спорово-пыльцевого анализа выполнено разделение колонок донных отложений на периоды по модифицированной Н. А. Хотинским схеме Блитта-Сернандера [Хотинский, 1977], проведена корреляция голоценовых разрезов, реконструирован палеоклимат голоцена на изученной территории. По результатам диатомового анализа выделены стадии развития озер, определены условия обстановок осадконакопления в голоцене.

Пятая глава посвящена геохимическому исследованию донных отложений озер. На основе кластерного анализа массива геохимических данных выделены ассоциации химических элементов, подсчитаны факторы обогащения, рассчитаны отношения химических элементов, являющиеся потенциальными палеомаркерами.

В шестой главе с помощью электронной и оптической микроскопии выполнен подробный анализ качественного минерального состава, на основе данных рентгенофазового анализа выделены типы рентгенограмм, характеризующие различные условия седиментогенеза. Исходя из сопоставления данных по минералогии донных отложений с результатами спорово-пыльцевого и диатомового анализа, выявлены минералогические индикаторы условий голоценового седиментогенеза.

В седьмой главе на основе синтеза полученной информации осуществляется окончательная реконструкция палеообстановок голоцена изученной территории Южного Урала.

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

**Положение 1. На основе комплексного изучения колонок донных отложений озер Южного Урала определено, что основными событиями голоцена являются: похолодание позднего дриаса, половецкое потепление, пребореальная осцилляция, похолодание и аридизация климата второй половины бореала, климатический оптимум конца атлантического периода, похолодание и аридизация климата начала суббореала и середины субатлантика. Выявлена многократная смена периодов аридизации и гумидизации климата в суббореальном и субатлантическом периодах южной части изученной территории.**

Донные отложения, соответствующие аллереде (AL), отмечены только для оз. Сырыткуль. Они характеризуются значительным количеством пыльцы *Larix sibirica Ledeb.* (рис. 2). Для спорово-пыльцевых спектров (СПС) отложений позднего дриаса (Dr3) выявлены максимум содержания пыльцы трав и спад кривой пыльцы лиственницы, указывающие на похолодание и аридизацию климата. Снижение содержания пыльцы трав и возрастание количества пыльцы лиственницы в первой половине пребореала (PB1) знаменуют начало половецкого потепления (радиоуглеродная датировка  $10300 \pm 80$   $^{14}\text{C}$  лет). Переславское похолодание или пребореальная осцилляция второй половины пребореала (PB2) (радиоуглеродная дата  $9615 \pm 65$   $^{14}\text{C}$  лет) выявляется по СПС с возросшим содержанием пыльцы анемофильных трав (в основном *Artemisia sp.*), *Betula sect. Nanae*, *Ephedra distachia L.* О потеплении климата первой половины бореала (BO1) свидетельствуют преобладание пыльцы *Betula sect. Albae* и увеличение количества пыльцы древесных пород в СПС. В спорово-пыльцевых спектрах второй половины бореала (BO2) выявлен третий пик пыльцы трав, снижение количества пыльцы *Picea sp.* и повышение содержания пыльцы *Betula sect. Nanae*. Данные изменения СПС указывают на аридизацию климата. Спорово-пыльцевые спектры донных отложений атлантического периода (AT) отличаются повышением содержания пыльцы ели и широколиственных пород. Дата  $6265 \pm 50$   $^{14}\text{C}$  лет (по оз. Уфимское) соответствует эмпирической границе, а  $5500 \pm 50$   $^{14}\text{C}$  лет (по оз. Сырыткуль) рациональной границе пыльцы *Ulmus sp.*

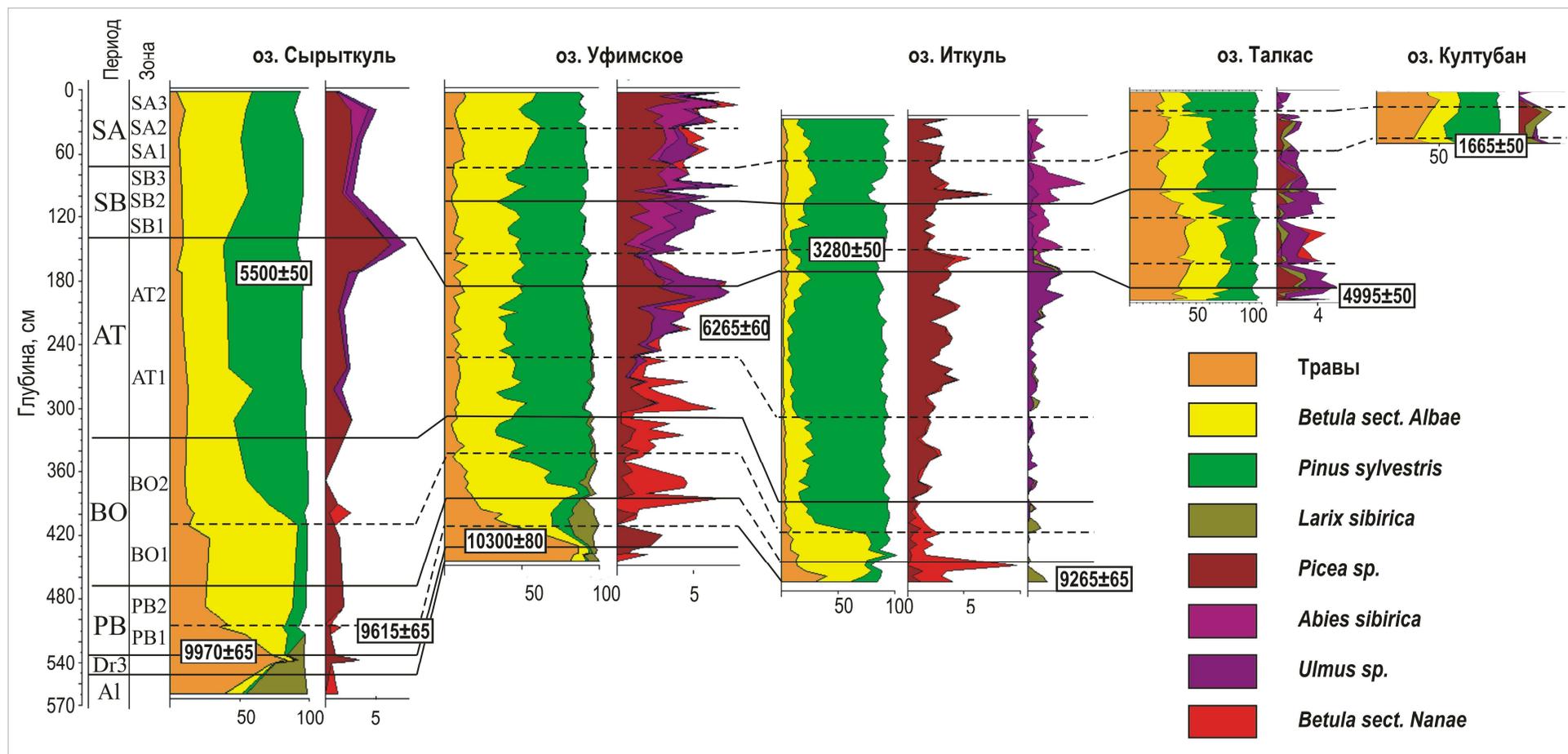


Рис. 2. Корреляция разрезов донных отложений по данным спорово-пыльцевого анализа.

Максимальное содержание пыльцы вяза в конце атлантического периода отмечает климатический оптимум голоцена. Нижняя граница суббореала (SB) проводится на уровне резкого спада кривой пыльцы *Ulmus sp.*, знаменующего начало суббореального похолодания и аридизации климата. Рубеж суббореал-субатлантик (SB/SA) отмечается на уровне небольшого спада кривой пыльцы вяза и повышения содержания пыльцы ели. Похолодание и аридизация климата в середине субатлантика отмечается по уменьшению содержания пыльцы пихты, и (или) возрастанию количества пыльцы *Larix sibirica*.

Для озер лесостепей и степей характерна большая чувствительность летописи донных отложений к колебаниям влажности климата в связи с лимитирующим значением фактора увлажнения. Суббореальное похолодание, синхронное для обширной территории от Англии до Урала [Хотинский, 1977], выразилось для территории водосбора оз. Талкас уменьшением влажности климата. В целом, в суббореале и субатлантике южной части изученной территории отмечена многократная смена периодов аридизации и гумидизации климата, не выявленная по спорово-пыльцевым диаграммам (СПД) озер Иткуль, Уфимское, Сырыткуль. Так, в начале первых зон суббореала и субатлантика (SB1, SA1), а также в конце вторых зон периодов (SB2, SA2), отмечены кратковременные аридизации климата. Третьи зоны суббореального и субатлантического периодов (SB3, SA3), характеризовались повышением увлажнения. Для эпизодов аридизаций климата начала первых и конца вторых зон суббореала и субатлантика характерно повышение содержания пыльцы анемофильных трав и *Betula sect. Albae*. Увлажнение климата индицируется по повышению процента пыльцы *Ulmus sp.*, уменьшению содержания пыльцы анемофильных трав и древесной березы.

Соответствие спорово-пыльцевых и диатомовых зон, выявленное по изученным озерам, свидетельствует о влиянии климата на изменения состава диатомовой флоры. Однако каждая диатомовая зона включает, как правило, несколько пыльцевых зон, так что, на основе данных диатомового анализа выявляются только высокоамплитудные или продолжительные изменения климата. Так, например, для донных отложений оз. Уфимское характерно резкое изменение диатомового комплекса на границе позднего дриаса-пребореала, что соответствует значительной амплитуде климатических колебаний.

На основе сопоставления данных спорово-пыльцевого анализа и геохимии донных отложений определено несколько индикаторов палеоклимата: индексы химического выветривания (CIA, CIW), индекс изменения состава (ICV), отношения  $Al_2O_3/Na_2O$  («Коэффициент зрелости Петтиджона»),  $Na_2O/K_2O$  (ЩМ – щелочной модуль),  $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$  (НКМ – нормированная щелочность),  $(CaO+Na_2O)/Al_2O_3$  (ПМ – плагиоклазовый модуль),  $La/V$ ,  $Zr/TiO_2$  (ТЦМ – титан-циркониевый модуль) сноса [Юдович, 2000; Маслов, 2005],  $(Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al)$ , содержания карбонатфильных элементов Ca,  $C_{неорг}$ , Sr, Mg, Mn, Na, а также химических элементов терригенного сноса Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al.

В аридных обстановках в область аккумуляции поступает слабо переработанный процессами выветривания на палеоводосборах материал, а в гумидных условиях отмечается вынос из полевых шпатов Ca, Na и K [Nessbit, Young, 1982; Visser, Young, 1990]. Кроме того при аридизации климата происходит образование кальцита и гипса. В связи с повышенной концентрацией Zr и La в минералах устойчивых при процессах транспортировки и седиментации (циркон, апатит, монацит и др.) значения отношений  $La/V$  и  $Zr/TiO_2$  имеют тенденцию к росту в более зрелых отложениях [Маслов, 2005]. В результате наших исследований было выявлено возрастание значений CIA, CIW,  $Al_2O_3/Na_2O$ ,  $La/V$  и  $Zr/TiO_2$  и концентраций Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al при потеплении-гумидизации климата. В донных отложениях, накопленных в течение периодов похолодания-аридизации климата, снижаются величины отношений  $(Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al)$ , концентраций карбонатфильных элементов, а также значений ЩМ, НКМ, ПМ, ICV.

Однако, применение ряда индикаторов имеет ограничения в связи с большим разнообразием факторов, влияющих на их значения. Например, концентрация Mn зависит не только от накопления карбоната кальция, но и от окислительно-восстановительной обстановки, а также от фотосинтезирующей активности водорослей приповерхностного слоя сапропеля. Mg иногда занимает промежуточное положение между группами карбонатфильных элементов и химических элементов терригенного сноса. Относительно высокие значения ЩМ, НКМ, ПМ характерны не только для аридных условий, но и для обстановок начала осадконакопления.

Наиболее надежными, характерными для всех изученных озер индикаторами палеоклимата, являются: (Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), CIA, CIW, концентрации Ca, C<sub>неорг</sub> Sr. Так, для осадков позднего дриаса (Dr3) оз. Сырыткуль отмечается повышение, по сравнению с отложениями аллерада (AL), содержания Ca, Sr, C<sub>неорг</sub>. величин отношений (Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), ICV, снижение значений CIA, CIW (табл. 1).

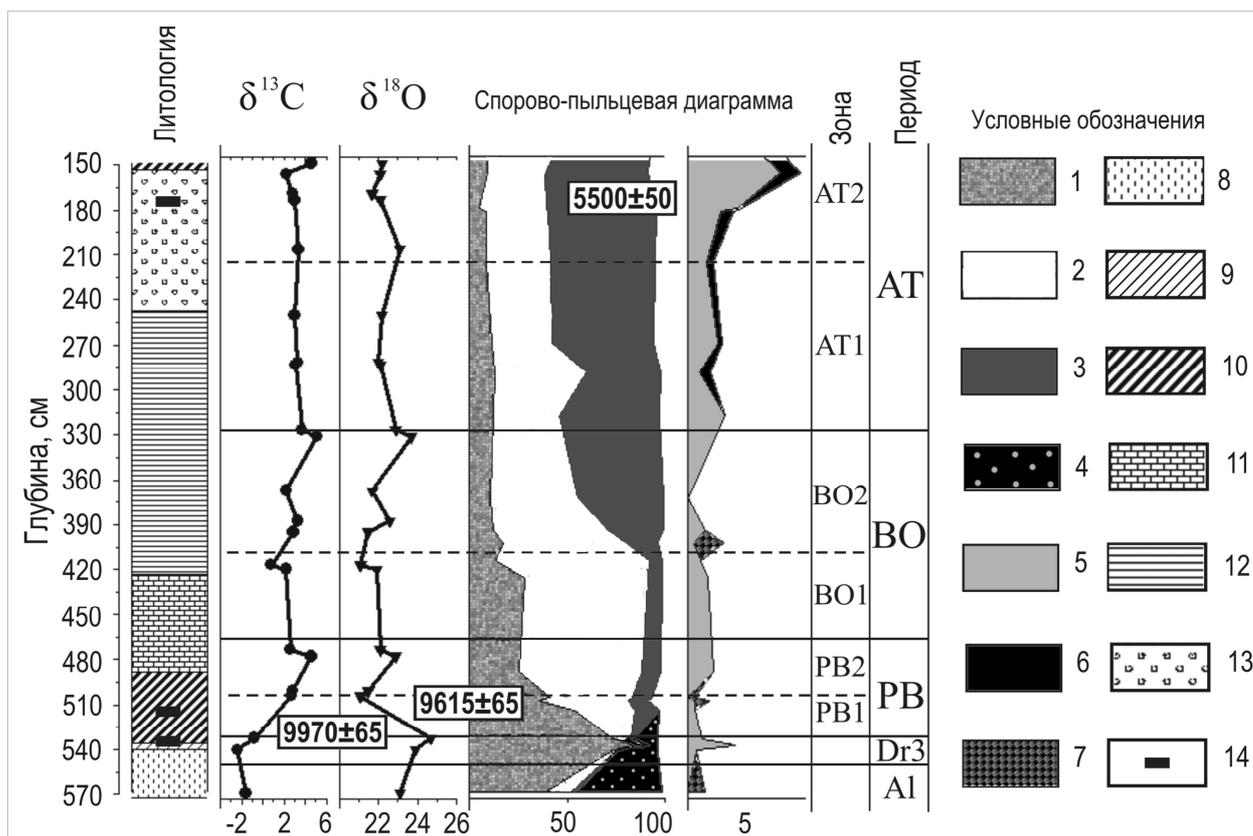
**Таблица 1. Геохимические индикаторы палеоклимата**

Индикаторы палеоклимата	Оз. Уфимское		Оз. Сырыткуль		Оз. Талкас	
	Dr3	PB1	AL	Dr3	SA2	SA3
<b>CIA</b>	34.0	52.0	51.0	48.0	27.0	63.0
<b>CIW</b>	36.0	57.0	57.0	53.0	28.0	68.0
<b>ICV</b>	2.1	1.5	1.7	1.9	3.6	1.5
<b>C<sub>неорг</sub> (%)</b>	1.5	0.2	0.5	3.0	3.0	1.0
<b>Ca (весовые %)</b>	7.9	2.8	4.7	6.9	11.6	2.2
<b>Mg (весовые %)</b>	1.9	1.5	2.0	1.7	1.0	1.1
<b>Mn (г/т)</b>	1409.0	1496.0	426.0	838.0	1067.0	1074.0
<b>Sr (г/т)</b>	328.0	160.0	382.0	479.0	294.0	109.0
<b>Sr/Li</b>	17.6	6.3	16.0	19.0	20.4	10.3
<b>Ca/Al</b>	0.8	0.3	0.5	0.8	2.5	0.4

Подобные особенности характерны и для отложений позднего дриаса-пребореала оз. Уфимское, сапропеля второй половины пребореала (PB2, переславское похолодание) оз. Иткуль, сапропеля аридизаций начала первой и конца второй зон субатлантического периода оз. Талкас (SA1, SA2). Однако, данные индикаторы палеоклимата не применимы для сапропеля пребореала-атлантика (PB-AT) оз. Сырыткуль, сапропеля атлантика-суббореала оз. Талкас (AT-SB) в связи с большой ролью биогенного карбоната накопления.

Информацию относительно особенностей палеоклимата периодов, охарактеризованных карбонатными отложениями, можно получить с помощью изотопии углерода и кислорода. Стабильные изотопы в озерных отложениях позволяют выявить изменения палеогеографических условий в относительно короткие интервалы времени [Общие закономерности..., 1986]. Величина отношения стабильных изотопов кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в озерной воде зависит от изотопного состава притоков, атмосферных осадков, грунтовых вод и испарения [Anderson, 2001]. На основе данных о составе стабильных изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) можно судить о величине испарения, количестве и изотопном составе атмосферных осадков [Chase, 2011; Fushun, 2002; Hatte, 1998; Liutkus, 2005], интенсивности фотосинтеза и продуктивности водоема [McKenzie, 1985; Hollander, 2001].

Нами изучен изотопный состав углерода и кислорода карбонатной части колонки донных отложений оз. Сырыткуль, накопленных в течение интервала 11000-5000 <sup>14</sup>C лет (рис. 3).



**Рис. 3. Сопоставление данных спорово-пыльцевого и изотопного анализа донных отложений оз. Сырыткуль.  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  в ‰; пыльца - ‰.**

1 – травы; 2 – *Betula sect. Albae*; 3 – *Pinus sylvestris*; 4 – *Larix sibirica*, 5 – *Picea sp.*; 6 – широколиственные породы; 7 – *Betula sect. Nanae*; 8 – сизая глина; 9 – буровато-серая глина; 10 – ржаво-красный сапропель с бурыми прослоями; 11 – розоватый сапропель с коричневыми прослоями; 12 – слоистый сапропель неоднородной окраски; 13 – серый сапропель с раковинами моллюсков и остракод; 14 – места отбора проб на радиоуглеродные датировки (AMS  $^{14}\text{C}$ ).

Отмечено совпадение границ палинозон и климатических стадий, выделенных по изотопным кривым углерода и кислорода. На основе сопоставления данных спорово-пыльцевого и изотопного анализов подтверждено предположение о связи изменения изотопного состава кислорода и углерода с количеством атмосферных осадков и интенсивностью испарения. Выявлено, что высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  характерны для периодов пониженной влажности, а снижение содержаний тяжелых изотопов отмечается при увеличении влагообеспеченности территории. С помощью изотопии углерода и кислорода выделено три периода гумидизации (PB1, BO1, AT) и два периода аридизации климата (PB2, BO2), что соответствует данным спорово-пыльцевого анализа.

Минеральный состав донных отложений изученных озер связан, главным образом, с особенностями пород их водосборных бассейнов. Так, например, наличие амфиболов (роговая обманка), обломочного пирита, биотита в донных осадках оз. Уфимское обусловлено, прежде всего, преобладанием амфиболитов и биотитовых гранитов среди пород водосбора. К аллотигенным минералам озерных осадков относятся: кварц, полевые шпаты (альбит, микроклин, ортоклаз), амфиболы, обломочный пирит, гранат, минералы группы слюд (мусковит, биотит), каолинита, хлорита, монтмориллонита. Аутигенные минералы представлены кальцитом, гипсом и фрамбоидальным пиритом. Выявлено, что кальцит и гипс можно использовать в качестве дополнительных индикаторов аридизации климата. В нижней части колонок донных отложений оз. Уфимское, оз. Сырыткуль,

соответствующих холодному континентальному климату позднего дриаса (Dr3), в донных осадках оз. Талкас и оз. Култубан, отвечающих периодам аридизации начала и середины субатлантика, отмечено присутствие кальцита и гипса. По данным рентгенофазового анализа наибольшая степень магниальности характерна для кальцита отложений позднего дриаса ( $d=3,022\text{\AA}$ ). Осаждение карбонатов кальцит-доломитового ряда зависит от отношения  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  в воде, ее общей карбонатной щелочности, солености, величины рН, температуры, продуктивности озера. Данные признаки контролируются водным балансом, зависящим от климата [Скляр, 2010]. Возрастание степени магниальности кальцита свидетельствует об аридизации климата [Солотчина, 2009].

Дифрактограммы осадков оз. Иткуль и оз. Уфимское имеют широкое гало, соответствующее содержанию рентгеноаморфного компонента, включающего органическое вещество и биогенный кремнезем [Гречин, 1972]. По дифракционным спектрам донных отложений оз. Иткуль и оз. Уфимское, на основе выраженности гало и интенсивности рефлексов минералов терригенного сноса, можно выявить чередование периодов преимущественно органогенного и минерогенного осадконакопления и косвенно судить об изменениях глубины, продуктивности, зарастаемости водоемов, а также облесенности территории водосборов озер.

**Положение 2:** Стадии развития озер, выделенные на основе диатомового анализа, соответствуют пыльцевым зонам, и характеризуются комплексом признаков, главными из которых являются содержание  $C_{\text{неорг}}$ , Ca, Sr, Mn, Na, Mo,  $C_{\text{орг}}$ , значения отношений  $\text{Mo/Co}$ ,  $(\text{Sr, Ca})/(\text{Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al})$ , щелочного, плагиоклазового модулей, нормированной щелочности, присутствие кальцита и минералов терригенного сноса.

Рассмотрим стадии развития озер двух контрастных ландшафтно-климатических обстановок:

#### **оз. Уфимское (горные леса)**

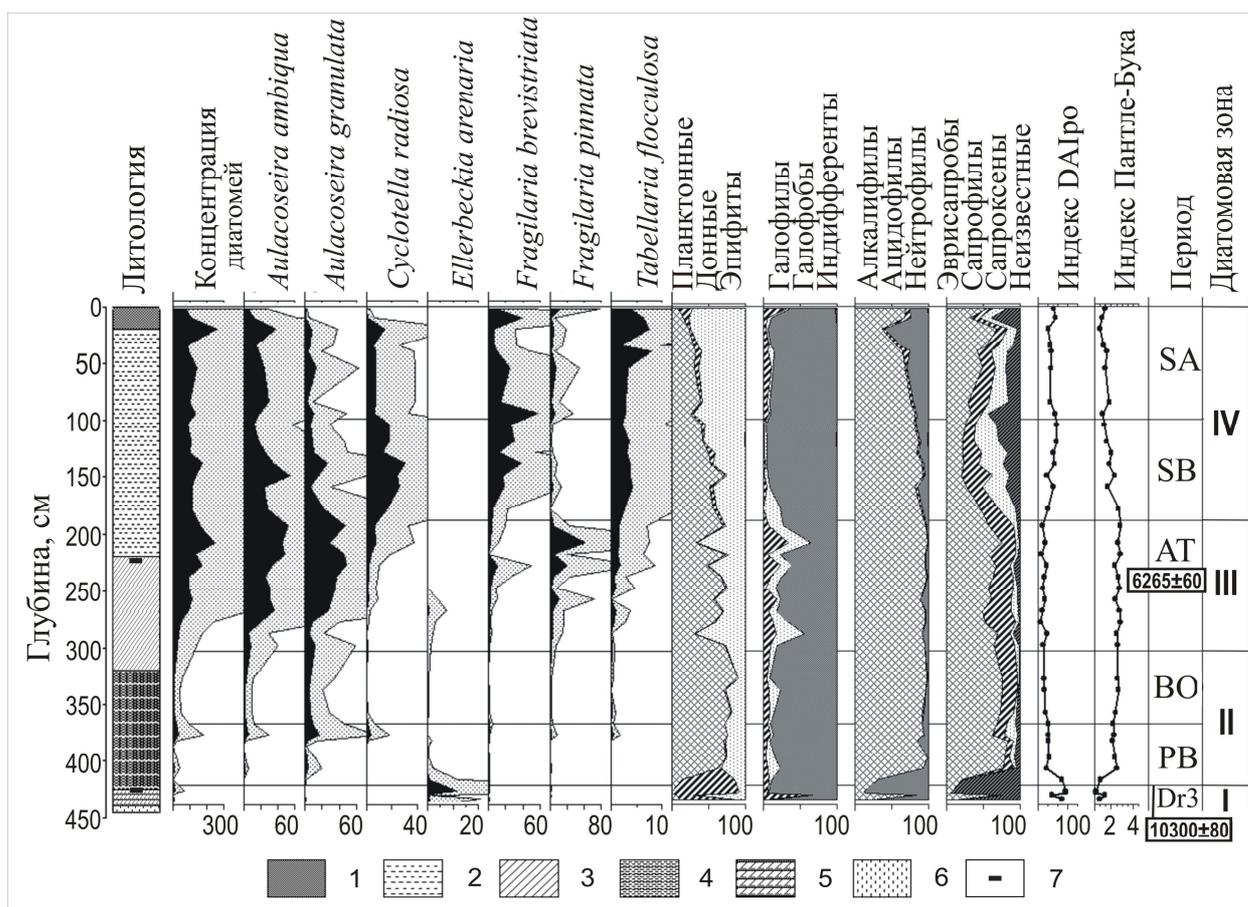
Стадия зарождения оз. Уфимское соответствует *Ellerbeckia arenaria* – zone (I) (Dr3, интервал 451–438 см) (рис. 4). Осадки позднего дриаса представлены серым мелкозернистым песком, обогащенным Ca, Mg, Sr, Mn,  $C_{\text{неорг}}$ , Na, Ta, Nb, Ti. Для рассматриваемых отложений выявлены высокие значения ЩМ, ПМ, НКМ, присутствие кальцита и гипса (рис. 5).

Для торфянистого сапропеля стадии зарастания водоема макрофитами (Dr3, интервал 438–425 см) отмечается резкое повышение концентрации эпифита *Fragilaria pinnata*, возрастание содержания  $C_{\text{орг}}$ , Se, Mo, W, Co, V.

Стадию обводнения характеризует *Aulacoseira granulata* – zone (II) (PB-BO, интервал 425–300 см). Буро-оливковый слюдистый сапропель данного этапа осадконакопления отличается высоким содержанием химических элементов – индикаторов терригенного сноса (Li, Cs, Be, Cr, Ni, Sc, Zr, Hf, Ga, V, Rb, Ba, Sr, Ta, Nb, Al, K, Fe, Mg, Ti) и доминированием среди диатомей планктонных видов.

*Fragilaria pinnata-Aulacoseira ambigua-Aulacoseira granulata* – zone (III) (AT, интервал 300–195 см) соответствует стадии повышения продуктивности озера. Для нее характерен оливковый сапропель с высоким содержанием органического углерода, РЗЭ, Th, U, Cu, повышением численности и разнообразия диатомей, преобладанием среди них эпифитов.

*Fragilaria brevistriata-Cyclotella radiosa-Tabellaria flocculosa* – zone (IV) (SB-SA, интервал 195–100 см) характеризует стадию зарастания-ацидификации озера. Для буро-оливкового сапропеля субатлантика и суббореала (интервал 225–20 см) отмечается повышение содержания органического углерода, уменьшение концентраций Li, Rb, Cs, Ba, Be, Al, Zr, Hf, Fe, Cr, Ti, увеличение численности и разнообразия диатомей-ацидофилов.



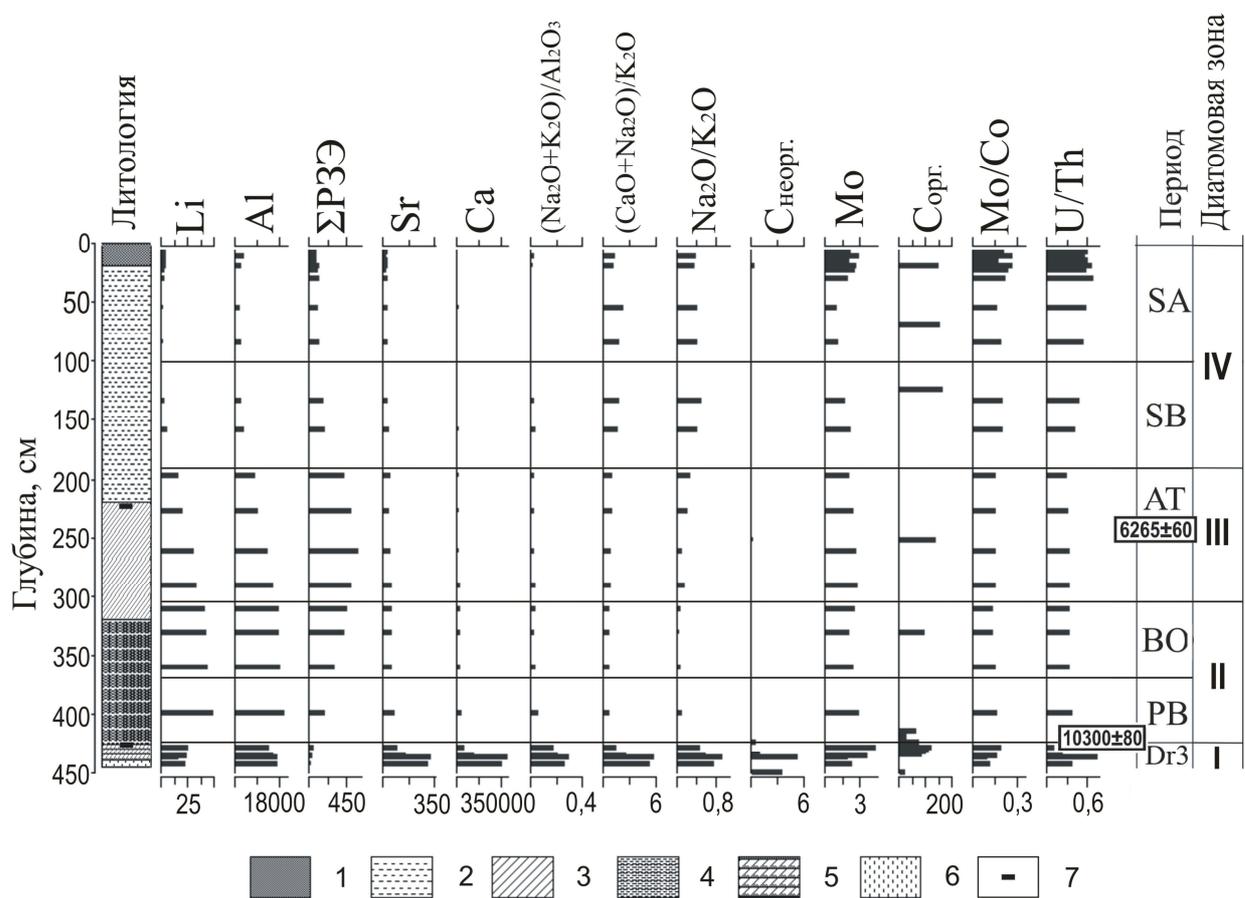
**Рис. 4. Диатомовая диаграмма донных отложений оз. Уфимское.** Концентрация диатомей в млн./г, экологические группы в %, индексы сапробности в баллах. 1 – темно-бурый обводненный пелитовый сапропель; 2 – буро-оливковый пелитовый сапропель; 3 – оливковый пелитовый сапропель; 4 – буро-оливковый грубо-пелитовый слюдястый сапропель; 5 – опесчаненный слюдястый торфянистый сапропель; 6 – песок серый, кварцевый, мелкозернистый; 7 – место отбора проб на AMS<sup>14</sup>C.

#### Оз. Талкас (лесостепь).

Стадии заросшего макрофитами гипотрофного водоема (I) (*Fragilaria brevistriata* – zone (AT2, интервал 196.5-187 см)) соответствует темно-бурый сапропель с прослоями торфа (рис. 6). Для него характерно обогащение Ca, Sr, As, Mn, Na, высокие значения модулей ЩМ, ПМ, НКМ, отношений (Sr,Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), U/Th, Mo/Co, присутствие кальцита, арагонита, доминирование эпифитов в диатомовых комплексах (рис. 7).

*Cyclotella bodanica* – zone (SB, интервал 187-106 см) характеризует стадию обводнения озера (II). Буровато-серый глинистый сапропель суббореала отличается высокими концентрациями карбонатфильных элементов, присутствием кальцита, максимальным содержанием планктонных диатомей.

Стадия зарастания водоема (III) соответствует *Fragilaria brevistriata-Fragilaria pinnata* – zone (SA, интервал 106-0 см). Для оливково-зеленого сапропеля субатлантического периода отмечено повышение содержания органического углерода, отсутствие кальцита и арагонита.

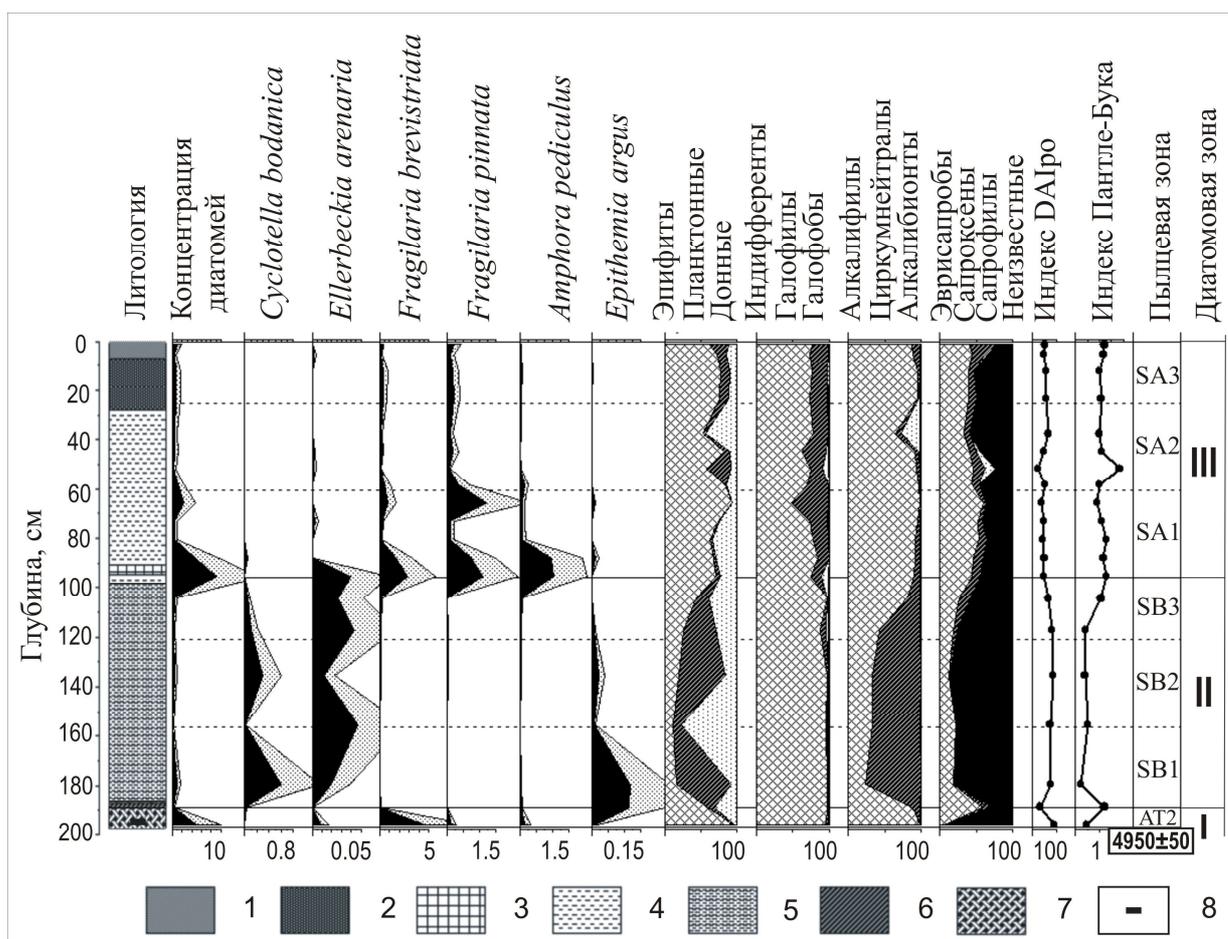


**Рис. 5. Геохимия донных отложений оз. Уфимское.** Li, Al, Sr, Ca, Mo – г/т;  $C_{\text{неорг.}}$ ,  $C_{\text{орг.}}$  – %. (условные обозначения см. рис. 4).

Сапропель начала первой зоны (интервал 94-91 см) и конца второй зоны (интервал 28-24 см) субатлантического периода отличаются значительным повышением содержания углерода карбонатов, химических элементов, связанных с карбонатом кальция, высокой интенсивностью пиков кальцита на дифрактограммах, значительной концентрацией диатомей алкалифилов.

На основе изучения пяти колонок донных отложений озер выявлено, что донные отложения разновозрастных озер, накопленные в одни и те же стадии развития, характеризуются сходными признаками. Так, например, в начале озерного седиментогенеза накапливаются отложения с низкой концентрацией органического вещества, значительным содержанием  $C_{\text{неорг.}}$ , Ca, Sr, Mn, Na, высокими значениями модулей ЩМ, ПМ, НКМ, отношений (Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al). В результате зарастания водоема макрофитами, в условиях высоких скоростей седиментации при недостатке кислорода, формируются слои сапропеля со слабо разложившимися растительными макроостатками, высоким содержанием  $C_{\text{орг.}}$ , Mo, U, преобладанием в составе диатомовых сообществ диатомей-обрастателей (*Fragillaria pinnata* Ehr., *Fragillaria brevistriata* и др.).

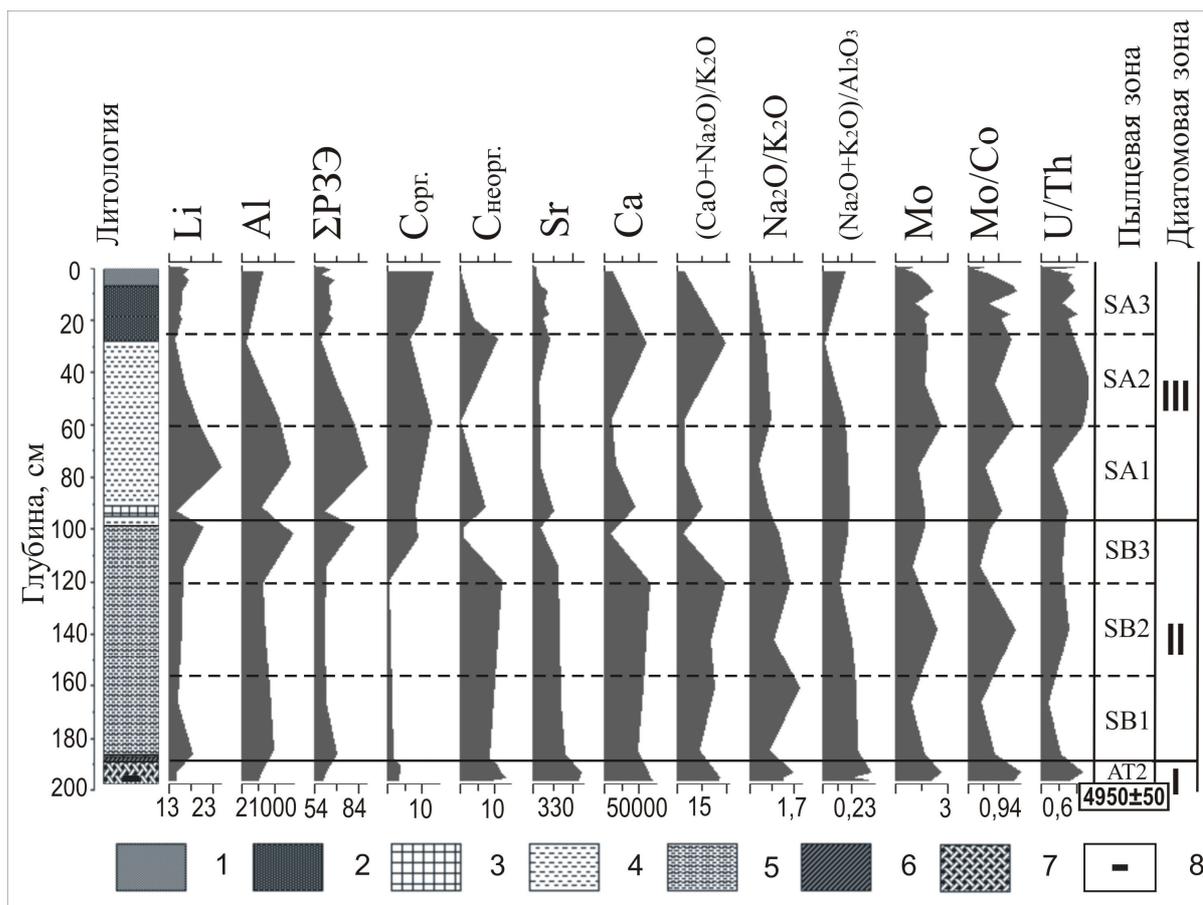
Стадии обводнения соответствует сапропель с повышенными концентрациями химических элементов – индикаторов терригенного сноса (Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), увеличением содержания планктонных диатомей, преобладанием среди минералов донных отложений кварца, слюд, полевых шпатов. Оливковый, буро-оливковый сапропель стадии зарастания водоемов макрофитами накапливается в условиях низкой скорости седиментации и характеризуется более полным разложением органики. Он отличается высоким содержанием  $C_{\text{орг.}}$ , снижением концентрации химических элементов – индикаторов терригенного сноса.



**Рис. 6. Диатомовая диаграмма донных отложений оз. Талкас.** Концентрация диатомей в млн./г, экологические группы в %, индексы сапробности DAPro и Пантле-Бука в баллах. 1 – буро-оливковый ил; 2 – темно-бурый полужидкий сапропель; 3 – осветленный сапропель; 4 – оливково-зеленый сапропель с растительными остатками; 5 – буровато-серый глинистый плотный сапропель; 6 – серый прослой; 7 – темно-бурый сапропель с торфянистыми прослоями; 8 – место отбора проб на AMS<sup>14</sup>C.

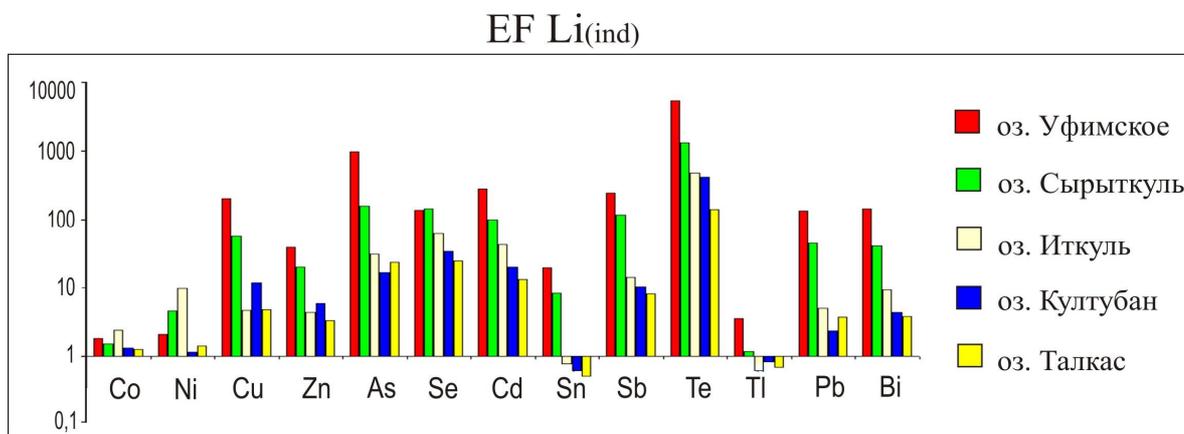
**Положение 3.** При наличии техногенного воздействия в донных отложениях озер этапа горнопромышленного техногенеза резко повышается обогащение Cu, Cd, Pb, Bi, Sb, Te. Техногенная ацидификация выражается в значительном снижении pH поровых вод, увеличении содержания Fe, Cu, Cd, Pb, Ni, Co в поровых водах, достижении максимального содержания диатомей-ацидофилов, пика концентрации *Tabellaria flocculosa*.

На основе изучения геохимии донных отложений озер Южного Урала выявлено резкое повышение концентрации халькофильных элементов, а также Ni, Co в озерных осадках индустриального периода. Для выявления техногенной ассоциации общей для изученной территории рассчитаны факторы обогащения (EF – Enrichment Factor) донных отложений озер химическими элементами относительно кларков концентрации элементов в литосфере [Teulog, 1995] с нормированием по литию [Loring, 1991]. Для сравнения обогащения донных отложений доиндустриального и индустриального периодов по аналогии со степенью концентрации [Nakanson, 1980], рассчитана степень обогащения:  $C_{EF} = EF_{ind}/EF_{preind}$ , где  $EF_{ind}$  – максимальный фактор обогащения донных отложений химическим элементом в индустриальном периоде,  $EF_{preind}$  – максимальный фактор обогащения донных отложений химическим элементом в доиндустриальном периоде.



**Рис. 7. Геохимия донных отложений оз. Талкас.** Li, Al, Sr, Ca, Mo – г/т; C<sub>неорг.</sub>, C<sub>орг.</sub> – %. (условные обозначения см. рис. 6).

Выявлено максимальное обогащение халькофильными элементами осадков индустриального периода оз. Уфимское, расположенного в 7 км, от медеплавильного комбината в г. Карабаш (табл. 1.). В отличие от оз. Уфимское донные отложения оз. Сырыткуль, находящегося в 12 км от медеплавильного комбината в г. Карабаш, характеризуются меньшей степенью обогащения халькофильными элементами (рис. 8).



**Рис. 8. Факторы обогащения донных отложений индустриального периода химическими элементами – индикаторами техногенеза.**

Несмотря на то, что олово не является типоморфным элементом сульфидсодержащей антропогенной пыли для донных отложений оз. Уфимское и оз. Сырыткуль отмечены сравнительно высокие степени и факторы обогащения олова, что объясняется использованием в производственном процессе отходов (лом), обогащенных этим элементом.

**Таблица 2.** Обогащение донных отложений озер химическими элементами – индикаторами техногенеза.

<b>оз. Уфимское</b>	<b>EF<sub>preind</sub></b>	<b>EF<sub>ind</sub></b>	<b>C<sub>EF</sub></b>
<b>Co</b>	2	2	1,1
<b>Ni</b>	1	2	1,4
<b>Cu</b>	15	205	13,9
<b>Zn</b>	3	39	12,2
<b>As</b>	504	985	2,0
<b>Se</b>	117	137	1,2
<b>Cd</b>	11	280	26,5
<b>Sn</b>	<1	20	43,4
<b>Sb</b>	12	246	21,3
<b>Te</b>	75	5401	72,2
<b>Tl</b>	1	4	3,7
<b>Pb</b>	4	134	30,4
<b>Bi</b>	4	144	38,5
<b>оз. Талкас</b>	<b>EF<sub>preind</sub></b>	<b>EF<sub>ind</sub></b>	<b>C<sub>EF</sub></b>
<b>Co</b>	1	1	0,9
<b>Ni</b>	4	1	0,4
<b>Cu</b>	3	5	1,7
<b>Zn</b>	2	3	1,8
<b>As</b>	33	24	0,7
<b>Se</b>	29	24	0,8
<b>Cd</b>	3	13	4,3
<b>Sn</b>	<1	1	1,9
<b>Sb</b>	3	8	2,5
<b>Te</b>	37	142	3,8
<b>Tl</b>	0	1	2,2
<b>Pb</b>	1	4	4,5
<b>Bi</b>	1	4	4,5

Оз. Иткуль, расположенное в 20 км от никель-кобальтового завода в г. Верхний Уфалей, находится на третьем месте по величине факторов обогащения донных отложений халькофильными элементами (кроме Cu, Zn). Факторы обогащения Ni (10) и Co (3) максимальны среди всех изученных озер, что отражает специфику металлургического производства.

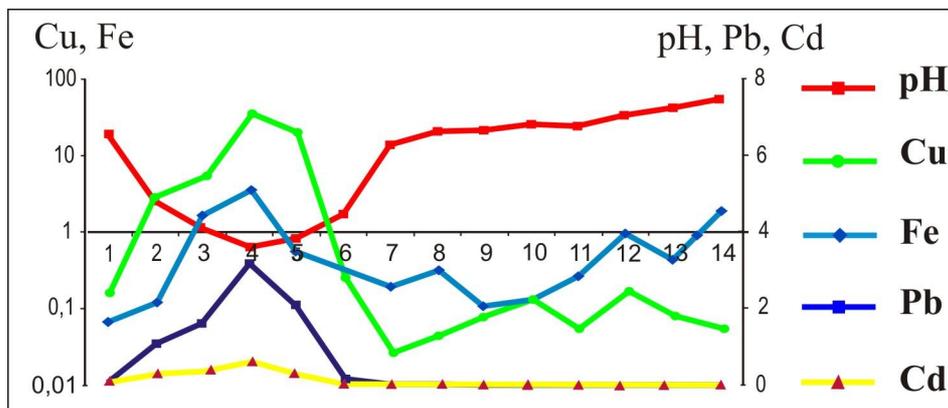
Озеро Култубан расположено в 6 км от горно-обогатительного завода в г. Сибай. Озеро находится на четвертом месте по степени обогащения донных отложений элементами индикаторами техногенеза, однако в сравнении с оз. Иткуль отличается большими значениями факторов обогащения Cu, Zn.

Наименьшее обогащение химическими элементами-индикаторами техногенеза выявлено для донных отложений оз. Талкас, расположенного вдали от возможных источников загрязнения (табл. 2).

Таким образом, для верхних слоев донных отложений всех изученных озер характерно обогащение Cu, Cd, Sb, Te, Pb, Bi. Обогащение химическими элементами

техногенной ассоциации уменьшается с увеличением расстояния от источника эмиссии. Повышение концентрации химических элементов индикаторов – техногенеза при отсутствии близкорасположенных источников загрязнения, вероятно, объясняется трансграничным переносом халькофильных элементов на изученной территории.

Исходя из результатов анализа поровых вод оз. Уфимское выявлено, что при резком уменьшении pH поровых вод донных отложений индустриального этапа, возрастает концентрация тяжелых металлов (Fe, Cu, Ni, Co, Cd, Pb) в поровых водах (рис. 9). Одновременно, уменьшается содержание тяжелых металлов в донных отложениях, что отмечено также для оз. Талкас и оз. Култубан.

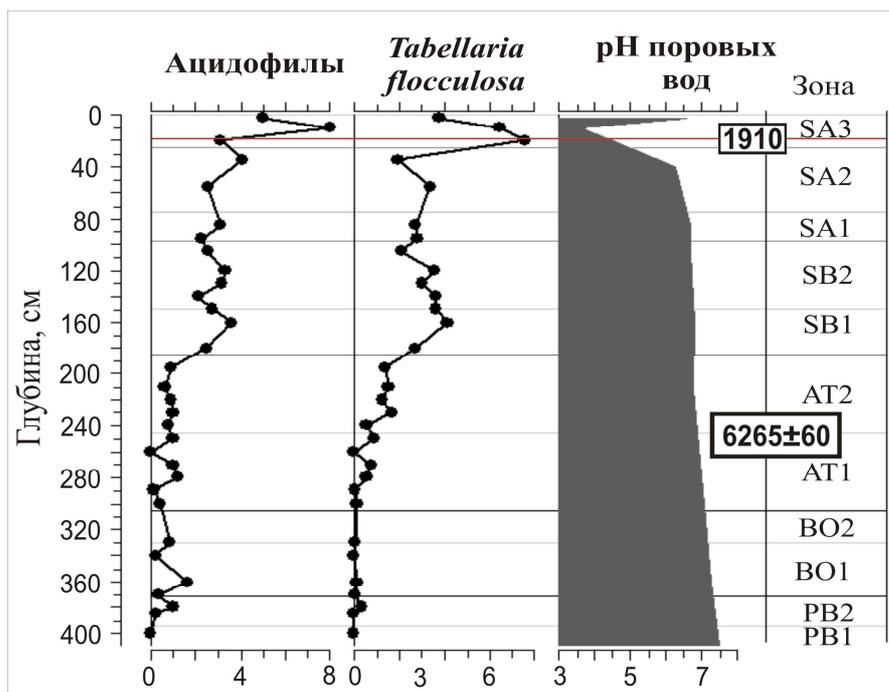


**Рис. 9.** Изменение pH и концентрации тяжелых металлов в поровых водах донных отложений индустриального периода оз. Уфимское.

Реконструкция pH по диатомовым водорослям выполнена для оз. Уфимское (минерализация 50 мг/л) и оз. Серебры (минерализация 85 мг/л), находящихся соответственно в 7 км и 5 км от Карабашского медеплавильного комбината. В донных отложениях индустриального периода оз. Уфимское и оз. Серебры pH поровых вод уменьшается с 6,67 и 5,7 до 3,62 и 3,04 соответственно. Для оценки изменения pH выделены экологические группы диатомовых водорослей: acf – ацидофилы (широкое распространение при pH<7), alf – алкалофилы (предпочитают pH>7), ind – циркумнейтралы (диффузное распространение при pH=7), alb – алкалобионты (оптимальное развитие только при pH>7) [Давыдова, 1985]. Теоретические значения pH, рассчитанные по диатомеям [Renberg, 1982; Braak, 1989], гораздо выше pH поровых вод. Они выявляют лишь общую тенденцию естественного снижения pH, уменьшаясь еще в доиндустриальном периоде.

Содержание ацидофилов (acf) для донных отложений оз. Уфимское в доиндустриальном периоде не превышает 4%, а в индустриальном периоде достигает 8%. Более высокий процент ацидофилов, характерный для индустриального периода оз. Серебры (12,6%), вероятно, связан с меньшим расстоянием озера от источника сернокислотной эмиссии. Концентрация наиболее массового вида-ацидофила *Tabellaria flocculosa* (Roth) Ktz, процент индифферентов (циркумнейтралов) и ацидофилов в изученных озерах начинает повышаться в доиндустриальном периоде (оз. Уфимское – суббореал (SB), оз. Серебры – субатлантик (SA)) (рис. 10).

Естественное закисление озер может быть объяснено уменьшением выветривания пород водосбора, выщелачиванием основных ионов, развитием растительности и почв на водосборе [Acid deposition., 1986; Velle, 2005]. К тому же, при повышении мощности залежей сапропеля уменьшается содержание кислорода и увеличивается доля неполного окисления органических веществ до гуминовых кислот, которые связывают катионы металлов и способствуют природному закислению озер. Максимальная концентрация *Tabellaria flocculosa* и ацидофилов достигается в индустриальном периоде, что соответствует изменениям значений pH поровых вод. Разнообразие видов диатомей-ацидофилов не увеличивается в индустриальном периоде, что обусловлено небольшой временной протяженностью техногенного этапа развития озер.



**Рис. 10.** Изменения величин индикаторов ацидификации оз. Уфимское. Ацидофилы в %, *Tabellaria flocculosa* – млн/г.

В донных отложениях оз. Уфимское обнаружены агрегаты кристаллов гипса, образование которого связано с воздействием большого объема эмиссий сернистого ангидрида в акваторию озера от медеплавильного

производства г. Карабаш. В донных отложениях оз. Сырыткуль обнаружены частицы сульфидов железа, меди и цинка явно техногенного происхождения.

Таким образом, для озер, непосредственно подвергающихся воздействию предприятий горнопромышленного техногенеза, кроме резкого повышения концентрации и обогащения халькофильными элементами в донных отложениях, отмечается техногенное закисление, усугубляющее естественную ацидификацию озер. Оно выражается в значительном снижении рН поровых вод, возрастании концентрации тяжелых металлов в поровых водах, достижении максимального содержания ацидофильных диатомовых водорослей и высокой концентрации *Tabellaria flocculosa*.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексных исследований донных отложений оз. Иткуль, оз. Уфимское, оз. Сырыткуль, оз. Култубан и оз. Талкас реконструированы обстановки озерного седиментогенеза и изучено отражение динамики палеоусловий голоцена в составе донных отложений. Климатическая обстановка изученной территории в голоцене неоднократно менялась. Потепление аллерада (AL) сменилось похолоданием позднего дриаса (Dr3). Наиболее четко в летописи донных отложений отражен переход от похолодания позднего дриаса к пребореальному потеплению (половецкое потепление). На фоне общего тренда потепления-увлажнения климата по данным спорово-пыльцевого и изотопного анализов донных отложений после потепления начала пребореала (PB1) выявлена пребореальная осцилляция (PB2), сменившаяся бореальным потеплением (BO1) и краткой аридизацией второй половины бореала (BO2). Голоценовый оптимум определен для конца атлантического периода (AT2). Суббореальное похолодание в степях и лесостепях Южного Урала (по оз. Талкас и оз. Култубан) выявляется как аридизация климата, что связано с лимитирующим значением фактора увлажнения в сравнении с температурным фактором для южных районов. После похолодания суббореала для южной части территории по данным изучения литологии, геохимии, минералогии, спорово-пыльцевых спектров донных отложений, отмечено чередование влажных и сухих периодов. Во всех изученных голоценовых разрезах отражена аридизация середины субатлантического периода (SA2).

Исходя из результатов изучения геохимии донных отложений выявлено, что повышение значений концентраций карбонатфильных элементов (Ca, Na, Mg, Mn, Sr,

$C_{\text{неорг.}}$ ), отношений (Sr, Ca)/(Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), литохимических модулей ЩМ, НКМ, ПМ, индекса изменения состава ICV,  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  указывает на аридизацию климата. Возрастание концентрации химических элементов терригенной ассоциации (Li, Rb, Cs, Be, Hf, Al), индексов CIA, CIW, отношений  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ , La/V, Zr/TiO<sub>2</sub> свидетельствует о гумидизации климата.

Исходя из результатов диатомового анализа, выявлены стадии развития озер, соответствующие пыльцевым зонам. Определено, что донные отложения, накопленные в разные стадии развития, отличаются по литологическим, геохимическим, минералогическим признакам. Донные отложения разновозрастных озер, накопленные в одни и те же стадии развития, характеризуются комплексом признаков, связанных с формированием сходных условий озерного седиментогенеза. Так, например, накопление карбонатфильных элементов и кальцита в начале озерного седиментогенеза может быть связано с насыщенностью водной толщи карбонатами в условиях мелководного водоема, поступлением в озеро слабо переработанного процессами выветривания материала из прилегающей к озеру местности. Накопление Mo, U в торфянистом сапропеле стадии зарастания водоема связано с образованием сорбционно-восстановительного геохимического барьера. Возрастание содержания химических элементов и минералов терригенного сноса на стадии обводнения объясняется формированием берегов озера в процессе увеличения его глубины.

Индустриальному периоду соответствует верхняя часть колонки донных отложений озер мощностью 18–38 см. На основе расчета факторов обогащения химических элементов, характеризующихся возрастанием концентрации в донных отложениях индустриального этапа развития водоемов (Co, Ni, халькофильные элементы) выявлена группа элементов индикаторов техногенеза для изученной территории (Te, Cd, Sb, Cu, Bi, Pb) и определено, максимальное обогащение халькофильными элементами верхних слоев донных отложений оз. Уфимское и минимальное – Талкас. Выявлено, что обогащение химическими элементами техногенной ассоциации имеет прямую зависимость от близости расположения источника эмиссии. Повышение концентрации химических элементов индикаторов-техногенеза при отсутствии близкорасположенных источников загрязнения, указывает на наличие трансграничного или «уральского» переноса элементов техногенной ассоциации. По изменению состава диатомовых комплексов, pH поровых вод, колебаниям концентраций Fe, Cu, Ni, Co, Cd, Pb в системе поровые воды – донные отложения определено наличие техногенной ацидификации для озер, характеризующихся относительно низкой нейтрализационной емкостью и расположенных в непосредственной близости от медеплавильного завода г. Карабаш (оз. Уфимское, оз. Серебры).

Таким образом, антропогенная деятельность за последнюю сотню лет наложила на донные отложения отпечаток не меньший, чем длительные, тысячелетние природные процессы.