

На правах рукописи



СОЛОТЧИН Павел Анатольевич

**ЛИТОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ЛЕТОПИСИ ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР СИБИРСКОГО РЕГИОНА КАК ОСНОВА
ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ**

1.6.21- геозкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК-2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Савенко Виталий Савельевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Субетто Дмитрий Александрович,

доктор географических наук, декан факультета географии, заведующий кафедрой физической географии и природопользования Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург

Борзенко Светлана Владимировна

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэкологии и гидрогеохимии, главный научный сотрудник Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет», г. Барнаул

Защита диссертации состоится 21 июня 2023 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН)

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а
e-mail: amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, адрес сайта: <http://www.igc.irk.ru/ru/nauka/dissertatsionnyj-sovet>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.х.н.



А.А. Амосова

Введение

Актуальность работы диктуется, во-первых, недостаточной изученностью процессов формирования минерального вещества в природных низкотемпературных условиях, во-вторых, растущей нестабильностью климата на планете, его катастрофическими аномалиями, дискуссионностью роли антропогенного фактора и, как следствие, значительной неопределенностью климатических прогнозов. На крупнейших международных форумах, таких как Парижская конференция COP21 (2015 г.); климатические саммиты COP23 (Бонн, 2017 г.) и COP26 (Глазго, 2021 г.) изменения климата на планете – фактические и ожидаемые – и адаптация к ним условий жизни населения были обозначены как приоритетные проблемы современности. В этой связи особое значение приобретают исследования климата недавнего прошлого Земли, поскольку именно обстановки голоцена-верхнего плейстоцена могут рассматриваться как близкие аналоги современности и/или как потенциальные аналоги климата будущего. Естественными архивами, в которых зафиксирована история развития природно-климатических обстановок со времени окончания последнего ледникового максимума, являются донные отложения озер. На ведущую роль климатического фактора в формировании континентальных субаквальных отложений неоднократно указывал в своих работах стоявший у истоков теории литогенеза академик Н.М. Страхов (Страхов и др., 1954; Страхов, 1960-1962). Несомненная важность проблемы требует привлечения новых объектов и методов исследований.

Внутриконтинентальная Азия, значительную часть которой занимает Сибирский регион, оказывает заметное влияние на характер глобального климата. Этот обширный, местами глубоко расчлененный массив суши играет важную роль в распределении и перераспределении атмосферной циркуляции на территории всего северного полушария планеты. При этом, если палеогеографическая и палеоклиматическая изученность западных районов нашей страны сравнительно велика (Хотинский, 1977, Палеогеография Европы..., 1982; Величко, 1989, 2012, Субетто, 2009 и другие авторы), то Сибирь во многом продолжает оставаться "terra incognita". Тому существуют объективные причины, прежде всего - слабая освоенность огромной территории и труднодоступность удаленных районов. Создание единой модели эволюции климата Сибири остается делом будущего, из-за очевидного недостатка детальных палеоклиматических записей.

В результате бурения донных отложений озера Байкал в 1993-1999 гг. была получена уникальная непрерывная осадочная летопись изменений климата и природной среды Центральной Азии длительностью 8 миллионов лет (30 лет программе..., 2020). Изучение байкальского разреза продолжается, и он, без сомнения, является опорным при проведении любых палеоклиматических исследований в Сибирском регионе. Вместе с тем остается целый ряд вопросов, для ответа на которые необходимо привлечь значительно большее количество объектов и получить записи более высокого разрешения. Такими объектами в мировой практике считаются позднечетвертичные донные отложения малых озер различной минерализации (Lider, 1976; Hammer, 1986; Smoot, Lowenstein, 1991; Last, 1990, 2002; Last, Ginn, 2005; Deocampo, 2010 и др.). Подобные бассейны в силу небольших размеров и глубины менее консервативны в сравнении с крупными водоемами, и отчетливо реагируют на короткопериодические изменения климата и химического состава озерных вод.

Подавляющее большинство современных исследований осадков малых озер Сибири основываются главным образом на данных палинологического, диатомового, изотопного анализов, биогеохимии, распределении макро- и микроэлементов в разрезах (Дзюба и др., 1999; Безрукова и др., 2005, 2008, 2017; Солоноватые и соленые озера..., 2009; Tarasov et al., 2009; Базарова и др., 2011; Леонова, Бобров, 2012; Решетова и др., 2013; Страховенко и др., 2014, 2019; Хазин и др., 2016; и другие), в то время как литолого-минералогический аспект зачастую остается за скобками. Между тем, озерный

седиментогенез обладает рядом характерных черт, главной из которых является богатство аллотигенных и, особенно, аутигенных минеральных фаз, могущих отложиться за короткое время в сравнительно небольшом бассейне. Как постулировалось еще в работах В.И. Вернадского (1923) и А.Е. Ферсмана (1934) и было неопровержимо доказано более поздними исследованиями, существует прямая связь структурных и кристаллохимических особенностей минералов с физико-химическими и природно-климатическими условиями их образования и преобразования. Таким образом, состав парагенетических ассоциаций, последовательность их образования в разрезах озерных отложений и, в особенности, структурные характеристики отдельных минеральных фаз могут служить надежными источниками региональной палеоклиматической информации, что и определяет актуальность представленного исследования.

Цель и задачи исследования

Цель работы – комплексное изучение вещественного состава позднечетвертичных донных отложений озер Сибири, установление факторов и закономерностей их формирования и решение на этой основе задач, связанных с реконструкциями региональных климатических обстановок в голоцене и плейстоцене.

Задачи исследования:

1. Изучение литолого-минералогических особенностей позднечетвертичных осадков озер различной минерализации, расположенных на территории Восточной и Западной Сибири комплексом традиционных и современных (в т.ч. авторских) аналитических методов.

2. Выявление специфических парагенетических ассоциаций аллотигенных и аутигенных минералов в датированных осадочных разрезах.

3. Установление закономерности смены одних ассоциаций другими в зависимости от изменения природно-климатических обстановок Сибири в голоцене и позднем плейстоцене.

4. Обоснование высокой информативности структурно-кристаллохимических характеристик ряда минералов – индикаторов природных обстановок для проведения палеоклиматических реконструкций.

5. Построение на основе выполненных исследований детальных летописей позднечетвертично-голоценового климата для ряда районов Сибири.

Объект исследований – позднечетвертичные донные отложения озер различной минерализации, приуроченных к разным ландшафтно-климатическим областям на территории Восточной и Западной Сибири.

Фактический материал и методы исследований

Материалом для исследований послужили образцы донных отложений 25 озер Восточной и Западной Сибири, полученные автором лично в экспедиционных поездках с 2000 по 2021 гг. и предоставленные сотрудниками Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск), Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Собранный и проанализированный при выполнении работы база данных включает результаты изучения более полутора тысяч образцов. Большая их часть – около 1200 проб – отобрана из донных осадков озер Байкальского региона, включая уникальные керны глубоководных отложений оз. Байкал и Хубсугул, полученные в рамках международных программ «Baikal-Novsgol Drilling Projects». Также изучено более 300 образцов осадков озер Западной Сибири и Восточного Саяна. По мере необходимости изучался минеральный состав горных пород водосборов. Методом математического моделирования рентгеновских дифракционных профилей карбонатных и глинистых минералов проанализировано более 500 образцов донных отложений.

Работа выполнялась в соответствии с планами НИР по проектам «Пространственно-временные закономерности изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Северной Азии» и «Осадконакопление, стратиграфия, палеогеография и

реконструкции разномасштабных пространственно-временных изменений глобального климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири для регионального экологического прогноза» в рамках Приоритетного направления IX.127. «Динамика и механизмы изменения ландшафтов, климата и биосферы в кайнозое. История четвертичного периода». Исследования по теме диссертации в разные годы выполнялись при реализации Программы Президиума РАН №4-9 «Отклик ландшафтно-климатических систем Восточной Сибири на изменения атмосферной циркуляции: связь с процессами опустынивания в позднем кайнозое (по материалам озерных и торфяных отложений)», а также Междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН №38 «Минеральные озера Центральной Азии – архив палеоклиматических летописей высокого разрешения и возобновляемая жидкая руда», №120 «Коэволюция климата, природной среды и человека в плейстоцене и голоцене Сибири», №52-53 «Эволюция природной среды и климата в четвертичном периоде Сибири, реконструируемая на основе синтеза геологических, археологических, дендроклиматических данных, ее влияние на развитие человека, его культуру и региональный прогноз природно-климатических изменений на ближайшее будущее» и ряда других программ.

Литолого-минералогическое изучение образцов проводилось комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, сканирующую электронную микроскопию. Максимальная результативность XRD анализа обеспечивалась применением оригинальных авторских методов математической обработки рентгеновских дифракционных профилей аутигенных карбонатов и слоистых силикатов. Для определения макро- и микроэлементного состава осадков выполнялись рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) и рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении (РФА СИ). Для верхних горизонтов разрезов датирование выполнено гамма-спектрометрией по ^{210}Pb . Анализ стабильных изотопов кислорода ^{18}O и углерода ^{13}C в карбонатах осуществлен методом масс-спектрометрии. Основная часть аналитических работ выполнена в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. При проведении палеоклиматических реконструкций привлекались данные палинологического и диатомового анализов, выполненные специалистами ИГХ СО РАН и ИЗК СО РАН. Датирование отложений проводилось радиоуглеродным методом (^{14}C) по карбонатному и органическому веществу (AMS) в ЦКП «Геохронология кайнозоя» СО РАН и зарубежных радиоуглеродных лабораториях.

Защищаемые положения

1. Позднеплейстоцен-голоценовые донные осадки озер Сибирского региона сложены преимущественно пелитовым и алевритовым материалом, имеющим полигенетический характер. Природно-климатические обстановки седиментации приводят к активному образованию в отложениях солоноватых и соленых озер аутигенных карбонатов кальцит-доломитового ряда, обладающих высокой степенью структурного изоморфизма.

2. Минералого-кристаллохимические особенности хемогенных карбонатов ряда «кальцит-доломит» осадков минеральных озер являются надежными индикаторами изменений регионального климата. Математическое моделирование их XRD профилей позволило выявить прямую зависимость содержания MgCO_3 в структуре минералов от природно-климатических условий: влажный климат ведет к осаждению низко-Mg кальцитов (истинных твердых растворов с содержанием $\text{MgCO}_3 < 18$ мол.%), аридизация – к осаждению высоко-Mg кальцитов («доменных» кристаллов с 18-43 мол.% MgCO_3).

3. В осадках пресноводных озер с отсутствующей или незначительной карбонатной седиментацией роль минералов-индикаторов палеоклиматических изменений принадлежит слоистым силикатам, ассоциации, состав, структура которых отражают физико-химические обстановки выветривания, переноса и осаждения вещества, что

позволяет восстанавливать ландшафтно-палеогеографические и палеоклиматические условия, в которых осуществлялись процессы осадкообразования.

4. Основными тенденциями эволюции климата позднего плейстоцена и голоцена Байкальского региона и юга Западной Сибири являются: чередование относительно холодных и теплых стадий в позднеледниковое время, господство влажных обстановок в бореальный период, значительные локальные вариации температуры и влажности в атлантическое время, похолодание и иссушение климата суббореального и первой половины субатлантического периодов, рост влажности во второй половине субатлантического периода.

Научная новизна

1. Впервые для ряда ранее не изучавшихся озер Восточной и Западной Сибири выполнено литологическое описание голоцен-позднеплейстоценовых донных отложений, определен их гранулометрический и минеральный составы, построены распределения в разрезах терригенных и аутигенных минералов, некоторых макро- и микроэлементов, а также стабильных изотопов кислорода и углерода.

2. Впервые проведен детальный минералогический анализ отдельных компонентов осадков, прежде всего аутигенных, установлены их структурные и кристаллохимические характеристики, могущие служить основой для реконструкции физико-химических и природно-климатических обстановок их образования и преобразования.

3. При участии автора разработан и успешно применен уникальный современный метод математического моделирования рентгеновских дифракционных профилей карбонатов и слоистых силикатов. Модельный подход позволяет проводить дифференциальную диагностику отдельных минеральных фаз, определять положение, интегральную интенсивность аналитического пика каждой фазы, получать количественные соотношения минералов в образце и их распределение в разрезе, обусловленное сменой обстановок осадконакопления в водоеме. Данный метод не имеет аналогов в мировой практике.

4. На основании проведенных литолого-минералогических исследований, дополненных результатами геохимических, палинологических и других видов анализов впервые для ряда озер Сибирского региона воссоздана история их эволюции и получены детальные летописи региональных климатических событий на протяжении голоцена и позднего плейстоцена.

Научная и практическая значимость исследований

Изучение континентального седиментогенеза, представляющего собой совокупность многофакторных процессов, протекающих на континентах в различных природных обстановках и приводящих к формированию разнообразных по составу и строению осадочных толщ, является фундаментальной научной задачей. Как подчеркивал в своих трудах академик Н.М. Страхов «представления геологов о древнем литогенезе на каждой данной ступени развития литологии определялись, в конце концов, суммой знаний о современном осадконакоплении» (Страхов, 1971, стр. 576). Этот постулат обуславливает высокую значимость изучения молодых озерных осадков, уже попавших в конечные водоемы стока, но не затронутых процессами литификации.

Конкретным результатом, полученным в рамках целей и задач настоящего исследования, является обоснование высокой информативности литолого-минералогических данных о составе и строении позднечетвертичных осадочных разрезов озер Сибири для создания палеоклиматических реконструкций. Наглядной иллюстрацией этого служат приведенные в работе детальные летописи эволюции ряда озерных бассейнов под влиянием меняющихся региональных природно-климатических обстановок в голоцене и позднем плейстоцене. Другим важным аспектом работы стало успешное применение разработанного при участии автора современного метода математического моделирования сложных XRD профилей карбонатов и слоистых силикатов, как компонентов, наиболее чувствительных к изменениям обстановок седиментации. Судя по

публикациям в отечественной и зарубежной научной литературе, в настоящее время это единственный метод, позволяющий надежно идентифицировать индивидуальные минеральные фазы, проводить их кристаллохимическую типизацию, устанавливать количественные соотношения между ними в отложениях различного генезиса. Наконец, литолого-минералогические исследования донных осадков озер могут послужить основой для определения современного состояния природной среды Сибири, прогнозирования вероятных тенденций региональных климатических изменений и оценки роли в них антропогенного фактора.

Личный вклад автора:

Представленная диссертационная работа основывается на результатах исследований, проведенных автором лично или при его непосредственном участии. Для ряда озерных бассейнов автором был осуществлен полный цикл изучения донных отложений: получение кернового материала в ходе экспедиционных поездок, его литологическое описание, отбор образцов на различные виды анализов, аналитические работы, обобщение полученных данных и проведение палеоклиматических реконструкций. Как один из исполнителей международных программ «Baikal Drilling Project» и «Novsgol Drilling Project» автор принимал участие в первичном описании и дальнейшем изучении кернов глубоководного бурения озер Байкал и Хубсугул, результатом которых стала серия статей в отечественных и зарубежных журналах и монография. Диссертант собственноручно выполнил большой объем аналитических исследований (включая пробоподготовку) методами лазерной гранулометрии, рентгеновской дифрактометрии, рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения, сканирующей электронной микроскопии. Отдельно следует отметить участие в разработке метода математического моделирования XRD профилей карбонатов и слоистых силикатов в многокомпонентных системах; большинство приведенных в работе моделей построены автором лично.

Апробация работы

Основные положения диссертации приведены в 88 публикациях, в том числе 39 статьях в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, 1 коллективной монографии, а также 48 сборниках трудов международных и российских совещаний.

Результаты исследований докладывались на конференциях и симпозиумах различного уровня, таких как: III International Conference «Environmental Change in Central Asia» (Ulaanbaatar, 2005); IV Международный семинар «Теория, история, философия и практика минералогии» (Сыктывкар, 2006); VI International Symposium «Terrestrial Environmental Changes in East Eurasia and Adjacent Areas» (Irkutsk, 2007); VI International Symposium on Environmental Changes in East Eurasia and Adjacent Areas – High resolution records of terrestrial sediments (Ulaanbaatar, 2008); VI Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода (Новосибирск, 2009); 5th Vereshchagin Baikal Conference (Irkutsk, 2010); XVII International Conference «Crystal Chemistry, X-ray Diffraction & Spectroscopy of Minerals - 2011» (Saint Petersburg, 2011); Всероссийское совещание «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2012); III International Conference «Crystallogenes and Mineralogy» (Novosibirsk, 2013); I - V Международных конференциях «Палеолимнология Северной Евразии» (Петрозаводск, 2014; Якутск, 2016; Казань, 2018; Иркутск, 2021; Санкт-Петербург, 2022); VIII Всероссийское литологическое совещание (Москва, 2015); Минералогические семинары с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии» (Сыктывкар, 2016, 2018); 14th International Workshop «Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia» (Novosibirsk, 2017); I международная конференция «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» (Петрозаводск, 2017); V Всероссийская научно-практическая конференция «Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии» (Улан-Удэ, 2018); IV Российское совещание по глинам и глинистым минералам «Глины-2019» (Москва, 2019); XVIII и XIX Всероссийские совещания «Геодинамическая

эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)» (Иркутск, 2020, 2021); I Всероссийская конференция «Добрецовские чтения: наука из первых рук» (Новосибирск, 2022) и многих других.

Исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований, гранты №16-05-00244 «Голоценовая седиментация в малых минеральных озерах Сибирского региона: роль климатического фактора» и №19-05-00219 «Донные отложения малых озер Сибири: вещественный состав, факторы и процессы их формирования от плейстоцена до современности», где автор являлся руководителем проектов и ряд других проектов (5), в которых автор был исполнителем.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 237 страниц, включая 107 рисунков и 27 таблиц. Список литературы насчитывает 316 наименования.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность академику РАН М.И. Кузьмину и члену-корреспонденту РАН Е.В. Склярору за содействие на различных этапах выполнения работы, предоставленные материалы и совместные публикации. Автор искренне благодарен за всестороннюю помощь при выполнении работы, творческое сотрудничество, ценные советы и критические замечания д.г.-м.н. Э.П. Солотчиной, д.г.н. Е.В. Безруковой, д.г.-м.н. В.Д. Страховенко, д.г.-м.н. Г.А. Леоновой, д.г.-м.н. В.С. Зыкину, д.г.-м.н. С.К. Кривоногову, к.г.-м.н. А.Е. Мальцеву, к.г.-м.н. А.Н. Ждановой, н.с. И.В. Даниленко, н.с. Л.В. Мирошниченко. Благодарю вед. инженера Т.Т. Арманчеву за помощь в проведении экспериментальных работ.

Основное содержание работы

Во **введении** раскрывается актуальность темы диссертационной работы, обосновывается выбор позднечетвертичных донных осадков озер, как перспективных объектов для палеоклиматических реконструкций. Определяется цель, ставятся задачи исследований, формулируются положения, выносимые на защиту. Раскрывается новизна, научная и практическая значимость выполненной работы. Дается краткая информация о фактическом материале, основных методах исследований и научной апробации результатов. Демонстрируется личный вклад автора, приводится структура диссертации.

Глава 1. Озерный седиментогенез в Сибири: состояние изученности

Озера являются наиболее распространенным типом конечных бассейнов стока, расположенных в областях устойчивой континентальной аккумуляции. Современные исследования донных осадков озер ведутся по трем основным направлениям: 1) решение фундаментальных вопросов литологии и седиментологии на основе сравнительно-литологического принципа; 2) поиски и разведка полезных ископаемых; 3) региональные палеоклиматические реконструкции, поскольку климат является ведущим фактором озерного седиментогенеза. Именно с позиций последнего направления в работе рассматриваются позднеплейстоцен-голоценовые отложения озерных бассейнов Сибири.

В настоящее время нет точных данных о количестве озер Сибирского региона; различные источники оперируют цифрами в десятки тысяч водоемов в Восточной и сотни тысяч (до 1 млн.) – в Западной Сибири. Озероведческие исследования здесь всегда осложнялись удаленностью и труднодоступностью малоосвоенных территорий региона. Тем не менее, изучение озер Сибири с научных позиций продолжается уже более полутора столетий, а его история включает ряд закономерных этапов: от простого описания географического положения водоемов в ходе первых немногочисленных экспедиций до детальных исследований вод, биоты и донных осадков бассейнов с помощью новейших аналитических методик в наши дни. Отложениями сибирских озер в

разное время занимались такие ученые, как В.А. Обручев, А.Г. Франк-Каменецкий, А.И. Дзенс-Литовский, Н.М. Страхов, Л.Л. Россолимо, Н.В. Кордэ, А.В. Шнитников и многие другие. Особо следует отметить исследования крупнейшего пресноводного бассейна на континенте – озера Байкал, которые начались с работ А.Л. Чекановского, И.Д. Черского, Б.И. Дыбовского, а в XX столетии связаны с именами Г.Ю. Верещагина, Г.И. Галазия, Н.А. Флоренсова, М.А. Грачева и других ученых. Большим шагом вперед в изучении Байкала и озерной седиментации в Сибири в целом стала реализация международного проекта «Байкал-бурение» под руководством акад. М.И. Кузьмина, позволившего получить опорные континентальные разрезы протяженностью вплоть до 8 млн. лет и провести палеоклиматические реконструкции в диапазоне от плиоцена до современности. Вместе с тем многочисленные малые озера Сибирского региона долгое время оставались на периферии внимания специалистов. Однако изучение именно этих объектов в ряде случаев может дать гораздо более эффективные результаты по сравнению с исследованиями крупных глубоководных бассейнов, поскольку они менее консервативны и отчетливо реагируют на короткопериодические флуктуации окружающей среды, а именно, на изменения региональных и локальных природно-климатических обстановок и геохимической специфики озерных вод.

Анализируя публикации последних двух десятилетий, так или иначе посвященных проблеме изучения озер Сибири, нельзя не отметить, что большинство из них сконцентрировано на палинологических, биостратиграфических и экологических исследованиях, а также элементном и изотопном анализе отложений. В то же время число работ, где рассматриваются собственно процессы седиментации и минеральный состав донных осадков сибирских озер, сравнительно невелико. Между тем, седиментация в малых озерах обладает рядом характерных черт, в частности, богатством новообразованных минеральных фаз, могущих отложиться за короткое время в небольшом по площади и глубине бассейне. Формирование минералов *in situ* является важной частью геохимического цикла, а структурные и кристаллохимические особенности продуктов аутигенного минералообразования представляют собой надежные индикаторы климатических обстановок, в которых этот процесс протекает. Таким образом, изучение литолого-минералогических особенностей озерных отложений с применением комплекса непрерывно совершенствующихся методов исследований минералов и их ассоциаций, и выполнение на этой основе палеоклиматических реконструкций является актуальной научной задачей, при этом в настоящее время наблюдается острый недостаток подобных работ.

В разделе «Краткая типизация озер» приводятся общие сведения об основных типах озерных бассейнов, которые представляются важными для решения поставленных в работе задач. Наиболее значимыми характеристическими признаками, на основании которых производится типизация озер, являются: морфометрические показатели бассейна, минерализация вод, постоянство существования, характер водообмена. Необходимо подчеркнуть, что территория Сибири чрезвычайно велика и обладает огромным ландшафтным разнообразием, поэтому здесь можно встретить озера любого типа, вне зависимости от того, идет речь о площади, глубине, минерализации или трофности. При этом климат является ведущим фактором природной среды, оказывающим первостепенное влияние на характер и количество озер в регионе.

Глава 2. Методы исследований озерных осадков

Полигенетический характер озерных отложений, в большинстве случаев представляющих собой сложную смесь терригенных, хемогенных и биогенных компонентов, разнообразие продуктов аутигенного минералообразования, многофакторное воздействие на них окружающей природной среды и климата требуют привлечения широкого комплекса традиционных и современных методов изучения вещества осадков. Исходя из поставленных в работе задач, этот комплексный подход

должен: (1) дать исчерпывающее представление о составе, структуре и генезисе изучаемых отложений; (2) раскрыть роль различных факторов седиментогенеза, обуславливающих формирование тех или иных типов осадков; (3) выявить основные индикаторы природных обстановок осадконакопления для выполнения реконструкций позднечетвертичного климата в Сибирском регионе.

Аналитические методы. Для всестороннего исследования вещественного состава терригенной и аутигенной компонент озерных осадков использовались методы гранулометрического, минералогического и элементного анализов. Изучение гранулометрического состава, позволяющее классифицировать отложения по соотношению основных фракций (пелит, алеврит, песок), проводилось на лазерном микроанализаторе ANALYSETTE 22 MicroTec. Ведущая роль в определении фазового состава отложений, кристаллохимической типизации, изучении особенностей реальной структуры дисперсных, большей частью плохо окристаллизованных минеральных фаз осадков отводилось порошковой рентгеновской дифрактометрии (XRD) и инфракрасной спектроскопии. Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометрах ARL X'TRA, ДРОН-4 и ДРОН-8 (излучение CuK_α). ИК-спектроскопия проводилась на спектрофотометре Specord 75 JR и Фурье-спектрометре VERTEX 70 FT I. Морфология частиц и состав аутигенной составляющей ряда образцов изучались в сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU. Для выявления элементного состава донных осадков применялись методы рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр ARL-9900-XP), атомно-абсорбционной спектрометрии (спектрометр Solaar M6) и рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (ускоритель ВЭПП-3, Институт ядерной физики СО РАН). Анализ распределения стабильных изотопов кислорода и углерода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$) в карбонатсодержащих отложениях осуществлялся с помощью метода масс-спектрометрии (масс-спектрометр Finnigan MAT 253). Определение возраста осадков проводилось методом радиоуглеродного (^{14}C) датирования по карбонатному и органическому веществу (AMS) в радиоуглеродной лаборатории ЦКП «Геохронология кайнозоя» СО РАН и ряде зарубежных лабораторий. Для верхних горизонтов разрезов некоторых озер было также выполнено датирование гамма-спектрометрическим методом по неравновесному ^{210}Pb . С целью уточнения и детализации палеоклиматических реконструкций использовались данные палинологического и диатомового анализов.

Методы моделирования рентгеновских дифракционных профилей. При непосредственном участии автора были разработаны уникальные методы математического моделирования сложных XRD профилей минералов в многокомпонентных системах. Эти методы были использованы в работе для дифференциальной диагностики, анализа природных ассоциаций, реальной структуры и кристаллохимических характеристик хомогенных карбонатов (солончатые и соленые озера) и слоистых силикатов (пресные озера) поскольку именно они наиболее активно реагируют на изменения обстановок седиментации.

Современные представления о минералогии и кристаллохимии озерных низкотемпературных карбонатов. Карбонатные минералы характеризуются широким спектром изоморфизма в кристаллической решетке, наличием полиморфных модификаций, существенными вариациями степени порядка/беспорядка в структуре и в этой связи относятся к числу наиболее перспективных объектов для изучения геологического прошлого (Reeder, 1983). В донных осадках озер различной минерализации встречаются преимущественно тригональные разновидности карбонатов: кальцит CaCO_3 , Mg-кальциты разной степени магнезиальности $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$ и Ca-избыточные доломиты $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$, присутствует арагонит (ромбическая модификация CaCO_3), эпизодически появляются моногидрокарбонат $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и родохрозит MnCO_3 (Солотчина, Солотчин, 2014). В единичных случаях присутствуют иные карбонаты – сидерит, гидромагнезит и др. Предлагаемый в работе подход к палеоклиматическим

реконструкциям базируется на детальном изучении минералого-кристаллохимических характеристик и количественных соотношений таких широко представленных в озерных разрезах и чрезвычайно изменчивых карбонатных минералов, как Mg-кальциты и Ca-избыточные доломиты.

По химическому составу, положению основных аналитических пиков на рентгенограммах и полос поглощения в ИК-спектрах Mg-кальциты располагаются между кальцитом и доломитом (рис. 1).

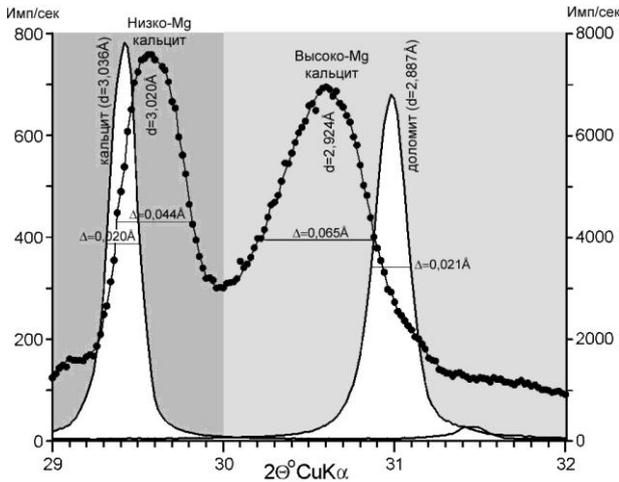


Рис. 1. XRD профили стехиометрических и разупорядоченных тригональных безводных карбонатов кальцит-доломитового ряда.

В структуре кальцита (CaCO_3) заселенные кальцием слои чередуются вдоль оси c с карбонатными слоями, в структуре же доломита ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) катионы Mg замещают катионы Ca строго в каждом втором слое. В случае Mg-кальцитов Ca и Mg беспорядочно распределены по катионным позициям, т.е. они являются твердыми растворами. Из значительного различия ионных радиусов Mg^{2+} ($0,72\text{\AA}$) и Ca^{2+} ($1,00\text{\AA}$) следует, что твердые растворы системы $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ должны существовать лишь в ограниченном интервале содержания в них магнезия, иначе их кристаллическая решетка утрачивает стабильность. Тем не менее, Mg-кальциты широко распространены в природе и содержание MgCO_3 в них может достигать 43 мол.% без признаков доломитового упорядочения. Это объясняется тем, что, по современным представлениям, магнезиальные кальциты представляют собой смешанные кристаллы ряда кальцит–доломит без постоянного химического состава (Navrotsky, Carobianco, 1987; Deelman, 2011). При низких содержаниях магнезия ($\text{MgCO}_3 < 18$ мол.%) они являются истинными твердыми растворами (рис. 2, а). В остальных случаях это смешанные «доменные» кристаллы, в которых кальцитовые и магнезитовые слои чередуются с разной степенью порядка, образуя домены нанометрической размерности (рис. 2, б).

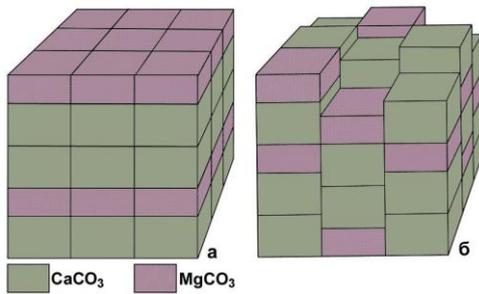


Рис. 2. Две различные модели структуры Mg-кальцитов: а – неупорядоченное чередование гомогенных кальцитовых и магнезитовых слоев; б – «доменная» структура.

Что же касается Ca-избыточного доломита, то по своим структурным характеристикам он ближе к высоко-Mg кальцитам, нежели к собственно доломиту, в котором отношение Mg- и Ca-слоев равно 1:1 (Drits et al., 2005). Этот минерал, по сути, является крайним членом ряда описанных выше Ca-Mg безводных карбонатов и имеет генезис, отличный от стехиометрического доломита (Deelman, 2011).

Метод моделирования XRD профилей карбонатов. На XRD спектрах озерных осадков магнезиальные кальциты диагностируются по наиболее интенсивным аналитическим линиям $hkl=104$ в области углов $28,5\text{-}32,5^\circ 2\theta \text{ CuK}\alpha$, а значения межплоскостных расстояний d_{104} служат мерой их магнезиальности (рис. 1). Для детального описания этих минералов среди них удобно выделить три группы по величине d_{104} : 1) низкомагнезиальные кальциты с содержанием MgCO_3 в структуре $< 4\text{-}5$ мол.% ($3,036\text{\AA} > d_{104} > 3,02\text{\AA}$); 2) промежуточные магнезиальные кальциты с $5\text{-}18$ мол.% MgCO_3 в

структуре ($3,02\text{\AA} > d_{104} > 2,98\text{\AA}$); 3) высокомагнезиальные кальциты с содержанием 18-43 мол.% MgCO_3 ($2,98\text{\AA} > d_{104} > 2,90\text{\AA}$). Са-избыточные доломиты, в структуре которых избыток CaCO_3 может достигать 7 мол.% по отношению к доломиту *sensu stricto*, характеризуются значениями d_{104} от $2,90\text{\AA}$ до $2,887\text{\AA}$. На рентгенограммах изученных образцов, записанных с высоким разрешением, 104-пики карбонатных минералов, как правило, формируются в виде двух максимумов сложной формы и переменной интенсивности: 1) низкомагнезиальных и промежуточных кальцитов и 2) высокомагнезиальных кальцитов и Са-избыточных доломитов (рис. 3).

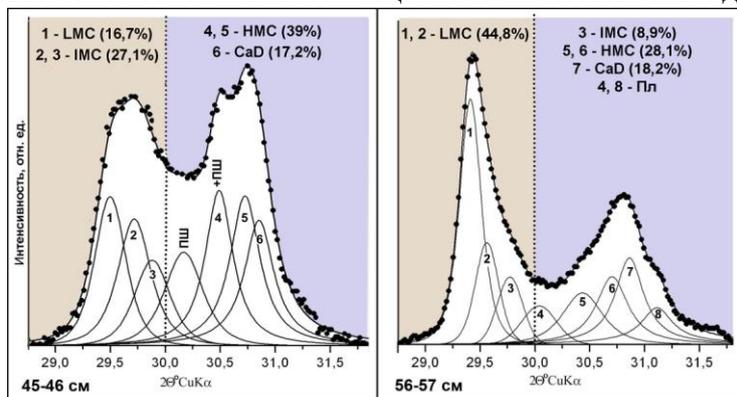


Рис. 3. Результаты моделирования экспериментальных XRD профилей карбонатов осадков оз. Сульфатное (Западное Забайкалье) в области d_{104} пиков. LMC – низко-Mg кальциты, IMC – промежуточные Mg-кальциты, HMC – высоко-Mg кальциты, CaD – Са-избыточные доломиты, Пш – полевые шпаты, Пл – плагиоклаз.

Дифференциальная диагностика присутствующих в образцах Mg-кальцитов и Са-доломитов выполнялась авторским методом математического моделирования XRD профилей, снятых с высоким разрешением в интервале углов от 29 до 32° (2Θ CuK α). Метод заключается в разложении расширенных дифракционных максимумов, имеющих сложную конфигурацию и представляющих собой суперпозицию нескольких пиков карбонатных фаз с различным содержанием Mg в структуре, на индивидуальные пики с помощью функции Пирсона VII, имеющей следующий вид:

$$P(2\Theta) = 2 \left(\frac{2^{1/m} - 1^{1/2}}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \frac{\gamma(m)}{\gamma(m-1/2)} \cdot \frac{1}{H} \cdot \left[1 + 4 \frac{(2\Theta - 2\Theta_0)^2}{H^2} \cdot (2^{1/m} - 1) \right]^{-m},$$

где γ – гамма-функция, H – полуширина линии, $2\Theta_0$ – положение максимума линии, m – параметр формы.

Данная функция универсальна, она включает в себя как частные случаи функции Коши, Лоренца, Гаусса и применяется в рентгеноструктурном анализе для адекватного описания профилей порошковых дифракционных линий. Переменными (моделируемыми параметрами) являются интенсивность линии, ее полуширина и параметр формы. Таким образом устанавливались положение максимума, интегральная интенсивность аналитического 104-пика каждой карбонатной фазы и их количественные соотношения (рис. 3). Определение содержания MgCO_3 в каждой из фаз проводилось по калибровочным графикам зависимости величины d_{104} от содержания мол.% MgCO_3 (Goldsmith, Graf, 1958; Deelman, 2011). Первое применение модельного подхода к изучению донных отложений минеральных озер Прибайкалья показало, что аридизация климата, сопровождающаяся падением уровня вод, приводит к осаждению серии высокомагнезиальных кальцитов и Са-доломитов, в то время как теплый и влажный климат способствует формированию низкомагнезиальных и промежуточных Mg-кальцитов (Солотчина и др., 2008, 2011; Скляр и др., 2010). Дальнейшие исследования на материале других минеральных озер подтвердили существование указанной закономерности.

Модельный подход к анализу кристаллохимических свойств карбонатов и определению количественного содержания ряда минеральных фаз в пробах успешно дополнялся результатами ИК-спектроскопии. Карбонаты ряда кальцит-доломит характеризуются в средней области ИК спектров тремя основными полосами поглощения CO_3^{2-} иона – ν_3 , ν_2 и ν_4 . Наиболее чувствительна к замещению Са \leftrightarrow Mg относительно узкая

полоса ν_4 , отстоящая на значительном расстоянии в спектрах крайних членов ряда. В спектрах Mg-кальцитов она заметно сдвигается в сторону высоких частот с ростом содержания магния в структуре (Bischoff et al., 1985; Dauphin, 1999). Однако она часто не свободна. Полосы ν_2 и ν_3 не столь чувствительны к замещению Ca \leftrightarrow Mg, тем не менее, полоса ν_2 чутко реагирует на изменения в составе карбонатов. Соотношение интенсивностей компонентов полосы ν_2 служит мерой относительного содержания в образце той или иной карбонатной фазы.

Метод моделирования XRD профилей слоистых силикатов. Слоистые силикаты являются постоянными и, во многих случаях, доминирующими компонентами донных отложений пресноводных озер. Их ассоциации, состав, структура, типоморфные особенности отражают физико-химические обстановки выветривания и переноса вещества, и позволяют восстанавливать ландшафтно-палеогеографические, палеоклиматические, палеотектонические условия, в которых осуществлялись процессы седиментации в конечных водоемах стока. Для получения исчерпывающей информации о составе, структурных характеристиках каждого минерала и их количественных соотношениях в пробах в работе применялся авторский метод математического моделирования XRD профилей слоистых силикатов (Солотчина, 2009; Solotchina et al., 2009). Метод основан на расчете интерференционной функции от одномерно-неупорядоченных кристаллов конечной толщины (Mac Ewan, 1958; Reynolds, 1980; Moore and Reynolds, 1997). Оптимизация моделируемых параметров выполнялась эффективными методами нелинейного программирования (Гилл и др., 1985). Моделирование предварялось выбором нескольких компонент с явно выраженным профилем и заданием для них исходных параметров, которые подразделяются на три группы. Первая группа определяет химический состав минеральной компоненты, вторая - вероятностные параметры, описывающие состав слоев, количество слоев разного типа и порядок их переслаивания в структуре, третья контролирует распределение доменов по размерам. Для построения единой модели, включающей в себя все присутствующие в образце слоистые фазы, применялась итерационная процедура суммирования их индивидуальных вкладов.

Глава 3. Донные осадки озер Забайкалья

Забайкалье – обширная территория в центральной части Евразийского континента восточнее оз. Байкал. Она является областью повсеместного развития горного рельефа; равнинные ландшафты встречаются преимущественно в долинах крупных рек и тектонических депрессиях, где широко представлены четвертичные отложения аллювиального и озерного генезиса. Климат Забайкалья – резко континентальный со значительными колебаниями как годовых, так и суточных температур и неравномерным сезонным распределением атмосферных осадков, что во многом определяется присутствием над Сибирью в холодное время года Сибирского (Азиатского) антициклона. Годовая сумма осадков в степных районах составляет 200-300 мм, в горно-таежном поясе около 350-450 мм. На территории Забайкалья насчитывается порядка 19000 озер, подавляющее большинство которых (более 99%) составляют водоемы площадью менее 1 км² (Солоноватые и соленые озера..., 2009). Возраст донных отложений основной массы озер редко выходит за пределы верхней границы последнего ледникового максимума (~18000 кал. лет). Большинство малых озер Забайкалья группируются в системы, расположенные на ограниченных площадях, характеризующихся единством ландшафтных и гидрографических условий (Скляр и др., 2011). Как правило, эти системы носят названия тектонических депрессий, к которым они приурочены, однако в различных источниках одна и та же группа бассейнов может называться по-разному.

В настоящей работе рассматриваются результаты изучения донных отложений девяти озер различной минерализации, восемь из которых приурочены к наиболее крупным озерным системам Забайкалья: оз. Верхнее Белое, Сульфатное и Круглое (Гусиноозерская система), оз. Большое Алгинское (Баргузинская система), оз. Долгое и

Большое Окуневое (Еравнинская система), оз. Баунт (Баунтовская система), оз. Арахлей (Ивано-Арахлейская система). Отдельно рассматривается оз. Киран, расположенное на юге изучаемого региона в долине р. Чикой и не принадлежащее ни к одной из упомянутых озерных систем (рис. 4).

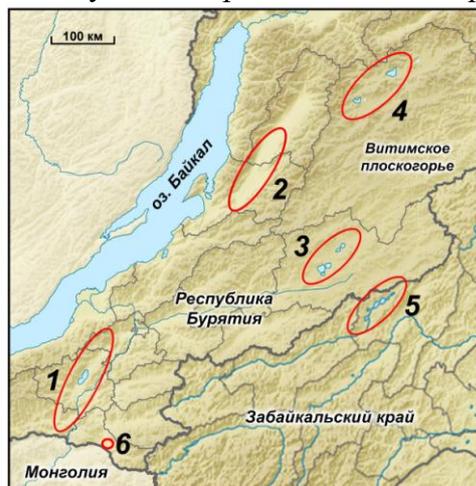


Рис. 4. Карта-схема расположения озерных систем, к которым принадлежат изученные бассейны. Озерные системы: 1 – Гусиноозерская, 2 – Баргузинская, 3 – Еравнинская, 4 – Баунтовская, 5 – Ивано-Арахлейская; 6 – оз. Киран.

Большинство изученных озер относятся к минеральным; по степени минерализации их воды варьируют от слабо солоноватых (оз. Большое Окуневое – 1 г/л) до соленых (оз. Большое Алгинское – 47-48 г/л) (табл. 1). Озера Баунт, Арахлей и Круглое в настоящее время являются пресными, однако, судя по присутствию в разрезах оз. Арахлей и Круглое интервалов, обогащенных аутигенными карбонатами, эти бассейны в определенные периоды своего существования были, как минимум, солоноватоводными.

Таблица 1. Некоторые данные о морфометрии, минерализации, мощности и возрасте озерных отложений изученных бассейнов Забайкалья

Озеро	Площадь, км ²	Ср. глубина, м	Мощность изученного разреза, см	Минерализация, г/л	Начало озерной седиментации
Верхнее Белое	3-4,5	<1,0	66	16,0-22,0	граница пребореала и бореала
Сульфатное	9-12	1,7	57	~12,0	первая половина атлантика
Круглое	~10	5,0	100	0,2-0,25	н.д.
Большое Алгинское	~1	1,0-1,5	75	47,0-48,0	граница атлантика и суббореала
Долгое	<1	4,0-4,5	96	4,5-5,0	середина субатлантика
Большое Окуневое	<1	<1,0	66	~1,0	около 560 л.н.
Арахлей	58	10,5	128	<0,2	потепление бёллинг
Баунт	111	17,0	800	<0,25	28-30 тыс. л.н. (Крайнов и др., 2017)
Киран	~1	2,0	101	>4,5	первая половина атлантика

Гранулометрический анализ показал, что в составе кластической компоненты осадков всех изученных озер доминируют пелит и алеврит в различных соотношениях.

главным образом от климатических условий в регионе. На основе литолого-минералогических и кристаллохимических исследований аутигенных карбонатов в датированных разрезах донных осадков, дополненных результатами элементного, изотопного, палинологического и других анализов были выделены стадии эволюции озер Забайкалья и проведена их корреляция с климатическими событиями голоцена и позднего плейстоцена.

Типичным для минеральных озер Забайкальского региона является разрез голоценовых осадков оз. Верхнее Белое, относящегося к Гусиноозерской системе (рис. 7). Судя по дате 10810 ± 280 кал. л.н., определенной в подошве разреза, осадконакопление в водоеме началось на границе пребореального и бореального периодов.

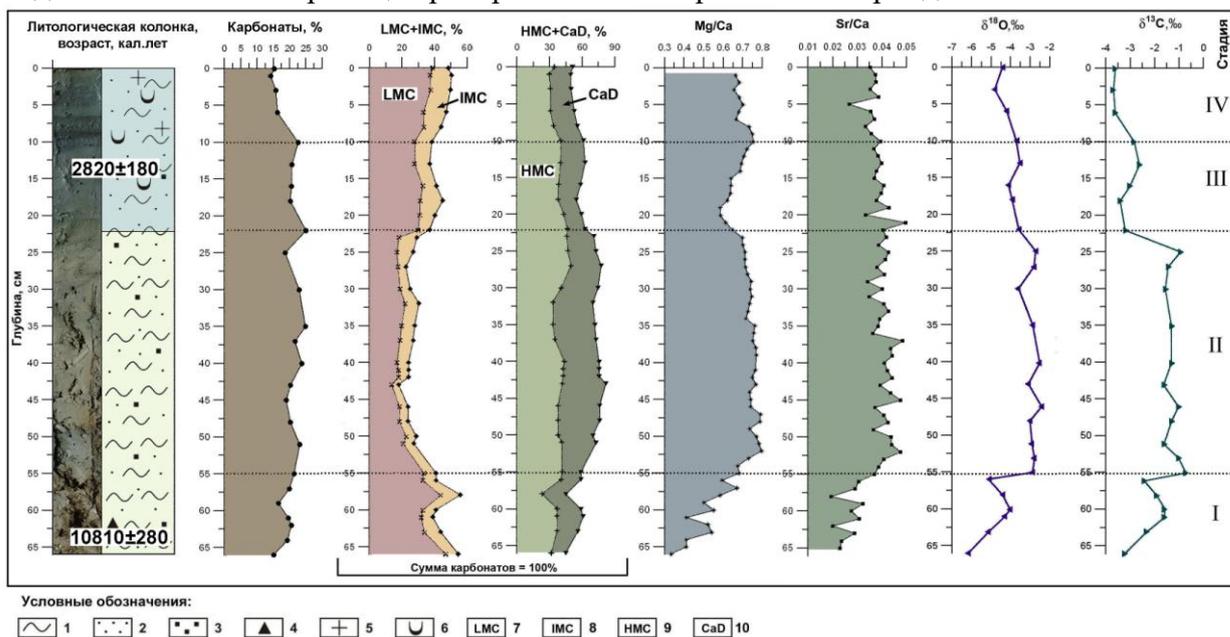


Рис. 7. Литологическая колонка голоценового разреза осадков оз. Верхнее Белое, распределение карбонатных минералов, геохимических индикаторов палеоклиматических изменений (отношения Mg/Ca и Sr/Ca), стабильных изотопов ($\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C$), стадии эволюции озера. Условные обозначения: 1 - пелит, 2 – алеврит, 3 – песок, 4 – гравий, 5 – диатомеи, 6 – раковины моллюсков, 7-10 — см. на рис. 3.

По результатам комплексных исследований отложений оз. Верхнее Белое выделено 4 стадии его эволюции. Стадия I (55-66 см) характеризуется преобладанием в карбонатной составляющей низко-Mg кальцита, доля которого по данным моделирования XRD спектров достигает 45-47% от суммы карбонатов (рис. 6). Остальное приходится на долю промежуточных и высоко-Mg кальцитов, а также Ca-избыточного доломита. Преимущественное осаждение низкомагнезиальных разновидностей происходит в условиях умеренной насыщенности вод по карбонатам и умеренной солености; о последнем свидетельствует и величина Sr/Ca -отношения, которая в среднем равна 0,02 (рис. 7). Невелики также значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C$ (особенно в начале стадии), что свидетельствуют в пользу положительного гидрологического баланса озера. В целом, доминирование в стадию I низко-Mg кальцита, сопровождающееся низкими показателями Mg/Ca -, Sr/Ca -отношений и тяжелых изотопов углерода и кислорода указывает на сравнительно высокий уровень стояния воды в озере.

Самой продолжительной из выделенных нами стадий является стадия II (интервал 22-55 см). Судя по возрасту залегающих выше осадков, который на глубине 13-14 см составляет около 2800 кал. лет, скорость осадконакопления была очень низкая, порядка 0,07 мм/год. Происходит резкое увеличение содержания высоко-Mg кальцитов и Ca-избыточного доломита, в общей сложности на их долю приходится ~70-75% от суммы карбонатов (рис. 6, 7). Количество Ca-доломита составляет более 30% в ансамбле

карбонатных минералов. В отложениях появляется хемогенный арагонит, соосаждение которого с Mg-кальцитами и Ca-доломитом указывает на повышенные концентрации в воде ионов Mg^{2+} и ее соленость. Отмечается также заметный рост значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C$. Все это указывает на значительное иссушение климата, начавшееся в конце бореала, и обмеление оз. Верхнее Белое, которое, судя по высоким содержаниям в отложениях Ca-избыточного доломита, могло приобрести плайевый характер.

В начале стадии III (гл. 10-22 см) озерная котловина постепенно начинает обводняться, о чем можно судить по увеличению содержания в осадках низкомагнезиальных и промежуточных разновидностей кальцитов, легкого изотопа кислорода ^{16}O и уменьшению Mg/Ca отношения (рис. 7). Значительное отрицательное смещение $\delta^{13}C$, по-видимому, связано с деградацией образовавшейся ранее в мелководном озере органического материала, в результате чего происходило обогащение поверхностных вод легким углеродом ^{12}C . В конце стадии III в соответствии с данными карбонатной записи уровень воды в озере вновь падает. Сохраняется высокая вероятность перерывов в осадконакоплении, судя по малому количеству накопившегося осадка. Стадия IV характеризуется некоторым ростом концентрации в осадках Mg-кальцитов с пониженным содержанием Mg в структуре на фоне общего снижения количества карбонатов в разрезе. Можно предполагать некоторое смягчение и увлажнение регионального климата в субатлантический период по сравнению с суббореалом. Исключение составляет кровля разреза, где вновь наблюдается рост содержания высоко-Mg кальцитов и Ca-доломита. Выделенные стадии подтверждаются данными ИК-спектроскопии (рис. 8).

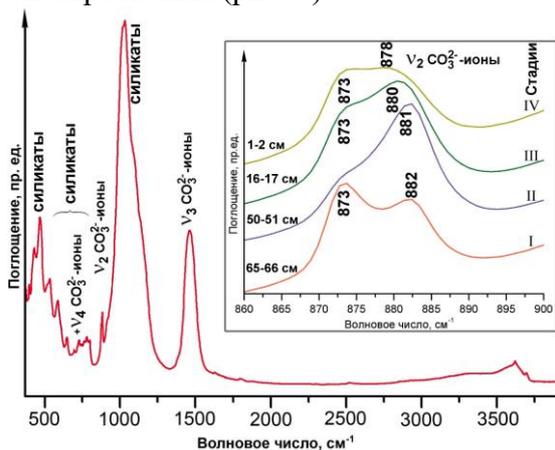


Рис. 8. Обзорный ИК спектр образца донных осадков оз. Верхнее Белое (интервал 50-51 см). Отмечены полосы поглощения ν_4 , ν_2 и ν_3 карбонат-ионов. На врезке показана конфигурация полосы поглощения ν_2 CO_3^{2-} -ионов карбонатных минералов в образцах четырех выделенных стадий эволюции озера.

Наиболее протяженная и полная осадочная последовательность, охватывающая конец позднего плейстоцена и весь голоцен получена из оз. Баунт (Баунтовская озерная система). Это пресноводное, проточное, сравнительно большое как по площади, так и по глубине озеро, с достаточно высокими темпами седиментации. Согласно возрастной модели, в бескарбонатном разрезе оз. Баунт по характеру отложений достаточно отчетливо выделяются две части: позднеплейстоценовая, представленная алевритовым и глинистым материалом с небольшой примесью диатомей, и голоценовая, сложенная преимущественно диатомовыми илами. Подобное строение разрезов (морские изотопные стадии MIS2 и MIS1) является характерным для глубоководных пресных сибирских озер, например для оз. Байкал и отражает общий тренд потепления климата при переходе от плейстоцена к голоцену (подробно рассматривается в Главе 5). Минералогическо-кристаллохимические исследования слоистых силикатов, которые являются основными минеральными компонентами донных отложений оз. Баунт, сопоставленные с анализом изменения скоростей осадконакопления, рядом геохимических и палинологических показателей позволили на фоне этой генеральной тенденции выделить более дробные интервалы разреза, отвечающие чередованию периодов похолодания (например, древнейший дриас и пребореал) и потепления (бёллинг-аллерёд, атлантик) на территории Баунтовской котловины.

Другие изученные бассейны региона (за исключением оз. Арахлей, которое как мелководный плайевый водоем с маломощным осадконакоплением, существовало с начала потепления бёллинг), образовались на различных этапах голоценового периода (табл. 1), а их осадки постоянно или эпизодически содержат хемогенную карбонатную компоненту. Проведенные комплексные (литолого-минералогические, кристаллохимические, геохимические, изотопные, палинологические и др.) исследования показали, что осадконакопление в различных озерных системах Забайкалья в голоцене находилось под сильным (иногда преобладающим) влиянием локальных природно-климатических обстановок. Тем не менее, можно отметить следующие общие моменты. Сопоставление разрезов озер Баунт, Арахлей и Верхнее Белое демонстрирует, что бореальный период (или, по крайней мере, большая его часть) в изучаемом регионе был этапом смягчения и увлажнения климата на фоне сухого и прохладного пребореала. Потепление атлантического периода (5700-7800 л.н.) по-разному проявило себя в различных областях Забайкалья. С одной стороны, образование ряда озер (например, Сульфатное, Киран) говорит о том, что региональное увлажнение в целом возросло. С другой стороны, нередкое присутствие в осадках этого периода высокомагнезиальных разновидностей карбонатов свидетельствует о периодическом иссушении климата, которое носило преимущественно локальный характер. Так, например, в отложениях оз. Верхнее Белое с конца бореала до конца атлантика среди аутигенных карбонатов преобладают высоко-Mg кальциты и Ca-избыточный доломит, отмечаются повышенные значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ и Mg/Ca- и Sr/Ca-отношения. В то же время, в осадках озер Арахлей и Сульфатное, относящихся к первой половине атлантического периода доминируют низкомагнезиальные разновидности карбонатов. Таким образом, если при реконструкциях палеоклимата голоцена Европейской части материка атлантический период практически всегда трактуется как «теплый и влажный», то для континентальных районов Сибири картина далеко не столь однозначна. Потепление климата в этот период, безусловно, имело место и в Сибири, однако влажность в разные периоды времени и в разных районах могла значительно варьировать. Следует отметить, что подобное явление – колебания соотношения тепла и влажности в атлантический период в различных районах Евразии – наблюдается также и по результатам анализа озерных осадков Южного и Среднего Урала (Масленникова и др., 2014).

Суббореальный период и большая часть субатлантика в Забайкалье, по данным проведенных исследований, в целом были суше и холоднее атлантического периода. Значительное усиление карбонатообразования в оз. Большое Алгинское, доминирование в карбонатных ассоциациях осадков озер Киран и Сульфатное высокомагнезиальных разновидностей, явные следы обмеления и полного пересыхания водоемов, накопление «холодных» ассоциаций слоистых силикатов в оз. Арахлей – все это свидетельствует об аридизации регионального климата. В то же время для некоторых бассейнов, например, оз. Верхнее Белое, наблюдается обратная картина – общий рост содержания низко-Mg и промежуточных кальцитов, сопровождающийся падением Mg/Ca-отношения и значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, что указывает на обводнение водоема и снижение его минерализации. Таким образом, как и в атлантическое время, на отдельных территориях наблюдается доминирование локальных природно-климатических факторов над общими региональными климатическими трендами. Отсюда можно сделать вывод, что это не случайная флуктуация, а характерная черта голоценового климата если не Сибири в целом, то Забайкалья в частности.

Глава 4. Донные осадки озер Приольхонья

Западное побережье Байкала представляет собой сравнительно узкий, круто обрывающийся в озеро береговой склон, отделенный от Предбайкальского прогиба горными сооружениями Приморского и Байкальского хребтов. В тектоническом плане это уступ весьма протяженной (около 1500 км) структуры – Обручевского сброса,

образующего северо-западный борт Байкальской впадины. В районе устья р. Бугульдейка сброс разделяется в северо-восточном направлении на две ветви - Приольхонскую и Приморскую. Между этими ветвями находится Приольхонская краевая ступень, включающая Приольхонское плато с высотными отметками до 800-900 м над уровнем моря, остров Ольхон, впадину Малого моря, Кучелго-Таловскую депрессию и прилегающие склоны Приморского хребта (рис. 9).

Единого мнения о том, что следует называть «Приольхоньем», нет, однако в большинстве исследований (Склярова и др. 2002, Уфимцев и др., 2010; Федоровский, Скляров, 2010 и другие), территория краевой ступени носит географическое наименование Ольхонский регион, а Приольхоньем называется только область одноименного плато. В данной работе используется именно такая трактовка названия «Приольхонье».

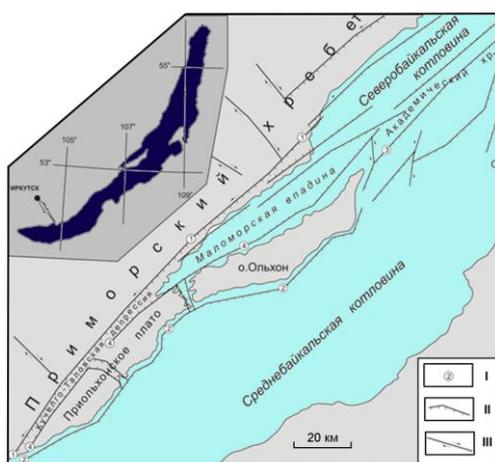


Рис. 9. Морфоструктурная ситуация в районе Приольхонья, (Кузьмин, 2019). I - основные активные разломы, показаны цифрами в кружках: 1 - Приморский, 2 - Приольхонский, 3 - Академический, 4 - Чернорудско-Баракчинский; II - активные разломы сбросовой кинематики; III - активные разломы сдвиговой кинематики.

Геологическая история Ольхонского региона началась в раннем палеозое, когда серия столкновений Сибирского кратона и композитного Ольхонского террейна, являющегося одним из сегментов Центрально-Азиатского складчатого пояса, привела к образованию здесь коллизионной системы. В посткаледонское время Ольхонский терреин испытывал еще несколько периодов тектонической активизации разной интенсивности, сменявшихся длительными эпохами спокойных геодинамических обстановок. Современный же структурный план региона, с одной стороны, является следствием проявления мощного позднекайнозойского рифтогенеза, с другой – демонстрирует выразительные проявления древней коллизионной тектоники. Поэтому в рельефе Приольхонья можно выделить два основных типа впадин. Во-первых, это линейные грабены северо-восточного простирания, наследующие генеральную структуру, возникшую в результате раннепалеозойских сдвиговых деформаций. Во-вторых, хорошо выраженные долины преимущественно северо-северо-восточного простирания, расположенные над структурами типа пулл-апарт, возникшими на рифтогенном этапе тектогенеза (Склярова и др. 2002; Кузьмин, 2019).

Приольхонье, как и весь Байкальский регион, является областью господства континентального и резко континентального климата. Однако влияние огромной водной массы Байкала проявляется в некотором снижении летних температур и, наоборот, повышении зимних, в сравнении со средними значениями по Прибайкалью. Роль осадков, вызываемых местной прибайкальской атмосферной циркуляцией сравнительно невелика (Дзюба, 1991). Значительно большее влияние на количество осадков оказывает нахождение изучаемого района в ветровой тени Приморского хребта, преграждающего путь западным циклонам. Так, если на наветренных склонах хребта и водоразделах среднегодовое количество осадков составляет 500-700 мм/год, то в долинах Приольхонья выпадает в среднем 200-300 мм/год. В последние три десятилетия нередки экстремально сухие годы, когда на описываемой территории выпадало 100-200 мм/год осадков (Баженова, Мартянова, 2002). Речная сеть Приольхонья развита довольно слабо; основной источник питания большинства водотоков - атмосферные осадки, однако у крупных рек с закарстованными бассейнами, таких, как Бугульдейка и Анга, преобладающим типом питания является подземное.

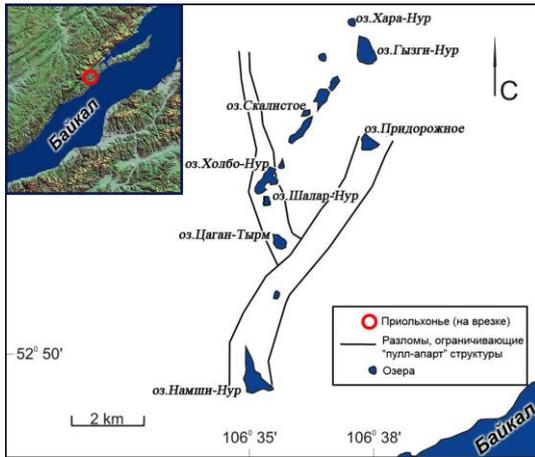


Рис. 10. Схема расположения озер Тажеранской системы.

Большая часть озер Приольхонья, а их насчитывается около 60, расположена на территории Тажеранской степи – северо-восточной части Приольхонского плато, простирающейся от долины р. Анга на юго-западе до пролива Ольхонские Ворота на северо-востоке. Несмотря на то, что Тажеранская степь является наиболее засушливым участком Приольхонья, именно здесь встречаются многочисленные озера различной минерализации, как правило, сгруппированные в

цепочки (рис. 10).

Все озера относятся к категории малых, наиболее мелководные бассейны в теплые летние периоды пересыхают, а в зимнее время полностью промерзают. Ряд водоемов, несомненно, относится к карстовым, однако подавляющее большинство имеет тектоническую природу и связаны с упомянутыми выше двумя типами грабенов (Склярова и др., 2004).

Было изучено восемь водоемов Тажеранской озерной системы, компактно расположенных в пределах структуры, которая в работе (Сковитина, Федоровский, 2007) называется «пулл-апарт системой Холбо-Нур – Намши-Нур» (рис. 10). Все они относятся к бессточным, основное поступление терригенного материала осуществляется временными потоками и эоловым переносом. Основными источниками водного питания озер являются родники, роль атмосферных осадков невелика. Несмотря на близкое взаимное расположение и единый геолого-геохимический ландшафт, озерные воды весьма разнообразны как по минерализации и щелочности, так и по соотношению основных ионов (табл. 2). Тем не менее, геохимия вод подавляющего большинства озер все же имеет ряд общих черт. Как правило, воды относятся к щелочным, иногда сильно щелочным: рН 7,9–10,0, карбонатная щелочность 244–4364 мг/л. В ионно-солевом составе в основном преобладают два аниона – HCO_3^- и SO_4^{2-} и два катиона – Mg^{2+} и Na^+ , в подчиненном количестве присутствуют Cl^- , Ca^{2+} . Исключение составляют воды оз. Цаган-Тырм – там доминирует анион Cl^- (табл. 2) (Солотчина и др., 2015; Страховенко и др., 2015).

Таблица 2. Химические параметры вод и минеральный состав современных осадков исследованных озер Приольхонья

Озеро	Вода				Донные отложения
	рН	TDS, г/л	Alk, мг/л	Ионный состав вод по формуле Курлова	Минеральный состав
Хара-Нур	7,9-8,3	0,5	244-303	$\text{HCO}_3 76 [\text{SO}_4 21] \text{Mg} 48 \text{Na} 28 [\text{Ca} 24]$	LMg-кальцит, кварц, плагиоклаз, слюда, амфибол, пирит, гипс
Гызги-Нур	9,1-9,3	0,8-1,3	481-662	$\text{HCO}_3 62 \text{SO}_4 33 [\text{Cl} 5] \text{Mg} 59 \text{Na} 35 [\text{Ca} 6]$	IMg-кальциты, кварц, плагиоклаз, кши, слюда, амфибол
Шалар-Нур	9,1-9,6	3,2-6,6	317-549	$\text{SO}_4 79 [\text{Cl} 15 \text{HCO}_3 6] \text{Na} 49 \text{Mg} 47$	IMg-кальцит, LMg-кальцит, кварц, слюда, плагиоклаз, амфибол, гипс, каолинит, смектит
Холбо-Нур	8,8-9,5	4,3-6,4	453-537	$\text{SO}_4 77 [\text{Cl} 15 \text{HCO}_3 8] \text{Na} 51 \text{Mg} 46$	IMg-кальцит, LMg-кальцит, NMg-кальциты, арагонит, родохрозит, кварц, плагиоклаз, слюда, амфибол

Намши-Нур	8,9- 9,2	1,8- 2,7	784- 1024	$\text{HCO}_3\text{49SO}_4\text{42}[\text{Cl9}]$ Na57Mg41	Моногидрокальцит, LMg-кальцит, IMg-кальцит, кварц, слюда, плагиоклаз, кпш, амфибол, гипс
Скалистое	9,2- 9,5	3,6- 4,1	1041- 1100	$\text{SO}_4\text{53 HCO}_3\text{36} [\text{Cl11}]$ Na53Mg46	HMg-кальциты, Са-доломит, арагонит, IMg-кальцит, LMg-кальцит, моногидрокальцит, кварц, плагиоклаз, амфибол, слюда, гипс, пирит, каолинит
Цаган-Тырм	8,6- 9,1	14,5- 22,1	1078- 1648	$\text{Cl63 SO}_4\text{31} [\text{HCO}_3\text{6}]$ Na75Mg24	Са-доломиты, HMg-кальцит, LMg-кальцит, IMg-кальцит, слюда, кварц, плагиоклаз, каолинит, гипс, амфибол
Придорожное	9,5- 10,0	7,0- 17,6	2674- 4364	$\text{SO}_4\text{61HCO}_3\text{31}[\text{Cl8}]$ Na78Mg22	Са-доломиты, HMg-кальцит, LMg-кальцит, IMg-кальцит, кварц, слюда, плагиоклаз, амфибол, пирит, каолинит

Обозначения: LMg-кальцит – низко-Mg кальцит; IMg-кальцит – промежуточный Mg-кальцит; HMg-кальцит – высоко-Mg кальцит; кпш- калиевый полевой шпат; TDS – минерализация; Alk – щелочность.

Литолого-минералогические исследования верхнего слоя отложений озер Хара-Нур, Гызги-Нур, Шалар-Нур, Холбо-Нур, Намши-Нур, Скалистое, Цаган-Тырм и Придорожное возрастом не более 100 лет (датирование по ^{210}Pb) показали, что в составе осадков присутствуют обломочные, аутигенные и биогенные компоненты в различных соотношениях. По данным рентгеновской порошковой дифрактометрии (XRD) и ИК-спектроскопии в наиболее молодых озерных отложениях преобладают хемогенные карбонаты кальцит-доломитового ряда, а также арагонит и моногидрокальцит. По наличию в верхнем горизонте осадков тех или иных карбонатных минералов озера делятся на 3 группы. В первую группу входят озера Хара-Нур, Гызги-Нур и Шалар-Нур. В их донных отложениях установлены Mg-кальциты, представленные низкомагнезиальными и промежуточными разновидностями, содержание MgCO_3 в которых не превышает 12,5 мол.%. Вторую группу составляют озера, в осадках которых кроме карбонатов кальцит-доломитового ряда присутствуют в существенных количествах моногидрокальцит (оз. Намши-Нур и оз. Скалистое), арагонит (оз. Холбо-Нур и оз. Скалистое) и небольшое количество родохрозита в осадках оз. Холбо-Нур. К третьей группе нами отнесены озера Цаган-Тырм и Придорожное, в их осадках карбонаты принадлежат только к кальцит-доломитовому ряду, причем доминируют Са-избыточные доломиты (табл. 2).

Для реконструкции климата голоцена на территории Приольхонья было осуществлено бурение, получены керны и проведены комплексные (литолого-минералогические, геохимические, палинологические) исследования донных отложений трех озёр различной минерализации: Цаган-Тырм (TDS 14,5-22,1 г/л), Холбо-Нур (TDS 4,3-6,4 г/л) и Намши-Нур (TDS 1,8-2,7 г/л). Как бассейны с карбонатной седиментацией они сформировались в первой половине голоценового периода. Для всех трех разрезов характерна общая черта – озерные карбонатсодержащие отложения, терригенная компонента которых сложена преимущественно алевропелитами с примесью песка, подстилаются горизонтами разнообломочного кластического материала с большой долей грубой фракции. Эти толщи, представленные смесью пелита, алеврита, песка, гравия и гальки, которые по петрографическому составу аналогичны коренным породам водосбора, вероятнее всего, связаны периодами активизации процессов разломной тектоники.

Методами XRD анализа и ИК-спектроскопии установлено, что основной компонентой осадков (проанализировано более 350 образцов) являются аутигенные карбонаты, доля которых может достигать 85-90% минерального состава отложений.

Терригенная составляющая, как правило, представлена биотитом, кварцем, плагиоклазом, КПШ, амфиболом, хлоритом, глинистыми минералами; эпизодически встречаются гипс и гематит. При этом содержание биотита зачастую превышает количество всех других обломочных минералов вместе взятых, что объясняется значительным эоловым привносом с территории водосборов. Среди аутигенных карбонатов доминируют Mg-кальциты разной степени магнезиальности и Ca-избыточные доломиты; встречаются также арагонит, моногидрокальцит, в незначительных количествах отмечаются родохрозит и стехиометрический кальцит. Методом моделирования XRD спектров установлено, что в одном образце может присутствовать ансамбль из пяти-шести карбонатных фаз (рис. 11).

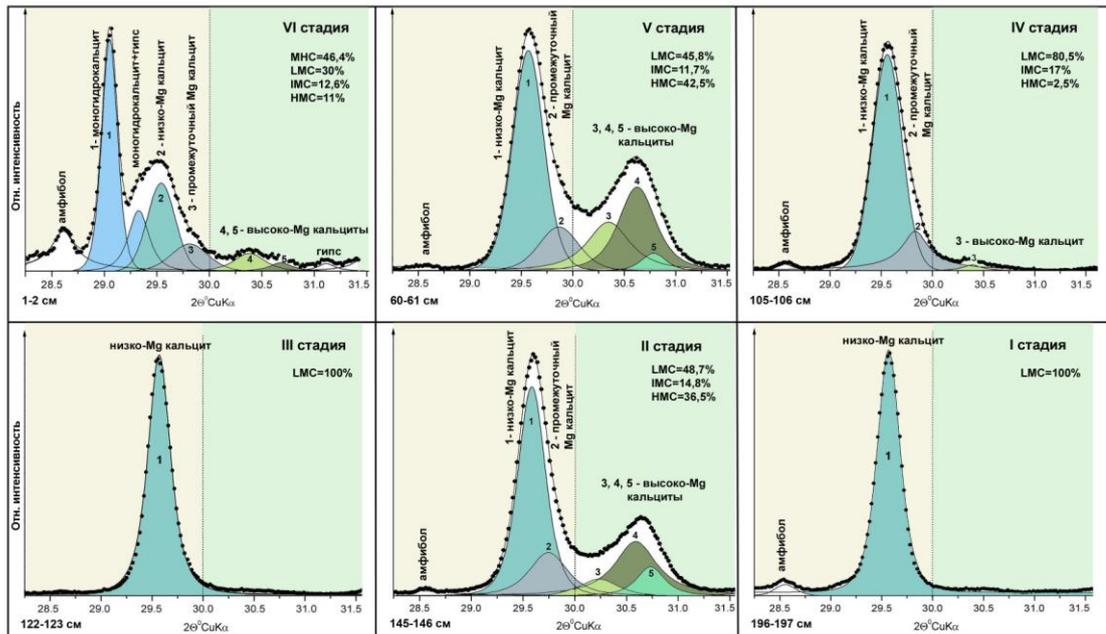


Рис. 11. Результаты моделирования экспериментальных XRD профилей карбонатов в осадках оз. Намши-Нур. LMC – низко-Mg кальцит, IMC – промежуточный Mg-кальцит, HMC – высоко-Mg кальцит, MNC – моногидрокальцит. Содержание карбонатов в образце принимается за 100%.

Проведенные комплексные исследования позволили выделить стадии эволюции этих озер, обусловленные колебаниями регионального климата. Наиболее длительная и хорошо датированная непрерывная осадочная последовательность мощностью 210 см получена из оз. Намши-Нур, осадконакопление в котором, судя по дате в подошве разреза ~8800 кал. л.н. началось во второй половине бореального периода. Всего выделено шесть стадий эволюции этого озера (рис. 12).

Для стадии I (160–210 см) характерны высокая средняя скорость седиментации ~0,7 мм/год и постепенное увеличение содержания карбонатов вверх по разрезу - от 20% до 60% вещественного состава осадков. Представлены они преимущественно низко-Mg кальцитом (рис. 11, обр. 196-197 см), что служит показателем высокого уровня стояния вод озера, их слабой минерализации, умеренной карбонатной щелочности, и, соответственно, повышенной влажности климата. В стадию II (137-160 см), охватывающую конец бореального периода, ассоциация карбонатных минералов становится сложной, причем очень резко. Разложение XRD профилей показало, что в это время осаждается серия высоко-Mg кальцитов, появляется в заметных количествах промежуточный Mg-кальцит, доля низко-Mg кальцита существенно уменьшается (рис. 11, обр. 145-146 см). Подобные изменения в составе карбонатов свидетельствуют о внезапной и резкой смене климатических условий от гумидных к аридным. Стадия III (105-137 см) приходится на первую половину атлантика и является периодом увлажнения

регионального климата. Карбонаты, составляющие около 60% вещественного состава осадка, практически нацело сложены низко-Mg кальцитом (рис. 11, обр. 122-123 см).

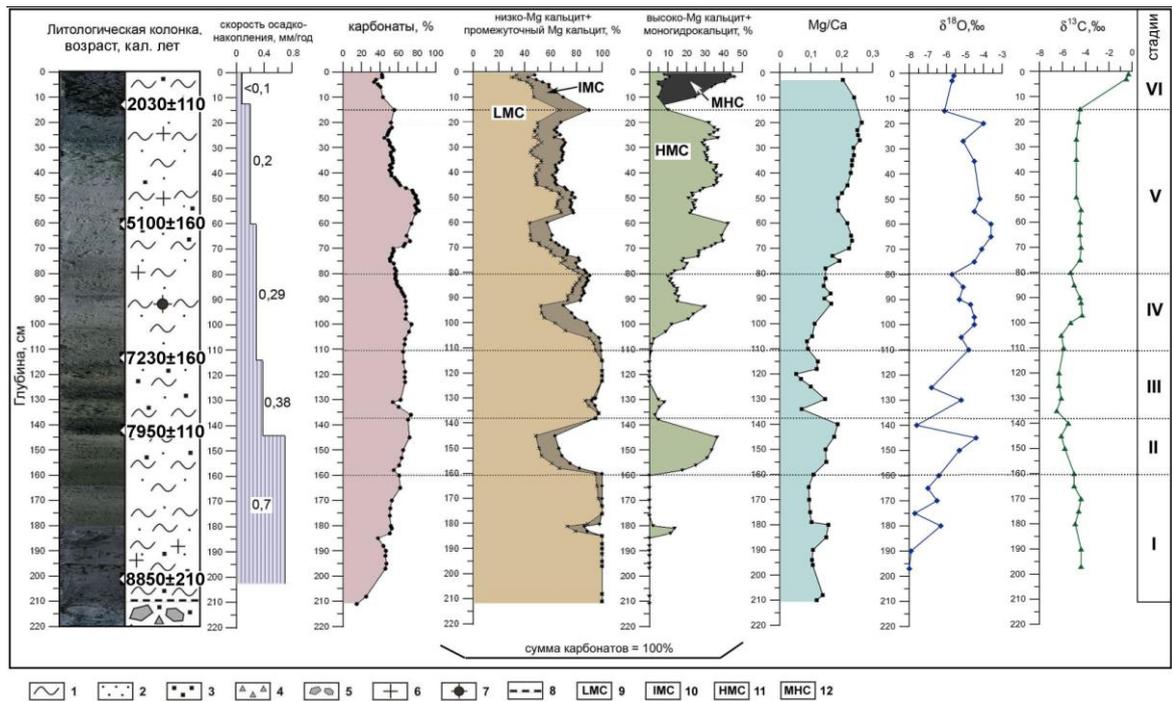


Рис. 12. Литологическая колонка голоценового разреза осадков озера Намши-Нур, возрастная модель, средние скорости осадконакопления, распределения карбонатных минералов, Mg/Ca отношение, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$. Условные обозначения: 1 – пелит, 2 – алеврит, 3 – песок, 4 – гравий, 5 – щебень, 6 – диатомеи, 7 – конкреции, 8-12 – см. на рис. 11.

В стадию IV (80-110 см), соответствующую второй половине атлантического периода, в озере, помимо низко-Mg кальцитов, вновь осаждаются промежуточные и высоко-Mg кальциты. Однако в отличие от стадии II изменения в составе карбонатов носят постепенный характер, начинаясь с появления в осадках промежуточного Mg-кальцита. Содержание высокомагнезиальных разновидностей достигает 30% от суммы карбонатов в середине стадии и опускается до 10% на атлантико-суббореальном рубеже. Стадия V (15-80 см) – самая продолжительная, она охватывает весь суббореальный период (рис. 12), в целом более сухой и холодный, нежели атлантический. Ее начало характеризуется максимальным в разрезе содержанием высоко-Mg кальцитов – более 40% от суммы карбонатов (рис. 11, обр. 60-61 см). К середине суббореала (50-55 см) климатические условия на короткое время смягчаются, содержание высоко-Mg кальцита падает вдвое против начального периода (рис. 12), в то же время карбонатная седиментация здесь максимальна (до 80% минерального вещества осадков), что может быть отчасти обусловлено сокращением поступления терригенного материала. Вторая половина стадии V характеризуется ростом аридности, о чем можно судить по усилившемуся осаждению высоко-Mg кальцитов. К концу стадии, однако, ситуация меняется на противоположную, отмечается рост содержания низкомагнезиальных и промежуточных разновидностей карбонатов (рис. 12), что указывает на увеличение атмосферной увлажненности и смягчении климата. Последняя стадия VI (0-15 см), соответствующая субатлантическому периоду, отличается от всех предыдущих не только самой низкой скоростью седиментации (<0,1 мм/год), но и присутствием в осадках, в том числе и современных, наряду с Mg-кальцитами метастабильного моногидрокарбоната (рис. 11, обр. 1-2 см). Существенное влияние на его формирование и стабилизацию оказывает ряд органических и неорганических примесей, присутствие которых значительно расширяет диапазон условий осаждения этого карбоната, тем самым несколько

обесценивая его индикаторные возможности при проведении палеоклиматических реконструкций. Тем не менее, поскольку одним из условий стабилизации моногидрокарбоната является высокий уровень биологической активности среды, его присутствие в озерных осадках служит косвенным подтверждением потепления климата, способствующего активизации процессов фотосинтеза водной растительности и накопления примесей, необходимых для сохранения этого минерала (Swainson, 2008).

Анализ распределений стабильных изотопов кислорода и углерода в карбонатных осадках оз. Намши-Нур показал, что $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ принимают только отрицательные значения. При общей тенденции к росту $\delta^{18}\text{O}$ снизу-вверх по разрезу (усиление аридности климата), на отдельных участках наблюдаются довольно резкие аномалии в его поведении (рис. 12). В целом же отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ свидетельствуют о том, что контролером выступает приток свежих метеорных вод, обогащенных легким изотопом кислорода. Наблюдается явная корреляция значений $\delta^{18}\text{O}$ с содержанием высоко-Mg кальцитов. Минимальные значения ($-8,0\text{‰}$ и $-7,6\text{‰}$) $\delta^{18}\text{O}$ принимает в те периоды, когда осаждение высоко-Mg кальцитов практически не происходит (влажный климат). Максимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ от $-4,4\text{‰}$ до $-3,6\text{‰}$ обнаружены в стадиях II и V – периоды наибольшего иссушения климата по данным карбонатной летописи. Эти стадии, вероятно, соответствуют самым мелководным фазам в жизни озера (процесс испарения превалирует над притоком) и характеризуются также ростом отношения Mg/Ca (рис. 12). Содержание $\delta^{18}\text{O}$ в последнюю VI стадию падает, что указывает на положительный водный баланс озера и, соответственно, некоторое смягчение аридности климата региона. Самые низкие значения ($-6,5\text{‰}$) $\delta^{13}\text{C}$ принимает в стадию III, что, скорее всего, обусловлено притоком метеорных вод, обогащенных ^{12}C . Увеличение содержания в водах озера тяжелого изотопа ^{13}C в стадию VI ($\delta^{13}\text{C} \rightarrow 0$), происходит в результате извлечения ^{12}C в процессе фотосинтеза и превращения его в $\text{C}_{\text{орг}}$ при усилении первичной биологической продуктивности озера. Это обстоятельство вполне согласуется с присутствием в осадках моногидрокарбоната.

Обобщая результаты литолого-минералогических, кристаллохимических, геохимических, изотопных, диатомовых, палинологических исследований терригенно-эвапоритовых отложений трех малых минеральных озер Тажеранской системы (Намши-Нур, Холбо-Нур и Цаган-Тырм) можно сделать следующие выводы о климате и обстановках седиментации, господствовавших на территории Приольхонья в голоцене. Полученные возрастные модели показывают, что карбонатное (т.е. собственно озерное) осадконакопление началось в котловинах Тажеранской степи не ранее второй половины бореала. О климате этого периода можно судить по результатам изучения осадков оз. Намши-Нур (оз. Цаган-Тырм в этот период еще не существовало как бассейн с карбонатной седиментацией, а в осадках оз. Холбо-Нур наблюдаются следы тектонической активности, искажающие палеоклиматическую запись). Среди карбонатных минералов нижней части разреза оз. Намши-Нур наблюдается резкое преобладание низкомагнезиальных разновидностей кальцита; высоко-Mg кальциты появляются в заметных количествах ближе к концу бореала, причем на достаточно короткое время. Соответствующий умеренный рост демонстрирует Mg/Ca-отношение. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в целом довольно низки, но также показывают определенный тренд к увеличению вверх по разрезу. Все эти признаки свидетельствуют о достаточно высоком уровне стояния озерных вод, их слабой минерализации, умеренной карбонатной щелочности, и, соответственно, гумидности климата.

Начало атлантического периода по палеоклиматическим записям из осадочных разрезов озер характеризуется как период господства сравнительно теплого и влажного климата. Среди карбонатов существенно доминируют низкомагнезиальные разновидности кальцитов, которые осаждаются в условиях относительно высокой обводненности бассейнов, умеренной насыщенности вод по карбонатам и умеренной солености.

Отмечаются в целом пониженные значения содержаний тяжелых изотопов кислорода и углерода, а также довольно низкие Mg/Ca-отношения. В оз. Цаган-Тырм наблюдается расцвет планктонных видов диатомей. Природно-климатические обстановки региона во второй половине атлантического периода отличались заметной нестабильностью. Особенно четко эта нестабильность проявлена в распределениях карбонатов озер Цаган-Тырм и Холбо-Нур, где отмечаются частые противофазные колебания содержаний магниезиальных кальцитов. В осадках оз. Цаган-Тырм появляется арагонит в переменных количествах, а в отложениях оз. Холбо-Нур, где арагонит присутствует постоянно, его содержание возрастает. В оз. Намши-Нур начинают осаждаться промежуточные и высоко-Mg кальциты. В осадках всех трех водоемов отмечаются умеренные значения отношений Mg/Ca, возрастающие к верхней границе периода, и не самая высокая соленость, о чем свидетельствуют средние величины Sr/Ca отношения, также постепенно растущие вверх по разрезу.

Начало суббореального периода характеризуется резким ростом содержания в осадках высокомагнезиальных разновидностей карбонатов ряда кальцит-доломит. Так, в отложениях оз. Цаган-Тырм доля высоко-Mg кальцитов и Ca-избыточных доломитов в это время достигает 90-95% от суммы карбонатов. В разрезах фиксируется тенденция к росту Mg/Ca и Sr/Ca отношений, а также величины $\delta^{18}\text{O}$ (процесс испарения превалирует над притоком). Однако максимальная аридизация климата Приольхонья в голоцене приходится на вторую половину суббореала – начало субатлантика. Наиболее ярко этот факт отражен в осадочной летописи оз. Цаган-Тырм, где на глубине 7-12 см (~3600 кал. л.н.) наблюдаются отчетливые признаки перерыва в осадконакоплении и суходольного стояния котловины. Иссущение климата сопровождалось усилением эоловых процессов, на что указывает рост содержания биотита в отложениях. Незначительная мощность перекрывающих осадков свидетельствует о том, что озерная котловина вновь заполнилась водой до современного состояния лишь в самом конце субатлантического периода. Судя по осадочной летописи оз. Холбо-Нур, ослабление аридности климата региона началось около 700 л.н. В водоеме активно отлагаются низкомагнезиальные кальциты, в осадках наблюдается снижение отношений Mg/Ca и Sr/Ca, а также величины $\delta^{18}\text{O}$. Все эти признаки указывают на рост обводненности озера, снижение его минерализации и карбонатной щелочности, вплоть до современных параметров.

Глава 5. Крупнейшие озера Байкальской рифтовой зоны: Байкал и Хубсугул и малое высокогорное озеро Хикушка

В главе рассматриваются позднечетвертичные отложения двух крупнейших пресноводных бассейнов Байкальской рифтовой зоны (БРЗ): Байкала и Хубсугула. Реакция обширных и глубоких внутриконтинентальных водоемов на природно-климатические изменения, особенно короткопериодические, в значительной степени «сглажена» и не так выразительна, как это характерно для мелководных озер. Тем не менее, очевидно, что и в этом случае климатические флуктуации находят определенный отклик в составе и строении осадочных толщ. Кроме того рассматриваются донные осадки оз. Хикушка, расположенного в высокогорной зоне Восточного Саяна, которое, хотя и относится к малым, однако имеет сравнительно большую глубину и сходный тип позднеплейстоцен-голоценового разреза.

Озеро Байкал. Байкальская впадина – центральный сегмент БРЗ, составляющий около 1/3 ее полной длины, т.е. ~680 км. Она находится на стыке докембрийского Сибирского кратона и палеозойского Саяно-Байкальского складчатого пояса (Логачев, 1999) и своим возникновением обязана процессам рифтогенеза. Само оз. Байкал простирается в длину на 636 км при ширине от 24 до 80 км (рис. 13). Площадь его водной поверхности составляет 31722 км², длина береговой линии около 2000 км, объем – 23615 км³ (Бухаров, 2001). Морфологически озеро представляет собой комбинацию трех котловин различной глубины, разделенных поднятиями.

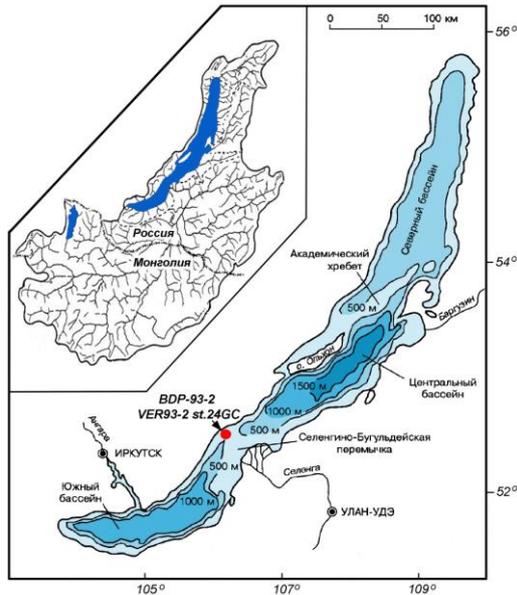


Рис. 13. Схематическая батиметрическая карта оз. Байкал (Кузьмин и др. 2001). Показано место отбора кернов BDP-93-2 и VER93-2 st.24GC. На врезке - водосборный бассейн оз. Байкал (Князева, 1954).

Геохимия вод Байкала достаточно стабильна как по площади, так и по глубине бассейна. Общая минерализация незначительно колеблется около величины в 120 мг/л (Галазий, 1987). По химическому составу воды относятся к гидрокарбонатным кальциевым. Характеристика современного климата региона приводится в главах, посвященных малым озерам Забайкалья и Приольхонья. Распределение атмосферных осадков по акватории и побережью озера крайне неравномерное, что обусловлено сложными условиями воздушной циркуляции и орографией

региона. Так, если на северо-западном берегу в Приольхонье выпадает около 200 мм/год осадков, то на востоке и юго-востоке, на наветренных склонах Баргузинского хребта и Хамар-Дабана может выпадать и 1200-1400 мм/год (Байкаловедение..., 2009).

Длительные байкальские осадочные последовательности были получены в ходе реализации международной программы «Baikal drilling project». В 1993-1999 гг. было проведено пять экспедиций, пробурено семь скважин на Селенгино-Бугульдейской перемычке, Академическом хребте и Посольской банке, и получено более 1500 м керна донных отложений возрастом 8 млн. лет (Коллектив участников..., 1995, 2000; BDP Members, 1997; Williams et al., 1997; Karabanov et al., 2000; Кузьмин и др., 2001; Prokopenko et al., 2002; Солотчина, 2009; 30 лет программе..., 2020; и др.). В настоящей работе приводятся результаты изучения голоцен-позднеплейстоценовой части разреза байкальских осадков по кернам BDP-93-2 и VER93-2 st.24GC.

Оба керна были получены на Селенгино-Бугульдейской перемычке (рис. 13), которая характеризуется сравнительно высокими темпами седиментации благодаря интенсивному привносу вещества реками Селенга и Бугульдейка. Мощность отложений в скв. BDP-93-2, отвечающих временному интервалу сартанское оледенение - голоцен (MIS2 - MIS1) составляет около 500 см, однако керн в интервале 145-190 см отсутствует. Как показало определение возраста, именно этот интервал соответствует переходу от плейстоцена к голоцену, поэтому для уточнения строения позднечетвертичного разреза с помощью гравитационного прободоотборника был получен непрерывный керн VER93-2 st.24GC, вскрывший толщу осадков мощностью 472 см (рис. 14).

Литологический анализ керна показал, что разрез позднеплейстоцен-голоценовых отложений оз. Байкал состоит из двух частей. Нижняя часть (180-472 см) представлена преимущественно голубовато-серыми алевролитистыми глинами, массивными и неяснослоистыми, с примесью песчаного материала. Верхняя часть (0-180 см) сложена зеленовато-серыми диатомовыми илами с различным содержанием биогенного кремнезема; количество створок диатомей может достигать 40% от объема осадка. В строении нижней, алевроито-глинистой части разреза, на уровне ~210-240 см выделяется интервал диатомового ила, весьма сходного по литологическим характеристикам с осадком, описанным для горизонта 0-180 см. Причины появления этого прослоя раскрываются при изучении возрастной модели разреза. Радиоуглеродное датирование образцов из керна VER93-2 st.24GC показало последовательное увеличение возраста с глубиной (рис. 14), что свидетельствует о ненарушенности разреза (Karabanov et al., 2004, Prokopenko et al., 2007, Tarasov et al., 2007).

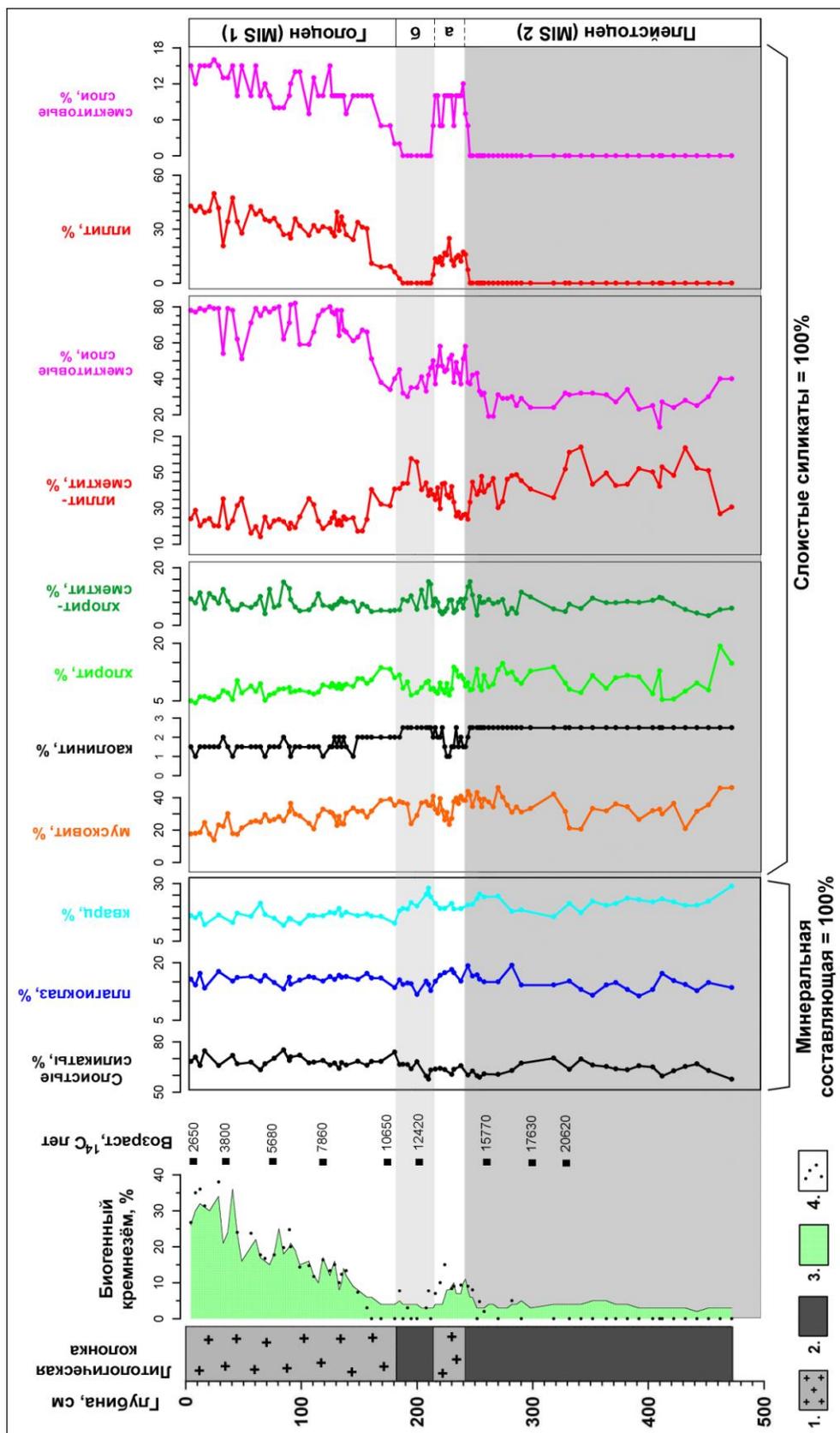


Рис. 14. Литологическая колонка, возрастная модель, распределения биогенного кремнезема и основных минеральных компонентов голоцен-позднеплейстоценовых отложений оз. Байкал, вскрытых скв. VER93-2 st.24Gc. Условные обозначения: 1 – диатомовый ил; 2 – бездиатомовая алевролитистая глина; 3 – $\text{SiO}_{2\text{био}}$ по данным щелочной экстракции; 4 - $\text{SiO}_{2\text{био}}$ по данным ИК-спектроскопии; а – потепление бёллинг-аллерёд; б – похолодание поздний дриас.

Граница между диатомовыми илами и алевритистыми глинами, проходящая на уровне 180 см, имеет возраст около 10600 ^{14}C лет и, очевидно, является рубежом плейстоцен/голоцен. Датирование подошвы диатомового горизонта в позднеплейстоценовой части разреза скв. BDP-93-2 показало радиоуглеродный возраст 13750 лет, что можно рассматривать, как начало потепления бёллинг-аллерёд, способствовавшего расцвету диатомей в оз. Байкал. Перекрывающие же диатомовый прослой алевритистые глины, имеющие возраст около 12400 лет (^{14}C) (рис. 14) накапливались во время похолодания поздний дриас.

Изучение осадков кернов BDP-93-2 и VER93-2 st.24GC методами рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии показало, что в их составе, как на ледниковых интервалах, так и в межледниковья доминируют слоистые силикаты, которые составляют 58-73% минеральной компоненты. Среди неслоистых минералов преобладают кварц и плагиоклаз, калиевый полевой шпат и амфибол присутствуют в следовых количествах. Ассоциация слоистых силикатов в байкальских отложениях представлена иллитом, смешанослойными иллит-сметкитами, слюдами, хлоритами и каолинитом (Солотчина и др., 2004; Солотчина, 2009). Методом моделирования их XRD профилей выявлены количественные соотношения этих минералов в разрезах, а также установлены кристаллохимические и структурные характеристики отдельных фаз (рис. 15).

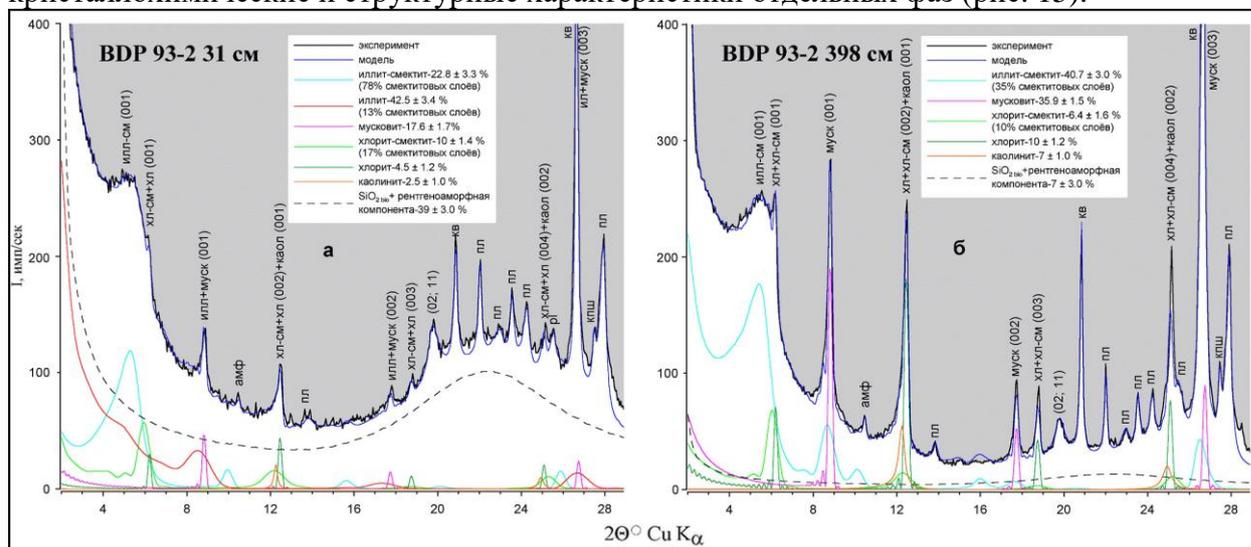


Рис. 15. Результаты моделирования XRD спектров голоцен-позднеплейстоценовых отложений оз. Байкал, вскрытых скв. BDP-93-2: а – голоцен (MIS 1), б – поздний плейстоцен (MIS 2). Сумма слоистых силикатов = 100%. Образцы насыщены этиленгликолем. Амф – амфибол; ил-см – иллит-сметтит; као – каолинит; кв – кварц; кпш – калиевый полевой шпат; муск – мусковит; пл – плагиоклаз; хл – хлорит; хл-см – хлорит-сметтит.

Мусковит, который в байкальских осадках имеет обломочный генезис, составляет от 15 до 40% слоистой компоненты, а его количество падает при переходе от плейстоцена к голоцену. Доминирующими же минералами среди слоистых силикатов почти всегда являются иллит и иллит-сметтиты. Количество иллита изменяется от следов в плейстоцене до 50% в позднем голоцене. Содержание иллит-сметтита в холодные периоды достигает 50-60% слоистого компонента, при этом концентрация сметтитовых слоев относительно невелика (около 30%). В голоценовых отложениях количество иллит-сметтита существенно ниже (15-30%), однако концентрация сметтитовых слоев в структуре минерала может достигать 75-80%, совпадая с пиковыми значениями содержания биогенного кремнезема. Нетрудно заметить, что распределения иллит-сметтита с одной стороны и иллита, а также сметтитовых слоев в иллит-сметтите – с другой, находятся в противофазе (рис. 14). Известно, что иллитизация смешанослойных иллит-сметтитов связана с концентрацией сметтитовых слоев в последних (Bethke,

Altaner, 1986). Чем выше содержание смектитовых слоев, тем меньше фиксированного калия требуется, чтобы преобразовать иллит-смектит в иллит (Środoń et al., 1986; Дриц, Коссовская, 1990). Очевидно, что формирование смешанослойных минералов в результате разложения полевых шпатов и слюд происходит как в холодном, так и в теплом климате. Однако структуры вторичных смешанослойных фаз существенно различаются в зависимости от климатических обстановок. В холодные периоды, к которым относится и поздний плейстоцен, выветривание заканчивалось формированием иллит-смектита с высоким содержанием иллитовых слоев. Из-за недостатка смектитовых слоев дальнейшая иллитизация иллит-смектитов была невозможна, и первоначальный смешанослойный компонент отлагался в озере неизменным. В голоценовое время формировались иллит-смектиты с повышенным содержанием смектитовых слоев, которые, в условиях господства теплого и влажного климата в водосборном бассейне частично преобразовывались в иллит.

Хлорит и хлорит-смектит содержатся в изученных байкальских отложениях в количестве 10-15% минеральной части. Распределения хлоритовых минералов в разрезах не показывают каких-либо отчетливых палеоклиматических сигналов. Каолинит является постоянным компонентом байкальских осадков, однако количество его невелико – не более 5% минеральной части. Ранее предполагалось (Melles et al., 1995; Yuretich et al., 1999), что рост его содержания связан с потеплением климата. Однако наши исследования показали, что поведение каолинита в разрезах сходно с таковым у обломочных компонентов – т.е. в плейстоценовых осадках его содержание доходит до 5% валового состава проб, а в голоценовых диатомовых илах не превышает 2-3%. В периоды межледниковья на территории водосбора происходит активное образование почв, в которых под действием органических кислот мусковит преобразуется в иллит и иллит-смектит. В холодное же время почвообразование угнетено в пользу образования кор выветривания, где каолинитизация мусковита – доминирующий процесс. Следовательно, падение содержания каолинита в голоцене может означать интенсификацию почвообразования в водосборе оз. Байкал.

Озеро Хубсугул, находящееся на территории Монголии, является вторым по величине водоемом Байкальской рифтовой зоны и приурочено к юго-западному ее флангу. Хубсугульская относится к рифтовым впадинам байкальского типа и имеет субмеридиональную ориентировку в отличие от депрессий, расположенных на территории России, которые ориентированы либо субширотно, либо в северо-восточном направлении (рис. 16, а).

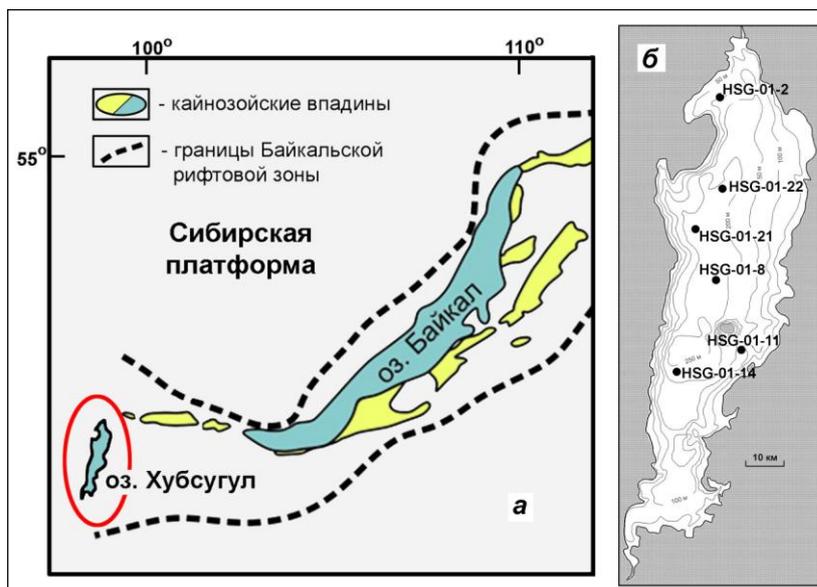


Рис. 16. Карта-схема расположения оз. Хубсугул в пределах Байкальской рифтовой зоны (а) и батиметрическая карта оз. Хубсугул (Атлас озера Хубсугул, 1989) с точками отбора кернов (б).

Структурный план региона определяется положением Хубсугульской впадины в зоне сочленения Тувино-Монгольского микроконтинента с группой раннепалеозойских

террейнов (Джидинский, Хамар-Дабанский, Тункинский) (Ярмолюк, Дегтярев, 2019). Тектонические движения, сопровождавшие эволюцию этих древних структур, привели к

образованию Прихубсугульского сводового поднятия, в осевой части которого в кайнозойе заложилась Хубсугульская впадина (Золотарев, Кулаков, 1976). Котловина оз. Хубсугул представляет собой асимметричный в поперечном разрезе грабен с более крутым западным и пологим восточным бортом. Основные морфометрические характеристики озера: площадь водной поверхности 2760 км², средняя глубина 139 м, максимальная длина – 136 км, ширина – 36,5 км, объем – 383 км³, длина береговой линии – 414 км, площадь водосборного бассейна – 4920 км². Климат Прихубсугулья умеренный, резко континентальный со значительными сезонными и суточными колебаниями температур; количество выпадающих осадков равно 300 мм/год, в горных районах возрастая до 400 мм/год. Водное питание озера осуществляется за счет 96-и впадающих в него водотоков, а также атмосферных осадков, сток происходит на юге через р. Эгийн-Гол – левый приток р. Селенга. Общая минерализация вод оз. Хубсугул равна 200-220 мг/л, по составу они относятся к гидрокарбонатным кальциевым.

Материалом для исследований послужили 6 кернов (HSG-01-2, -8, -11, -14, -21, -22) позднечетвертичных донных осадков (рис. 16, б). Отложения охарактеризованы кернами до глубины 174 см. Литологическое изучение кернового материала показало, что в строении верхней толщи хубсугульских осадков выделяются две различные по составу и структурно-текстурным особенностям части, разделенные переходным слоем (рис. 17). Верхняя часть сложена тонкими неяснослоистыми зеленовато-серыми диатомовыми илами мощностью от 14 до 78 см. Содержание SiO_{2bio} в этом горизонте может достигать 20% осадка. Нижние части разрезов представлены бездиатомовыми темно-серыми до черных глинистыми алевритами с линзами и прослоями более грубого разнообломочного материала (от мелкого песка до гравия и мелкой гальки). Во всех изученных разрезах между двумя упомянутыми толщами отмечено присутствие переходного слоя мощностью 5-25 см, представленного преимущественно светло-серым глинистым осадком, не содержащим ни диатомей, ни грубозернистых обломков (Прокопенко и др., 2003, Солотчина и др., 2003; Prokopenko et al., 2005). Согласно данным радиоуглеродного датирования, возраст осадков из переходного слоя в разрезе HSG-01-8 с учетом резервуарного эффекта составляет 12230 ¹⁴C лет (около 14200 кал. лет). Близкие датировки начала формирования тонких переходных глин получены также для кернов HSG-01-2 и HSG-01-11 (12950-13100 ¹⁴C л.н.). Указанные даты примерно отвечают окончанию позднеплейстоценового похолодания и началу потепления бёллинг-аллерёд. Принимая во внимание распределение в разрезах биогенного кремнезема, и проводя аналогию со сходными по строению верхними горизонтами байкальских осадков, рассмотренными ранее, можно утверждать следующее. Нижний слой бездиатомовых глинисто-алевритовых осадков отложился в конце сартанского оледенения. Переходный глинистый слой, вероятно, включает в себя отложения потепления бёллинг-аллерёд и похолодания позднего дриаса. Верхняя диатомовая толща сформировалась в голоцене.

Изучение минерального состава отложений показало, что они представлены преимущественно кварцем, плагиоклазом, слоистыми силикатами, амфиболом. Характерной чертой нижней глинисто-алевритовой толщи является присутствие в ней карбонатов в количестве 10-35%. Методом моделирования XRD спектров установлено, что они относятся к кальцит-доломитовому ряду и представлены широким спектром разновидностей: стехиометрическим кальцитом, Mg-кальцитами различной степени магнезиальности, Са-избыточными доломитами и стехиометрическим доломитом (рис. 17).

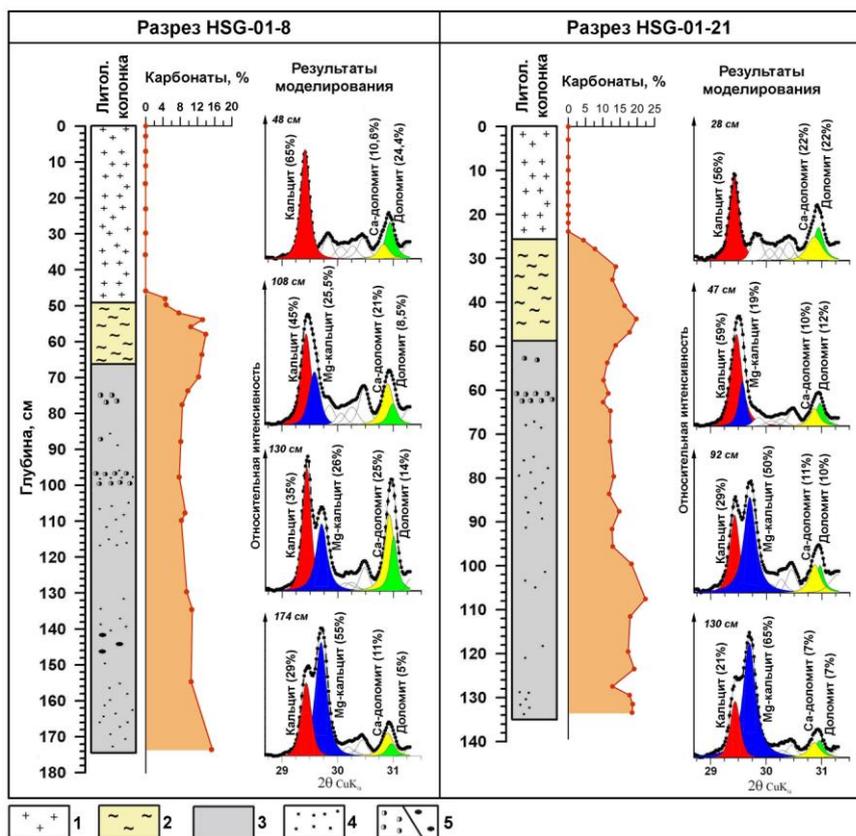


Рис. 17. Литологические колонки кернов HSG-01-8 и HSG-01-21, распределения карбонатов в разрезах, результаты моделирования XRD профилей карбонатных минералов. 1 – диатомовый ил, 2 – переходный слой, 3 – алеврито-глинистые осадки, 4 – песчаный материал, 5 – конкреции/гравийно-галечный материал.

Распределения карбонатов в наиболее протяженных разрезах HSG-01-8 и HSG-01-21 демонстрируют постепенное снижение их суммарного содержания снизу вверх по разрезу. На границе переходного слоя отмечается фактически двукратный

его рост, который сменяется резким падением и в подошве голоценовой толщи карбонаты исчезают из осадков. Если же рассматривать фазовый состав карбонатов, полученный методом моделирования их XRD профилей, то можно отметить следующую тенденцию. В осадках базальных частей обоих кернов среди карбонатных минералов существенно доминируют магниальные кальциты (55-65% от суммы карбонатов). Однако выше по разрезу их роль постепенно снижается при одновременном увеличении содержания стехиометрического кальцита, пока в переходном слое Mg-кальциты не исчезают из осадков полностью. Тренд к росту содержания снизу вверх демонстрирует также стехиометрический доломит (рис. 17). Подобное распределение карбонатов может объясняться тем, что во время образования Mg-кальцитов уровень воды в оз. Хубсугул был относительно низким, примерно на 100 м ниже современного (Прокопенко и др. 2003), а сами воды были более минерализованными. В дальнейшем водный баланс стал положительным и озеро постепенно обводнялось, что привело к опреснению и затуханию процессов хемогенного карбонатообразования. В то же время возросший речной привнос и расширение озерного бассейна существенно увеличили в осадках долю обломочных карбонатов, поступающих с территории водосбора.

Другими важнейшими компонентами хубсугульских осадков являются слоистые силикаты. По данным XRD анализа ассоциация слоистых силикатов как в голоценовой, так и в верхнеплейстоценовой частях разреза аналогична байкальской и представлена иллитом, хлоритом, мусковитом, смешанослойными иллит-смектитом и хлорит-смектитом, а также каолинитом. Содержание слоистых силикатов в диатомовых илах составляет в среднем 75-80% минеральной части осадка, в глинисто-алевритовых отложениях ~ 50-55%. Для дифференциальной диагностики этих минералов, включая смешанослойные образования, был применен метод математического моделирования их рентгеновских дифракционных профилей (рис. 18).

количество иллита и высокое содержание смектитовых слоев в иллит-смектитах, что является показателем относительно теплого и влажного климата.

Для получения более полной информации о строении позднечетвертичных разрезов глубоководных пресных озер Сибирского региона были изучены донные отложения высокогорного озера *Хикушка*, расположенного юго-восточной части Восточного Саяна – области, находившейся в позднем кайнозое под сильным влиянием процессов байкальского рифтогенеза. Оз. Хикушка приурочено к верховьям пади Хи-Гол (Долина вулканов), являющейся частью Жом-Болокского базальтового лавового поля, расположенного в зоне сочленения Окинского плоскогорья и хребтов Большой Саян и Кропоткина. Оно имеет гляциальное происхождение, и при площади водного зеркала 0,3 км² его глубина превышает 40 м. Изучение 124-см керна показало, что разрез донных осадков оз. Хикушка имеет явно выраженное двучленное строение. В интервале 88-124 см вскрыта толща однородных алеврито-глинистых осадков, практически не содержащих биогенного кремнезема. Выше по разрезу (0-88 см) залегают глинистые алевриты, насыщенные диатомеями (биогенно-терригенные илы), концентрация SiO_{2bio} в них может достигать 18%. Возраст изученных отложений лежит в диапазоне от ~ 13800 л.н. до современности. Исходя из возрастной модели, граница между алевритистыми глинами и биогенно-терригенными илами на уровне 88 см соответствует переходу от плейстоцена к голоцену. Таким образом, строение разреза оз. Хикушка в целом аналогично таковому для позднеплейстоцен-голоценовых отложений оз. Байкал, а также оз. Баунт в Забайкалье.

Доминирующими минералами в осадках озера являются слоистые силикаты; другие постоянные компоненты – кварц, плагиоклаз, КПШ, амфибол. Методом математического моделирования XRD-профилей в ансамбле филлосиликатов установлены хлорит, иллит, иллит-смектит, хлорит-смектит, вермикулит и каолинит, соотношения которых меняются при переходе от плейстоцена к голоцену. Выявленные ассоциации несколько отличается от одновозрастных ассоциаций глубоких пресноводных озер Байкал и Хубсугул, что может объясняться различием природно-климатических обстановок. Так, присутствие в голоценовой части разреза оз. Хикушка заметных количеств хлорит-смектита и вермикулита при весьма незначительном содержании обломочного мусковита может свидетельствовать о существенно более высокой степени гипергенных преобразований коренных пород обрамления в условиях высокогорья. Также помимо пород водосборного бассейна потенциальным источником вещества в озерных осадках могли служить продукты извержений близкорасположенных вулканов (Ярмолук и др., 2003; Ivanov et al., 2011). На основе проведенных комплексных исследований было выделено 5 стадий эволюции оз. Хикушка, контролируемой климатом региона в позднечетвертичное время.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. В строении голоцен-позднеплейстоценовых осадочных комплексов глубоководных пресных озер Байкальского региона всегда отчетливо обособляются две толщи. Верхняя голоценовая (MIS 1) толща сложена диатомовыми илами, содержание биогенного кремнезема в которых может достигать 40% вещественного состава. Нижние плейстоценовые (MIS 2) отложения обычно представлены смесью алевритового и пелитового материала с различным процентным содержанием фракций и могут быть как бескарбонатными (оз. Байкал, оз. Хикушка), так и карбонатными (оз. Хубсугул). Присутствие карбонатов в разрезе указывает на значительное иссушение регионального климата, которое привело к падению уровня озера, повышению минерализации вод и росту в них Mg/Ca отношения. Среди слоистых силикатов главными показателями климатических обстановок являются содержание в осадках иллита и «индекс смектитовых слоев» - концентрация смектитовых слоев в иллит-смектитах. Выветривание, происходившее в холодном сухом климате ледниковых интервалов, благоприятствовало образованию иллит-смектитов с высокой концентрацией иллитовых слоев и, соответственно, низким содержанием смектитовой компоненты. Напротив, преимущественно теплый и влажный климат способствует

образованию иллит-сметитов с высокой концентрацией сметитовых слоев, которые имеют тенденцию преобразовываться в иллит. Присутствие и количественные соотношения в осадках других слоистых силикатов (мусковита, хлорит-сметитов, каолинита, вермикулита и др.), а также неслоистых минералов в ряде случаев могут служить источником дополнительной палеоклиматической информации.

Глава 6. Донные осадки озер юга Западной Сибири

Западно-Сибирская равнина расположена в пределах одноименной плиты, являющейся частью молодой Центральноевроазиатской (Урало-Сибирской) эпипалеозойской платформы. С юга Западно-Сибирская плита (ЗСП) ограничена горными сооружениями Алтае-Саянской области, с запада и северо-запада ее обрамляет складчатый пояс Урала, с востока – Сибирская платформа и Енисейский кряж, а с северо-востока складчатые сооружения Таймыро-Североземельской области. На севере ЗСП открывается в сторону океана и переходит в пассивную окраину (рис. 19).

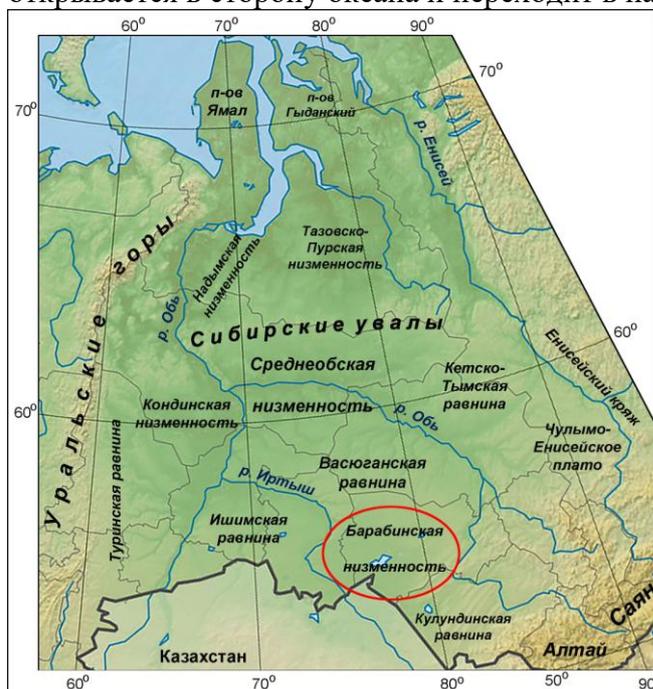


Рис. 19. Карта-схема Западно-Сибирской равнины; показан ряд наиболее крупных структурных элементов. Красным выделена территория Барабинской низменности, к которой приурочены изученные озера.

Западно-Сибирская равнина представляет собой гигантскую плоскую впадину, имеющую в плане форму трапеции, в меридиональном направлении протянувшуюся почти на 2500 км, сравнительно узкую на севере (около 725 км) и значительно – до 1900 км – расширяющуюся на юге. Основными формами современного рельефа равнины являются широкие плоские междуречья, часто заболоченные, и речные долины. Равнина дренируется более чем 2000 рек,

наиболее крупными из которых являются Обь, Иртыш и Енисей. Некоторые южные районы (Бараба, Кулунда) относятся к областям замкнутого стока, где реки впадают в бессточные озера, а в засушливые периоды могут пересохнуть полностью. Западная Сибирь – территория с достаточно суровым, континентальным климатом. Континентальность нарастает к югу, по мере удаления от побережья Северного Ледовитого океана, однако равнинность региона, его открытость с севера и юга обеспечивают свободный меридиональный перенос, что в определенной степени сглаживает температурные и погодные различия. Наибольшее количество осадков (550 – 650 мм) выпадает в лесной зоне, протянувшейся от Урала до Енисея через среднее течение Оби. К северу и к югу от полосы максимальных осадков количество их постепенно уменьшается до 250–350 мм (Гвоздецкий, Михайлов, 1987).

Озера встречаются на территории Западно-Сибирской равнины повсеместно; согласно современным представлениям здесь насчитываются сотни тысяч водоемов (по некоторым данным, около 1 млн.), а общая площадь их поверхности составляет более 100 тыс. км². Южная часть Западной Сибири отличается широким спектром минерализации расположенных здесь озерных бассейнов. В качестве объектов изучения были выбраны озера Барабинской низменности, которая представляет собой равнину, слегка наклонную с северо-востока на юго-запад и незначительно (до 100–160 м) приподнятую над уровнем

моря (рис. 19). На территории Барабы насчитывается более 2500 озер, занимаемая ими площадь превышает 5000 км², причем не менее 50% этой площади принадлежит в различной степени минерализованным водоемам (Орлова, 1990). Подавляющее большинство озер относятся к малым, однако здесь же расположено и самое крупное озеро Западной Сибири – бессточное оз. Чаны, площадь которого в настоящее время составляет около 2 тыс. км² при средней глубине ~2 м. Следует отметить, что Чаны можно считать озерной системой, включающей три почти самостоятельных бассейна – Большие Чаны, Малые Чаны и Яркуль. В свою очередь, Большие Чаны также не являются единой котловиной, а представляют собой четыре соединенных протоками и мелководными участками плёса: Ялковский, Тагано-Казанцевский, Чиняихинский и Юдинский. Сложная морфология Чановской озерной системы определяет одну из его наиболее характерных и интересных особенностей - изменчивость минерализации вод в разных суббассейнах, что объясняется низким водообменом между отдельными частями водоема и распресняющим действием питающих рек.

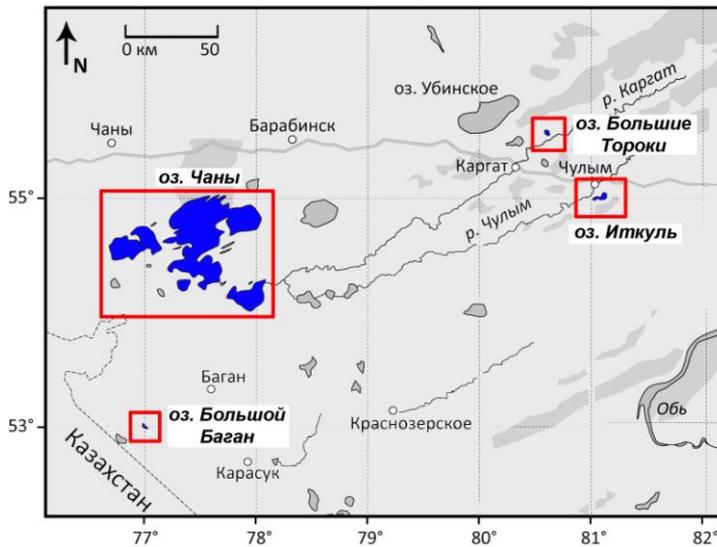


Рис. 20. Карта-схема расположения изученных озер на территории Барабинской низменности.

В работе рассматриваются результаты изучения донных отложений пяти бассейнов Барабинской низменности: двух суббассейнов Чановской озерной системы – Ялковского плёса и Малых Чанов, озер Иткуль, Большие Тороки и Большой Баган (рис. 20).

Все изученные озера относятся к категории мелководных, по степени минерализации их воды

варьируют от слабо солоноватых (оз. Малые Чаны, Большие Тороки ~ 1 г/л) до рассолов (оз. Большой Баган – 282 г/л) (табл. 3); по химическому составу они относятся преимущественно к хлоридным и гидрокарбонатным натриевым.

Таблица 3. Некоторые данные о глубине, минерализации, мощности и возрасте отложений изученных озер юга Западной Сибири

Озеро	Ср. глубина, м	Мощность изученного разреза, см	Минерализация, г/л	Начало озерной седиментации
Ялковский плёс оз. Чаны	~2,0	274	~7,0	вторая половина бореала
Малые Чаны	~2,0	290	~1,0	вторая половина бореала
Иткуль	1,5-1,8	162	~2,0	вторая половина бореала
Большие Тороки	0,5-1,5	160	~1,0	середина атлантика
Большой Баган	<1,0	284	282,0	вторая половина бореала

Гранулометрический анализ кластической компоненты озерных отложений показал, что в подавляющем большинстве она представлена глинистыми алевритами с примесью песка, обычно незначительной; лишь в разрезах оз. Чаны доля псаммитового материала иногда может достигать 40-50%. Также осадки обычно содержат то или иное количество органического вещества, вплоть до формирования органоминеральных илов с содержанием ОВ 35% и более, как, например, в оз. Большие Тороки. Характерной чертой всех изученных разрезов является то, что бассейновые осадки подстилаются однотипными лессовидными субэразальными отложениями т.н. «гривной толщи», образующими специфические формы рельефа в виде линейно вытянутых гряд («грив»), ориентированных с юго-запада на северо-восток. Озера обычно приурочены к межгривным понижениям.

В терригенной части отложений доминируют кварц, плагиоклаз, слоистые силикаты (слюда, хлорит, каолинит, иллит), КПШ в различных соотношениях; эпизодически отмечаются амфибол, пирит. Аутигенные минералы изученных озер представлены карбонатами: Mg-кальцитами различной степени магнезиальности и Са-избыточным доломитом, в подчиненных количествах присутствует арагонит, иногда отмечается незначительная примесь родохрозита и Mg-сидерита. Гипс обычно присутствует в следовых количествах, кроме гиперсалинного оз. Большой Баган, где он, наряду с галитом слагает значительную часть хемогенной компоненты осадка. Методом моделирования XRD профилей для всех изученных озер была проведена дифференциальная диагностика и определены количественные соотношения присутствующих в осадках карбонатных фаз (рис. 21). Сопоставление результатов минералогических и кристаллохимических исследований с данными других видов анализов позволили выделить стадии эволюции озерных бассейнов, обусловленные изменениями климата юга Западной Сибири в голоцене. Характерной особенностью осадочных разрезов западносибирских озер является то, что границы этих стадий, как правило, хорошо коррелируются с границами климатических фаз по шкале Блитта-Сернандера.

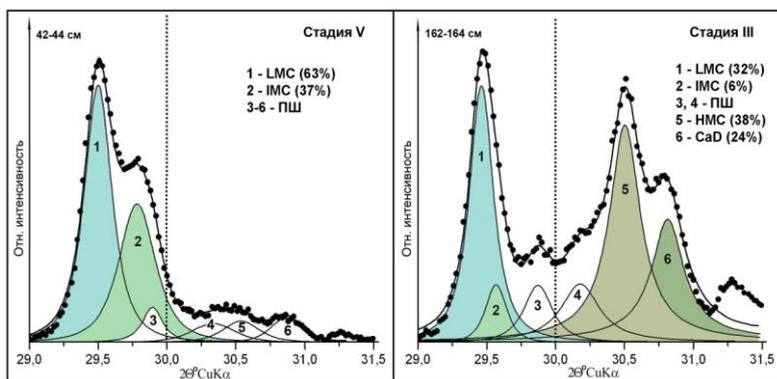


Рис. 21. Результаты моделирования экспериментальных XRD профилей карбонатов кальцит-доломитового ряда из осадков Ярковского плёса. Условные обозначения см. рис. 3.

Субаквальное осадконакопление в бассейнах озер Чаны, Иткуль и Большой Баган началось во второй половине бореала (около 8500-

9000 кал. л.н.), что позволяет считать данный период важнейшим этапом голоценовой климатической летописи региона. Судя по набору аутигенных минералов, климат в указанный период был достаточно влажным, чтобы обеспечить обводнение озерных котловин. Начало атлантического периода, согласно карбонатным записям озер Иткуль и Большой Баган, ознаменовалось заметной аридизацией природно-климатических обстановок. Общее содержание карбонатов в разрезах и степень их магнезиальности растет, в осадках появляется хемогенный арагонит. На кривой распределения карбонатов в разрезе оз. Большой Баган отмечается значительный максимум, который, согласно полученной возрастной модели, можно соотнести с глобальным климатическим событием Бонда-4 (засуха). В то же время на середину атлантического периода (~6900 кал. л.н.) приходится начало седиментации в бассейне оз. Большие Тороки. Можно предположить, что в данном случае вступили в силу локальные факторы в виде интенсивного притока

подземных вод, который в последней трети атлантика постепенно компенсируется испарением, поскольку содержание карбонатов в осадках оз. Большие Тороки растёт.

Суббореальный период на юге Западной Сибири был несколько более прохладным, чем атлантический, но по-прежнему отличался значительной аридностью. Об этом свидетельствует высокое содержание аутигенных карбонатов в разрезах: в оз. Иткуль до 35-40%, а в оз. Большие Тороки – до 50% от минеральной части осадка. На крайнем юге региона климатические обстановки суббореала были нестабильными, карбонатная составляющая в отложениях оз. Большой Баган варьирует от 10 до 40%. Возможно, таким образом могло проявляться периодическое доминирование либо северного (Арктического), либо южного (из Казахстана и Средней Азии) переноса воздушных масс. Субатлантический период, по результатам изучения отложений озёр Иткуль и Большие Тороки, в целом характеризуется некоторой гумидизацией регионального климата, которая выразилась в повышении уровня вод, снижении общего содержания (Ca,Mg)-карбонатов в разрезах и уменьшении степени их магниальности. В осадках гиперсалинного оз. Большой Баган такой тенденции не наблюдается. Колебания кривой распределения карбонатов и вариации в ансамбле минералов указывают на циклы относительного увлажнения/иссушения климата продолжительностью до нескольких сотен лет. Отмечаются возможные проявления глобальных климатических флуктуаций, так, практически двукратный рост карбонатности осадков оз. Большой Баган на уровне ~1200-1300 кал. л.н. может соответствовать событию Бонда 1 (позднеантичный малый ледниковый период). Общим для последнего этапа эволюции озёр Иткуль, Большие Тороки и Большой Баган является некоторое нарастание признаков аридизации климата в кровле разрезов, т.е. за последние несколько десятков лет.

Отдельного рассмотрения заслуживают голоценовые осадочные летописи Чановской озерной системы. Литолого-минералогическое изучение и определение возраста донных отложений Ярковского плёса (северо-восточный суббассейн оз. Большие Чаны) показали, что осадконакопление началось здесь не позднее 9100 кал. л.н., однако за первые 6500-7000 лет существования водоема (вторая половина бореала, атлантик, суббореал) в нем отложилось менее половины из 274-сантиметровой озерной толщи. Сходная картина наблюдается и в осадочном разрезе оз. Малые Чаны. Образование Чановской озерной системы связано с общим потеплением и гумидизацией климата Сибири в бореальном периоде. На это указывает преимущественное осаждение низкомагниальных кальцитов, а также изотопный состав кислорода и углерода в низах разрезов. Наступление атлантического периода ознаменовалось катастрофическим обмелением Чановского бассейна. Судя по малому количеству осадков, на протяжении всего атлантика и первой половины суббореала имели место весьма длительные перерывы в осадконакоплении, что было обусловлено значительным иссушением климата. Кроме того, по современным представлениям (Кривоногов и др., 2018) основные притоки оз. Чаны – реки Каргат и Чулым – протекали через серию понижений рельефа, которые долгое время служили промежуточными озерами и перехватывали речной сток, пока около 2000 л.н. не заполнились аллювиально-озерными отложениями. Во второй половине суббореального периода оз. Чаны представляло собой мелководный бассейн с повышенной минерализацией, на что указывает осаждение высоко-Mg кальцитов и Ca-избыточных доломитов и высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$. В начале субатлантического периода происходит рост содержания низкомагниальных разновидностей кальцитов и почти полное исчезновение высокомагниальных, что говорит об увлажнении регионального климата в позднем голоцене. Присутствие небольшого количества высоко-Mg кальцитов и Ca-доломита в кровле разреза может указывать на тенденцию к аридизации климата за последние ~100 лет.

Заключение

Позднеплейстоцен-голоценовые отложения озер Сибири представляют собой естественные архивы, в которых зафиксированы изменения природной среды и климата региона. Материалом послужили донные осадки 25-и бассейнов, детальное исследование литолого-минералогических особенностей большинства из которых ранее не проводилось. В работе широко применялись авторские методики математического моделирования сложных XRD профилей минералов в многокомпонентных системах; с их помощью была проведена диагностика и изучены структурные особенности хемогенных карбонатов (солончатые и соленые озера) и слоистых силикатов (пресные озера).

Установлено, что в составе отложений минеральных озер как Восточной, так и Западной Сибири заметную роль играют аутигенные компоненты, главными из которых являются карбонаты. Показано, что в ансамбле карбонатных минералов донных осадков наиболее широко распространены магнезиальные кальциты $(Ca,Mg)CO_3$ и Ca-избыточные доломиты $CaMg[CO_3]_2$. Для детального описания этих минералов среди них выделяются три группы: 1) низкомагнезиальные кальциты с содержанием $MgCO_3$ в структуре < 4-5 мол.%; 2) промежуточные магнезиальные кальциты с 5-18 мол.% $MgCO_3$ в структуре; 3) высокомагнезиальные кальциты с содержанием 18-43 мол.% $MgCO_3$. Ca-избыточные доломиты, в структуре которых избыток $CaCO_3$ может достигать 7 мол.% по отношению к доломиту *sensu stricto*, следует считать крайними членами ряда Ca-Mg безводных карбонатов. Математическим моделированием рентгеновских дифракционных профилей с помощью функции Пирсона VII было установлено, что пики карбонатных минералов, как правило, формируются в виде двух максимумов сложной формы и переменной интенсивности: 1) низкомагнезиальных и промежуточных кальцитов и 2) высокомагнезиальных кальцитов и Ca-избыточных доломитов. Осаждение тех или иных карбонатных фаз определяется рядом параметров: химизмом озерных вод, соленостью, величиной pH, температурой, органической продуктивностью озера, которые зависят, в свою очередь, от климатических условий. Применение модельного подхода к изучению карбонатов голоценовых донных отложений минеральных озер Сибири показало, что иссушение климата, сопровождавшееся падением уровня вод, приводило к осаждению серии высокомагнезиальных кальцитов и Ca-доломитов, в то время как теплый и влажный климат способствовал формированию низкомагнезиальных и промежуточных разновидностей кальцитов. Таким образом, минералого-кристаллохимические особенности озерных (Ca,Mg)-карбонатов являются надежными индикаторами изменений регионального климата.

В пресноводных озерных бассейнах, где карбонатная седиментация незначительна или отсутствует, минералами-индикаторами палеоклимата могут выступать слоистые силикаты (филлосиликаты), ассоциации, состав, структура, типоморфные особенности которых отражают физико-химические обстановки выветривания, переноса и осаждения вещества. Для корректной идентификации, определения минералого-кристаллохимических характеристик и количественных соотношений слоистых силикатов в работе применялся метод моделирования их XRD профилей. Использование модельного подхода позволило установить, что основными индикаторами природно-климатических палеообстановок в изученных бассейнах являются содержание в осадках иллита и концентрация смектитовых слоев в иллит-смектитах. Выветривание, происходившее в холодном сухом климате, благоприятствовало образованию иллит-смектитов с повышенным содержанием иллитовых слоев. Напротив, преимущественно теплый и влажный климат способствует образованию иллит-смектитов с высокой концентрацией смектитовых слоев, которые имеют тенденцию преобразовываться в иллит, что ведет к росту его содержания в отложениях гумидных периодов.

Проведенные исследования, включавшие помимо минералого-кристаллохимического изучения осадков также анализ распределения в них ряда химических элементов и стабильных изотопов, гранулометрический, палинологический и

диатомовый анализы, позволили сделать ряд выводов об эволюции природной среды и климата в позднеплейстоцен-голоценовое время на севере Азиатской части континента. Глобальные климатические события нашли свое отражение в осадочных последовательностях глубоководных пресных озер Восточной Сибири, таких как Байкал, Хубсугул, Баунт. По чередованию «холодных» и «теплых» ассоциаций слоистых силикатов, колебаниям содержания биогенного кремнезема и ряду других признаков в разрезах этих озер отчетливо выделяются интервалы, отвечающие похолоданиям древнейшего и позднего дриаса, потеплению бёллинг-аллерёд, голоценовому межледниковью.

Возраст подавляющего большинства малых минеральных озер, отложения которых рассматриваются в работе, не выходит за пределы голоцена. Для расчленения и корреляции разрезов использовалась климатостратиграфическая схема Блитта-Сернандера. Благоприятным для озерообразования на большей части территории региона был бореальный период (~10500-7800 л.н.), особенно его вторая половина. Присутствующие в отложениях бореала ассоциации хемогенных карбонатов указывают на достаточно высокую гумидность климата. Что касается атлантического периода (~7800-5700 л.н.), то при сохранении общей тенденции к потеплению степень увлажнения/иссушения климата может значительно варьировать в различных районах Сибири. Так, палеоклиматические индикаторы, выявленные в отложениях озер Приольхонья указывают на сравнительно высокую гумидность первой половины атлантика. В то же время изучение одновозрастных осадков бассейнов юга Западной Сибири, напротив, показало значительную степень иссушения климата в сравнении с бореалом. Все это говорит о преобладающем влиянии локальных природно-климатических обстановок на характер седиментации в атлантическое время.

Суббореальный период (~5700-2600 л.н.) и большая часть субатлантика (~2600 л.н. – наше время) в Байкальском регионе, по данным проведенных исследований, в целом были суше и, вероятно, холоднее атлантического эпизода. Некоторое смягчение природно-климатических обстановок и в Забайкалье и в Приольхонье началось только во второй половине субатлантического периода. На юге Западной Сибири суббореальный период также был достаточно прохладным и сухим. С началом же субатлантика проявился тренд изменения климата в сторону увлажнения, выражающийся в повышении уровня вод, снижении общего содержания (Ca, Mg)-карбонатов и уменьшении степени их магниальности. Лишь в кровле разрезов отмечается признаки некоторого роста аридности, однако говорить о новом цикле иссушения климата пока преждевременно.

Таким образом, предложенный комплексный подход к изучению донных осадков озер, основанный на литолого-минералогических и кристаллохимических исследованиях, позволяет как на региональном уровне, так и на уровне отдельных озерных систем выявлять палеоклиматические флуктуации различных порядков – от длительных до короткопериодических. В современных условиях глобального потепления при оценке природного потенциала территорий для целей аграрного землепользования, ландшафтного планирования, высока необходимость учитывать результаты реконструкции изменений природной среды и климата в изученных районах в недавнем геологическом прошлом – голоцене и позднем плейстоцене.

Список основных публикаций по теме диссертации

Глава в коллективной монографии

Солотчина Э.П., Солотчин П.А. Минеральный состав донных осадков озера Байкал по данным глубоководного бурения // 30 лет программе «Байкал-бурение» / Отв. ред.: М.И. Кузьмин, Е.В. Безрукова. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – С. 215-235.

Статьи в рецензируемых изданиях

1. **Солотчин П.А.**, Кузьмин М.И., Солотчина Э.П., Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Жданова А.Н., Кривоногов С.К. Осадочная летопись озера Большой Баган (Западная Сибирь): отклик на климатические события голоцена // Докл. РАН. – 2022. – Т. 506. – № 2. – С. 202-209.
2. **Solotchin P.A.**, Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Maltsev A.E., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Zhdanova A.N. Climate signals in the Holocene bottom sediments of shallow saline lakes of the Southwestern Siberia // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – № 4 – P. 172-174.
3. **Солотчин П.А.**, Кузьмин М.И., Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Страховенко В.Д., Щетников А.А., Жданова А.Н. Позднечетвертичное осадконакопление в высокогорном озере Хикушка (Восточный Саян): роль климатического и вулканического факторов // Докл. РАН. – 2021. – Т. 501. – № 1. – С. 49-56.
4. Солотчина Э.П., Кузьмин М.И., **Солотчин П.А.**, Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Кривоногов С.К. Минералогические индикаторы изменений климата юга Западной Сибири в голоценовых осадках озера Большие Тороки // Докл. РАН. – 2021. – Т. 496. – № 1. – С. 22-29.
5. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Жданова А.Н. Климатические сигналы в позднечетвертичных донных осадках озера Баунт (Северное Забайкалье) // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – № 10. – С. 1397-1408.
6. **Solotchin P.A.**, Solotchina E.P., Bezrukova E.V., Zhdanova A.N. Phyllosilicates in bottom sediments of Lake Baunt (northern Transbaikalia) as indicators of paleoclimate // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – № 4 – P. 548-559.
7. Солотчина Э.П., Кузьмин М.И., **Солотчин П.А.**, Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Даниленко И.В. Аутигенные карбонаты голоценовых осадков озера Иткуль (юг Западной Сибири) – индикаторы изменений климата // Докл. РАН. – 2019. – Т. 487. – № 1. – С. 54-59.
8. Жданова А.Н., Солотчина Э.П., Кривоногов С.К., **Солотчин П.А.** Минеральный состав осадков озера малые Чаны как индикатор изменения климата голоцена (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 10. – С. 1458-1471.
9. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Страховенко В.Д., Жданова А.Н., Даниленко И.В. Аутигенное карбонатообразование в малых озерных бассейнах западного Забайкалья // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т. 24. – № 6. – С. 45-54.
10. Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., **Солотчин П.А.**, Шток О., Жданова А.Н. Позднеплейстоцен-голоценовое осадконакопление в озерах Центрального Забайкалья как показатель состояния окружающей среды // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59 – № 11. – С. 1777–1794.
11. Маркова Ю.Н., Ощепкова А.В., Кузьмин М.И., Солотчина Э.П., **Солотчин П.А.**, Бычинский В.А., Чудненко К.В. Влияние изменений климата позднего плейстоцена-голоцена на состав донных отложений Селенгино-Бугульдейской перемычки озера Байкал // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2018. – Т. 26. – № 3. – С.109-116.
12. **Солотчин П.А.**, Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Маркова Ю.Н. Карбонатная седиментация в малых минеральных озерах Западного Забайкалья: отклик на изменения климата голоцена // Докл. РАН. – 2017. – Т. 473. – № 6. – С. 703-708.
13. Солотчина Э.П., Скляров Е.В., **Солотчин П.А.**, Замана Л.В., Даниленко И.В., Склярова О.А., Татьков П.Г. Аутигенное карбонатообразование в озерах Еравнинской группы (Западное Забайкалье): отклик на изменения климата голоцена // Геология и геофизика. – 2017. – Т.58. – № 11. – С.1749-1763.
14. Жданова А.Н., Солотчина Э.П., **Солотчин П.А.**, Кривоногов С.К., Даниленко И.В. Отражение изменений климата голоцена в минералогии донных осадков Яркового плеса озера Чаны (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 856-868.

15. **Солотчин П. А.**, Склярлов Е. В., Солотчина Э. П., Замана Л. В, Склярова О. А. Новая находка когаркоита $\text{Na}_3\text{SO}_4\text{F}$ в Забайкалье // Докл. РАН. – 2015. – Т. 462. – № 6. – С. 701-705.
16. Даниленко И.В., **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П. Минералогия голоценовых осадков малых озер Байкальского региона: связь с палеоклиматом // Известия РАН. Серия географическая. – 2015. – № 4. – С. 107-112.
17. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., Страховенко В.Д., **Солотчин П.А.**, Склярова О.А. Минералогия и кристаллохимия карбонатов современных осадков малых озер Приольхонья (Байкальский регион) // Докл. РАН. – 2015. – Т. 461. – № 5. – С. 579-585.
18. Страховенко В.Д., Солотчина Э.П., Восель Ю.С., **Солотчин П.А.** Геохимические факторы аутигенного минералообразования в донных отложениях озер Тажеранской системы (Прибайкалье) // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 10. – С. 1825-1841.
19. Солотчина Э.П., **Солотчин П.А.** Состав и структура низкотемпературных природных карбонатов кальцит-доломитового ряда // Журнал структурной химии. – 2014. – Т. 55. – № 4. – С. 814-820.
20. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., **Солотчин П.А.**, Вологина Е.Г. Склярова О.А. Минералогия и кристаллохимия карбонатов голоценовых осадков озера Киран (Западное Забайкалье): связь с палеоклиматом // Геология и геофизика – 2014. – Т. 55 – № 4. – С. 605-618.
21. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., **Солотчин П.А.**, Вологина Е.Г., Склярова О.А., Ухова Н.Н. Голоценовая осадочная летопись озера Большое Алгинское, Западное Забайкалье: связь с палеоклиматом // Докл. РАН. – 2013. – Т. 449. – №1. – С. 80-86.
22. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., **Солотчин П.А.**, Вологина Е.Г., Столповская В.Н., Склярова О.А., Ухова Н.Н. Реконструкция климата голоцена на основе карбонатной осадочной летописи малого соленого озера Верхнее Белое, Западное Забайкалье // Геология и геофизика – 2012 – Т. 53. – № 12. – С. 1756-1775.
23. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., Вологина Е.Г., **Солотчин П.А.**, Столповская В.Н., Склярова О.А., Изох О.П., Ухова Н.Н. Климатические сигналы в карбонатной осадочной летописи голоцена озера Намши-Нур, Западное Прибайкалье // Докл. РАН. – 2011. – Т. 436. – № 6 – С. 814-819.
24. Склярлов Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Игнатова Н.В., Изох О.П., Кулагина Н.В., Склярова О.А., **Солотчин П.А.**, Столповская В.Н., Ухова Н.Н., Федоровский В.С., Хлыстов О.М. Детальная летопись климата голоцена из карбонатного разреза соленого озера Цаган-Тырма, Западное Прибайкалье // Геология и геофизика – 2010. – Т. 51. – № 3. – С. 303-328.
25. Склярлов Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Изох О.П., Кулагина Н.В., Орлова Л.А., Склярова О.А., **Солотчин П.А.**, Столповская В.Н., Ухова Н.Н. Климатическая история голоцена Западного Прибайкалья в карбонатной осадочной летописи озера Холбо-Нур // Докл. РАН – 2010. – Т. 431 – № 5. – С. 668-674.
26. Solotchina E.P., Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., **Solotchin P.A.**, Zhdanova A.N. Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Hovsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core // Quaternary International. – 2009. – V. 205. – P. 38-52.
27. Солотчина Э.П., Кузьмин М.И., Столповская В.Н., Прокопенко А.А., **Солотчин П.А.** Минералогия карбонатов в осадках озера Хубсугул: водный баланс и палеоклиматические обстановки // Докл. РАН. – 2008. – Т. 419 – № 3 – С. 387-392.
28. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., Вологина Е.Г., Орлова Л.А., Склярова О.А., **Солотчин П.А.**, Столповская В.Н., Федоровский В.С., Хлыстов О.М. Карбонаты в осадочной летописи соленого озера Цаган-Тырма (Западное Прибайкалье): новый тип палеоклиматических сигналов высокого разрешения // Докл. РАН. – 2008. – Т. 421 – № 3 – С. 391-398.

29. Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Williams D.F., Gelety V.F., Kalmychkov G.V., Gvozdkov A.N., **Solotchin P.A.** Basin-wide sedimentation changes and deglacial lake-level rise in the Hovsgol basin, NW Mongolia // *Quaternary International*. – 2005. – V. 136. – P. 59-70.

30. BDP-99 Baikal Drilling Project Members (Bezrukova E., Bychinskiy V., ... **Solotchin P.** et al.). A new Quaternary record of regional tectonic, sedimentation and paleoclimate changes from drill core BDP-99 at Posolskaya Bank, Lake Baikal // *Quaternary International*. – 2005. – V. 136. – P. 33-48.

Сборники трудов

1. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Кривоногов С.К., Жданова А.Н. Карбонатная седиментация в малом соленом озере Большой Баган (юг Западной Сибири): зависимость от изменений климата голоцена // *Материалы I Всерос. науч. конф. «Добрецовские чтения: Наука из первых рук»*. – Новосибирск: СО РАН. – 2022. – С. 307-310.

2. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Жданова А.Н. Глинистые минералы донных отложений малых озер Сибири – индикаторы изменений позднечетвертичного климата // V Рос. совещ. по глинам и глинистым минералам. *Материалы докладов*. – М.: ИГЕМ РАН. – 2021. – С. 184-186.

3. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Безрукова Е.В. Минералогия озерных отложений Центрального Забайкалья как индикатор климата в позднечетвертичное время // *Материалы XVIII Всерос. совещ. «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)»*. Иркутск: ИЗК СО РАН. – 2020. – С. 357-358.

4. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Даниленко И.В., Шолохова Ю.Н. Аутигенное минералообразование в голоценовых донных осадках озер юга Западной Сибири: связь с палеоклиматом // *Материалы IX Всерос. литологического совещ. (с международным участием) «Литология осадочных комплексов Евразии и шельфовых областей»*. – Казань. – 2019. – С. 446-447.

5. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Даниленко И.В. Особенности хемогенного карбонатообразования в донных отложениях малых озер аридных и семиаридных зон Северной Азии // *Материалы 12 Уральского литол. совещ. «Осадочная геология Урала и прилежащих регионов: сегодня и завтра»*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН – 2018. – С. 329-331.

6. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Скляр Е.В. Минералогия донных осадков малых озер аридных зон Байкальского региона – перспективный подход к реконструкциям климата голоцена // *Материалы I Междунар. конф. «Озера Евразии: проблемы и пути их решения»*. – Петрозаводск. – 2017. – С. 406-411.

7. **Solotchin P.A.**, Solotchina E.P., Zhdanova A.N., Danilenko I.V. Composition of bottom sediments from lakes of Western Siberia south part as an indicator of Holocene climate changes // *Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current Status: Proceedings of the Intern. Conf.* – Yakutsk. – 2016. – С. 126-130.

8. **Солотчин П.А.**, Солотчина Э.П., Скляр Е.В. Голоценовое осадконакопление в малых озерах аридных зон Байкальского региона // *Материалы VIII Всерос. литол. совещ. «Эволюция осадочных процессов в истории Земли»*. – Москва. – 2015. – Т. I. – С. 168-171.

9. **Солотчин П.А.**, Даниленко И.В., Бердюгина К.Р. Минералогия и кристаллохимия озерных карбонатов кальцит-доломитового ряда как основа для региональных палеоклиматических реконструкций // *Материалы XVIII Междунар. совещ. «Кристаллохимия, рентгенография и спектроскопия минералов»*. – Екатеринбург. – 2014. – С. 180-182.

10. Солотчина Э.П., **Солотчин П.А.**, Скляр Е.В. Хемогенные карбонаты голоценовых осадков малых соленых озер аридных зон // *Материалы VII Всерос. литол. совещ. «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории»*. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН. – 2013. – С. 132-136.