

На правах рукописи



Ощепкова Анастасия Владимировна

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО  
СОСТАВА ОЗЕРНЫХ ОСАДКОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

25.00.09 Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук

Иркутск-2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** кандидат геолого-минералогических наук  
Бычинский Валерий Алексеевич

**Официальные оппоненты:** доктор геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Леонова Галина Александровна  
ИГМ СО РАН, г. Новосибирск

кандидат геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник  
Щетников Александр Александрович  
ИЗК СО РАН, г. Иркутск

**Ведущая организация:** Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Лимнологический институт  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск

Защита состоится 4 декабря 2018 г. в 10:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу 664033, а/я 304, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а;  
Тел/факс: 8(3952) 42-70-50  
e-mail: korol@igc.irk.ru  
<http://igc.irk.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте (<http://www.igc.irk.ru>) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.г.-м.н.



Г.П. Королева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Озерные осадки хранят в себе запись геологических и климатических событий, происходивших на континенте. Условия выветривания, существовавшие в водосборном бассейне, отражаются в составе и соотношении минералов в осадке. Однако, если биогенные индикаторы изменения климата и общий химический состав получить относительно просто, минералогические исследования многометровых осадочных разрезов – дорогостоящий и занимающий много времени процесс. Физико-химическое моделирование позволяет оценить соотношения минералов в осадках по химическому составу. На основе программного комплекса «Селектор» создана универсальная физико-химическая модель для определения минерального состава донных осадков, сформированных в пределах Байкальской рифтовой зоны. Интерпретация полученных данных позволяет дополнить, уточнить и детализировать взаимосвязь минерального состава и изменения климатических условий в Центрально-Азиатском регионе.

**Цель исследования:** разработать универсальный способ расчета минерального состава различных типов донных осадков (бескарбонатных биогенно-терригенных илов, карбонатных глин и илов) с использованием данных о химическом составе отложений. Затем, используя полученные результаты, провести палеоклиматические реконструкции, и определить возможный источник сноса осадочного вещества.

### **Основные задачи:**

1) Обобщить имеющиеся результаты изучения геолого-геохимических характеристик объектов исследования. Обзор предшествующих исследований позволит выбрать наиболее представительные объекты для дальнейшего моделирования.

2) Уточнить факторы, контролирующие формирование химического и минерального состава донных осадков установить их взаимосвязь со структурно-геологическими и географическими особенностями водосборного бассейна с целью определения независимых параметров в физико-химической модели.

3) С помощью разработанной физико-химической модели рассчитать минеральный состав донных отложений озер Байкал, Хубсугул, Баунт.

4) Выявить в рассчитанном минеральном составе осадков палеоклиматические индикаторы.

5) Сопоставить полученные в настоящем исследовании реконструкции изменения климата и природной среды на основе минерального состава с региональными и глобальными моделями природно-климатических вариаций.

## **Научная новизна**

Разработан алгоритм экспрессного расчета минерального состава, позволяющий выявить палеоклиматические сигналы в осадочном разрезе без трудоемких минералогических исследований. Разработка способа расчета минерального состава осадков по химическому, с учетом корректировки количества воды (H<sub>2</sub>O), включаемой в модель, повысила точность расчетов. Такой подход может использоваться для исследования любых осадочных разрезов как субаквального, так и субаэрального генезиса, поскольку для определения минерального состава необходимы только данные по химическому составу осадка, а адаптация модели для определенного типа пород занимает намного меньше времени, чем детальное минералогическое исследование.

Разработан и предложен новый индекс изменения природной среды - коэффициент обломочности, усредняющий вариации содержания глинистых минералов, снижающий погрешности расчетов и повышающий корректность использования данных моделирования для палеоклиматических построений.

## **Фактический материал**

Работа выполнена с использованием результатов химического, диатомового и палинологического анализов, полученных в аналитических лабораториях Института геохимии СО РАН, обобщенных в работах коллективов авторов проекта Байкал-бурение, Хубсугул-бурение и предоставленных автору научным руководителем этих проектов академиком РАН Кузьминым М.И. Часть результатов химических анализов была предоставлена Ивановым Е.В. Все использованные в настоящей работе результаты литологического, диатомового и палеомагнитных анализов опубликованы [Коллектив..., 1998, 2000, 2001; Глобальные и региональные., 2008, Кузьмин и др., 2000, Кузьмин и др., 2014, Novsgol Drilling Project Members, 2009, Коллектив, 2007, и др.]. Донные отложения озера Баунт получены в результате совместных полевых работ сотрудников Института геохимии СО РАН и Института земной коры СО РАН. Автор благодарен научному руководителю экспедиционных исследований в котловине оз. Баунт, д.г.н., гл. н.с. ИГХ СО РАН Безруковой Е.В. за предоставление материалов изучения донных отложений оз. Баунт. Моделирование осадков Баргузинской долины выполнено по данным, представленными к.г.-м.н., ст. н. с. Института земной коры СО РАН Чувашовой И.С.

## **Личный вклад соискателя**

1. На основании фактического материала, собранного предыдущими исследователями [Коллектив..., 1995, 1998, 2000, 2001], автором проведен анализ, обобщение аналитической информации.

2. С помощью симплекс-метода экспрессно определено соотношение минеральных фаз в осадке и на основе этих результатов сделаны предварительные выводы о смене теплых и холодных периодов.

3. Разработана модель расчета минерального состава донных осадков на ПК «Селектор». Модифицирована существующая модель твердых растворов для глинистых минералов.

4. Разработано специальное дополнение к программе «Селектор», автоматически вычисляющее стехиометрические формулы и термодинамические параметры моделируемых глинистых минералов.

5. Проведено моделирование минерального состава донных осадков озер Байкал, Хубсугул, Баунт.

6. Разработан и применен новый критерий для оценки условий выветривания в водосборном бассейне – коэффициент обломочности. Коэффициент обломочности (КО) является отношением суммы минералов-индикаторов холодного климата (мусковита и хлорита) к сумме минералов-индикаторов теплого климата (иллита и иллит-сметита) [Ощепкова и др., 2015].

7. Изменения КО и минерального состава донных отложений сопоставлены с возрастными моделями отложений изученных озер и известными региональными и глобальными климатическими событиями.

8. Подтверждено соответствие основных событий в геологической и климатической истории региона их глобальным аналогам.

### **Практическая значимость**

Исследования ассоциаций глинистых минералов в осадочных летописях составляет важную часть комплексного подхода к реконструкциям прошлых изменений климата в водосборных бассейнах озер. Реконструкции закономерностей особенностей ритмичности природных обстановок прошлого являются единственным источником сведений о долгосрочных тенденциях развития ландшафтов и климата и, таким образом, служат для прогнозирования их изменений в будущем. Изучение внутриконтинентальных областей ярко показывает пространственную дифференциацию эко- и геосистем во времени и неоднородность их отклика на глобальные климатические сигналы. Это следует учитывать в сценариях будущих природных изменений, играющих значительную роль в разработке глобальных политических и экономических стратегий.

Метод расчета минерального состава на основании данных химического анализа может использоваться при изучении любых осадочных разрезов. Данный подход позволяет не только рассчитывать по химическому составу осадка его общий

минеральный состав и сводные стехиометрические формулы твердых растворов, но и расширять базу термодинамических данных. В конечном итоге это позволяет определить физико-химические условия образования глинистых минералов, и уточнить эмпирически полученные геотермометры, поскольку расчеты выполняются на основе твердых растворов, миалы которых имеют уравнения теплоемкости.

### **Защищаемые положения**

1. Химические особенности ассоциаций слоистых силикатов, накопленных в донных отложениях, позволяют определить преобладающие условия выветривания в водосборном бассейне, поскольку их состав существенно изменяется в теплые и холодные климатические эпизоды.

2. Разработанная физико-химическая модель донных отложений позволяет на основе общего химического состава рассчитывать сводные стехиометрические формулы полевых шпатов, хлоритов и иллит-смектитов и их термодинамические свойства.

3. Коэффициент обломочности - частное от суммы обломочных минералов (мусковит, хлорит, индикаторов холодного климата) к сумме аутигенных глинистых минералов (иллит и смектит, показателей теплого климата) является чувствительным индикатором вариаций природной среды.

### **Апробация работы, публикации**

По теме диссертации опубликована 31 работа. Из них 5 – статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК (3 статьи входят в базы данных Web of Science, 1- Scopus).

Полученные результаты представлены и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: (1) XIV международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, апрель 2014 г.; (2) VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов). Новосибирск. Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, ноябрь 2014 г.; (3) XIX международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, апрель 2015 г.; (4) Всероссийская конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии» - 2015, посвященная 120-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова, Иркутск, Институт геохимии СО РАН, сентябрь 2015 г.; (5) Чтения В.И. Вернадского. - Иркутск, Институт геохимии СО РАН, апрель 2016 г.; (6) Восьмая международная Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле. – Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, июнь 2016 г., (7) XXI Международная конференция по химической термодинамике в

России (RCCT–2017), г. Новосибирск, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, (8) Международная конференция Asian Orogeny and Continental Evolution: New Advances from Geologic, Geophysical and Geochemical Perspectives International conference in memory of Prof. Bor-Ming Jahn (Taipei, Taiwan, Nov. 6-7, 2017), (9) Всероссийская конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии» - 2018, Иркутск, Институт геохимии СО РАН, июнь 2018.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 18 иллюстраций, 13 таблиц. Библиографический список включает 136 работ.

**Благодарности.** Автор признателен академику РАН д.г.-м.н. М.И. Кузьмину за помощь, ценные замечания и содействие на различных стадиях подготовки работы. Автор выражает благодарность д.г.-м.н. Солотчиной Э.П., д.г.н. Безруковой Е.В., д.г.-м.н. Чудненко К.В., д.г.-м.н. Макрыгиной В.А. и д.х.н. Таусон В.Л., чьи советы и консультации способствовали подготовке отдельных разделов работы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00266 мол\_а.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

#### **Глава 1. Геолого-геохимическая характеристика озерных отложений байкальской рифтовой зоны**

Геоморфологической особенностью Байкальского водосборного бассейна является асимметричность. Восточный борт Байкальской котловины пологий и составляет 85 % от всего дренажного бассейна озера, его породы обуславливают и общий химический, и минеральный состав осадков. В водосборном бассейне преобладают разновозрастные гранитоиды, залегающие среди глубокометаморфизованных пород докембрийского фундамента, сложенного гнейсами, кристаллическими сланцами, мигматитами, мраморами и кварцитами [Гвоздков, 1998, Рассказов и др., 2000, Ковач и др., 2012, Цыганков, 2014].

Отмечаются различия в накоплении и составе байкальских отложений основных объектов исследования – осадков из глубоководных скважин BDP-96 и BDP-98, заложенных на подводном Академическом хребте, и керна st.24GC, поднятого на Селенгино-Бугульдейской перемычке. Подводный Академический хребет отделен от берегов котловинами, препятствующими поступлению грубого терригенного материала. Отложения хребта накапливаются из водной толщи и способны охарактеризовать общий «усредненный» состав поступающего в оз. Байкал материала. Бугульдейская скважина

(st.24GC) расположена напротив дельты крупной реки Селенга, несущей большое количество осадочного материала.

Возраст осадков скважины BDP-98 оценивается в 8 млн лет [Horiuchi et al., 2003]. В основании разреза (600–480 м) залегают алевропелитовые илы с включениями песчаного и гравийного материала, высоким содержанием растительных остатков. Эта часть разреза формировалась вблизи авандельты крупной реки Палеобаргузин [Коллектив, 1998]. Осадки с глубин 480–270 м характеризуется постоянным присутствием в грубой фракции частиц пелитовой размерности. Вероятно, формирование этого интервала происходило в мелководных условиях. В этот период существовал палеосток с р. Баргузин в Пра-Манзурку и через Академический хребет транзитно переносился осадочный материал [Уфимцев, Щетников, 2006]. Примерно с глубины 270 м и вверх по разрезу на Академическом хребте накапливались пелитовые илы, характеризующие седиментацию в спокойной озерной обстановке, аналогичной современным условиям. Осадки глубин 110–0 м характеризуются присутствием прослоев плотных ледниковых глин, а также значительными колебаниями содержания створок диатомовых (от 0 до 65 %).

Осадочный разрез станции 24GC состоит из двух частей: нижней (472.5–350 см), сложенной тонкими уплотненными ледниковыми алевритистыми глинами, и верхней (350–0 см), представленной диатомовыми илами. Верхняя толща диатомовых илов характеризуется значительными вариациями в содержании створок диатомовых. Основание изученного керна имеет возраст 25–27 тыс. лет. Двуслойное строение отмечается и для осадков озера Хубсугул: нижняя часть керна представлена карбонатными глинами, верхняя – диатомовыми илами.

Отложения Баргузинской впадины рассмотрены на примере осадков скв. 513, и содержат глины, алевролиты, пески.

Осадки озера Баунт представлены диатомовыми илами с включениями алеврита.

Состав пород водосборных бассейнов рассматриваемых озер оставался неизменным длительное время, в то время как изменялись климатические и тектонические условия. Таким образом, несмотря на различия в строении осадочных разрезов, в донных отложениях рассматриваемых озер содержится информация об изменении окружающей среды.

## **Глава 2. Особенности донных осадков как долговременной записи климата региона**

Палеоклиматические реконструкции основываются на результатах комплексного исследования осадочных отложений. Ландшафтная и растительная изменчивость

устанавливается по палинологическим спектрам, продуктивность озера определяется по наличию и видовому разнообразию диатомовых створок.

Геологические факторы записаны в минеральном составе и проявляется в ассоциации глинистых минералов, химический состав которых указывает на особенности протекания процессов выветривания. В работах [Кузьмин и др., 2000, Солотчина, 2009] представлены результаты изучения минерального состава байкальских осадков рентгенофазовым анализом с применением математического моделирования профилей (XRD). Определены слоистые силикаты: иллит-сметтит, иллит, хлорит, мусковит, хлорит-сметтит, каолинит; и неслоистые – кварц и плагиоклазы (преимущественно альбит). Установлено, что высокое содержание в осадках обломочных минералов мусковита, хлорита, а также плагиоклазов, свидетельствует о похолодании климата, а возрастание содержания глинистых минералов – иллитов и иллит-сметтитов, характерно для теплых климатических эпох.

Представленные исследования проведены по реперным точкам, но из-за трудоемкости неприменимы ко всему осадочному разрезу. Задачу расчета минерального состава можно решить с помощью программного комплекса «Селектор».

### **Глава 3. Моделирование минерального состава озерных осадков**

Расчет минерального состава озерных осадков выполнен методом физико-химического моделирования (ФХМ), основанным на минимизации свободной энергии. Этот подход разработан И. К. Карповым [1981] и реализован в универсальном программном комплексе (ПК) «Селектор» [Чудненко, 2010]. При использовании этого метода глинистые минералы рассматриваются как твердые растворы и описываются при помощи списка миналов, отдельного для каждого минерального типа (хлориты, иллиты, иллит-сметтиты). Термодинамические свойства минералов взяты из справочника [Yokoкаwa, 1988], монографии [Чудненко, 2010]. Сводные условные стехиометрические формулы глинистых минералов рассчитываются автоматически на основании мольных термодинамически равновесных миналов.

Разработка способа расчета минерального состава осадков по химическому потребовала корректировки количества воды ( $H_2O$ ), включаемой в модель. Количество воды, входящее в структуру слоистых силикатов, существенно меньше общей влаги в осадке. На основании 10 определений минерального состава методом моделирования дифракционных профилей [Солотчина, 2009] и расчетных данных по средним составам выведено уравнение регрессии, позволяющее математически высчитать необходимое для расчетов количество  $H_2O$ . Этот прием существенно повысил точность расчетов.

#### **Глава 4. Использование результатов моделирования минерального состава осадков в палеоклиматических реконструкциях**

В осадках содержатся как минералы в неизменном виде, вынесенные из коренных пород (кварц, полевые шпаты, мусковит, хлориты и карбонаты), так и слоистые алюмосиликаты, образующиеся в корах выветривания (иллиты, иллит-сметиты). Установление соотношения этих групп минералов в осадках позволяет реконструировать условия выветривания в водосборном бассейне.

Сопоставление данных моделирования и рентгенофазового анализа показывает различие в содержании иллитов и иллит-сметитов. Это связано с тем, что данные методы идентифицируют минералы по-разному. Рентгенофазовый анализ исследует структуру минерала, но не увязан с химическим составом; моделирование не отражает структуру, а оперирует химическими формулами и, соответственно, разделяет иллитовые и сметитовые слои по содержанию калия.

Этот недостаток устраняется введением дополнительного критерия – коэффициента обломочности. Коэффициент обломочности (КО) – это отношения суммы минералов-индикаторов холодного климата (мусковита и хлорита) к сумме минералов-индикаторов теплого климата (иллита и иллит-сметита) [Ощепкова и др., 2015]. Слоистые силикаты имеют сходные физические свойства и не дифференцируются в процессе выветривания, переноса и аккумуляции осадочного материала, поэтому только они используются в расчете коэффициента. КО усредняет колебания содержания глинистых минералов в осадке и показывает общие тенденции изменения климата.

**Запись с Академического хребта.** На рисунке 1 представлены результаты расчета минерального состава донных осадков из скв. BDP-98 по химическому составу донных отложений. Пробы керна для моделирования минерального состава выбраны с частотой 5–10 см., что определило средний временной интервал в 10-15 тыс. л.

Результаты моделирования подтвердили, что осадки нижнего интервала керна (600-480 м), сформировавшиеся вблизи палеодельты р. Баргузин приблизительно 6–8 млн лет назад, содержат грубозернистый материал. Минеральный состав интервала отличается большим разбросом значений содержания минералов-индикаторов. Значения КО для этого интервала изменяются от 0,089 до 0,360 и слабо коррелируют с содержанием биогенного кремнезема – основным показателем продуктивности озера. Основная причина этого явления в высокой скорости осадконакопления в этот период (30 см/1 000 лет) [Кузьмин и др., 2014]. Грубообломочный материал, сносимый водотоками, скрыл роль климата в процессе формирования осадка. Таким образом, расчетные данные в первую очередь указали на изменение гидродинамических условий осадконакопления.

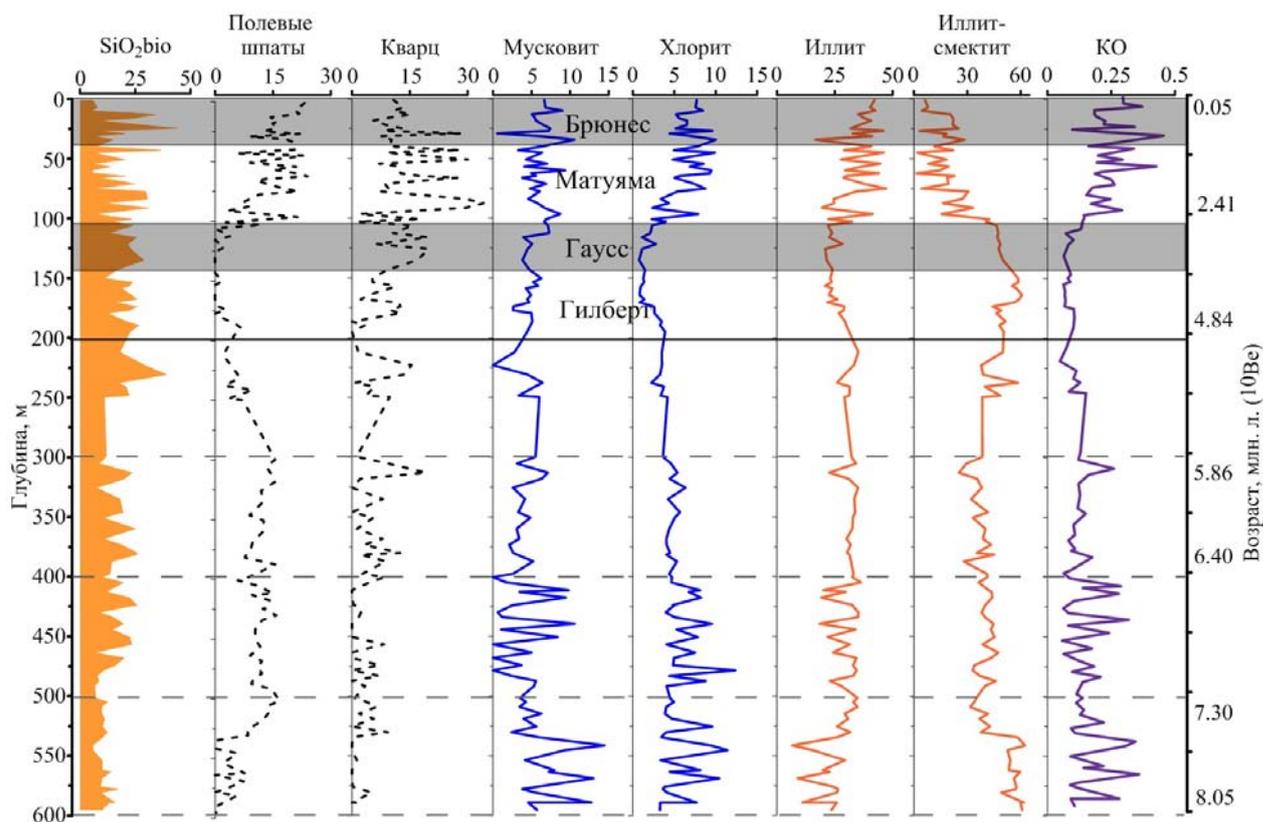


Рис. 1. Минеральный состав (содержание в весовых процентах) осадков скв. BDP-98 по данным ФХМ.

В интервале осадков 480–300 м также присутствует грубозернистая фракция, скорость осадконакопления остается относительно высокой (15 см/1 000 лет) [Кузьмин и др., 2014]. Вверх по разрезу, согласно расчетным данным, происходит уменьшение количества обломочных мусковита и хлорита, изменения значений КО становятся менее контрастными и в целом ниже, чем в предыдущем периоде (от 0,058 до 0,319). Следовательно, в данном интервале величины КО в первую очередь указывают на изменений условий седиментации и неточно отражают климатические параметры.

С глубины 270 м (5 млн лет назад) и вверх по разрезу осадки Академического хребта формировались в условиях, близких с современными – из водной толщи [Коллектив, 1998]. На графике интервал 300–110 м характеризуется низкими, неконтрастными значениями КО. Среднее арифметическое КО для интервала наиболее низкое для всего разреза байкальских осадков – 0,092, при минимальном значении 0,049 и максимальном – 0,157. Амплитуда изменения содержаний минералов-индикаторов физического выветривания – хлоритов и мусковита - не велика, но количество иллита и иллит-сметтита меняется в широких пределах. Иллит-сметтит, как индикатор теплого климата [Солотчина, 2009], явно преобладает.

В изменении минерального состава отразилось усиление процессов физического выветривания в бассейне озера в условиях интенсификации Сибирского атмосферного максимума и тектонической деятельности 2,8–2,5 млн лет назад (рис. 1, 2). Этот временной интервал характеризовался также глубокими изменениями состава региональной растительности, описанных в работах [Безрукова и др., 1999, Bezrukova et al., 2003, Demske, Mohr, Oberhaensli, 2002].

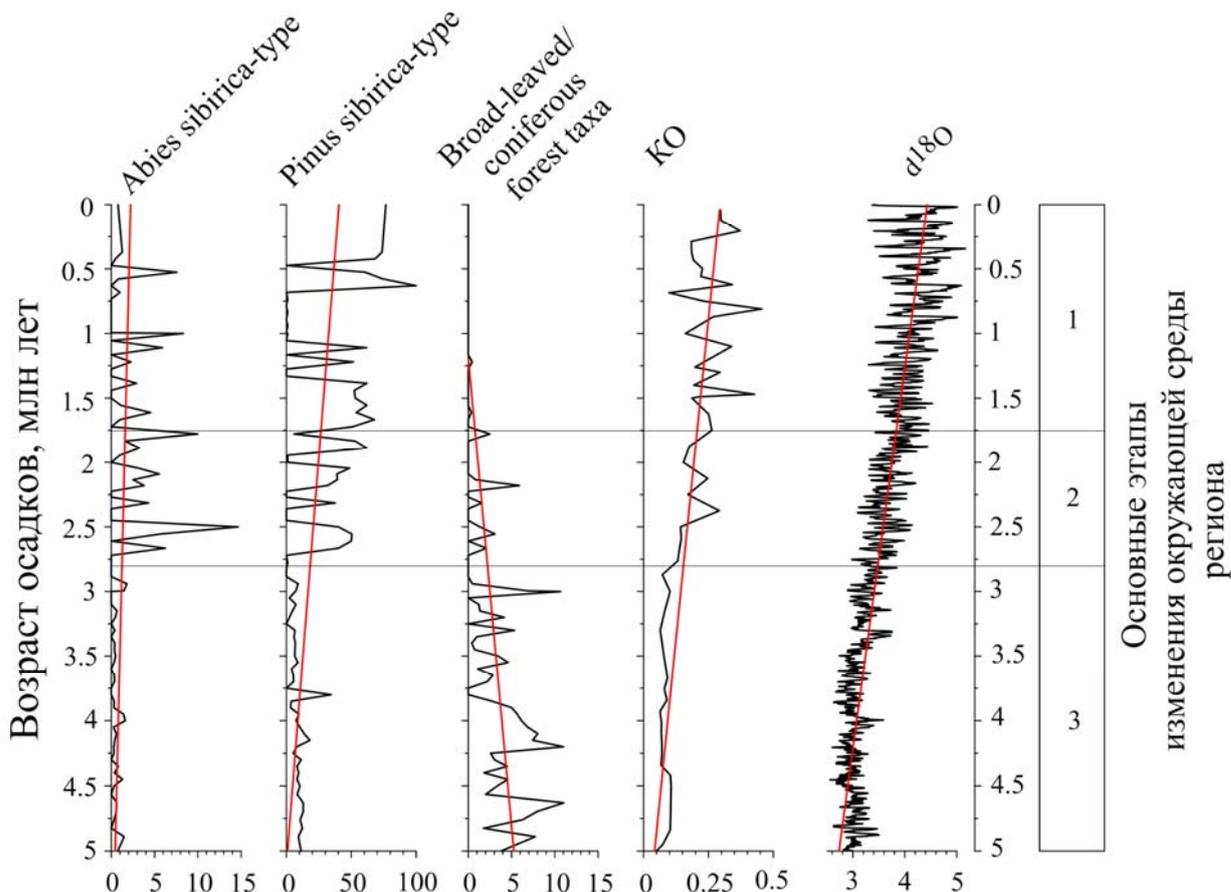


Рис. 2. Обобщающий график изменения процентного содержания пыльцевых таксонов – индикаторов изменения климата в осадках скважины ВДР-96 [Безрукова и др., 1999, Bezrukova et al., 2003] в сопоставлении с вариациями значений КО и суммарной изотопно-кислородной записи по бентосным фораминиферам ( $d^{18}O$ ), рассматриваемой как индикатор динамики глобальной климатической системы [Lisiecki, Raymo, 2005].

До 2,8 млн лет назад в регионе преобладали хвойно-широколиственные леса (рис. 2, broad-leaved/coniferous forests), означая теплый и влажный климат. Повышение относительного обилия пыльцы пихты *Abies sibirica*-type и пыльцы сосны сибирской *Pinus sibirica*-type (см. рис. 2), особенно четко проявившийся позднее 2,8 млн лет, означает снижающийся уровень среднегодовых значений атмосферных осадков и нарастающее похолодание климата. Линейный тренд в шкале обилия представителей флоры умеренно-широколиственных лесов (broad-leaved coniferous taxa) демонстрирует сокращение

теплолюбивой растительности с 5 млн лет назад. У границы квартера происходит синхронное с палинологическими показателями повышение значений КО (см. рис. 2) в ответ на усиление процессов физического выветривания в условиях более холодного и аридного климата.

Следующий период усиления физического выветривания и эрозионного сноса в котловину оз. Байкал грубообломочного материала наступил 2–1,5 млн лет назад, что отчетливо выражено на графике (см. рис. 2). Сравнение КО и палинологических индексов динамики региональной природной среды с изотопно-кислородной записью изменения глобального климата (см. рис. 2, шкала  $d^{18}O$ ) показывает высокую чувствительность регионального климата на его глобальные вариации.

**Запись Селенгино-Бугульдейской перемычки.** Моделированием минерального состава донных осадков Селенгино-Бугульдейской перемычки (кern станции 24GC) установлено, что по всему осадочному разрезу преобладают глинистые минералы (рис. 3).

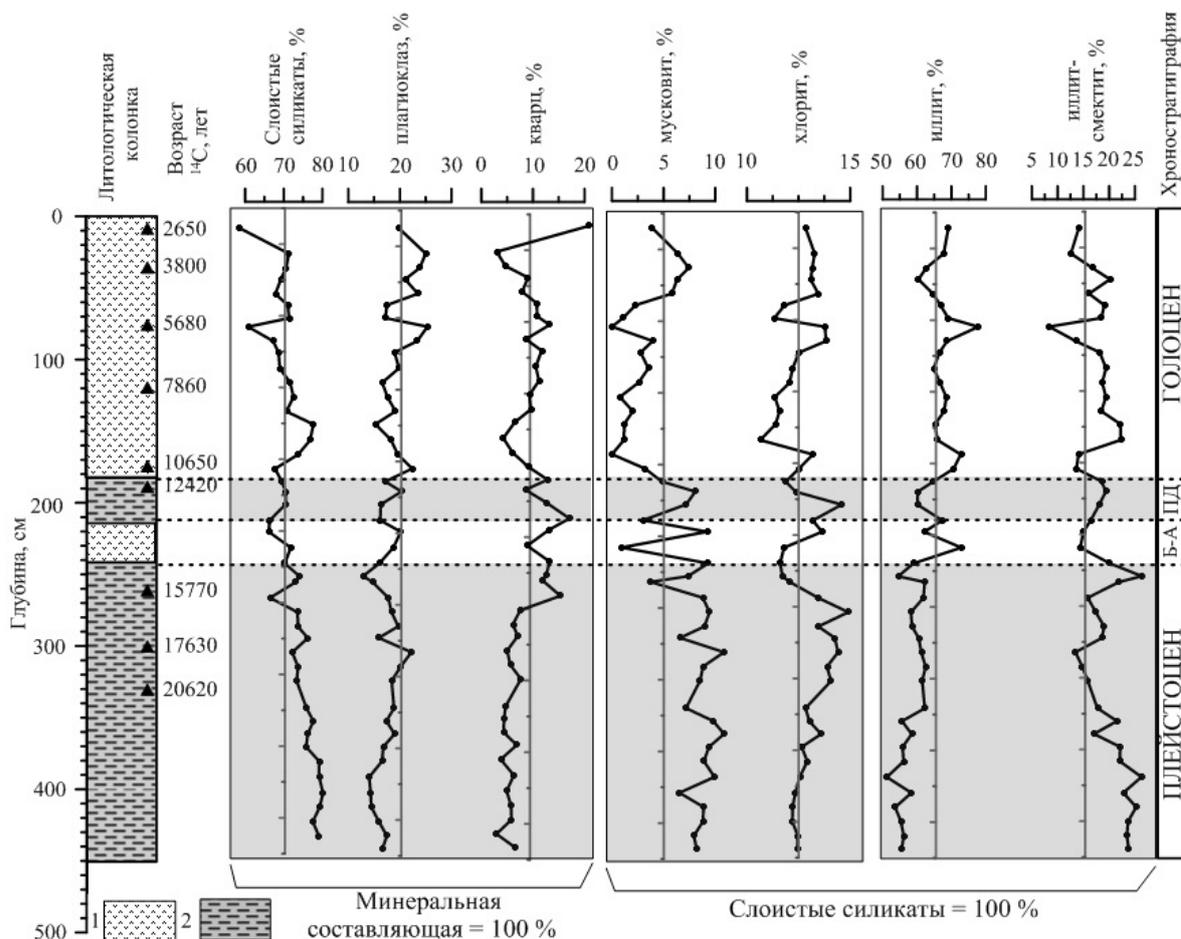


Рис. 3. Распределение минеральных компонентов в голоцен-плейстоценовых осадках оз. Байкал (VER93-2 st. 24GC) по данным ФХМ. 1 – диатомовый ил; 2 – бездиатомовая ледниковая глина; Б-А – потепление, Беллинг-Аллеред; ПД – похолодание, Поздний Дриас.

В интервале осадков от основания скважины до 240 см (до 13.75 тыс. лет) отмечаются значительные колебания в содержании иллита и мусковита. Осадки 240 до 180 см формировались в нестабильной климатической обстановке. Это заметно по резким изменениям в минеральном составе, что также может быть связано с таянием ледников и поступлением в озеро большого количества разнообразного осадочного материала. Граница голоцена, характеризующаяся потеплением климата, устанавливается в отложениях со 180 см. Верхний интервал осадков характеризуется большим содержанием глинистых минералов иллита, иллит-сметита. Таким образом, донные отложения станции 24ГС сформировались в различных природно-климатических условиях – в ледниковое и межледниковое время.

КО, рассчитанные по смоделированному минеральному составу и КО, рассчитанный по данным XRD, не совпадают по абсолютным значениям, но тенденция их изменения по разрезу соответствует климатическим изменениям (рис. 4).

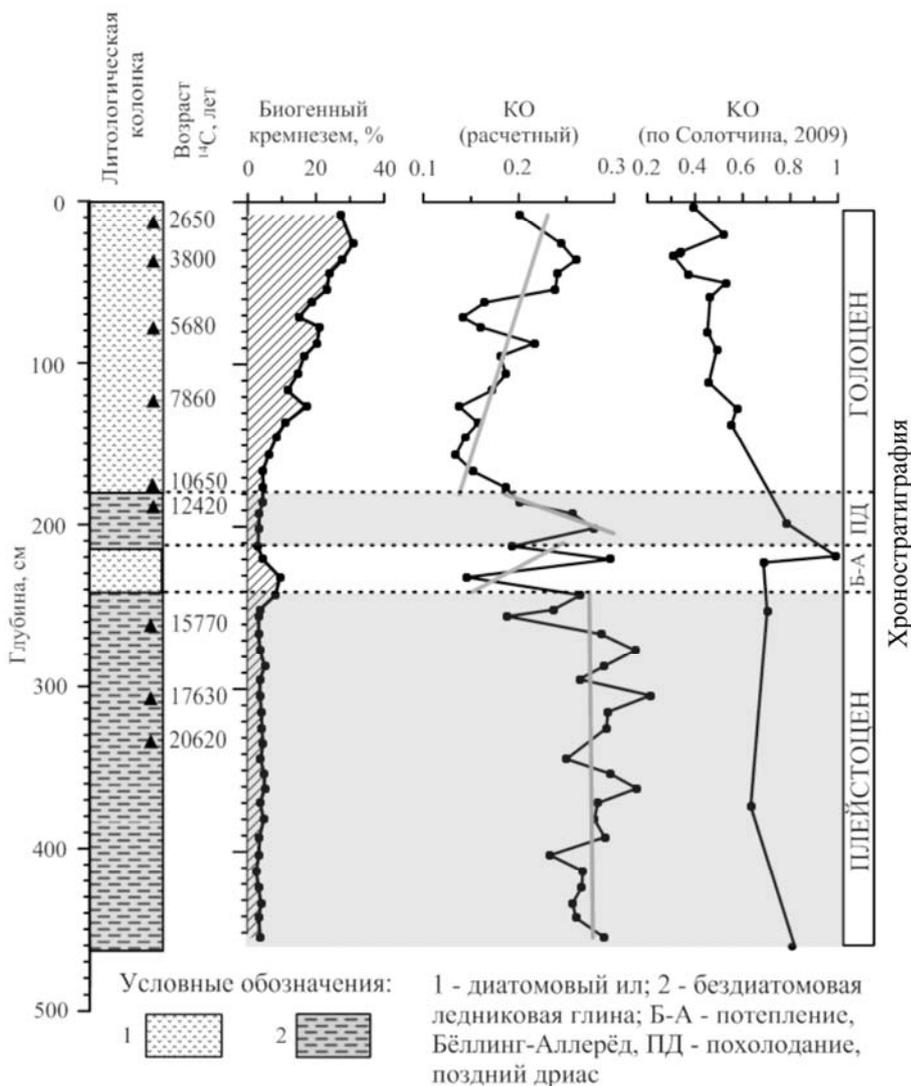


Рис. 4. Распределение в донных отложениях ст. 24 коэффициента обломочности (КО) по расчетным и XRD данным.

Существенные различия расчетного состава и рентгенофазового анализа обнаружены только для соотношения иллит - мусковит. Главной причиной отклонения является то, что химический состав выполнен для горизонтов осадка близких, но не совпадающих с теми, для которых сделан рентгенофазовый анализ. При условии полного соответствия проб ошибка будет незначительной. Изменение КО по разрезу, представленное на рис. 4, отражает общую тенденцию потепления климата.

**Баргузинская впадина.** Минеральный состав осадков скв. 513 – это механическая смесь кварца, полевых шпатов, мусковита и глинистых минералов. Моделирование проведено по 43 точкам с определенным химическим составом. В модель включены карбонаты, предварительно обнаруженные рентгенофазовым анализом. Результаты расчета приведены на рис. 5.

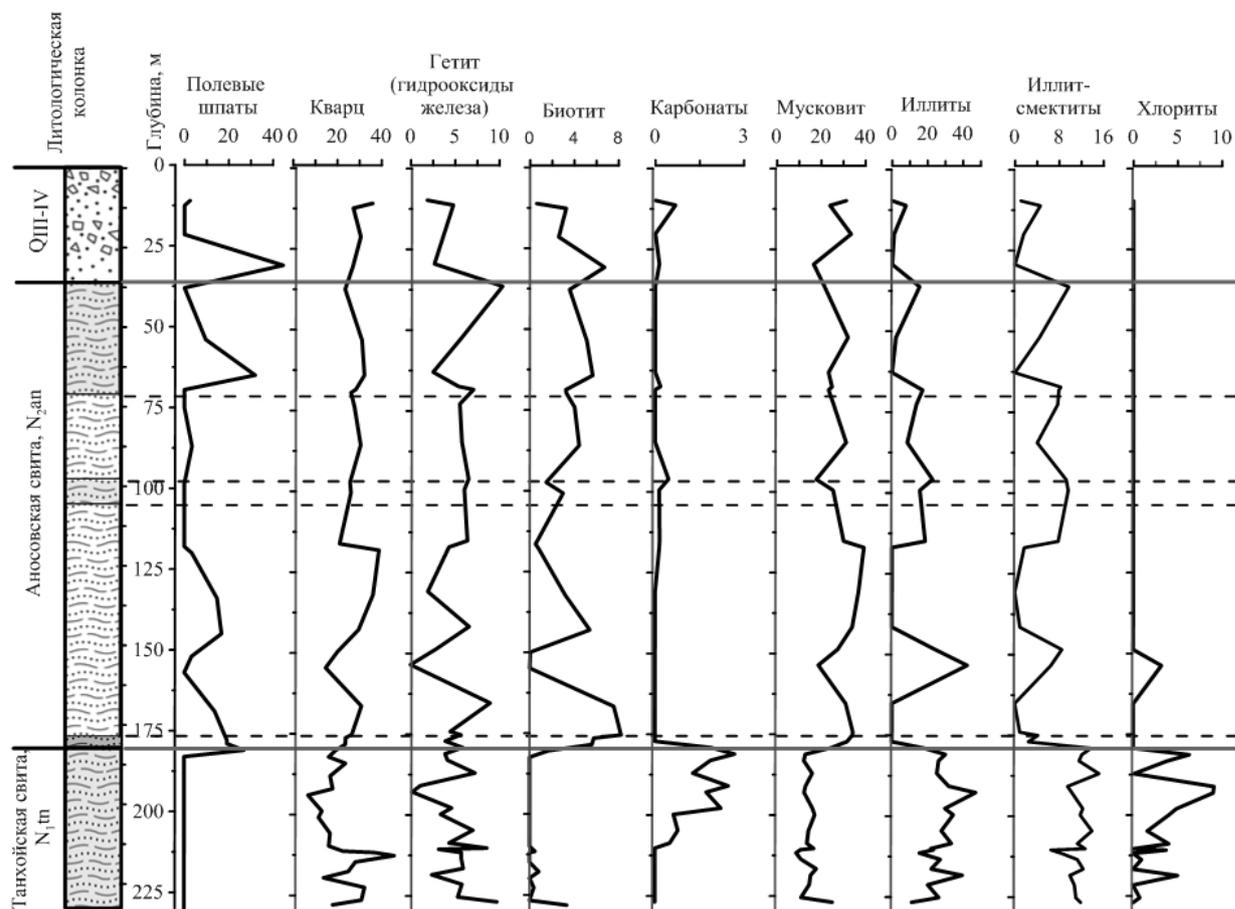


Рис. 5. Изменение минерального состава (в весовых процентах) осадков из скв. 513 в зависимости от глубины.

Одной из задач моделирования являлось стратиграфическое разделение аносовской и танхойской свит. Характерными глинистыми минералами для отложений танхойской свиты являются иллит, хлорит и иллит-сметтит. Отмечается присутствие карбонатных минералов в верхней части танхойской свиты. Для минерального состава аносовской

свиты характерно почти полное отсутствие хлоритов, повышенное содержание мусковита и биотита в осадках. В результате показано, что микроклин и биотит, являющиеся характерной особенностью аносовской свиты и переходного слоя, отсутствуют в танхойской свите. Явного разделения отложений аносовской свиты и современных четвертичных по минеральному составу не отмечается.

**Запись озера Баунт.** Преобладание глинистых минералов в осадках характерно и для отложений озера Баунт. Рентгеноструктурным анализом по четырем пробам определены кварц, альбит, ортоклаз, клинохлор, мусковит и кордиерит. Глинистые смешаннослойные минералы присутствуют в осадке, но их диагностика данным методом затруднена [Безрукова и др., 2017].

Детальный минеральный состав всего разреза был рассчитан на ПК «Селектор». В модель минерального состава включено 143 пробы с шагом 1 см. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

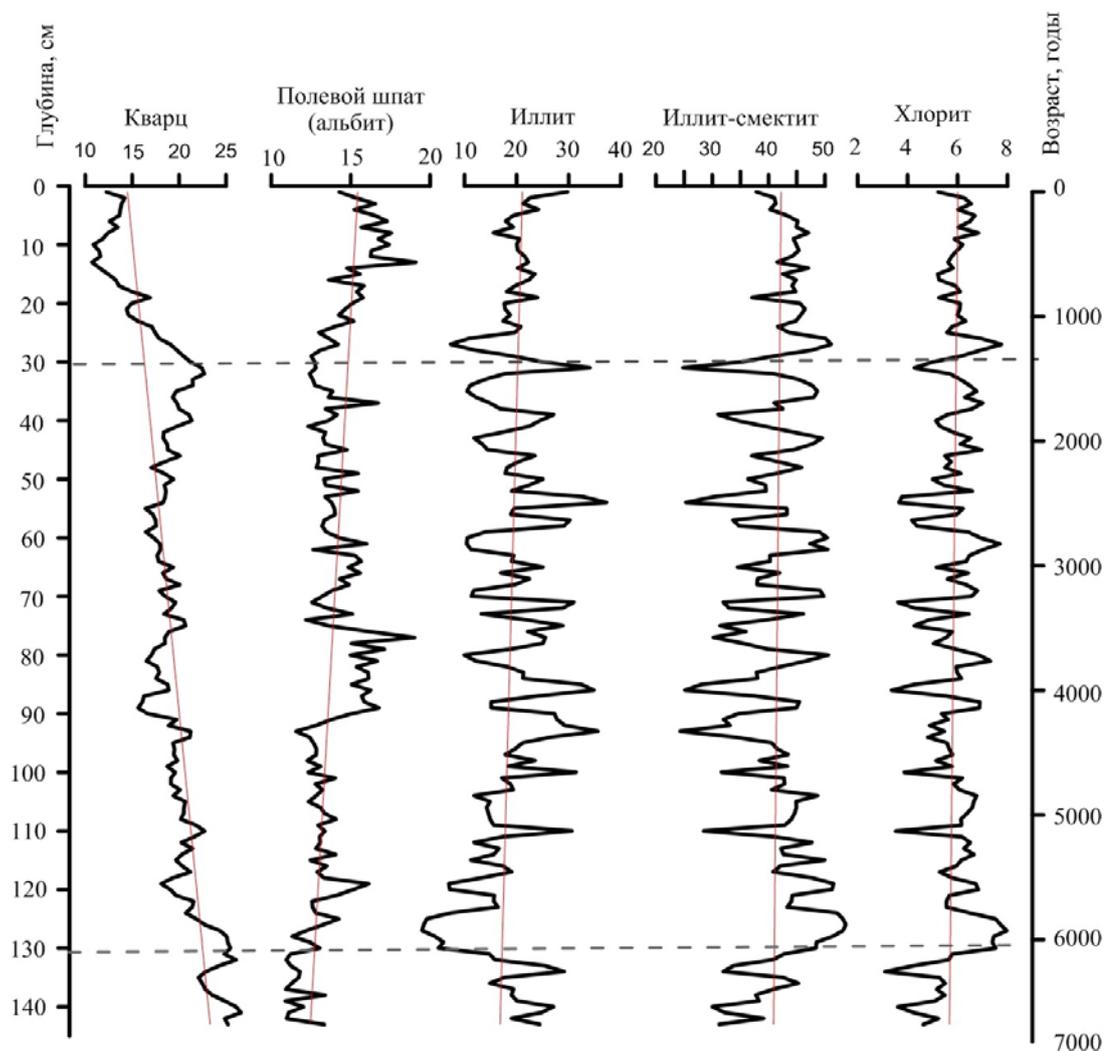


Рис. 6. Распределение минеральных компонентов в голоценовых осадках оз. Баунт (Бнт-13) по данным ФХМ (в весовых процентах). Красной линией обозначен линейный тренд изменения содержания минералов.

В работе [Безрукова и др., 2017] выделены три этапа в развитии природно-климатических условий в Баунтовской котловине. Теплый и сухой климат здесь имел место в конце оптимального периода голоцена около 6900-6000 л.н., затем отмечается относительное похолодание, сменившееся похолоданием и усилением физического выветривания с 1500 л.н. Увеличение доли хлорита в осадках и общие тренды изменения минерального состава согласуются с этими этапами.

**Озеро Хубсугул.** Недостаточное число проанализированных химическим анализом проб из разреза хубсугульских осадков не позволяет построить высокоразрешающую палеоклиматическую запись плейстоцен-голоценовых изменений в регионе. Моделирование проведено по 8 точкам, включающим плейстоценовые глины и голоценовые диатомовые илы (рис. 7)

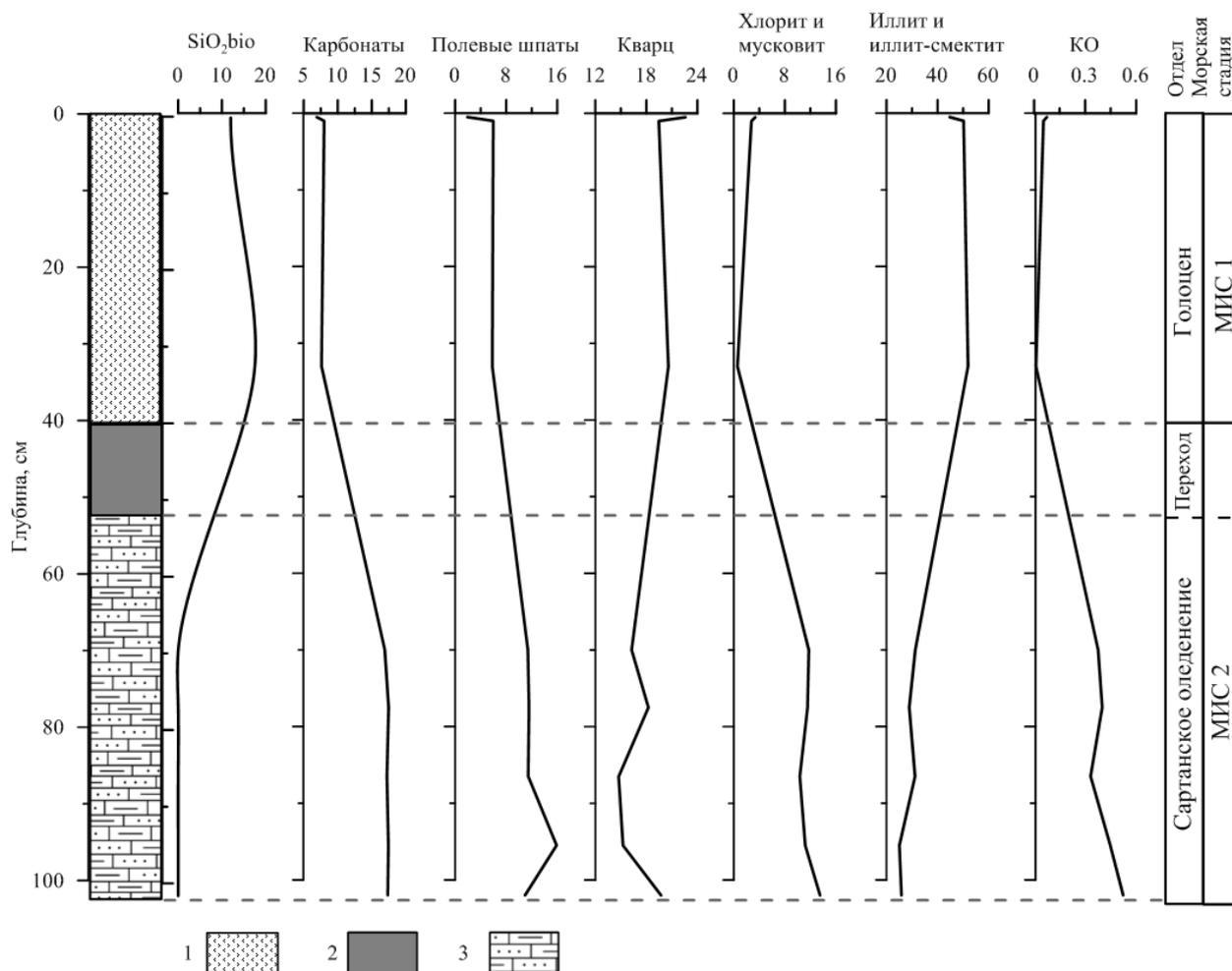


Рис. 7. Вертикальные профили распределения  $CO_2$  и минеральных компонентов в плейстоцен-голоценовых осадках оз. Хубсугул, ст. HSG-01-01, содержание в массовых процентах. 1 – диатомовый ил; 2 – тонкослоистый переходный слой; 3 – карбонатная алевритистая глина.

Моделирование минерального состава озерных отложений байкальской рифтовой зоны позволило дополнить геологическую и климатическую историю региона, начиная с миоцена и до современности. По преобладанию глинистых смешанослойных минералов прослежен наиболее теплый климатический период – миоцен (8-5 млн лет назад), далее похолодание отмечается в плиоцене (5-2,5 млн лет) и после череды смены ледниковых и межледниковых интервалов плейстоцена отмечается голоценовое потепление.

Границу между сартанским оледенением и голоценовым потеплением можно проследить во всех изученных разрезах. В осадках озера Хубсугул голоценовое потепление проявляется в отсутствии карбонатов в верхнем интервале осадков присутствующих в сартанских осадках, в байкальских осадках с потеплением климата увеличивается накопление смешанослойных алюмосиликатов. Голоценовые климатические события могут быть установлены исходя из изучения осадков скв. 24 и озера Баунт.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований разработан метод физико-химического моделирования минерального состава озерных осадков. Исходными данными являются результаты химического анализа.

Составлены списки минералов для твердых растворов глинистых минералов – иллитов, иллит-сметитов, хлоритов. Таким образом, в модели достоверно отражается химический состав сложных алюмосиликатов. С помощью ПК «Селектор» рассчитывается итоговая стехиометрическая формула, а также термодинамические свойства (энтропия, энтальпия, энергия Гиббса) иллитов, иллит-сметитов, хлоритов теплых и холодных климатических эпизодов. Такой подход впервые применен к глинистым минералам, и показал хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований (например, расплавной калориметрии растворения). Рассчитанные этим методом термодинамические свойства как повышают точность расчета минерального состава, так и сами по себе представляют интерес с точки зрения изучения осадочных пород и минералов. Их значения варьируют в теплые и холодные периоды и могут использоваться как индикаторы изменения условий окружающей среды.

Совершенствование способа расчета минерального состава осадков по химическому составу, потребовало корректировки количества  $H_2O$ , включаемой в модель. Этот прием существенно повысил точность расчетов. Несмотря на то, что метод ФХМ не может полностью заменить минералогический анализ, с некоторыми допущениями он может применяться при решении общих литологических задач, поскольку корректная

адаптация модели для определенного типа пород занимают намного меньше времени, чем детальное минералогическое исследование.

Физико-химическое моделирование позволило получить экспрессную оценку минерального состава осадка и рассчитать коэффициент обломочности, при помощи которого возможно реконструировать условия выветривания в водосборном бассейне любого озера.

Предложенный метод позволяет получить достоверную экспрессную оценку минерального состава осадков многометровых разрезов, например, отложений скв. ВDP-98 (подводный Академический хребет). Наибольшую эффективность метод моделирования минерального состава, как способ реконструкции климата, показал на интервалах осадков, накопившихся в гемипелагических условиях (0–270 м). Таким образом, с помощью расчетного минерального состава и коэффициента обломочности были установлены основные климатические события (оледенения) в плейстоцене и определены условия осадконакопления (авандельта-гемипелагические). Полученные ФХМ палеоклиматические записи хорошо согласуются с результатами палинологического и диатомового анализа. Плейстоцен-голоценовую границу и коротковременные климатические события позднеледникового (Дриас, Беллинг-Аллеред) установлены и по результатам моделирования осадков Селенгино-Бугульдейской перемычки (Байкал) и озера Хубсугул. Граница между сартанским оледенением и голоценовым межледниковьем четко прослеживается во всех изученных разрезах. События голоцена детально реконструированы по результатам моделирования минерального состава осадков озера Баунт. Оптимум голоцена по результатам ФХМ совпадает с оптимумом, выделенным по данным других методов исследования, и приходится на средний голоцен.

Таким образом, использование метода ФХМ на ПК «Селектор» в совокупности с исследованиями биостратиграфических и химических характеристик озерных осадков, позволяет получить комплексную информацию об климатических и геологических условиях региона в прошлом. Применение этого подхода к изучению минерального состава осадков возможно и для других осадочных разрезов.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. 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. (входит в базу данных WoS)

2. **Ощепкова А.В.**, Кузьмин М.И., Бычинский В.А., Солотчина Э.П., Чудненко К.В. Модели твердых растворов для расчета минерального состава донных осадков озера Байкал: новый подход к палеоклиматическим реконструкциям // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461. - №4. - С. 447-450. (входит в базу данных WoS)

3. Кузьмин М.И., Бычинский В.А., Кербер Е.В., **Ощепкова А.В.**, Горегляд А.В., Иванов Е.В. Химический состав осадков глубоководных байкальских скважин как основа реконструкции изменений палеоклимата и окружающей среды // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – №1. – С. 3-22. (входит в базу данных WoS)

4. Бычинский В.А., Королева О.Н., **Ощепкова А.В.**, Штенберг М.В. Способ определения термодинамических свойств веществ для изучения природных и технологических процессов методами физико-химического моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. - Т. 329. - № 5. - С. 48–56. (входит в базу данных Scopus)

5. **Ощепкова А.В.**, Кузьмин М.И., Бычинский В.А. Реконструкция минерального состава глубоководных байкальских осадков на основе их химического // Известия Иркутского государственного университета. – Серия «Науки о Земле». – 2013. – Т. 6. - № 1. – С. 122-132.