

На правах рукописи

Иванов Егор Владимирович

**Геохимические особенности донных отложений озера Байкал как
показатель изменения природной среды в плиоцене – плейстоцене**

Специальность 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:** **Кузьмин Михаил Иванович**, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИГХ СО РАН
- Официальные оппоненты:** **Федотов Андрей Петрович**, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук. Директор, заведующий лабораторией палеолимнологии
- Страховенко Вера Дмитриевна**, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких металлов и экогеохимии
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург)

Защита состоится 18 июня 2018 года в 14:00 часов 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, Иркутск, ул. Фаворского 1а, факс: (3952)42 70 50

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Автореферат разослан ____ . ____ 2018 г.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Актуальность данной работы состоит в получении и интерпретации детальной геохимической летописи из донных отложений озера Байкал за последние 4 млн. лет (необайкальская стадия развития) с позиции изменения природной среды и климата. Реконструкции потенциальных источников сноса терригенной фракции на подводных перемычках водоема в возрастном диапазоне до 8 млн. лет через интерпретацию макро-, микроэлементного и изотопного (Sr-Nd) составов отложений, полученных из кернов глубокого бурения. Подобные данные впервые позволяют дополнить картину эволюции природной среды, климата и изменения тектонических условий при переходе миоцен – плиоцен и детально плиоцен – плейстоцен.

Детализация геохимических данных стала возможна в результате завершения первого этапа реализации проекта «Байкал-Бурение», в ходе которого в различных морфоструктурах озера было пробурено 5 кустов скважин различной мощности. Всесторонние исследования первого этапа позволили детально задокументировать разрезы, определить их возраст, выявить и описать ледниковые и межледниковые периоды посредством изучения распределения диатомовых водорослей, концентраций биогенного кремнезема, оценить палинологические характеристики [BDP-93 Baikal Drilling Project Members, 1997; Коллектив, 1995, 1998, 2004, 2000; Antipin, 2001; Prokopenko, 2006, 2010 и др.]. В результате проведенных исследований биостратиграфическая модель по биогенному кремнезему ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) для озера Байкал на период верхний плиоцен – голоцен принята в качестве элемента мировой хроностратиграфической шкалы [International Commission on Stratigraphy].

Цель работы заключается в реконструкции вариаций изменения природной среды в зависимости от изменения климата и геолого-тектонических условий Байкальского региона на основе изучения макро- и микроэлементного состава осадков из кернов скважин глубокого бурения дна озера Байкал. Установлении источников поступления осадочного материала на подводные перемычки озера Байкал в зависимости от условий окружающей среды и климата в возрастном диапазоне до 5 млн. лет и детально в необайкальскую стадию развития (до 4 млн. лет).

Основные задачи исследования:

- На основании литостратиграфической документации и биостратиграфической модели ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) для кернов скважины BDP-98 (Академический хребет) в отложениях, соответствующих среднему, верхнему плиоцену – плейстоцену для определения петрохимического состава отложений отобрать интервалы кернов соответствующих пиковым значениям климатических стадий (MIS). Для плейстоцена, – с учетом каждой стадии, в отложениях среднего, верхнего плиоцена для получения реперных характеристик – без учета стадийности.

- Провести корреляционные исследования макро- и микроэлементного состава осадков Селенгино-Бугульдейской перемычки (разрез BDP-99) и Академического хребта (разрез BDP-98).

- Реконструировать условия осадконакопления и процессы выветривания на водосборной площади, используя плиоцен-плейстоценовые горизонты разрезов BDP-98, 99.

- Установить и описать механизм зависимости условий осадконакопления от изменения климатических и тектонических условий на водосборной площади.

- Выявить комплексы пород обрамления, являющиеся потенциальными источниками поступления обломочного материала в озеро Байкал.

- Оценить вклад источников терригенного вещества среди пород обрамления озера на формирование осадочной толщи озера Байкал через изучение изотопных характеристик Sr и Nd в осадочных горизонтах Академического хребта (скважина BDP-98).

Фактический материал и методы исследования.

В основу работы положен материал из осадочных кернов глубоководных байкальских скважин (BDP-98, BDP-99), пробуренных на подводном Академическом хребте и Селенгино-Бугульдейской перемычке в ходе реализации проекта «Байкал-Бурение» в 1998–1999 гг. Автором накоплен большой фактический материал, результаты исследования которого были использованы в данной работе. Для детального вычленения интервалов соответствующих изотопно-кислородных стадий верхнего плиоцена – плейстоцена (MIS-104 – MIS-4), изучения корреляционных связей по макро- и микроэлементному составу осадков и обоснования защищаемых положений, детально изучено более 300 метров осадочных кернов при суммарной длине разрезов более 900 метров. Основной массив геохимических данных, более 500 образцов, (РФА, ICP-MS) был получен автором в ходе реализации проектов РФФИ (01-05-97223 Байкал, 07-05-01053 а) на приборной базе центра коллективного пользования Института геохимии СО РАН. Для определения содержаний редких элементов использовался метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), масс-спектрометр Element-2. Петрогенные элементы анализировались на многоканальном XRF спектрометре СРМ-25 (ЗАО Научприбор, Орел, Россия), XRF спектрометрах с волновой дисперсией, оснащенных рентгеновской трубкой с Rh-анодом: S4 Pioneer, S8 Tiger (Bruker AXS, Германия). Изотопные характеристики Sr и Nd изучались в лаборатории изотопной геохронологии Института геологии и геохронологии докембрия РАН в Санкт-Петербурге на масс-спектрометре Finnigan MAT 262 В.П. Ковачем, М.Ю. Загорной. Аналитические работы проведены с использованием аттестованных методик и контролем качества анализов по международным стандартным образцам. Литологические аспекты формирования осадочных горизонтов изучались автором в Институте Геохимии СО РАН и в ходе научной стажировки в геологическом центре (GFZ), Потсдам, Германия, в рамках программы DAAD.

Достоверность результатов работы обеспечена большим количеством проб и массивом полученных данных (РФА – 379 определений, ICP MS – 134 определения, изотопные характеристики Sr и Nd – 41 определение). Современными методиками пробоподготовки, высокоточными аттестованными аналитическими методами в центрах коллективного пользования ИГХ СО РАН, ИГГД РАН, ИЗК СО РАН. Публикациями в ведущих российских и зарубежных изданиях.

Научная новизна.

1. Впервые представлена детализированная петрохимическая летопись донных отложений озера Байкал на период поздний плиоцен – поздний плейстоцен. Выявлен ряд закономерностей поведения петрохимических модулей на этапах ледниковье/межледниковье.
2. Установлены корреляционные связи между литолого-стратиграфической моделью донных отложений и изменением макро- и микроэлементного состава осадков для полного набора климатических стадий (MIS) в интервалах, отвечающих максимальным и минимальным значениям SiO_{2bio} (с наиболее контрастными свойствами) для верхнего плиоцена – плейстоцена.
3. Предложены механизмы поступления терригенной фракции в водоем во временном отрезке верхний плиоцен – плейстоцен. Определены потенциальные источники сноса терригенной фракции в горизонты разрезов Академического хребта и Селенгино-Бугульдейской перемычки.
4. Установлена взаимосвязь изотопных характеристик Sr и Nd как индикаторов источников сноса терригенного вещества и изменения тектонических условий.

Практическая значимость работы. Биостратиграфическая часть осадочной летописи озера Байкал, является важным элементом мировой хроностратиграфической шкалы [International Commission on Stratigraphy]. Детальная геохимическая летопись и её интерпретация в хорошо датированных поздне-плиоцен-плейстоценовых осадках озера Байкал, а также определение

источников сноса терригенного вещества, является необходимой информацией для широкого круга исследователей кайнозойских отложений региона.

Личный вклад автора. Автор данной работы является непосредственным участником проекта «Байкал-Бурение», в обязанности которого входило: приемка и документация кернов на буровом комплексе, литолого-структурное описание кернов скважин, отбор проб на различные виды анализов ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$, C_{org} , РФА, ICP MS, ориентированные образцы для палеомагнитных исследований). Автором накоплен большой фактический материал, результаты исследования которого положены в основу данной работы. Для обоснования защищаемых положений, детально изучено более 300 метров осадочных кернов при суммарной длине исследуемых разрезов более 900 метров.

Защищаемые положения.

1. Петрохимические характеристики донных отложений Академического хребта озера Байкал, окончательно сформированных при переходе от плиоцена к плейстоцену (2,8–2,5 млн. лет), при корреляции с биостратиграфическими ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) и литостратиграфическими данными, отображают изменения условий выветривания на водосборной площади, начало тектогенеза в Байкальской горной области и изменение климата Северного Полушария в целом.
2. Изменения геохимических показателей выветривания (CIA, CIW, ICV) и отношений $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (ТМ), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (ЩМ), $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})/\text{SiO}_2$ (ГМ), Ti/Zr , свидетельствуют о начале эпохи горно-долинных оледенений в Байкальской горной области с момента окончания активного тектогенеза 1,5 млн. лет назад. В интервале возрастов 1,5–0,3 млн. лет перенос значительных объемов межледниковых отложений водосборной площади в озеро Байкал происходит в ледниковые периоды при усилении процессов экзарации, холодного иссушения (крио- аридизации) и эоловой транспортировки.
3. Донные отложения Академического хребта и Селенгино-Бугульдейской перемычки заимствуют макро- и микроэлементные характеристики пород обрамления озера Байкал. Нормирование элементного состава отложений выявляет поступление продуктов разрушения гранитоидов Западного Забайкалья и влияние древних пород фундамента платформы, демонстрируя близость к шарыжалгайскому метаморфическому и гранитному комплексам пород или их аналогам. При этом зависимость изменения источников сноса от изменения климатических условий на водосборной площади не выявлена.
4. Характеристика отношений изотопов Sr и Nd для осадков Академического хребта позволяет выявить потенциальные источники сноса терригенного вещества, определяя изотопный состав отложений в области составов пород баргузинского и чивыркуйского гранитоидных комплексов. Кроме того, отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ является индикатором позднекайнозойского горообразовательного процесса в Байкальской горной области, демонстрируя резкое изменение величин на этапе тектонической реконструкции горного обрамления озерной системы 2,8–2,5 млн. лет.

Апробация работы и публикации. Основные положения работы в разное время докладывались на конференциях: «молодых ученых по наукам о земле» (Новосибирск 2004г.); молодежной конференции «Ломоносов» (Москва, МГУ 2006); международной конференции «Third International Conference Environmental Change in Central Asia» (Ulaanbaatar, Mongolia; 2005); международной конференции «Terrestrial environmental changes in East Eurasia and Adjacent areas» (Иркутск-Листвянка 2007); международной конференции «The 7th International Symposium on Environmental Changes in East Eurasia and Adjacent Areas – High resolution records of terrestrial sediments» (Ulaanbaatar-Hatgal, Mongolia, 2008); международной конференции 7th ANKA Annual Meeting (Karlsruhe, 2008); международная конференция "Палеолимнология Северной Евразии" Петрозаводск 2014. По теме диссертации опубликовано 6 статей в журналах из перечня WoS.

Структура и объем работы. Работа общим объемом 170 страниц включает 13 таблиц, 43 рисунка и 4 карты-схемы. Текст состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы включающего 167 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю академику РАН М.И. Кузьмину, искренне благодарен академику РАН В.В. Ярмолуку, а также докторам геол.-мин. наук В.А. Макрыгиной, В.И. Левицкому, А.Б. Котову, д.г.н. Е.В. Безруковой, к.г.-м.н. В.А. Бычинскому, Е.В. Керберу, к.х.н. Г.В. Калмычкову, к.г.-м.н. С.С. Костровой за полезные консультации, стимул в исследованиях и написании диссертационной работы. Определяющий вклад в данную работу внесли руководители и сотрудники аналитических лабораторий ИГХ СО РАН: к.г.-м.н. О.В. Зарубина, д.т.н. А.Л. Финкельштейн, к.х.н. Т.С. Айсуева, д.т.н. Т.Н. Гуничева, М.И. Арсенюк, П.Т. Долгих, к.г.-м.н. Е.В. Смирнова; ИГГД РАН: д.г.-м.н. В.П.Ковач, Н.Ю. Загорная.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Литологические особенности формирования осадочного выполнения озера Байкал в миоцене – плейстоцене

В главе даны сведения о характере процесса седиментации на подводных перемычках озера Байкал на примере разрезов BDP-98 (Академический хребет), BDP-99 (Посольская банка, Селенгино-Бугульдейская перемычка).

Мощность разреза BDP-98 (Академический хребет) превышает 600 метров, возраст отложений определен в 8,4 млн. лет [Nogiuchi, 2003]. Осадки разреза представлены тонкими алевритопелитовыми биогенно-терригенными илами. В нижней его части доля алевритовой компоненты увеличивается, осадки сильно уплотнены. На основании полуколичественных подсчетов изучены соотношения в отдельных слоях песчано-алевритового, глинистого и диатомового материала. До самого забоя скважины отмечается чередование песчано-, алевритово-, глинистых слоев со слоями, обогащенными остатками диатомовых водорослей [Коллектив, 2000; Кузьмин и др., 2001; Antipin et al., 2001].

Наиболее высокие средние содержания частиц пелитовой размерности отмечаются в интервале 0–120 м, затем (120–130 м) доля пелита падает до 10 % за счет увеличения доли диатомовых. Ниже 130 м до самого низа разреза средние содержания частиц глинистой размерности остаются относительно постоянными, но значительно ниже, чем в верхних 120 м. На отрезке 130–270 м отмечаются более значительные колебания содержания пелитовой части осадков по сравнению с нижней частью (270–600 м), в которой они выражены, кроме отдельных коротких интервалов, крайне слабо.

Суммарное содержание песчано-алевритовой фракции испытывает флуктуации, частота и амплитуда которых имеют более высокие значения в интервале от 0 до 160 м. На глубине 170–190 м отмечается глубокий минимум в содержании грубой фракции осадка.

Текстура осадков, как правило, слоистая, тонкослоистая, массивная и линзовидная; слоистость обусловлена, в первую очередь, чередованием диатомовых илов с терригенными глинами. Такие слоистые текстуры хорошо выражены в верхней части разреза (0–200 м).

Осадки разреза имеют преимущественно восстановленный серый цвет. Для глинистых горизонтов характерны светлые тона (серые), для диатомовых – более темные (оливковые или зеленые).

Текстура осадков преимущественно слоистая, тонкослоистая, массивная и линзовидная; слоистость обусловлена, в первую очередь, чередованием диатомовых илов с терригенными глинами. Такие тонкослоистые текстуры хорошо выражены в верхней части разреза (0–200 м).

Так как необайкальская стадия развития (до 4 млн. лет) для отложений озерной системы укладывается в верхние 200 метров разреза, детализация литологических и биогеохимических характеристик выявила согласованность трендов изменения физических и биогеохимических свойств с учетом возрастных параметров донных отложений и климатической стадийности (рис. 1).

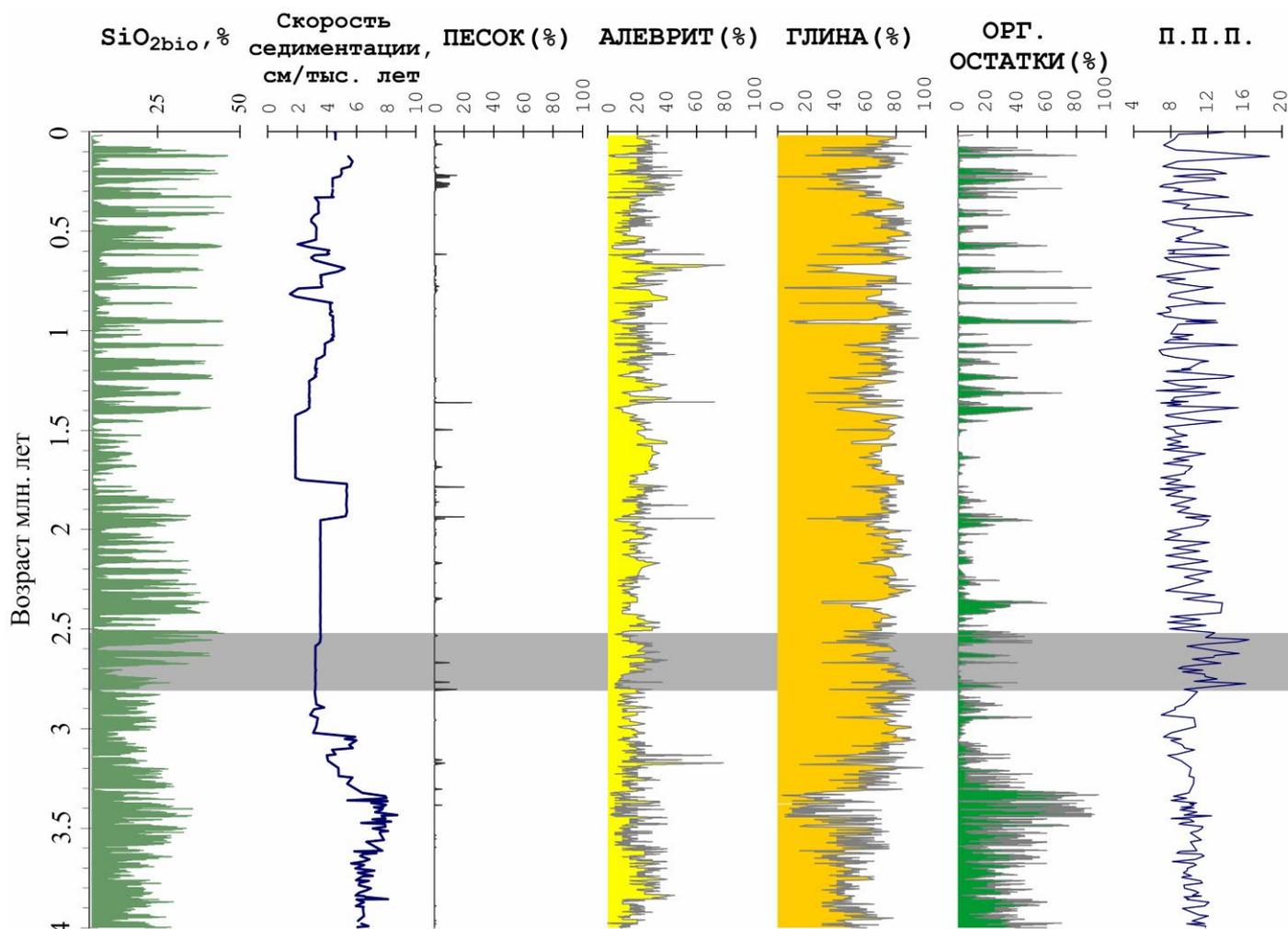


Рис. 1. Соотношение компонентов осадка разреза BDP-98 в возрастном интервале до 4 млн. лет. Детализация литостратиграфической модели с дополнениями [Antipin et al., 2001]

Мощность разреза BDP-99 пробуренного на северо-западном склоне Посольской банки составляет 350 метров и по возрастным параметрам не превышает 1,2 млн. лет [Коллектив авторов, 2004, BDP Members, 2005]. Согласно комплексным геолого-геофизическим исследованиям подводное поднятие Посольская банка представляет собой фрагмент когда-то единой поверхности дельты реки Селенги [Хлыстов, 2016] и, соответственно, аккумулирует осадочный материал, отлагаемый в различных пропорциях на Селенгино-Бугульдейской перемычке в целом, что позволяет проводить корреляционные построения для обеих подводных перемычек озера Байкал.

Разрез BDP-99 можно условно поделить на три толщи. Нижняя толща с глубины 325 до 230 метров сложена алевритистыми глинами с примесью песчаного материала. Доля алевритового материала в них составляет от 30 до 50 %. Средняя толща от 230 до 120 м также представлена алевритистыми глинами, однако примесь грубого материала в этих глинах значительно ниже, чем в подстилающей толще, а среднее содержание створок диатомовых водорослей выше. Доля алевритового материала в среднем составляет 20–30 %. Верхняя толща биогенно-терригенных илов от 0 до 120 м характеризуется более изменчивым составом и значительными вариациями в содержании песчано-алевритовой фракции, от 10 до 60 %. Цвет

отложений, вскрытых скважиной, серый до оливково-черного, это связано с восстановительными процессами, протекающими в осадках и характерно также для осадков Академического хребта. Текстура осадков: слоистая, тонкослоистая, массивная и линзовидная. Слоистость обусловлена чередованием диатомовых и глинистых слоев в верхней части разреза, а также изменением гранулометрического состава осадков.

Осадки исследуемых разрезов (BDP-98, 99) характеризуются тонкими алевритопелитовыми биогенно-терригенными илами. В нижней части разреза BDP-98 доля алевритовой составляющей увеличивается, осадки сильно уплотнены. В нижней части разреза BDP-99 преобладают тонкие более уплотненные терригенные алевритистые глины. Оба разреза условно подразделяются на 3 толщи, отличие которых заключается в пропорциях соотношений песчано-алевритового, глинистого и диатомового материала.

Глава 2. Геологическое строение Байкальской рифтовой впадины и определение доминирующих источников кластического материала донных отложений позднего кайнозоя с использованием макро- и микроэлементного состава осадков

В главе на основании общих методов и подходов при учете геологического строения комплексов обрамления проведена реконструкция областей питания для отложений водосборной площади и, соответственно, потенциальных источников сноса терригенного вещества в озеро Байкал.

В геологическом и тектоническом отношении данный регион является областью сочленения раннедокембрийского Сибирского кратона с фанерозойской складчатой областью – Центрально-Азиатским складчатым поясом. К основным докембрийским структурам Сибирского кратона, представленного на западном побережье Байкала, относятся: Шарыжалгайский, Голоустненский и Байкальский выступы фундамента, Северо-Байкальский (Акитканский) вулканоплутонический пояс и реликты докембрийского осадочного чехла.

К крупным структурным единицам Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), окаймляющего восточную часть побережья и встречаемого на западном берегу (о. Ольхон), относятся Байкало-Муйская и Икат-Баргузинская зоны. Среди которых выделяются: Икатский задуговый бассейн, Ольхонский метаморфический террейн, Хамар-Дабанский метаморфический террейн, Ангино-Таланчанский островодужный террейн.

Основными породами, слагающими до 80% восточного побережья озера, являются массивы позднепалеозойских гранитоидов относимых к Ангаро-Витимскому батолиту.

При формировании впадины и Байкальской рифтовой системы происходило разрушение раннее сформированных разнообразных магматических, метаморфических и осадочных комплексов, появление фракций разной размерности, их перемещение с формированием осадков в различных частях бассейна.

Тройная диаграмма $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$ [Bhatia, 1983] экспонирует составы отложений Академического хребта озера Байкал в поле источников сноса кислого состава, преимущественно гранитов, гранодиоритов и дацитов (рис. 2 а.). Разделение составов отложений Академического хребта по возрастному критерию не приводит к существенному разграничению фигуративных точек. Таким образом, очевидной становится неизменность основных источников сноса в плиоцене – плейстоцене в зависимости от изменения условий седиментации.

В отложениях Селенгино-Бугульдейской перемычки (скважина BDP-99) состав осадков располагается исключительно в поле гранитных источников питания, тем самым, свидетельствуя о преимущественно гранитной природе для осадочных пород данной морфоструктуры (рис. 2 б.).

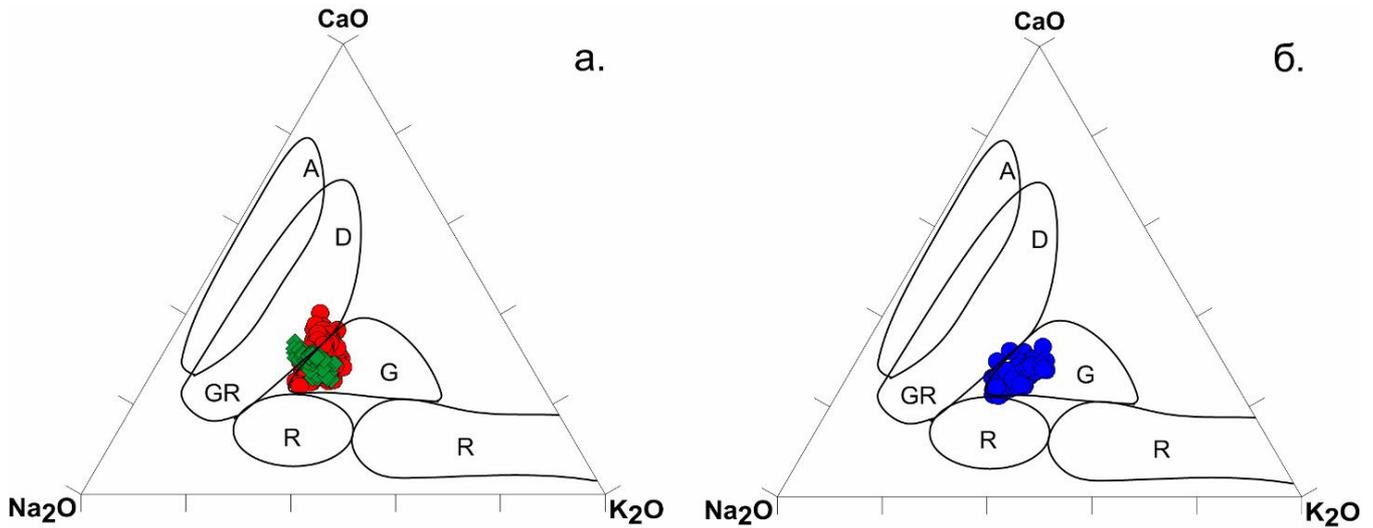


Рис. 2. а. – BDP-98 (разделение по критерию плиоцен/плейстоцен); б. – BDP-99. Условные обозначения: А – андезиты; D – дациты; GR – гранодиориты; G – граниты; R – рециклированные осадки

При нормировании составов отложений на средние составы пород обрамления водоема удалось установить ряд источников кластического материала для отложений как водосборной площади, так и донных осадков водоема. Для подобных реконструкций использовались следующие составы пород [Левицкий, 2005]:

Метаморфические комплексы пород: шарыжалгайский метаморфический комплекс, ольхонский комплекс, слюдянский комплекс, святоносский комплекс.

Граниты: саянский комплекс, приморский комплекс.

Мигматит-граниты – шарыжалгайский комплекс.

Герцинские гранитоиды Забайкалья: щелочно-полевошпатовые и щелочные граниты и сиениты Монголо-Забайкальского вулканоплутонического пояса (раннекуналейский и позднекуналейский комплексы); шошонитовая интрузивная серия (монцонит-сиенит-кварцево-сиенитовая с синплутоническими базитами, нижнеселенгинский комплекс); граниты и кварцевые сиениты с синплутоническими базитами (зазинский комплекс); монцониты, кварцевые сиениты и габброиды (чивыркуйский комплекс); известково-щелочные граниты баргузинского комплекса (Ангаро-Витимский батолит) [Цыганков, 2014].

Ряд средних составов, в частности, относящихся к Аkitканскому вулканоплутоническому поясу и породам Ангино-Таланчанского островодужного террейна, для нормирования не использовались по причине очевидного расхождения с составами исследуемых отложений.

При нормировании среднего состава пород осадочной толщи Академического хребта BDP-98 на средний состав пород комплексов Западного Забайкалья (Забайкальский фланг), очевидной тенденцией является генетическая близость составов отложений к породам шошонитовой интрузивной серии, монцонит-сиенитовой и кварц-сиенитовой с синплутоническими базитами, нижнеселенгинского комплекса и высококалиевым известково-щелочным кварцевым монцонитам, кварцевым сиенитам герцинских гранитоидов Забайкалья и габброидам чивыркуйского комплекса (рис. 3, 4). Аналогичная тенденция выявляется при нормировании макро- и микроэлементного состава осадков скважины BDP-99 (Посольская банка, Селенгино-Бугульдейская перемычка). Таким образом, одним из основных источников для формирования донных отложений подводных перемычек озера Байкал являются гранитоиды Западного Забайкалья.

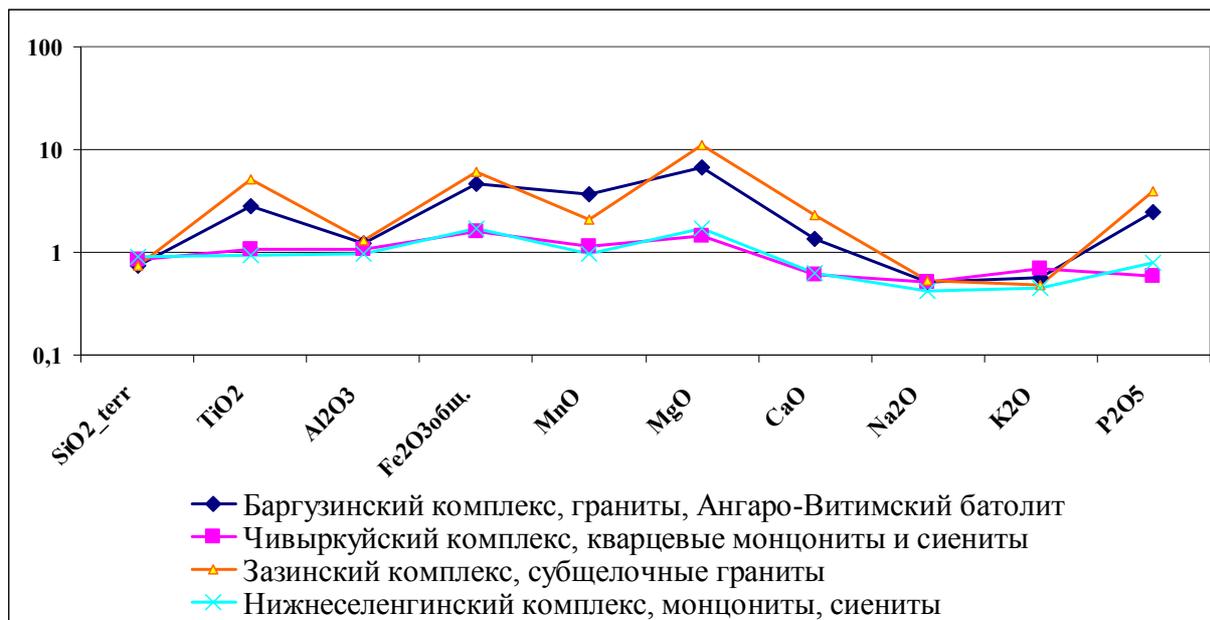


Рис. 3. Диаграмма нормирования петрогенных элементов среднего состава донных осадков Академического хребта (разрез BDP-98) на средний состав гранитоидов Забайкалья

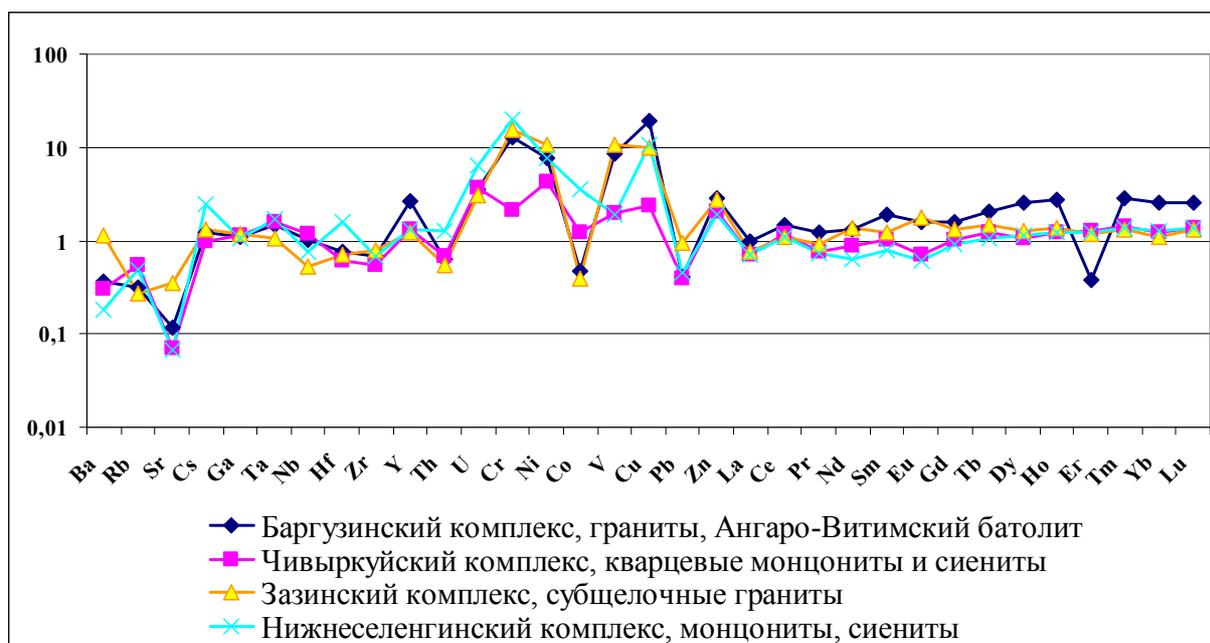


Рис. 4. Диаграмма нормирования микроэлементов среднего состава донных осадков Академического хребта (разрез BDP-98) на средний состав гранитоидов Забайкалья

При нормировании среднего состава донных осадков на породы Западного, Юго-Восточного и центрального флангов Байкальской впадины (рис. 5, 6) состав отложений Академического хребта демонстрирует геохимическое сходство с породами шарыжалгайского метаморфического и гранитного комплексов, тем самым выявляется зависимость состава отложений от пород древнего фундамента платформы или их аналогов, проявленных в Байкальской рифтовой зоне и изученных при подводных погружениях ГОА «Пайсис» [Бухаров, 1996].

Макро- и микроэлементный состав отложений обоих разрезов демонстрирует чрезвычайную близость друг другу, при этом основные источники поступления терригенного вещества остаются неизменными как в исследуемом диапазоне возрастов 4–0,01 млн. лет, так и при изменении климатических условий в это время.

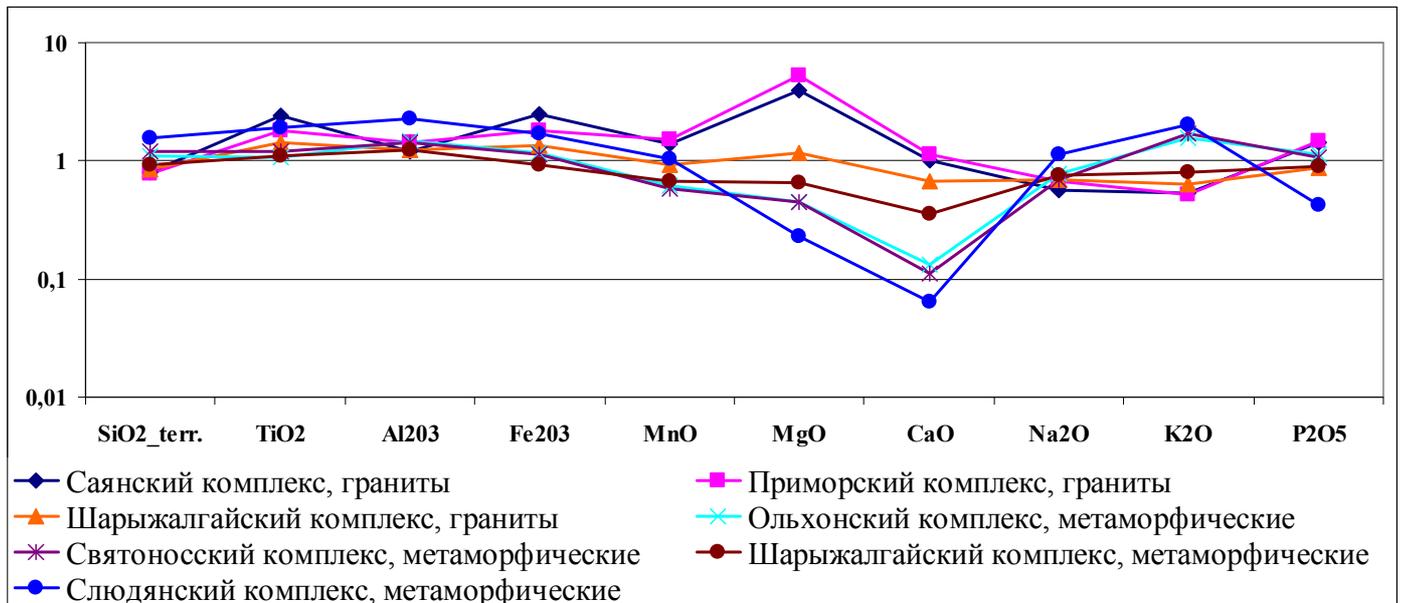


Рис. 5. Диаграмма нормирования среднего состава петрогенных элементов донных осадков Академического хребта (разрез VDP-98) на средний состав комплексов пород обрамления (западный, юго-восточный фланги)

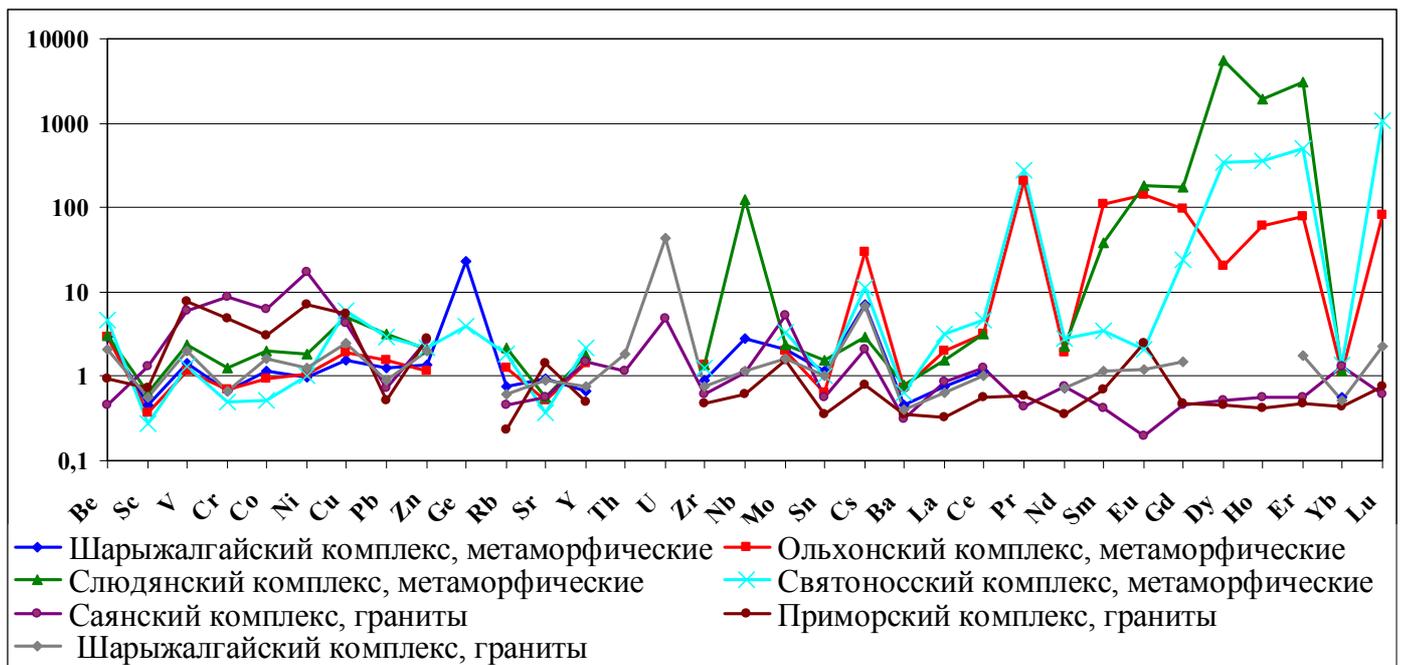


Рис. 6. Диаграмма нормирования среднего состава микроэлементов донных осадков Академического хребта (разрез VDP-98) на средний состав комплексов пород обрамления (западный, юго-восточный фланги)

Глава 3. Литохимическая реконструкция потенциальных источников поступления терригенного материала в бассейн седиментации и определение степени выветривания материнских пород

В данной главе для реконструкций состава осадочных пород, степени их переработки и химического выветривания использованы методические приемы, изложенные в работах [Мигдисов, 1960; Юдович, Кетрис, 1981, 2000, 2008, 2011; Петтиджон, 1976, 1981; Bhatia, 1983, 1986; Herron, 1988; Nesbitt, Young, 1982, 1989].

Донные отложения озера Байкал отличаются крайне низкой степенью литификации. В осадках озера фиксируются процессы раннего диагенеза, не оказывающие значительного

влияния на распределение породообразующих элементов [Гвоздков, 1998]. В связи с этим макроэлементный состав осадков не подвергся существенному изменению и в полной мере несет информацию о составе исходных источников.

Индекс химического выветривания CIA ($100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$) [Nesbitt, Young, 1982]. В плиоцен-плейстоценовых донных осадках Академического хребта (скважина BDP-98) значения индекса варьируют от 69,8 до 80,3 в верхнем плиоцене и от 66,3 до 75,3 в плейстоцене (рис. 7). Поскольку границей разграничения аридных и гумидных разностей пород по индексу CIA является значение 70 [Маслов, 1998], наиболее интересным, с точки зрения палеореконструкций, является интервал, характеризующий плейстоцен. Первоначально было установлено, что в периоды похолоданий наблюдался рост содержаний практически всех породообразующих элементов (TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O и K_2O). Это было связано с преобладанием процессов физического выветривания над процессами химического разложения. Также было установлено, что процессы химического выветривания в плиоцене были более отчетливыми, в то время как в плейстоцене более отчетливо фиксируются процессы физической эрозии. Это подтверждается более низкими значениями Mg, Ca, Na и K в плиоцене, причем амплитуды пиковых значений этих элементов в теплых и холодных интервалах плиоцена менее значительны, чем в осадках плейстоцена, что свидетельствует о более теплом климате Северного Полушария и планеты в целом в плиоцене.

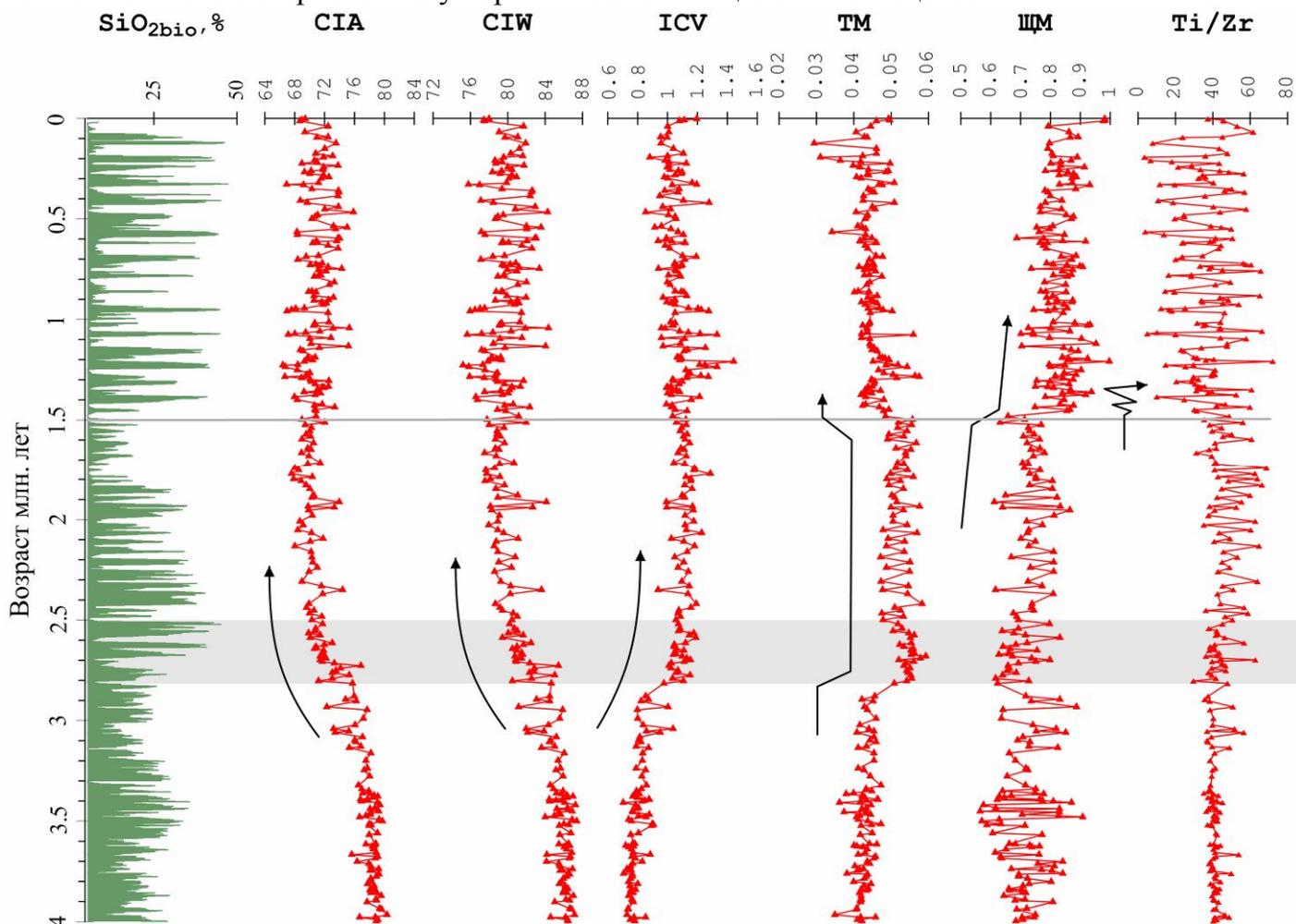


Рис. 7. Литохимические индексы (CIA, ICV, CIW), отражающие процессы выветривания и отношения ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (TM), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (ЩМ), Ti/Zr) применительно к возрастному диапазону до 4 млн. лет, с учетом концентраций биогенного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$). Условные обозначения: стрелками – направления трендов, серым цветом – интервалы 2,8–2,5 и 1,5 млн. лет. Академический хребт (разрез BDP-98)

Главная роль в транспортировке петрогенных компонентов в водосборный бассейн озера Байкал отводилась ледникам, обрамляющим котловину Байкала в плейстоцене, и процессам измельчения коренных пород до состояния «ледникового молока» с последующим осаждением в водоем. С получением новых данных по детализации геохимической записи верхнего плиоцена – плейстоцена водоема, существующие представления о формировании осадочной толщи озера и процессах выветривания на водосборной площади можно в значительной мере расширить.

Исходя из значений индекса CIA, существует четкая взаимосвязь изменения уровня интенсивности поступления тонкой выветрелой фракции в ледниковые и межледниковые периоды. В донных отложениях озера Байкал в интервалах соответствующих ледниковым периодам в диапазоне возрастов 1,5–0,3 млн. лет зафиксирован рост тренда индекса CIA по отношению к межледниковым интервалам. В интервале возрастов 0,3–0,01 млн. лет наблюдается обратная динамика – тренд CIA демонстрирует рост в межледниковых интервалах по отношению к ледниковым периодам (рис. 8).

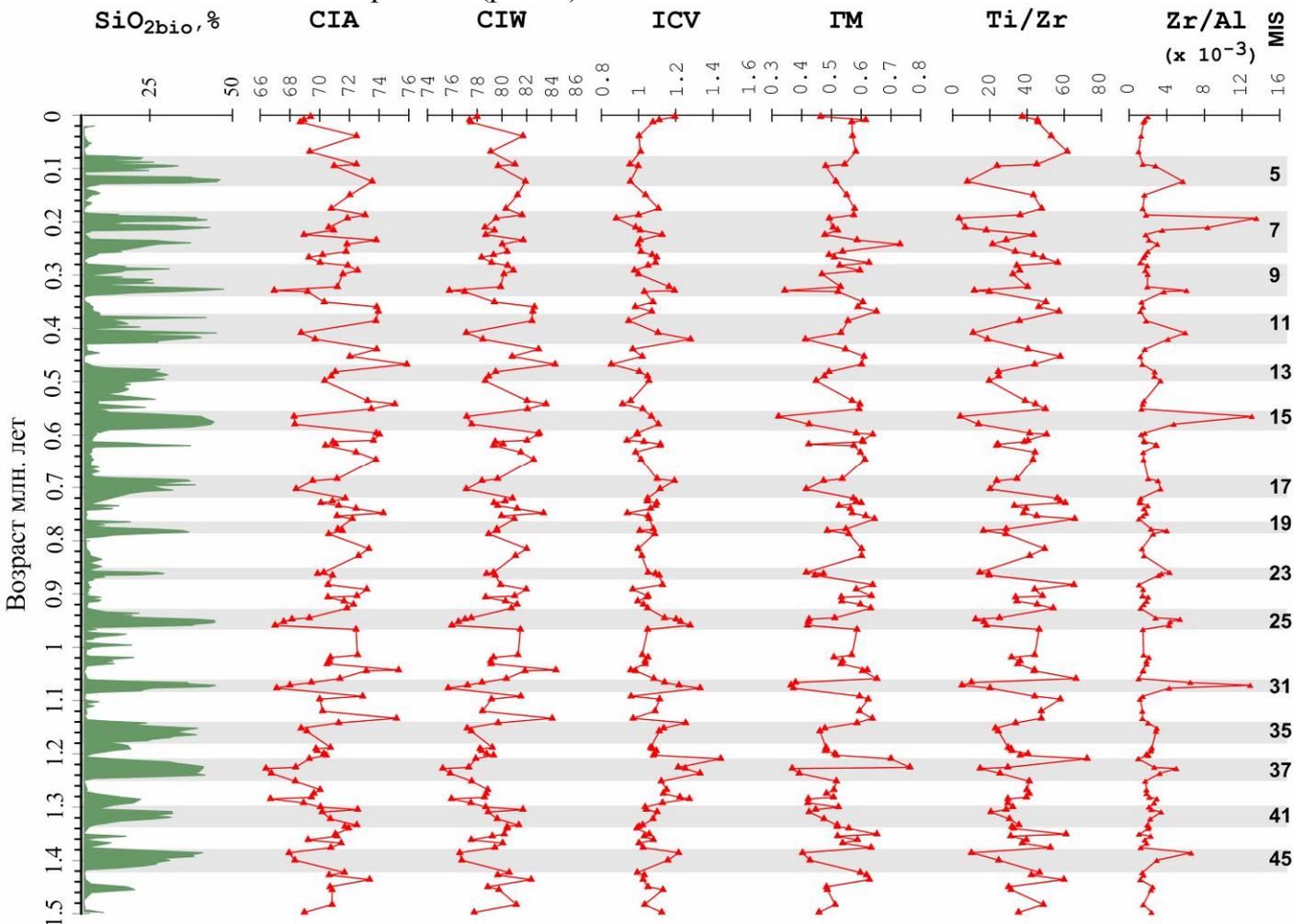


Рис. 8. Литохимические индексы и модули применительно к возрастному интервалу 1,5–0,01 млн. лет, с учетом корреляции климатической модели по биогенному кремнезему ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) и морских изотопных стадий (MIS). Академический хребет (разрез BDP-98)

Это свидетельствует о переносе значительных объемов межледниковых отложений водосборной площади в озеро Байкал в ледниковые периоды при усилении процессов экзарации, холодного иссушения (крио- аридизации) и эоловой транспортировки.

На рисунке 8 продемонстрировано соотношение индексов CIA, CIW, ICV, отношений $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (TM), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (ЩМ), Ti/Zr для полного набора «теплых» и «холодных» стадий в возрастном интервале 1,5–0,01 млн. лет. Данный интервал характеризуется наиболее четко

выраженными 46 теплыми и холодными стадиями, полностью согласованными с мировой хроностратиграфической шкалой [Prokopenko, 2006; International Commission on Stratigraphy].

Химический индекс выветривания (CIW) $[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \cdot 100$ [Fedo et al., 1995]. В осадках Академического хребта озера Байкал (рис 7, 8) индекс CIW во многом повторяет тренд CIA как в верхнем плиоцене, так и в горизонтах плейстоцена. Величина индекса в плиоцене варьирует от 79,4 до 85,3 единиц и, тем самым, демонстрирует хорошую переработку материала на водосборной площади. В дальнейшем степень разложения исходных пород снижается вместе с изменениями климатических условий раннего плейстоцена. Похолодание климата привело к поступлению менее химически разложенных разностей осадочных пород. В числовом выражении индекс CIW варьирует в пределах 77,5–83,6 единиц. Самый низкий уровень химического разложения донных осадков демонстрируют теплые стадии плейстоцена в интервале возрастов 1,5–0,01 млн. лет, в числовом выражении самое низкое значение 75,2 и 75,7 (MIS 25 и MIS 11 соответственно). Разнонаправленную динамику тренда CIW демонстрируют стадии MIS 5, MIS 7, MIS 9, MIS 11, что связано со структурой стадий, включающих в себя ряд подстадий со значительными вариациями по биогенному кремнезему. В холодных стадиях плейстоцена доминируют разности осадочных пород перенесшие значительное химическое разложение с индексом CIW достигающим: 84,4; 84,3; 83,5; 84,2 в стадиях MIS 34(?), MIS 30(?), MIS 14, MIS 12 соответственно.

Индекс зрелости осадков (ICV) [Cox et al., 1995] $(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2)/Al_2O_3$ отражает степень зрелости исходных пород и поступление тонкой алюмосиликокластики в бассейн седиментации.

Исходя из тренда ICV в донных отложениях Академического хребта озера Байкал (рис. 7), можно выделить три зоны изменения индекса: 4–3 млн. лет назад тренд варьирует в пределах 0,95–0,70 единиц, демонстрируя наличие достаточно зрелых глинистых пород с достаточным количеством глинистых минералов. Далее тренд ICV имеет тенденцию к росту и в интервале 2,8–2,5 млн. лет возрастает до 1,18 единиц, демонстрируя снижение объемов глинистых минералов в интервале и, тем самым, поступление менее зрелых разностей пород. Следующим этапом в изменении тренда ICV является интервал 1,5–0,01 млн. лет (рис. 8). Здесь происходят четко выверенные изменения зрелости составов на этапах ледниковье/межледниковье. Поскольку условной границей разделения более зрелых и менее зрелых глинистых пород является значение 1, то ледниковые стадии, как правило, демонстрируют большую зрелость составов отложений, с пиковыми значениями 0,85–1, в то время как теплые стадии демонстрируют менее зрелые разности пород с пиковыми значениями от 1 до 1,4 единиц. Подобная тенденция начинает нарушаться в 8-ой стадии (MIS 8), когда с ростом тренда ICV в короткие ледниковые стадии верхнего плейстоцена начинают поступать менее зрелые разности осадочного материала. Такая тенденция сохраняется вплоть до голоцена.

Значения *гидролизатного модуля* $Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO/SiO_2$ (ГМ) (рис. 8) для осадков Академического хребта экспонируются в 2 поля: поле глинистых пород (диапазон значений 0,3–0,5 единиц) и поле гидролизатных глинистых пород (диапазон значений 0,5–0,7 единиц). Ледниковые интервалы в интервале 1,5–0,01 млн. лет характеризуются гидролизатными разностями пород, тем самым, демонстрируя более разложенные осадки, содержащие каолинит и, возможно, свободные оксиды алюминия, железа и марганца. Межледниковые интервалы характеризуются простыми глинистыми породами с менее разложенной компонентой, подтверждая вывод по индексу выветривания CIA.

Согласно *отношению* Ti/Zr, отражающему дальность переноса кластики, выделяется 3 этапа поведения: 4–2,7; 2,7–1,5 и 1,5–0,01 млн. лет (рис. 7, 8). Если для интервала 4–2,7 млн. лет характерна весьма слабая расклевка тренда, то для интервала 2,7–1,5 млн. лет характерно хаотичное увеличение амплитуды колебаний безотносительно к изменениям климатических параметров (SiO_{2bio}). Это свидетельствует о поступлении зернистой Ti-содержащей компоненты при изменении тектонических условий и способов переноса материала в целом. В ин-

тервале 1,5–0,01 млн. лет наблюдается резкое увеличение отношения Ti/Zr в ледниковые периоды и резкое снижение в межледниковые интервалы. Это свидетельствует об увеличении прямого поступления продуктов физической эрозии с ледниковым детритом в конечный водоем стока по сравнению с интервалами, характеризующими межледниковья, где транспортировка материала предполагает вызревание на водосборной площади и тем самым свидетельствует о переотложении.

Для оценки поступления натриевого плагиоклаза, совместно с натриевым и калиевым модулями (НМ, КМ), принято использовать *щелочной модуль* (ЩМ) Na_2O/K_2O . Таким образом, осадочную толщу Академического хребта озера Байкал можно условно разделить на 2 этапа (рис. 7): 4–1,5 млн. лет и 1,5–0,01 млн. лет. Именно на границе 1,5 млн. лет фиксируется глубокий сдвиг в сторону резкого увеличения поступления породообразующих минералов, по сравнению с предшествующим возрастным интервалом, возрастающая в числовом выражении с 0,5–0,8 до 0,8–1. Таким образом, в интервале 1,5–0,1 млн. лет фиксируется деятельность ледников, отображая увеличение поступления большего количества натриевых плагиоклазов, калиевых полевых шпатов и слюд в бассейн седиментации при процессах экзарации и переноса тальными ледниковыми водами (ледниковым молоком) тонкозернистого материала (ледниковый детрит). Ледовым разносом и суспензионными потоками подобный материал может переноситься на значительные расстояния [Карабанов, 1999].

Согласно *титановому модулю* (ТМ) TiO_2/Al_2O_3 [Мигдисов, 1960], в основе которого лежит тенденция механической сортировки кластического материала в донных отложениях Академического хребта озера Байкал, поведение тренда ТМ можно разделить на 3 этапа: 4–2,8 млн. лет (0,034–0,047 единиц); 2,8–1,5 млн. лет (0,045–0,059 единиц); 1,5–0,01 млн. лет (0,029–0,056 единиц) (рис. 7, 9).

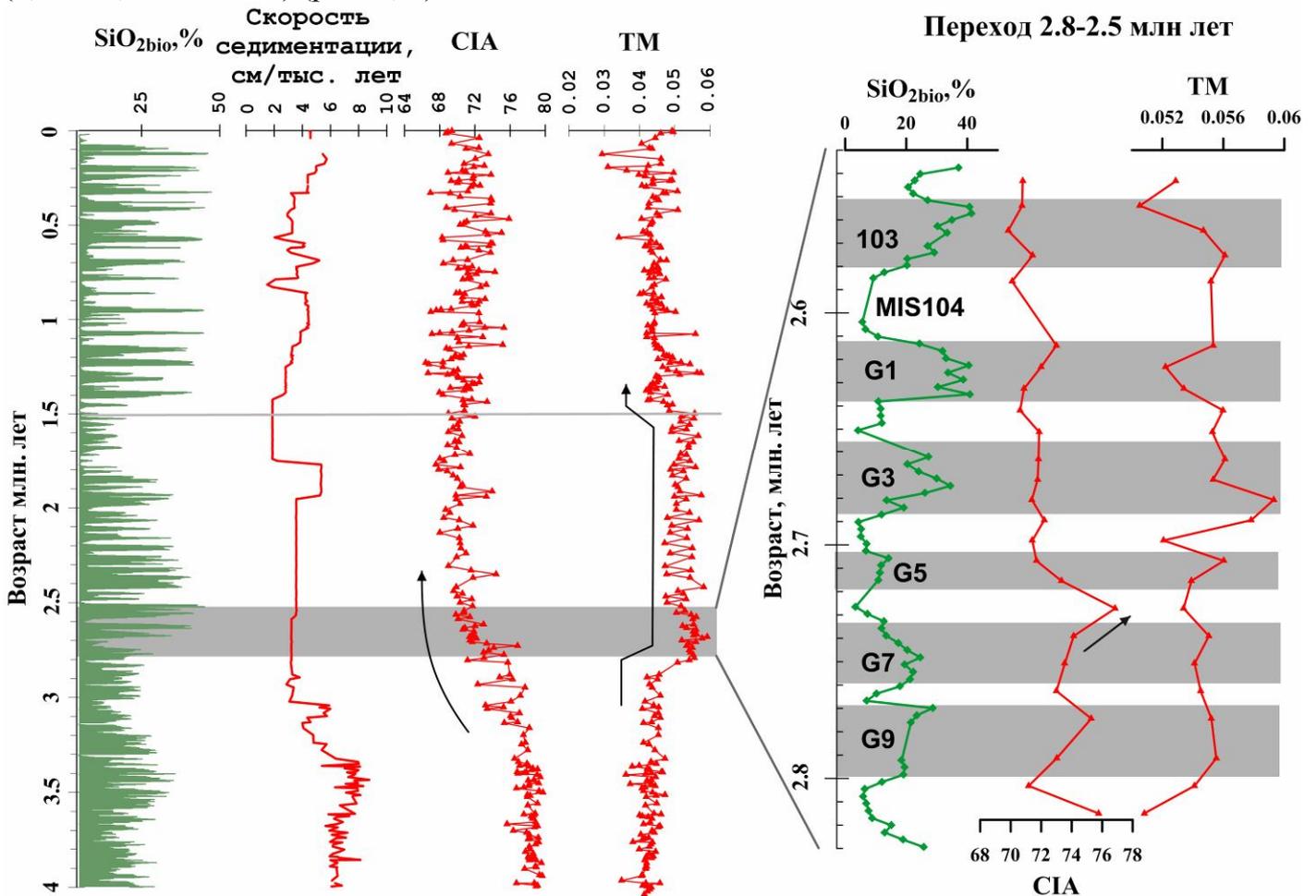


Рис. 9. Детализация модуля ТМ и индекса выветривания CIA в интервале перехода 2,8–2,5 млн. лет с учетом корреляции модели по биогенному кремнезему (SiO_{2bio}) и морских изотопных стадий MIS [Prokorenko, 2010], Академический хребт (разрез BDP-98). Стрелкой

справа выделен первый отклик индекса CIA на изменения климатических и тектонических условий, стрелки слева – изменения при переходе от плиоцена к квартеру

Глубокий сдвиг в сторону увеличения тренда ТМ в интервале 2,8–1,5 млн. лет свидетельствует о поступлении грубозернистых фракций осадков, что подтверждается полуколичественными определениями размерности частиц (рис. 1). Подобное поведение модуля свидетельствует о росте тектогенной нагрузки в ближайшем горном обрамлении озера и, по меньшей мере, отображает расчленение Приморского и Байкальского хребтов в это время. Активный тектонический процесс в интервале возрастов 2,8–1,5 млн. лет свидетельствует о взаимодействии местных и в удаленных геодинамических механизмов поскольку полностью согласуется по времени с «дооформлением» горных систем Азии (Тянь-Шань, Тибет) [Charreau, 2011; Wan, 2012].

Механизм седиментации, отражающий перенос терригенных компонентов сформированных в межледниковые периоды в последующие ледниковья в озеро Байкал, становится возможным после окончания активной стадии тектогенеза 1,5 млн. лет назад с ростом ледников в горном обрамлении озера. Подтверждением этому является поведение тренда индекса CIA в интервале перехода 2,8–2,5 млн. лет, где после увеличения поступления продуктов химической эрозии плиоцена в крио-аридных условиях одной из первых «холодных» стадий G6 при усилении эоловой нагрузки, происходит выполаживание тренда связанное с отсутствием дополнительного фактора экзарации склонов ледниками при транспортировке отложенных межледниковых горизонтов в ледниковые периоды (рис. 9). Таким образом, отображается незавершенность фазы тектогенеза.

На основании анализа литохимических индексов CIA, CIW, ICV, модулей и отношений НМ, КМ, НКМ, Ca/Al, демонстрирующих условия выветривания, модулей и отношений ТМ, ЩМ, Ti/Zr, Ba/Zr, отображающих процесс поступления обломочного материала, связываемый с тектоническим аспектом, осадочную толщу озера Байкал можно разделить на 4 этапа формирования. Первый этап 4–2,9 млн. лет характеризуется спокойной седиментационной обстановкой в условиях теплого и умеренно влажного климата плиоцена; второй этап 2,8–1,5 млн. лет – активный тектогенез в Байкальской горной области, сопряженный с изменением климата Северного Полушария при переходе от плиоцена к плейстоцену и межстадийным похолоданием 1,8–1,5 млн. лет; третий этап 1,5–0,3 млн. лет фиксирует масштабные горнодолинные оледенения в Байкальской горной области в ледниковые периоды; четвертый этап 0,3–0,01 млн. лет демонстрирует менее интенсивное воздействие климата на перенос продуктов химического выветривания в осадки ледниковых периодов, тем самым отображает процесс изменения в длительности и структуре климатических стадий (MIS).

Применение тройной диаграммы выветривания в координатах $(CaO+Na_2O)-Al_2O_3-K_2O$ [Nesbitt, 1989; Fedo, 1995] позволило выявить тенденцию направленности выветривания отложений водосборной площади, являющихся источником терригенного материала для донных осадков озера Байкал.

При разделении составов отложений Академического хребта по возрастному критерию (рис. 10 а.), где границей раздела отложений выбран интервал 2,588 млн. лет, соответствующий границе плиоцена и плейстоцена, фигуративные точки, относящиеся как к «теплым», так и к «холодным» интервалам, проявляют тенденцию к разделению, так как более возрастные осадки плиоцена демонстрируют большую степень выветривания отложений водосборной площади по отношению к более молодым осадкам плейстоцена. Подобная тенденция очевидна и вытекает из утверждения о более теплом климате плиоцена, а, соответственно, и более агрессивной обстановке химической эрозии в это время. Разделение составов отложений по климатическому критерию для интервалов, отвечающих пиковым значениям межледниковых стадий, образующих «теплый» тренд, а, ледниковым стадиям – «холодный» тренд, выявляет

две тенденции, несущие основополагающее значение при интерпретации процессов выветривания и переноса продуктов выветривания на подводные перемычки озера Байкал (рис. 10 б.).

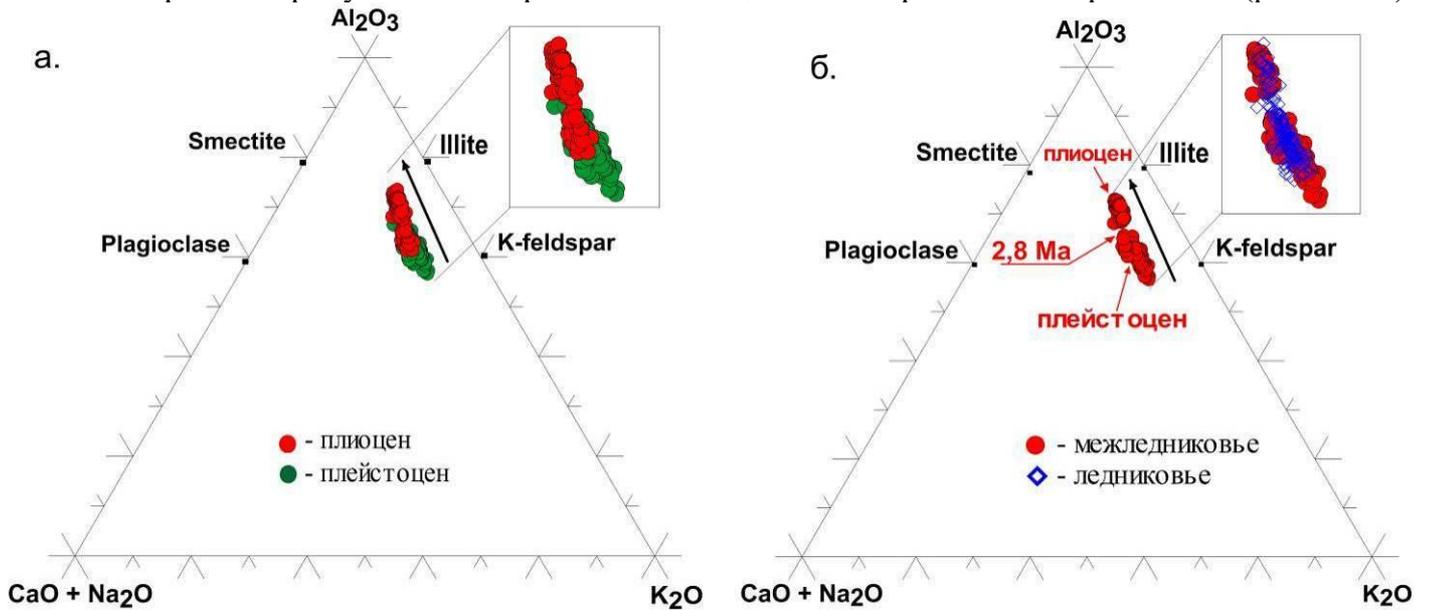


Рис. 10. Диаграмма направленности выветривания [Nesbitt, 1989; Fedo, 1995] для отложений разреза BDP-98 (Академический хребет): а. – разделение по критерию плиоцен/плейстоцен. б. – разделение по критерию ледниковье/межледниковье. Стрелкой указано направление выветривания

«Теплый» тренд показывает различие между характером выветривания отложений плейстоцена и интервала перехода 2,8–2,5 млн. лет с одной стороны и отложениями плиоцена (4–2,8 млн. лет) с другой. Не смотря на единое направление выветривания, фигуративные точки отложений плиоцена демонстрируют резкий отрыв от группы, соответствующих более молодым интервалам, тем самым фиксируя более прогрессивные условия разложения исходных пород в интервале возрастов 4–2,8 млн. лет. Показательным является отделение интервала перехода 2,8–2,5 млн. лет от пород плиоценовой группы к отложениям плейстоцена. Подобный переход указывает на изменения климатических и тектонических свойств, отображая поступление менее переработанных разностей пород.

«Холодный» тренд имеет схожее простираение с «теплым» трендом, что свидетельствует о едином характере процессов, протекающих на водосборной площади при переработке субстрата осадков независимо от климатического фактора, а также о неизменности материнских источников поступления материала. С другой стороны, фигуративные точки составов «холодного» тренда выстраиваются хаотично без учета временного фактора, т.е. перемешиваются. Подобная картина демонстрирует контаминацию ледниковых отложений продуктами выветривания межледниковых интервалов в момент переноса терригенной фракции в конечный водоем стока озеро Байкал. Таким образом, реконструкция направленности выветривания, позволила оценить динамику разрушения породообразующих минералов для ледниковых и межледниковых интервалов. Для отложений межледниковых интервалов Академического хребта озера Байкал установлена зависимость степени выветривания от временного фактора. Для ледниковых отложений подобной зависимости не выявлено, это свидетельствует о смешении составов отложений на водосборной площади перед аккумуляцией в горизонтах разреза.

При разграничении петрогенных характеристик отложений на модульной диаграмме в координатах ФМ-НКМ [Юдович, 1981] донные отложения Академического хребта озера Байкал экспонируются преимущественно в 3 поля: 2, 4 и 5 (рис. 11 а, б).

Поле 2 с преобладанием монтмориллонита (смектита) [Солотчина, 2009], характеризует осадки плиоцена вызревшие на водосборной площади в достаточно теплых и влажных

условиях (рис. 11 а.). Поля 4 и 5, фиксируют поступление менее переработанной на водосборной площади компоненты и характеризуют осадки плейстоцена имеющие хлорит-монтмориллонит-гидрослюдистый состав с одной стороны, и преимущественно гидрослюдистый с примесью тонкозернистых полевых шпатов с другой. При этом попытка отделить осадки ледниковых горизонтов от отложений межледниковья для плейстоцена (рис. 11 б.) не приводит к разграничению, свидетельствуя о смешении составов отложений при транспортировке в конечный водоем стока и, тем самым, подтверждая вывод для диаграмм направленности выветривания (рис. 10).

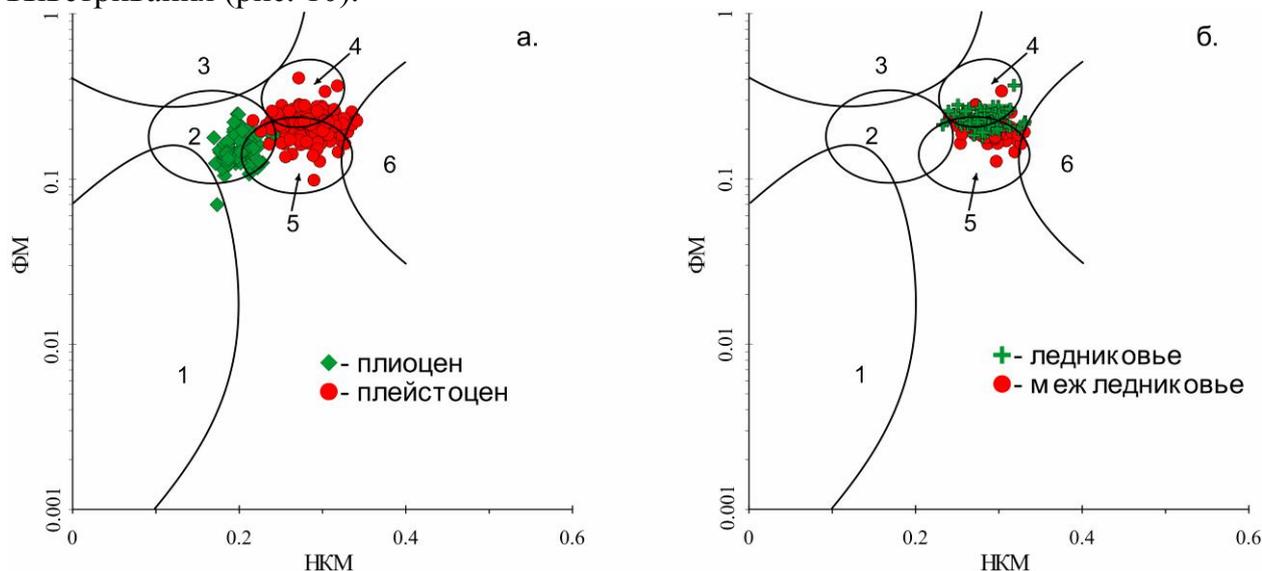


Рис. 11. Диаграммы в координатах ФМ-НКМ [Юдович, 1981] для разреза BDP-98. Условные обозначения: **а.** – разделение по возрастному критерию, ромбы – 4–2,8 млн. лет; кружки – 2,8–0,01 млн. лет; **б.** – разделение по критерию ледниковье/межледниковье в интервале 1,5–0,01 млн. лет; поля цифрами: 1 – глинистые породы с доминированием каолинита; 2 – породы с преобладанием монтмориллонита и подчиненным количеством каолинита и гидрослюда; 3 – глинистые породы с доминантой хлорита (Fe-слюда в виде примеси); 4 – глинистая порода гидрослюдистого состава со значительной примесью тонкозернистых полевых шпатов; 5 – глинистая порода трехкомпонентного состава (хлорит + монтмориллонит + гидрослюда); 6 – гидрослюдистые глинистые породы с примесью тонкодисперсного полевого шпата

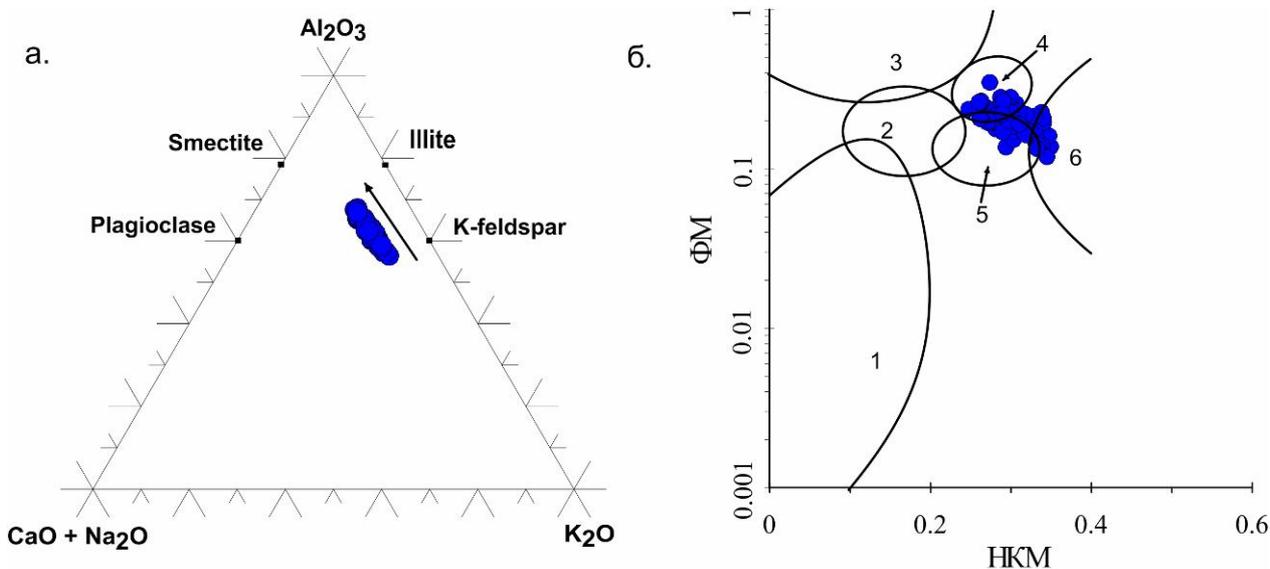


Рис. 12. а. – диаграмма направленности выветривания [Nesbitt, 1989; Fedo, 1995] для отложений разреза BDP-99 (Селенгино-Бугульдейская перемычка). Стрелкой указано направление выветривания. **б.** – диаграммы в координатах ФМ-НКМ [Юдович, 1981] для разреза BDP-99. Условные обозначения цифрами для полей как на рисунке 11

Для диаграммы направленности выветривания в отложениях разреза BDP-99 (Селенгино-Бугульдейская перемычка) длина простирания тренда и его расположение наблюдается в схожих с осадками Академического хребта координатах и свидетельствует о чрезвычайной близости составов продуктов выветривания на обеих перемычках Байкала. Различие заключается в слабом изменении направления тренда в сторону линии $(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3$ демонстрирующей поступление слабовыветрелой кластической компоненты в осадки разреза BDP-99 и отображающей влияние стока р. Селенги (рис. 12 а.).

На диаграмме ФМ-НКМ как и для одновозрастных осадков Академического хребта, существенная часть плейстоценовых осадков разреза BDP-99 (Селенгино-Бугульдейская перемычка) экспонируется в 2 поля: 4 и 5, однако третья часть фигуративных точек экспонируется в поле 6 – гидрослюдистых глинистых пород с тонкодисперсной примесью полевых шпатов. При разграничении глинистых отложений подобным способом очевидным является увеличение поступления обломков полевых шпатов как тонкозернистой, так и тонкодисперсной размерности. Причина подобного отличия очевидна и связана с близким расположением дельты р. Селенги, оказывающей существенное влияние на формирование осадочной толщи данной морфоструктуры (рис. 12 б.).

Глава 4. Изотопная Sr-Nd систематика осадков озера Байкал как индикатор эндогенных и экзогенных процессов

Для изучения изотопной систематики $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в разрезе BDP-98 опробование проводилось по критерию, примененному ранее для разреза BDP-96. Диатомовый ил с концентрациями биогенного кремнезема $\text{SiO}_{2\text{био}}$ от 26 до 43 % и ледниковые глины с содержаниями биогенного кремнезема от 3 до 8 %. Полученные при этом характеристики сравнивались с результатами, полученными ранее для осадков разреза BDP-96.

На рисунке 13 а. показано распределение изотопов стронция для осадков Академического хребта (BDP-98) до возрастной границы 7,2 млн. лет. Вариации изотопного состава стронция по разрезу подтверждают ранее выдвинутые предположения и вносят ряд новых моментов в оценку тектонических условий седиментации. Так, закономерным является менее радиогенный состав диатомового ила, отвечающий межледниковым интервалам. В тот же самый момент фиксируется очевидное смешение изотопного состава стронция в обоих типах отложений в возрастном диапазоне свыше 5 млн. лет, демонстрируя значительное смешение терригенной и биогенной составляющей осадка в результате влияния авандельты реки Палеобаргузин на формирование отложений Академического хребта во время его становления как обособленной структуры. На кривой распределения изотопного состава стронция для терригенных отложений зафиксировано два выброса с возрастными параметрами, соответствующими 2,8 млн. лет и 250 тыс. лет. Слабый отклик на данные выбросы демонстрирует и обогащенная биогенной компонентой часть осадка. Чтобы исключить влияние климатического фактора и, тем самым, подтвердить возможный отклик отношения изотопов стронция на тектогенез, отношения изотопов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для обоих типов отложений были нормированы на средние значения и приведены к единице (рис. 13 б.).

Полученные характеристики выявляют зависимость обоих типов отложений от изменения условий терригенной седиментации. Максимальные значения отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ как для ледниковых глин, так и диатомового ила согласуются с началом активного тектогенеза в Байкальской горной области 2,8–2,5 млн. лет и откликаются на возможный тектогенез в интервале 300–250 тыс. лет, согласуясь при этом с титановым модулем (ТМ). Таким образом, очевидным является подтверждение индикативных свойств величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для оценки орогенического процесса Байкальской рифтовой зоны.

Для определения влияния и идентификации источников сноса терригенного вещества окружающих пород в осадочные разрезы (как поверхностные четвертичные, так и донные от-

ложения), как правило, используются классические геохимические методы, такие как нормирование петрохимических характеристик на средние содержания (кларки) пород предполагаемых источников сноса.

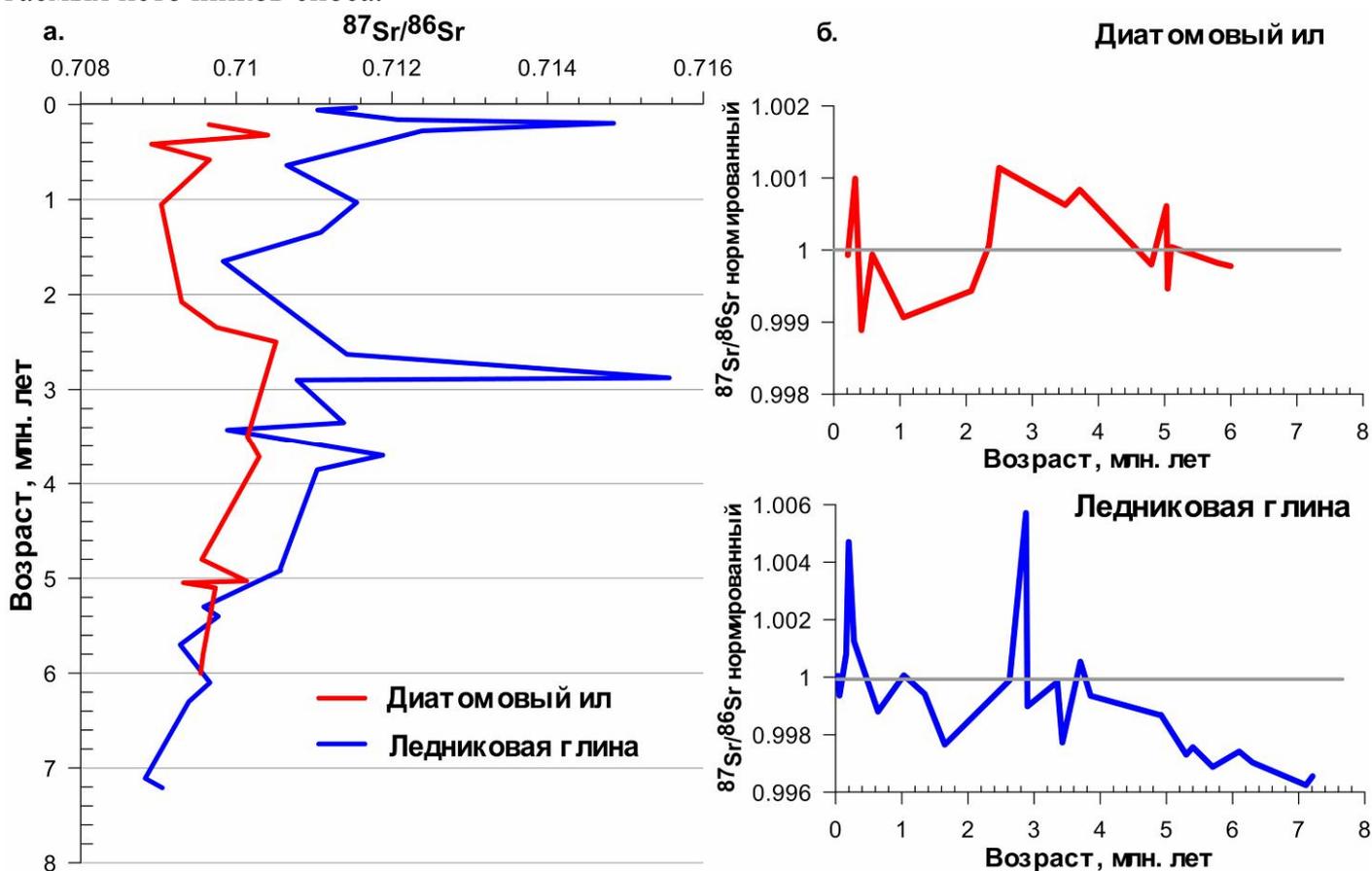


Рис. 13. а. – изотопное отношение стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в донных отложениях Академического хребта (BDP-98) для 2-х типов осадка. **б.** – изотопное отношение стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в донных отложениях Академического хребта нормированное на среднее и приведенное к единице

Основной сложностью для определения пропорций петрокомпонентов из разных источников вещества в донных отложениях Байкала является его мультиколлекторность, т.е. влияние весьма широкого спектра разновозрастных ассоциаций пород на формирование осадочной толщи водоема. Одним из методов, позволяющих оценить проблему переноса вещества из различных источников в бассейн седиментации, является распределения изотопов Sr и Nd.

Изотопный состав Nd в терригенных осадках разреза лежит в пределах $\epsilon\text{Nd}(0) = -12,9$ – $(-9,3)$ при среднем значении $\epsilon\text{Nd}(0) = -10,9$, а в диатомовых – в пределах $\epsilon\text{Nd}(0) = -13,0$ – $(-8,9)$ при среднем значении $\epsilon\text{Nd}(0) = -10,2$. Изотопный состав Nd в терригенных отложениях определяется природой источника сноса терригенного материала. По мере обогащения автохтонной органической компонентой наблюдается рост общего фона радиогенности составов Nd в осадке. Природа данного факта требует дополнительных исследований (рис. 14).

Изотопная Sr-Nd систематика осадков скважины BDP-98 позволяет определить параметры сноса терригенного осадочного материала в бассейн осадконакопления.

Установлено, что область локализации изотопных составов Sr-Nd не принадлежит к линии смешения вещества между мантией и нижней корой, а также смещена от линии смешения мантия – верхняя кора, при этом соответствует области составов баргузинского и чивыркуйского гранитоидных комплексов [Ярмолюк, 1997; Коваленко, 1999].

Таким образом, соответствие области составов отложений гранитоидам Забайкалья подтверждает ранее сделанный вывод о влиянии макро- и микроэлементного состава гранитоидов Забайкалья на состав отложений озера Байкал, в том числе, среднего состава чивыр-

куйского и нижнеселенгинского комплексов монзонитов-сиенитов [Цыганков, 2014], природа которых генетически связана с гранитоидами Ангаро-Витимского батолита. В то же самое время наблюдается смешение составов отложений как «теплых», так и «холодных» интервалов, демонстрируя отсутствие изменения основных источников сноса терригенного вещества как в ледниковые и межледниковые периоды, так и в диапазоне плиоцен – плейстоцен.

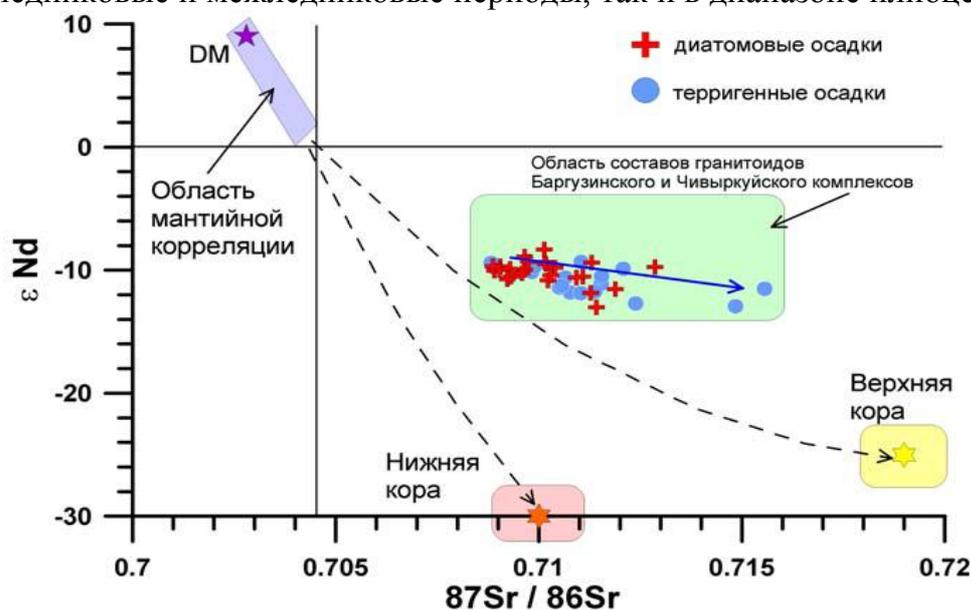


Рис. 14. Sr-Nd изотопная корреляция для терригенных и диатомовых осадков скважины BDP-98. Условные обозначения: DM – состав деплетированной мантии; составы Верхней и Нижней континентальной коры для Северо-Китайского кратона [Huang, 2007]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения детальных геохимических и изотопно-геохимических исследований в донных отложениях озера Байкал изучено влияние глобальных и региональных факторов (тектоника, климат) на изменение условий регионального седиментогенеза.

Выявлены основные этапы формирования осадочной толщи озера Байкал в необайкальскую стадию развития. Первый этап – 4–2,9 млн. лет – относительно спокойная седиментационная обстановка в условиях теплого и умеренно влажного климата плиоцена. Второй этап – 2,8–1,5 млн. лет – активный тектогенез в Байкальской горной области, сопряженный с изменением климата Северного полушария при переходе от плиоцена к плейстоцену и межстадийным похолоданием 1,8–1,5 млн. лет. Третий этап – 1,5–0,3 млн. лет фиксирует масштабные горно-долинные оледенения в Байкальской горной области в ледниковье. Четвертый этап – 0,3–0,01 млн. лет демонстрирует менее интенсивное воздействие климата на перенос продуктов химического выветривания в осадки ледниковья, тем самым отображает процесс изменения в длительности и структуре климатических стадий (MIS).

1. В интервале 2,8–2,5 млн. лет, при снижении общих температур и изменении климата, литохимические индексы и модули (CIA, CIW, ICV, НКМ, НМ, КМ, Ca/Al), происходят процессы выветривания на водосборной площади при корреляции с сопредельными интервалами, свидетельствующие об отсутствии масштабного горно-долинного оледенения в периоды похолоданий. Это связано с незавершенностью процесса тектогенеза и отсутствием необходимой расчлененности рельефа горного обрамления озера Байкал.

2. Начиная с 2,8 млн. лет, одновременно с началом процесса изменения климата Северного Полушария при переходе от плиоцена к плейстоцену, фиксируется начало тектогенеза в Байкальской горной области, приведшего, предположительно, к активному подъему и расчленению Приморского и Байкальского хребтов. Окончание активной фазы тектогенеза совпадает

по времени с интервалом очередного глубокого межстадийного похолодания климата в интервале 1,8–1,5 млн. лет.

3. Для интервала 1,5–0,3 млн. лет зафиксировано усиление переноса продуктов химического выветривания в отложения водоема в ледниковые стадии по отношению к межледниковым интервалам. Механизмом поступления тонкой переработанной терригенной компоненты является холодное иссушение (крио- аридизация) при экзарации склонов ледниками, возрастание эоловой нагрузки, способствующей аккумуляции продуктов разрушения кор выветривания и почв межледниковья в горизонтах разреза BDP-98 (Академический хребет).

4. Основными источниками поступления терригенной фракции на подводные перемычки озера Байкал являлись породы обрамления водоема, преимущественно Забайкальского фланга. На водосборной площади в зависимости от условий климата происходило смешение петрокомпонентов 2-х типов выветривания (физического и химического). В относительно теплых условиях плиоцена преобладали продукты химической переработки, в плейстоцене смешение происходило в зависимости от глубины (амплитуды) и длительности климатических стадий MIS.

5. Изотопный состав Nd и Sr определяет осадочные горизонты скважины BDP-98 в поле составов гранитных комплексов Забайкалья (баргузинский и чивыркуйский комплексы пород), а также является индикатором горообразовательного процесса в Байкальской горной области, демонстрируя резкое изменение отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ на различных этапах тектогенеза.

6. Отложения разрезов Академического хребта (BDP-98) и Селенгино-Бугульдейской перемычки (BDP-99) чрезвычайно близки друг другу по составу и незначительно отличаются по микроэлементным характеристикам. Это говорит о, преимущественно, родственных источниках сноса, при этом зависимость смены источников от изменения условий климата по геохимическим данным отсутствует и прослеживается только по изменению литологических и минералогических характеристик.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

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 климата и окружающей среды // Геология и геофизика. 2014. № 1. С. 3–22.

BDP Members. A new Quaternary record of regional tectonic, sedimentation and paleoclimate changes from drill core BDP-99 at Posolskaya Bank, Lake Baikal // Quaternary International. 2005. Vol. 136. P. 105–121.

Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Высокоразрешающая осадочная запись по керну глубоководного бурения на посольской банке в озере Байкал (BDP-99) // Геология и Геофизика. 2004. Т. 45. №2. С.163–193.

Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., **Иванов Е.В.**, Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубоководное бурение на Байкале-основные результаты // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. №. 1–2. С. 8–34.

Antipin V., Afonina T., Badalov O., Bezrukova E., Bukharov A., Bychinsky V., Dmitriev A., Dorofeeva R., Duchkov A., Esipko O., Filev T., Gelety V., Golubev V., Goreglyad A., Gorokhov I., Gvozdkov A., Hase Y., Ioshida N., **Ivanov E.**, Kalashnikova I., et al. The new BDP-98 600-m drill core from Lake Baikal: a key late Cenozoic sedimentary section in continental Asia // Quaternary International. 2001. Vol. 80. P. 19–36.

Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубоководного бурения) // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 1. С. 3–32.

Прочие издания

Ivanov E., Kerber E., Kuzmin M. Geochemical record from lake Baikal sediments as a history of environmental changes in the late-pliocene-pleistocene // Paleolimnology of Northern Eurasia. Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk, 21–25 September, 2014. – Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS. P. 46–47.

Ivanov E.V., Kuzmin M.I., Kovach V.P. Academician ridge sedimentation (Lake Baikal) by the isotopic-geochemical data // Abstract volume of The 7th International Symposium on Environmental Changes in East Eurasia and Adjacent Areas – High Resolution Environmental Records of Terrestrial Sediments. Ulaanbaatar-Hatgal, Mongolia. August 23–29, 2008. P. 81.

Ivanov E.V., Osuhovskaya Yu.N., Shaporenko A.D. Paleoenvironmental reconstruction of lake Baikal region in late Cenozoic using XRFSR and geochemical data of deep sedimentary cores // VII ANKA User Meeting. Abstract Book. October 09-10, 2008. Karlsruhe. Germany. P. 26.

Дриль С.И., **Иванов Е.В.**, Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Загорная Н.Ю., Гелетий В.Ф. Изотопная Nd-Sr систематика пород осадочного разреза озера Байкал // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Иркутск. 14–18 октября, 2008. С. 116–118.

Ivanov E.V. Tectonic reconstruction of the Baikal region in the late Cenozoic using litologic-geochemical data of deep sedimentary cores // The 6th International Symposium on Terrestrial Environmental Changes in East Eurasia and Adjacent Areas. Irkutsk-Listvyanka. 2007. P. 102.

Иванов Е.В. Литолого-геохимические характеристики осадконакопления Селенгино-Бугульдейской перемычки озера Байкал // Материалы XIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Москва. 2006.

Ivanov E.V., Gelety V.F., Kalmychkov G.V. Stratigraphic Break in Sedimentation of BDP-99 core and Paleoclimatic Reconstruction in the Central Asia // Third International Conference: Environmental Change in Central Asia. Ulaanbaatar. Mongolia. 2005. P. 47