

*На правах рукописи*



**Андреев Антон Андреевич**

**СОСТАВ, ВОЗРАСТ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПОРОД  
НЮРУНДУКАНСКОГО КОМПЛЕКСА КИЧЕРСКОЙ ЗОНЫ (БАЙКАЛО-  
МУЙСКИЙ СКЛАДЧАТЫЙ ПОЯС)**

Специальность 1.6.3. петрология, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

**Научный руководитель:**

**Ярмолюк Владимир Викторович,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
академик РАН, заведующий лабораторией  
редкометального магматизма Института геологии  
рудных месторождений, петрографии, минералогии и  
геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)

**Официальные оппоненты:**

**Цыганков Андрей Александрович,**  
доктор геолого-минералогических наук, директор  
Геологического института им Н.Л. Добрецова  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ГИН СО РАН)

**Саватенков Валерий Михайлович,**  
кандидат геолого-минералогических наук, старший  
научный сотрудник лаборатории геохронологии и  
геохимии изотопов Института геологии и  
геохронологии докембрия Российской академии наук  
(ИГГД РАН)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт земной коры Сибирского  
отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН)

Защита диссертации состоится «21» декабря 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.051.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии Наук (ИГЕМ РАН), по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, а также на сайте ИГЕМ РАН (<http://www.igem.ru/>). Автореферат диссертации также размещен на официальном сайте ВАК (<http://vak.ed.gov.ru/>)

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.051.01  
кандидат геолого-минералогических наук  
[dissovet\\_igem@mail.ru](mailto:dissovet_igem@mail.ru)



А.М. Козловский

## Введение

**Актуальность работы.** Вопросы формирования и эволюции континентальной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) относятся к одной из актуальных проблем геологии. В последние десятилетия в решении этой проблемы важнейшее значение приобрело использование современных методов петрологии, изотопной геохимии и геохронологии. На их основе установлены основные рубежи в истории формирования и эволюции коры ЦАСП, а также предложены геодинамические модели процессов корообразования, связанные с образованием и распадом суперконтинентов Родиния и Гондвана (Коваленко и др., 1999; Коваленко и др., 1996; Ярмолюк и др., 1999; Рыцк и др., 2007; Рыцк и др., 2011; Gladkochub et al., 2019; Ernst et al., 2008). Тем не менее, некоторые аспекты расшифровки ранних этапов тектонической эволюции ЦАСП и последовательности проявления корообразующих процессов в его пределах до сих пор остаются дискуссионными.

Классическим примером тектонотипов подвижных поясов байкальского этапа в развитии ЦАСП является Байкало-Муйский пояс (БМП). Его западный сегмент обладает наибольшей сложностью строения и представлен Кичерской зоной метаморфических пород. С точки зрения региональной тектоники интерес к рассматриваемой территории обусловлен ее позицией на границе с Олоkitским блоком краевой части Сибирского кратона. Основным геологическим подразделением Кичерской зоны является нюрнудуканский комплекс («нюрнудуканская толща»), в который традиционно объединялись практически все магматические и метаморфические образования этой структуры (Митрофанова и др., 2010).

Выявление докембрийских офиолитов в составе БМП, в качестве которых рассматривались породы «нюрнудуканского комплекса (толщи)», привлекло внимание многих специалистов к его геологическим особенностям (Добрецов, 1983; Добржинецкая, 1985; Клитин и др., 1975; Рундквист, 1990; Dobretzov et al., 1995; Amelin et al., 1997; Конников и др., 1999; Ярмолюк и др., 2006). В результате нюрнудуканский комплекс стал одним из наиболее известных геологических элементов не только Кичерской зоны, но и Байкало-Муйского пояса в целом. Вместе с тем статус и геологические границы нюрнудуканского комплекса в докембрии Северного Прибайкалья остаются неопределенными до настоящего времени.

Собственно, «нюрнудуканская толща» вулканитов основного и кислого состава с мощными пачками метаосадочных пород была выделена Л.И.Салопом (Салоп, 1964; Салоп, 1967). В ходе геологосъемочных работ масштаба 1:50000 объем нюрнудуканской толщи то сокращался, так что ее состав ограничивался только плагиогнейсами и амфиболитами междуречья Холодная - Кичера и береговой полосы Байкала, то снова расширялся из-за включения в ее состав мощных толщ метаосадочных пород и вулканитов Светлинской зоны Анамакит-Муйского террейна. Характеристика разрезов и состава нюрнудуканской толщи, заимствованная из сводных легенд ГГК-200 нового поколения (Митрофанова и др., 1996 г., Легенда Баргузино-Витимской..., 1999 г.), и обобщенная в материалах ГГК 1000/3 N-49, O-49 (Фишев и др., 2011, Митрофанова и др., 2010) дискуссионна и, местами, ошибочно представляет далекие от Кичерской зоны БМП структуры.

Исследования (Рыцк и др., 2007; Рыцк и др., 2011) показали, что формирование БМП протекало в два этапа, определяемых как ранне- (1.0-0.72 млрд лет) и позднебайкальский (0.72-0.59 млрд лет).

Неопределенность сложившихся представлений об объеме, взаимоотношениях и последовательности формирования магматических и метаморфических комплексов БМП требует уточнения и пересмотра. Ведущая роль в реконструкции тектонического развития Байкало-Муйского пояса принадлежит Кичерской зоне, где в составе образований, относимых к

нюрндукуанскому комплексу («толще»), нами установлены разновозрастные магматические и метаморфические породы.

**Цели и задачи работы.** Целью работы являлось восстановление последовательности, возраста и условий формирования магматических и метаморфических комплексов Кичерской зоны на основе результатов геологических, петрографических, геохимических, изотопных и геохронологических исследований. Основной упор был сделан на изучение состава и геологического положения пород нюрндукуанского комплекса, выполняющего ключевую роль в строении этой зоны.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выявление особенностей геологического строения Кичерской зоны на основе авторского материала и опубликованных данных.
2. Геологическое картирование ключевых участков распространения пород позднебайкальских комплексов, доминирующих в строении Кичерской зоны.
3. Выявление основных этапов формирования магматических и метаморфических пород Кичерской зоны.
4. Обоснование геологического положения (состава, строения, возраста, условий формирования и источников) пород нюрндукуанского комплекса Кичерской зоны.
5. Реконструкция обстановки формирования нюрндукуанского комплекса.

**Научная новизна.** 1. Установлено, что основные черты геологического строения Кичерской зоны определяются системой крупных сдвиговых тектонических пластин и блоков, границы которых маркируются бластомилонитами. 2. Установлены два рубежа высокотемпературных метаморфических преобразований пород Кичерской зоны, из которых ранний (755 млн лет) определяет верхнюю возрастную границу формирования раннебайкальских структур, представленных породами Горемыкского и Умоликитского блоков, а поздний (635-615 млн лет) возрастную границу, определившую двухэтапное формирование позднебайкальских структур – ранний этап – криогений – ранний эдиакарий и поздний этап – поздний эдиакарий. 3. Показано, что собственно нюрндукуанский комплекс представлен основными породами, которые возникли на ранней стадии позднебайкальского тектогенеза и были преобразованы в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций к рубежу 615 млн лет. 4. Получены геохимические характеристики пород нюрндукуанского комплекса, указывающие на их возможную принадлежность к компонентам офиолитов окраинно-континентального типа (СМ - continental margin). 5. Получены изотопно-геохимические Sm-Nd характеристики пород Кичерской зоны, позволяющие установить и охарактеризовать их источники.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут лечь в основу серийных легенд для геологических карт, а также обозначить новые подходы в их создании. Участки детально выполненных исследований высокометаморфизованных докембрийских комплексов района могут стать опорными при проведении геолого-съёмочных работ.

**Фактический материал и методы исследований.** В основу работы положен оригинальный авторский материал, собранный в течение десяти полевых сезонов в пределах Северного Прибайкалья (2009-2013, 2015-2019 гг.). Были детально изучены разрезы и ключевые участки Кичерской зоны БМП, а также пограничных зон и районов.

В ходе исследований проведены крупномасштабное картирование, фотодокументация и составлены профили наиболее дискуссионных участков Кичерской зоны. Для характеристики вещественного состава и аналитических исследований была отобрана представительная коллекция каменного материала (более 1000 проб). Петрографические и минералогические исследования выполнялись в прозрачно-полированных шлифах (изучено более 300 шлифов).

Химический состав пород определялся методами ICP MS (ИГЕМ РАН, ВСЕГЕИ) и РФА (ИГЕМ РАН) (более 500 определений). Более чем для 100 образцов выполнены изотопно-геохимические Sm-Nd (ИГГД РАН) исследования. Геохронологическими методами определен возраст пород, слагающих ранне- и позднебайкальские комплексы: ID-TIMS – 11 проб (ИГГД РАН), SIMS (SHRIMP II) – 6 проб (ВСЕГЕИ), LA-ICP MS – 2 пробы (Национальный университет Тайваня). Для определения химического состава породообразующих минералов наиболее значимых пород Кичерской зоны, были проведены микрозондовые анализы с использованием рентгеновского микроанализатора с 5-ю волновыми спектрометрами и сканирующего электронного микроскопа (ИГЕМ РАН, ИГГД РАН).

#### **Защищаемые положения.**

1. Определены особенности строения Кичерской зоны Байкало-Муйского пояса (БМП), являющейся петротипической для пород нюрундуканского комплекса. Установлено ее неоднородное строение, позволившее выделить в ее пределах раннебайкальские и позднебайкальские структуры. Раннебайкальские образования, сформированные к рубежу  $755 \pm 15$  млн лет, отмечаются в строении небольших тектонических блоков. Основной объем в строении зоны представляют позднебайкальские породы нюрундуканского комплекса.
2. Нюрундуканский комплекс представлен магматическими образованиями основного и среднего составов, сформированными в интервале 660 - 640 млн лет и преобразованными в результате метаморфизма (640 – 615 млн лет) в метабазиты, метадiorиты и трондьемиты.
3. Геохимические и Nd-изотопные характеристики метабазитов нюрундуканского комплекса указывают на их связь с различными ювенильными источниками. Толеиты MORB-типа центральной части Кичерской зоны формировались за счет ДМ источника, а толеиты с внутриплитной геохимической спецификой юго-западной части зоны - за счет обогащенного плюмового источника.
4. Формирование пород нюрундуканского комплекса и Кичерской зоны в целом связано с процессами ювенильного корообразования в пределах БМП, которое протекало в режиме рифтогенеза, инициированного мантийным плюмом, и завершилось закрытием субокеанического бассейна (палеорифта) и метаморфизмом.

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 5 статьях и тезисах докладов. Основные результаты были представлены на научных совещаниях «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)» (г. Иркутск, 2013, 2016, 2018, 2019 гг.), на Российской молодежной научно-практической школе «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, 2017, 2018 гг.), на V международной конференции «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал» (Гремячинск, 2017 г.), на Российской конференции по изотопной геохронологии «Методы и геологические результаты изучения геохронометрических систем минералов и пород» (Москва, 2018 г.), на VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия «Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика» (Санкт-Петербург, 2019 г.).

**Личный вклад автора.** Работа выполнена автором на основе оригинального материала, собранного в течение десяти полевых сезонов на территории Северного Прибайкалья. Были проведены геологическое картирование, структурно-геологическое изучение, задокументированы основные опорные разрезы и обнажения, отобраны пробы. Проведены петрографические исследования главных типов пород Кичерской зоны. Получены, проинтерпретированы и обобщены новые геохимические, изотопно-геохимические и

геохронологические данные. Реконструирована и обоснована последовательность корообразующих процессов в пределах Кичерской зоны БМП.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из 8 глав, введения, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет страниц 210, включая рисунки, таблицы и приложения. Список литературы состоит из 142 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю академику РАН В.В. Ярмолку за руководство работой, постановку научной задачи, внимание и терпение. Автор искренне благодарен В.И. Коваленко за поддержку в самом начале моего научного пути. Особую благодарность автор испытывает по отношению к Е.Ю. Рыцку за создание условий для проведения исследований и полевых работ, мотивацию, всестороннюю поддержку, дискуссии и ценные рекомендации. Искренне признателен автор члену-корреспонденту РАН А.Б. Котову, Е.Б. Сальниковой и В.П. Ковачу за помощь в проведении геохронологических исследований, ценный полевой опыт и методические консультации. За помощь в интерпретации материалов и советы автор благодарен С.Д. Великославинскому и Е.В. Толмачевой. Автор искренне признателен И.А. Андреевой, О.А. Андреевой, А.В. Никифорову, А.М. Козловскому, Д.А. Лыхину, Ю.М. Лебедевой, А.В. Андрееву, Е.А. Кудряшовой и В.С. Андрееву за консультации, критические замечания и полезные советы. Автор благодарен А.И. Якушеву, Е.В. Ковальчук и Е.С. Богомолу за выполненные высококачественные анализы. За дружеское участие, поддержку и ценные рекомендации автор признателен Н.В. Андреевой, С.А. Устинову, В.А. Минаеву, И.О. Нафигину, А.А. Усачевой, Н.А. Полякову, Е.Е. Амплиевой, А.Б. Лексину, Т.М. Злобиной, К.Ю. Мурашову и А.А. Котову.

## **Глава 1. Байкало-Муйский пояс и особенности его строения**

### **Краткая история изучения**

Байкало-Муйский пояс, входящий в структуру восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса, прослеживается на расстояние около 600 км от западного побережья оз. Байкал до бассейна среднего течения р. Витим.

Существуют различные взгляды на природу Байкало-Муйского пояса. Первые представления о его формировании были сформулированы Л.И. Салопом, который рассматривал его в качестве раннепротерозойской эвгеосинклинальной складчатой области (Салоп, 1964; Салов, 1967). Последующие геологические работы в пределах Кичерской зоны, представляющей ключевую структуру БМП, позволили сопоставить породы нюрндуханского комплекса с офиолитами (Клитин и др., 1975). Данная идея была поддержана Н.Л. Добрецовым, который предложил модель формирования БМП в условиях континентального рифтогенеза, сравнив породы нюрндуханского комплекса с офиолитами красноморского типа (Добрецов, 1983). Другая точка зрения, предполагавшая островодужную природу БМП, представлена в работах (Конников и др., 1999; Цыганков, 2005; Гордиенко, 2019, 2021а). Согласно (Рыцк и др., 2007; Рыцк, 2020) ведущее значение в тектонической эволюции БМП принадлежит рифтогенному режиму и процессам сдвигового тектогенеза.

### **Геологическое положение и строение Байкало-Муйского пояса**

Байкало-Муйский пояс занимает пограничное положение между краевой частью Сибирского кратона и Баргузино-Витимским супертеррейном ЦАСП (Рыцк, 2018а; Рыцк и др., 2019а). В его строении выделяются западный и восточный сегменты, которые имеют разные тектонические границы с кратоном. Границы западного сегмента имеют сдвиговый характер, а восточного – комбинированный сдвиговый с надвиговой компонентой (Рыцк, 2020).

Геологическое строение Байкало-Муйского пояса характеризуется совмещением ранне- и позднебайкальских структурно-вещественных комплексов. Муйская зона и отдельные

разобщенные тектонические блоки восточного и западного сегментов БМП образованы глубоко метаморфизованными породами раннебайкальских вулканогенно-карбонатно-терригенных комплексов. Позднебайкальские комплексы и продукты их метаморфического преобразования выделены в Кичерской зоне западного сегмента и Парам-Шаманской, Каралон-Мамаканской зонах восточного сегмента. Позднебайкальские образования Янской зоны частично охватывают район тектонического сочленения западного и восточного сегментов. Предметом наших исследований являлись магматические и метаморфические комплексы Кичерской зоны.

## **Глава 2. Методы исследования.**

Определение состава пород осуществлялось с помощью методов валового химического анализа, включающих рентгено-флуоресцентный анализ (петрогенные компоненты) и метод ICP-MS, позволяющий получить полный спектр редких и редкоземельных элементов.

U-Pb геохронологические исследования выполнены классическим методом изотопного датирования (ID-TIMS) и локальными методами (SIMS, LA-ICP MS) для отдельных зерен циркона. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программ «PbDAT», «SQUID», «GLITTER» и «ISOPLOT» (Ludwig, 1991, 1999, 2001, 2007, 2008, 2009; Van Achterbergh et al., 2001).

Содержания и изотопные составы Sm и Nd измерялись на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом режиме.

## **Глава 3. Геологическое строение Кичерской зоны.**

В строении Кичерской зоны нами были выделены глубоко метаморфизованные образования, а также комплексы пород, не затронутые высокотемпературным метаморфизмом (рисунок 1). Метаморфические породы представлены двумя ассоциациями. В составе одной преобладают гнейсо-граниты, в составе другой – амфиболиты. Нами было установлено, что первые отвечают раннебайкальским образованиям и проявлены в виде изометричных тектонических блоков. Вторые отвечают поздним байкалидам и участвуют в строении сдвиговых тектонических пластин. За последними, резко преобладающими в строении Кичерской зоны, мы сохраняем определение нюрндуканского комплекса. Помимо нюрндуканского выделяется еще и кичерский комплекс, в составе которого наряду с амфиболитами участвуют также метаосадочные породы. Комплексы пород, незатронутые высокотемпературным метаморфизмом представлены позднеэдиакарскими терригенными отложениями, выполняющими небольшие впадины, а также проявлениями гранитоидного и базитового магматизма.

В юго-западной части (подзоне) Кичерской зоны доминируют раннебайкальские образования Горемыкского блока, которые по мощной зоне бластомилонитов совмещены с метабазами позднебайкальского нюрндуканского комплекса Богучанской пластины (рисунок 1б). Центральная подзона сложена преимущественно позднебайкальскими метабазами нюрндуканского (Слюдинско-Курлинская и Гасан-Дякитская пластины) и вулканогенно-осадочными породами кичерского (Гаяндская пластина) комплексов. Последние по надвигу перекрываются раннебайкальскими метаморфическими породами Умоликитского блока. В Северо-Восточной подзоне преобладают структуры, сложенные метаосадочными толщами кичерского комплекса. Ниже приводится краткая геологическая характеристика разновозрастных магматических и метаморфических комплексов Кичерской зоны.

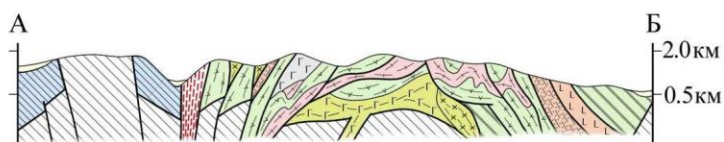
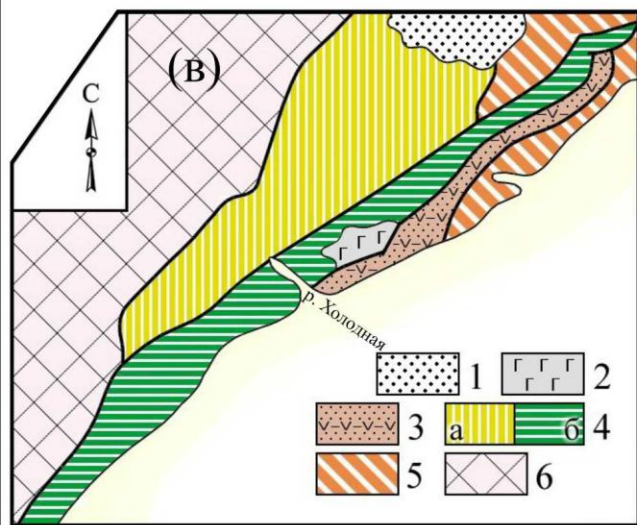
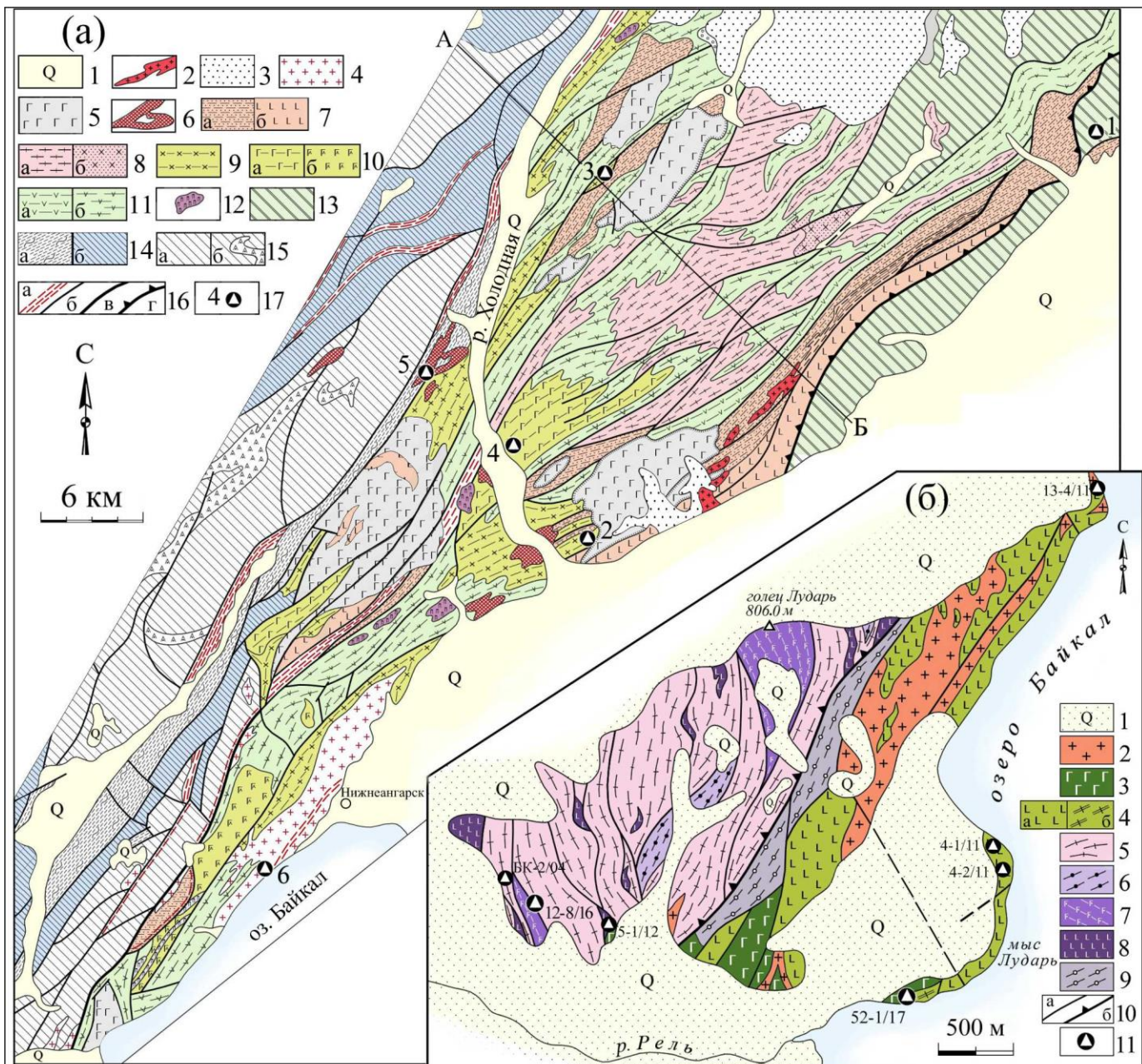


Рисунок 1. Схемы геологического строения Кичерской зоны (составлены Е.Ю.Рыцком и А.А.Андреевым с использованием геологосъемочных материалов Северобайкальской ГРЭ (В.П.Сафронов, А.Г.Крапивин, Н.М.Мошкин, А.Г.Степин и др.) (Андреев и др., 2022).

**(а):** Центральная подзона. 1 – четвертичные отложения; 2 – палеозойские граниты; **Позднебайкальские образования (3 – 12).** Поздний эдиакарий (3 - 4): 3 – холоднинская свита (конгломераты, гравелиты, песчаники); 4 – адакиты **нижнеангарского** комплекса; **Криогений - ранний эдиакарий (5 – 12):** 5 – **чая-нюрнудуканский** комплекс (габброиды и пердиотиты); 6 – гнейсо-граниты **онколнокитского** комплекса; 7 – **кичерский** комплекс: сланцы, метапесчаники, линзы известняков (а), metabазальты и метапорфиры (б); **нюрнудуканский комплекс (8 - 11):** 8 – плагиомигматиты (а), трондьемиты (б); 9 – метадiorиты; 10 – рассланцованные метагаббро (а), метагаббро с массивной текстурой (б); 11 – амфиболовые сланцы (а), амфиболиты и плагиогнейсы (б); 12 – автономные тела метагипербазитов; 13 - **раннебайкальский** комплекс Умоликитского и Водораздельного блоков; **Маректинский выступ (14 - 15).** 14 – неопротерозойские осадочные толщи (а - зеленые сланцы; б – глиноземистые сланцы, кварциты, доломиты); 15 - гнейсы и гнейсо-граниты (а), амфиболиты (б) раннего докембрия; **Прочие обозначения.** 16 – сдвиговая система тектонических швов (а – тектониты, милониты; б – сдвиги и сдвиго-надвиги; в – граничные тектонические швы; г – тоже с преобладанием надвиговой компоненты); 17 – точки отбора проб для геохронологических исследований (1 - №28/96; 2 -16-4/11; 3 – R14-25-1; 4 – 23-6-11, R14-22-2 и 9-10/02; 5 - 20-2/12; 6 – НА).

**(б):** Байкальский участок юго-западной подзоны. 1 – четвертичные отложения; Позднебайкальский комплекс Богучанской тектонической пластины (2 - 4): 2 – граниты; 3 – метадiorиты и метагаббро; 4 – амфиболиты, метагаббро и гранулиты (а); агматиты (б); Раннебайкальский комплекс Горемыкского блока (5 – 8): 5 – гнейсо-граниты; 6 – Grt-Bt±Crд±Sil сланцы; 7 - эндербит-чарнокитовые гнейсы; 8 – амфиболиты, гнейсы; 9 – бластомилониты и тектониты; 10 – главные тектонические швы (а), надвиг на границе Богучанской пластины (б); 11 – точки отбора проб для геохронологического изучения.

**(в):** Тектоническое районирование центральной подзоны Кичерской зоны (1 – 4). 1 – Холоднинский грабен; 2 – Нижнехолоднинский массив; 3 – Гаяндская пластина, сложенная кичерским комплексом; 4 – тектонические пластины, сложенные нюрнудуканским комплексом: Гасан-Дякитская (а), Слюдинско-Курлинская (б); 5 – тектонические блоки ранних байкалид; 6 – раннедокембрийский фундамент кратона.

### **Раннебайкальский комплекс.**

Породы комплекса охарактеризованы на примере Горемыкского блока, сложенного главным образом, гнейсо-гранитами Байкальского массива (рисунок 1б). Кроме того, в его строении отмечаются брекчированные дайки metabазитов, ксенолиты и тектонические линзы амфиболитов, амфиболовых гнейсов, гранат-силлиманит-кордиерит-биотитовых сланцев и гиперстеновых эндербит-чарнокитовых-гнейсов (Рыцк, 2013б). Биотитовые гнейсо-граниты, схожие с таковыми в Байкальском массиве, установлены и в юго-западной части Горемыкского блока, в междуречье Горемыка-Рель.

Геологическое положение, состав и характер взаимоотношений пород Горемыкского блока резко отличают его от пород других структур Кичерской зоны, что стало основанием для выделения их в отдельный комплекс, который в соответствии в результатами геохронологических исследований, был отнесен к ранним байкалидам (Рыцк и др., 2013б).

### **Позднебайкальские комплексы Кичерской зоны раннего этапа (660-615 млн лет).**

Позднебайкальские структуры Кичерской зоны представлены крупными сдвиговыми тектоническими пластинами - Богучанской, Слюдинско-Курлинской, Гасан-Дякитской и Гаяндской. В строении Богучанской, Слюдинско-Курлинской и Гасан-Дякитской пластин преобладают породы нюрндуханского метаморфического комплекса, а в составе Гаяндской пластины – породы кичерского комплекса.

### ***Нюрндуханский комплекс***

*Богучанская тектоническая пластина.* Интерес многих предшественников к геологии Богучанской пластины был обусловлен обнаружением В.А. Макрыгиной в береговых обнажениях м. Писаный Камень гранулитов, пироксеновых мигматитов и чарнокитоидов. В их работах гранулиты показаны широкой полосой вдоль береговых обнажений оз. Байкал от м. Тонкий до м. Лударь, включая Горемыкский блок (Макрыгина и др., 1989; Конников и др., 1999; Цыганков, 2005; Федотова и др., 2014; Kroner et al., 2015).

Проведенные исследования показали, что в строении Богучанской пластины преобладают метабазиты (метагаббро, амфиболиты и амфиболовые гнейсы), которые обособлены в небольших тектонических пластинах второго порядка и, как правило, лишены магматических контактов. Пластины характеризуются преимущественно северо-западным простиранием, в редких случаях встречаются реликты небольших складок с таким же простиранием осей.

Породы гранулитовой фации метаморфизма, к которой мы с уверенностью относим только двупироксеновые кристаллосланцы и ассоциирующие с ними жильные тела чарнокитоидов и эндербитов, фрагментарно обнажаются лишь в нескольких непротяженных скальных выступах вдоль оз. Байкал. Характер контакта жильных тел чарнокитоидов с вмещающими породами может указывать на их анатектическую природу происхождения. У южного края м. Писаный Камень установлены дайки субщелочного габбро, включающие ксенолиты кристаллосланцев. В районе м. Лударь амфиболовые гнейсы отдельных сдвиговых зон включают полный ряд продуктов мигматизации от венитов и артеритов до эффектных агматитов.

*Слюдинско-Курлинская и Гасан-Дякитская тектонические пластины.* Слюдинско-Курлинская пластина прослеживается в северо-восточном направлении от левого борта долины р. Горемыка вдоль оз. Байкал до долины р. Холодная и имеет протяженность около 90 км. В тектоническом плане пластина представляет собой центральную часть шовной сдвигово-надвиговой зоны и состоит из серии пластин второго порядка, отличающихся степенью тектонической переработки слагающих их пород. Подавляющая ее часть сложена амфиболитами, гранат-биотит-амфиболовыми ортогнейсами и мусковит-биотитовыми гнейсами, которые включают субпластовые тела метагаббро-норитов и апогаббровых бластомилонитов, а также интрузиями метадиоритов, участвующих в складчатых деформациях и рассланцевании. Жильные и дайковые тела адакитовых гранитоидов занимают секущее положение и не подвержены высокотемпературным метаморфическим изменениям.

В пределах Гасан-Дякитской пластины в составе нюрндуханского комплекса нами впервые выделена толща мигматизированных амфиболовых диорито-гнейсов, которые прослежены по простиранию на расстояние более 30 км. Повсеместно на этом участке обнаруживается последовательность от объемно или послойно мигматизированных амфиболовых гнейсов и амфиболитов, в разной степени насыщенных лейкосомой, до плагиомигматитов, в которых сохранены постепенные переходы к вмещающим амфиболовым гнейсам и амфиболитам. Плагиомигматиты и амфиболовые гнейсы ассоциируют с жильными

трондьемитами. Местами трондьемиты образуют жилы, секущие метаморфическую полосчатость вмещающих их пород.

Таким образом, в строении Слюдинско-Курлинской и Гасан-Дякитской пластин преобладают породы базитового и диоритового составов, а также продукты их метаморфического преобразования вовлеченные в складчатые деформации и расланцевание. Они имеют сходство с комплексом основных пород Богучанской пластины и подобно последним, рассматриваются в качестве нюрндукуканского комплекса.

### ***Кичерский комплекс***

Этот комплекс пород выделен в строении Гаяндской пластины. Он представлен вулканогенно-осадочными образованиями, ранее относившимися к аюлиндинской (Митрофанова и др., 2010), кичерской (Рыцк и др., 2007) и харгитуйской (Н.М. Мошкин ГК/50) толщам. В составе комплекса мы выделяем две толщи. Нижняя толща сложена тонкозернистыми метапесчаниками, алевросланцами и туфосланцами, которые включают горизонты углеродистых и известково-силикатных сланцев с единичными прослоями известняков. Верхняя толща представлена метабазами и редкими телами метариолитов с тонкими прослоями зеленых и углеродистых сланцев. Породы этих толщ объединяются нами в кичерский комплекс, который отличается от нюрндукуканского наличием метаосадков.

### **Позднебайкальские комплексы Кичерской зоны позднего этапа (615 - 545).**

Эти образования представлены жильными и дайковыми телами, а также отдельными массивами, которые прорывают породы нюрндукуканского комплекса. К синметаморфическим отнесены гнейсо-граниты онколнокитского комплекса, жильные тела которых развиты среди метабазитов нюрндукуканского комплекса Богучанской пластины. Близкий по составу массив калишпатовых гнейсо-гранитов приурочен к тектоническому шву Кичерской зоны с Маректинским выступом фундамента кратона.

К комплексам пород, незатронутым высокотемпературным метаморфизмом относятся многофазные интрузии чая-нюрндукуканского комплекса (массивы Тонкий Мыс, Нюрндукуканский, Гасан-Дякитский, Слюдинский, Чайский, Отторженец), сложенные главным образом амфиболитизированными габбро-норитами, (Конников, 1986; Конников и др., 1999; Цыганков, 2005; Врублевская и др., 2003), а также адакитовые граниты, объединяемые в нижнеангарский и богучанский комплексы. Среди последних достаточно крупное тело образуют биотитовые адакитовые гранитоиды Горячинского массива в юго-западной части Кичерской зоны.

### **Выводы к главе 3.**

1. Породы раннебайкальского комплекса слагают изометричные тектонические блоки и характеризуются преимущественно средне-кислым составом. Метабазиты в его составе представлены единичными дайками и тектоническими линзами среди гнейсо-гранитов.

2. Нюрндукуканский комплекс объединяет плутонические образования базитового и диоритового составов, а также продукты их метаморфического преобразования, участвующие в складчатых деформациях и слагающие крупные сдвиговые тектонические пластины. В отличие от него в Кичерский комплекс объединяются метабазит-метаосадочные образования.

3. Синметаморфические гнейсо-граниты онколнокитского комплекса занимают секущее положение относительно пород нюрндукуканского комплекса. Интрузивные массивы и многочисленные жильные тела чая-нюрндукуканского, богучанского и нижнеангарского комплексов сложены породами, которые не подвержены позднебайкальским высокотемпературным метаморфическим преобразованиям.

#### Глава 4. Обоснование возраста нюрндукуканского комплекса.

В данной главе рассматриваются вопросы, касающиеся геохронологического обоснования рубежей формирования и метаморфических преобразований пород нюрндукуканского комплекса. Ранее нами было показано (Рыцк и др., 2013б), что образование гнейсо-гранитов Горемыкского и Умоликитского блоков завершилось на рубеже ~755 млн лет. Исследования тел амфиболитов и эндербито-гнейсов в гнейсо-гранитах позволили нам установить возраст их магматического протолита (~823 млн лет) и выявить два рубежа метаморфических преобразований пород раннебайкальского комплекса. Первый из них 793-772 млн лет (SHRIMP-II) отвечает возрасту раннепротерозойского метаморфического события, а второй 628-622 млн лет (ID-TIMS; SHRIMP-II) свидетельствует о позднебайкальской метаморфической ремобилизации пород раннебайкальского комплекса (Андреев и др., 2022; Андреев и др., 2018).

Возраст собственно нюрндукуканского комплекса установлен по породам Слюдинско-Курлинской и Гасан-Дякитской пластин, расположенных в центральной подзоне Кичерской зоны. В их строении участвуют метадiorиты и амфиболовые диорито-гнейсы, которые совместно с амфиболитами, амфиболовыми плагиогнейсами, плагиомигматитами и трондьемитами вовлекаются в структурно-метаморфические преобразования. Возраст метадiorитов (образец 16-4/11) составляет  $641 \pm 4$  млн лет (ID-TIMS). Средневзвешенное значение возраста магматических ядер циркона из диорито-гнейсов составляет  $652 \pm 6$  млн лет (SHRIMP-II) и, в пределах ошибок, практически полностью соответствует возрасту метадiorитов. Средневзвешенный возраст метаморфогенных оболочек соответствует значению  $624 \pm 7$  млн лет.

Средневзвешенные оценки возраста (SHRIMP-II) магматических ядер циркона из плагиомигматитов 23-6/11 и R-14-22-2 Гасан-Дякитской пластины, составляют  $650 \pm 10$  млн лет и  $644 \pm 11$  млн лет соответственно. Возраст метаморфических (возможно анатектических) оболочек циркона -  $627 \pm 10$  млн лет (23-6/11) и  $627 \pm 13$  млн лет (R-14-22-2) интерпретируется как время проявления высокотемпературного позднебайкальского метаморфического события.

Циркон из жильных трондьемитов (образец 9-10/02) представлен преимущественно кристаллами с зональными ядрами и тонкими незональными оболочками. Их средневзвешенное значение возраста составляет  $630 \pm 7$  млн лет (SHRIMP-II) интерпретируется как время проявления анатексиса и плагиомигматизации метабазитов.

Породы нюрндукуканского комплекса юго-западной подзоны Кичерской зоны представляют особый интерес для геохронологических исследований, поскольку в ее пределах выявлены образования, отвечающие амфиболитовой и гранулитовой фациям метаморфизма (Макрыгина и др., 1989; Конников и др., 1999; Цыганков, 2005). Для циркона из мигматизированных метагаббро м. Лударь (образец 4-1/11) получены конкордантные значения возраста  $620 \pm 2$  млн лет (ID-TIMS), отвечающие времени проявления позднебайкальского метаморфического преобразования габброидов.

Средневзвешенные значения возраста ядер и оболочек (LA-ICP MS) циркона из амфиболитов м. Лударь составляют  $638 \pm 14$  млн лет и  $622 \pm 7$  млн лет соответственно. Данные, полученные по оболочкам циркона, коррелируют с возрастом позднебайкальских метаморфических преобразований амфиболитов из краевой части Байкальского массива.

Возраст, вероятно анатектического циркона из чарнокитоидов м. Красный Яр (образец 3-4/11) составляет  $632 \pm 9$  млн лет (LA-ICP MS). Данная датировка получена по пяти точкам и является лишь приблизительной, тем не менее, она хорошо согласуется с возрастом  $640 \pm 5$  млн лет чарнокитоидов м. Писаный Камень, который получен методом SIMS (Kroner et al., 2015).

Средневзвешенная оценка возраста (SHRIMP-II) ядер циркона из диоритов агматитов м. Лударь (52-1/17) составляет  $627 \pm 15$  млн лет и в рамках ошибки не отличается от средневзвешенного значения возраста оболочек  $617 \pm 9$  млн лет. Вероятно, формирование агматитов происходило в условиях метаморфизма амфиболитовой фации, сопровождающегося анатексисом.

Полученные оценки позволяют сделать вывод, что образование магматических протолитов нюрндукуанского комплекса происходило в интервале 660 – 640 млн лет, а их метаморфизм в интервале 640-615 млн лет.

Возраст завершения этого этапа метаморфизма, по-видимому, зафиксировали гнейсо-граниты онколнокитского комплекса (образец 20-2/12). Для него методом ID-TIMS получено значение  $615 \pm 3$  млн лет, которое хорошо согласуется с оценками возраста метаморфизма, полученным по породам нюрндукуанского комплекса.

Адакитовые граниты, секущие породы нюрндукуанского комплекса формировались на рубежах 606-600 млн лет, 588-581 млн лет и 545 млн лет.

#### **Выводы к главе 4.**

1. Проведенные геохронологические исследования позволяют вычленить образования раннебайкальского комплекса из состава нюрндукуанского комплекса. Протолиты породы раннебайкальского комплекса сформированы в интервале 823-755 млн лет и охвачены метаморфическими преобразованиями на рубежах 790-755 млн лет и 628-622 млн лет.

2. Полученные оценки возраста позволяют сделать вывод, что образование магматических протолитов нюрндукуанского комплекса происходило в интервале 660 – 640 млн лет, а их метаморфизм в интервале 640-615 млн лет.

3. Возраст завершения позднебайкальского этапа высокотемпературного метаморфизма фиксируется гнейсо-гранитами онколнокитского комплекса с возрастом  $615 \pm 3$  млн лет.

4. Ультрамафит-мафитовые интрузии чая-нюрндукуанского комплекса и Адакитовые граниты, секущие породы нюрндукуанского комплекса формировались на рубежах  $627 \pm 25$  млн лет (Amelin et al., 1997), 606-600 млн лет, 588-581 млн лет и 545 млн лет.

#### **Глава 5. Петрографическая характеристика пород нюрндукуанского комплекса.**

**Двупироксеновые кристаллические сланцы** представляют собой серые и темно-серые равномерно-мелкозернистые породы с лепидогранобластовой структурой. Сланцеватая текстура выражена параллельно вытянутыми зернами биотита. Они сложены преимущественно андезином (An<sub>34-35</sub>), авгитом, гиперстеном и биотитом, в качестве аксессуарных минералов присутствуют ильменит, апатит и циркон, иногда встречается КПШ.

**Жильные эндербиты** имеют порфиroidную гранобластовую мелко-среднезернистую структуру и массивную текстуру, размер некоторых зерен различается примерно в два раза. Эндербиты сложены плагиоклазом (до 60%), микроклином (до 15%), гиперстеном (5-10%) и кварцем (до 5%). Аксессуарные минералы представлены магнетитом, апатитом и цирконом.

**Чарнокиты**, обладают гетеробластовой средне-мелкозернистой структурой, все слагающие их минералы имеют либо изометричную, либо удлиненную форму, текстура массивная. Основными породообразующими минералами являются андезин ((An<sub>41</sub>) до 40%), КПШ (до 30%), гиперстен (5-15%), авгит (2-5%), кварц (до 5%), из аксессуарных минералов характерны ильменит, апатит и циркон.

**Метагаббро** имеют неравномерно-мелкосреднезернистую паналлотриомофрнотернистую структуру и массивную текстуру, минералы, слагающие их, представлены плагиоклазом (An<sub>45-52</sub>), роговой обманкой, биотитом и ильменитом.

**Амфиболиты**, как правило, это зеленовато-черные мелко-среднезернистые породы с нематобластовой структурой и сланцеватой текстурой. Основными минералами, слагающими их, являются магнезиальная роговая обманка, плагиоклаз (An 35) и эпидот. Нередко встречаются гранат содержащие разновидности, а также амфиболиты с массивной текстурой и повышенным содержанием рудного минерала.

**Метадиориты** представлены зеленовато-серыми средне-мелкозернистыми породами. Как правило, они имеют сланцеватую текстуру и паналлотриаморфнозернистую структуру, иногда встречаются разновидности с массивной текстурой. Метадиориты сложены плагиоклазом, роговой обманкой, биотитом и рудным минералом.

### Глава 6. Геохимическая характеристика пород нюрндукуканского комплекса.

Высокотитанистые метабазиты Богучанской пластины ( $TiO_2$  1,24-3,23 мас.%; в среднем 2,24 мас.%) по своим петрохимическим характеристикам соответствуют преимущественно высокожелезистым толеитам нормальной и умеренной щелочности. Они характеризуются преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми ( $(La/Yb)_N = 3,4-8,8$ ) и отсутствием выраженной европиевой аномалии ( $Eu/Eu^* = 0,85-1,3$ ) (рисунок 3). Спектры распределения рассеянных элементов в метабазитах характеризуются крайне незначительным Nb-Ta и Ti минимумами. Они обладают более высокими, чем в ОИВ (ocean island basalt) содержаниями тяжелых РЗЭ и, несмотря на более низкие концентрации остальных литофильных и высокозарядных элементов, близки к их среднему содержанию во внутриплитных базальтах. Положение точек составов рассматриваемых пород на дискриминационных диаграммах Th-Hf/3-Ta (Wood, 1980),  $D_x$ - $D_y$  (Великославинский, Глебовицкий, 2005) так же указывает на их формирование во внутриплитных обстановках (рисунок 2а,б).

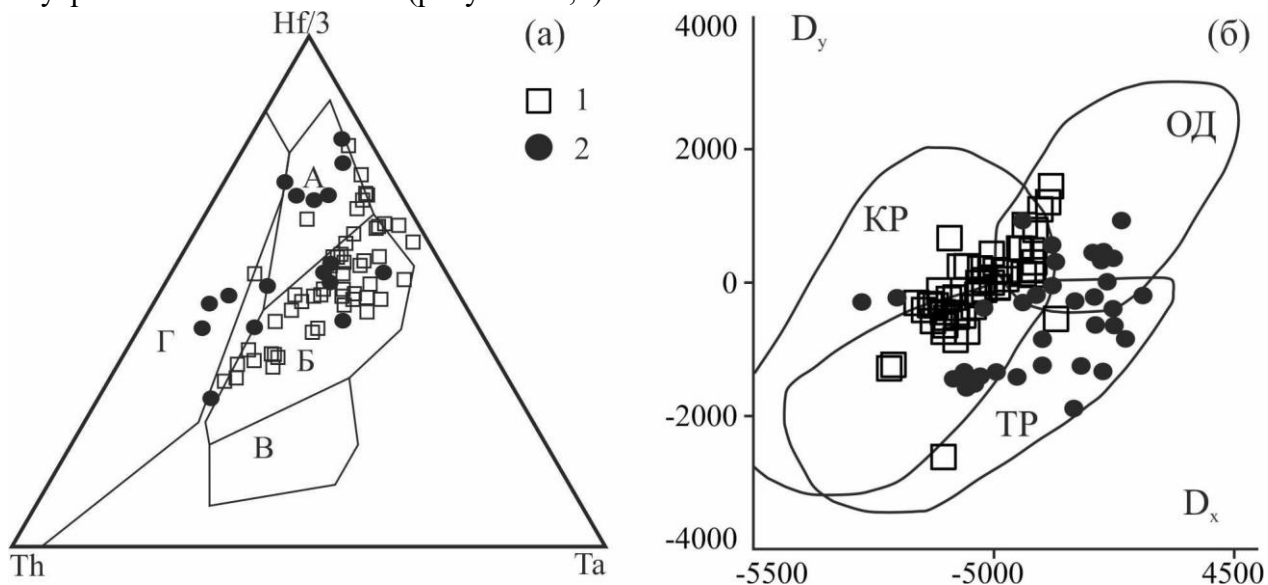


Рисунок 2. Дискриминационные диаграммы с точками составов метабазитов нюрндукуканского комплекса.

(а) – Hf/3–Th–Ta (г/т) (Wood, 1980); (б) – диаграмма  $D_x$ - $D_y$  (Великославинский и др., 2005).

Обозначения полей: (а) - А, Б, В, Г – базальты СОХ, внутриплитные, щелочные внутриплитные и островодужные базальты соответственно; (б) - ОД, ТР, КР – базальты островных дуг, базальты траппов, базальты континентальных рифтов.

Условные обозначения: 1-2 – метабазиты нюрндукуканского комплекса: 1 – Богучанской пластины 2 – Курлинской и Гасан-Дякитской пластин.

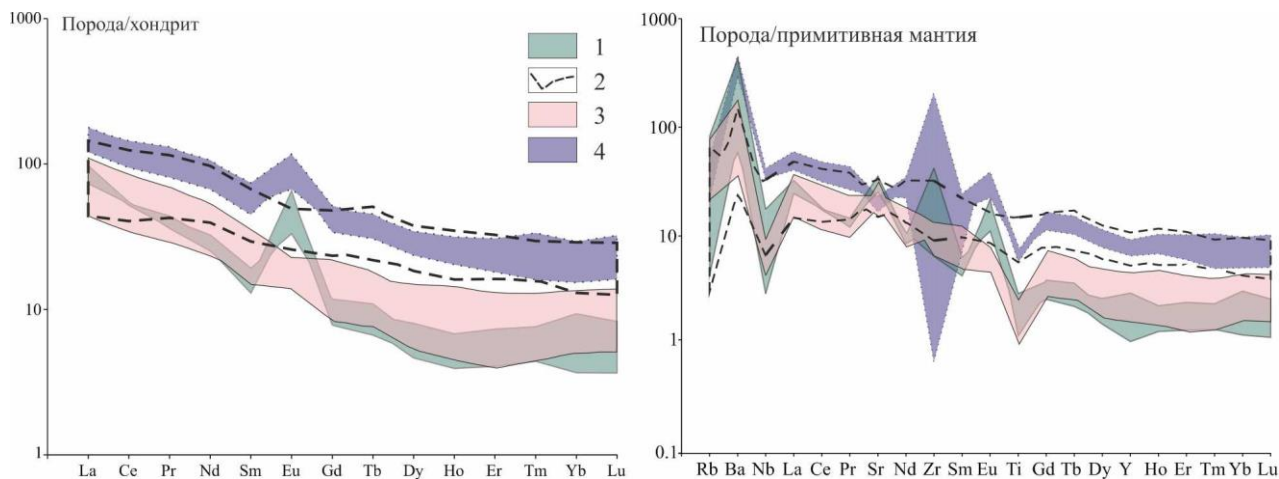


Рисунок 3. Распределение микроэлементов в породах нюрндуканского комплекса Богучанской пластины, нормированных к составам хондрита (Taylor, McLennan, 1985) и примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989).

Условные обозначения: 1 – метабазиты, 2 – жильные эндербиты, 3 – чарнокиты, 4 – диориты агматитов.

Чарнокитоиды и жильные эндербиты Богучанской пластины близки по своему составу к монцодиоритам и монцонитам. Суммарное содержание щелочей в этих породах составляет 6,5-9,3 мас.%, с преобладанием  $\text{Na}_2\text{O}$  над  $\text{K}_2\text{O}$  в эндербитах. Их химический состав характеризуется низкими содержаниями  $\text{MgO}$  (~1,8 и ~1,6 мас.%),  $\text{FeO}_t$  (~7,1 и ~3,3 мас.%),  $\text{CaO}$  (~4,2 и ~4,9 мас.%) и достаточно высокими содержаниями  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (~17,8 и 21,7 мас.%) соответственно. Чарнокиты обладают умеренно дифференцированными спектрами распределения легких РЗЭ  $((\text{La}/\text{Yb})_N = 5,8-7,9)$ , а эндербиты сильно дифференцированными  $((\text{La}/\text{Yb})_N = 8,6-26,4)$  (рисунок 3). Помимо этого, отмечаются отрицательные аномалии  $\text{Ti}$  и  $\text{Nb-Ta}$ . Предполагается, что протолитом этих пород являются высокотитанистые базиты Богучанской пластины. Различие в содержаниях редкоземельных и малых элементов связано с меньшей ролью участия корового материала при образовании эндербитов, либо более интенсивном проявлении анатексиса в чарнокитах.

Агматиты м. Лударь Богучанской пластины представляют собой обломки и глыбы амфиболитов, сцементированные расплавом диоритового состава. От метадiorитов Слюдинско-Курлинской пластины диориты агматитов отличаются более низкими содержаниями  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Y}$  и более дифференцированным распределением РЗЭ  $((\text{La}/\text{Yb})_N=4,1-11,5)$  (рисунок 3).

Метабазиты Слюдинско-Курлинской и Гасан-Дякитской пластин представлены преимущественно низкотитанистыми разновидностями и по отношению  $(\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  сопоставляются с габбро и монцогаббро. На диаграмме Йенсена (Jensen, 1976) точки составов амфиболитов этого типа располагаются преимущественно в поле высокожелезистых толеитов. По характеру распределения редких и редкоземельных элементов (за исключением подвижных  $\text{Rb}$  и  $\text{Ba}$ ) среди метабазитов Слюдинско-Курлинской и Гасан-Дякитской пластин выделяются различия, сходные с N-MORB  $((\text{La}/\text{Yb})_N = 0,3-1,3)$ , T- и E-MORB  $((\text{La}/\text{Yb})_N = 1,5-4,4)$  (рисунок 4а, б).

Метадиориты и диорито-гнейсы Слюдинско-Курлинской и Гасан-Дякитской пластин по своему составу отвечают ряду диорит - кварцевый диорит. Они характеризуются умеренными содержаниями железа ( $\text{FeO}_t = 7,7-8,7$  мас.%), алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3=15,5-17$  мас.%), магния ( $\text{MgO} = 2,1-3,7$  мас.%), кальция ( $\text{CaO} = 4-6$  мас.%) и титана ( $\text{TiO}_2=0,85-1,7$  мас.%). На вариационных

диаграммах, отражающих зависимость концентраций несовместимых элементов от содержаний Nb, точки составов метадiorитов и метабазитов образуют единые согласованные тренды, которые могут свидетельствовать о формировании диоритов за счет дифференциации базитового расплава. Им свойственны отчетливые отрицательные Sr, Ti и Ta-Nb аномалии, отсутствие выраженной Eu-аномалии ( $Eu/Eu^* = 0,8-1,1$ ) и слабодифференцированные спектры распределения РЗЭ ( $(La/Yb)_n = 2,4-5,3$ ) (рисунок 4а, б).

В составе Гасан-Дякитской пластины участвуют плагиомигматиты и трондьемиты, сформированные по метабазитам. В них наблюдаются повышенные содержания  $SiO_2$  (58–77 мас. %) и  $Na_2O$  (до 6.5 мас. %) относительно вмещающих их амфиболитов. В плагиомигматитах распределение РЗЭ слабодифференцированное ( $(La/Yb)_N = 0,65-1$ ). На мультиэлементной диаграмме отмечаются титановые и неглубокие Nb-Ta минимумы. В целом спектры распределения их редких и редкоземельных элементов идентичны таковым у вмещающих амфиболитов (рисунок 4в, г).

Трондьемиты по геохимическим характеристикам подразделяются на две группы. Породы первой из них обогащены легкими РЗЭ относительно тяжелых ( $(La/Yb)_N = 1,4-14$ ), а также обладают Eu и Sr максимумами (рисунок 4в, г). Более фракционированное распределение легких РЗЭ относительно вмещающих метабазитов, согласно (Pedersen, Malpas, 1984), указывает на формирование трондьемитов в результате их анатексиса на пике метаморфизма.

Конфигурация графиков трондьемитов второй группы схожа с таковой у амфиболитов, включая повышенные содержания тяжелых РЗЭ ( $(La/Yb)_N = 0,3-0,98$ ) (рисунок 4в, г). Формирование гранитоидов с подобными геохимическими характеристиками связывается с дифференциацией базитовой магмы в магматической камере (Boney and Stampfli, 2009; Whattam S.A. et al., 2016).

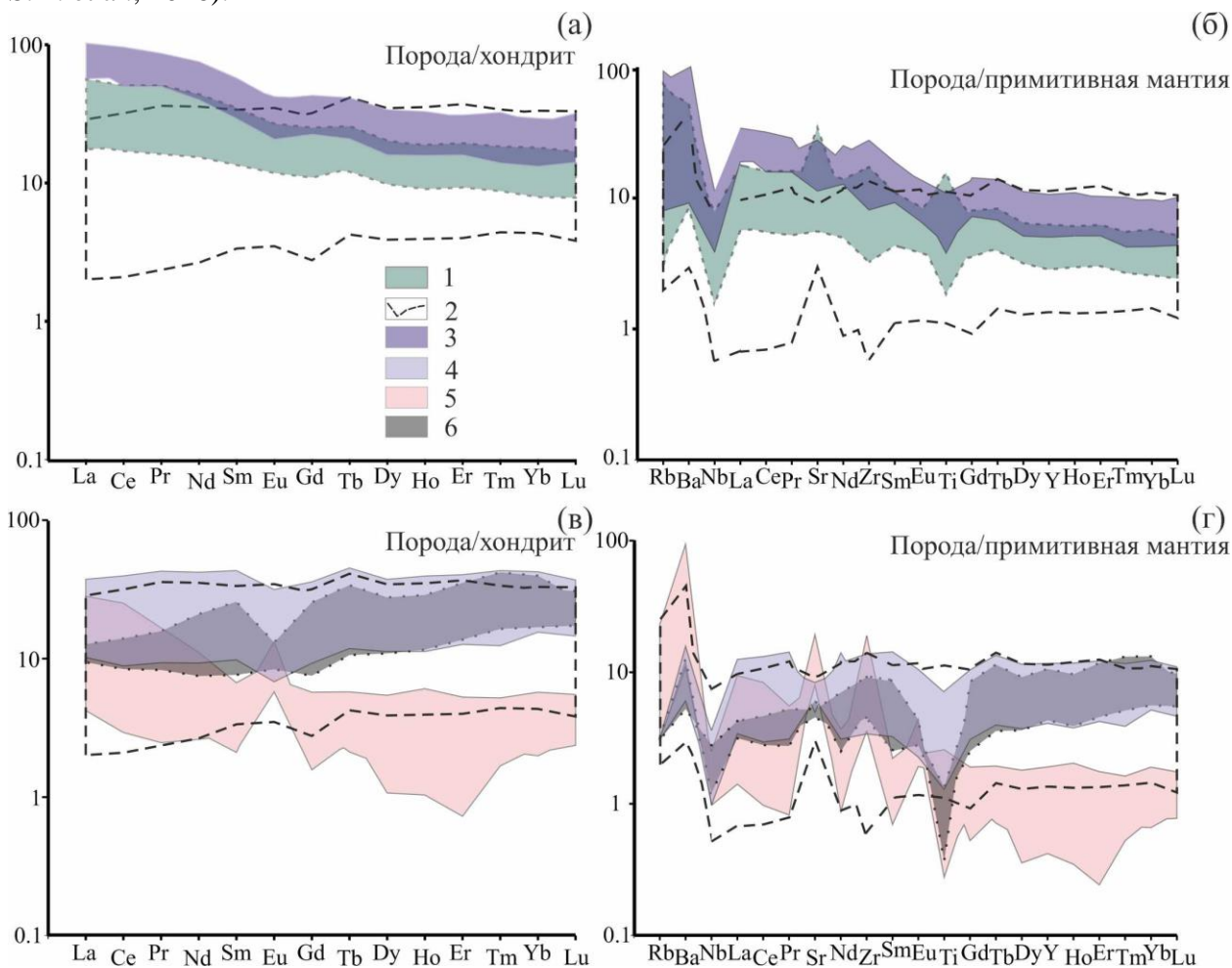


Рисунок 4. Распределение микроэлементов в породах нюрндукуанского комплекса Курлинской и Гасан-Дякитской пластин, нормированных к составам хондрита (Taylor, McLennan, 1985) и примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989).

Условные обозначения: 1 – метабазальты E-, T-MORB, 2 – метабазальты N-MORB, 3 – метадiorиты, 4 – плагиомигматиты, 5 – трондьемиты первой группы, 6 – трондьемиты второй группы

В целях сравнительной характеристики продемонстрировано, что породы других комплексов, участвующих в строении Кичерской зоны, имеют существенные вещественные отличия. Исключение составляют породы кичерского комплекса. Так, метабазальты комплекса соответствуют низкотитанистым, высокожелезистым толеитам. По характеру распределения РЗЭ среди них выделяются метабазальты N-MORB и E-, T-MORB типов. В целом по своим геохимическим характеристикам метабазальты кичерского комплекса близки к амфиболитам нюрндукуанского комплекса центральной подзоны (Андреев и др., 2022).

В отличие от нюрндукуанского и кичерского комплексов раннебайкальский комплекс представлен преимущественно гранитоидами I и S-типов (рисунок 5а). На дискриминационной диаграмме  $f_1$ - $f_2$  (Великославинский, 2003) их составы располагаются в полях надсубдукционных и коллизионных гранитоидов (рисунок 5б). Ассоциирующие с ними амфиболиты тектонических линз и ксенолитов отвечают умеренно- и низкотитанистым ( $TiO_2$  - 0,59-1,42 мас.%), относительно высокоглиноземистым ( $Al_2O_3$  - 14,43-17,07 мас.%) высоко-железистым толеитам. Для них свойственны низкие концентрации редкоземельных элементов с незначительным преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми ( $(La/Yb)_N=2-7$ ). Распределение малых элементов характеризуется отрицательными Ta-Nb и Ti-аномалиями и, как правило, положительными Sr-аномалиями, что типично для базальтов современных островных дуг.

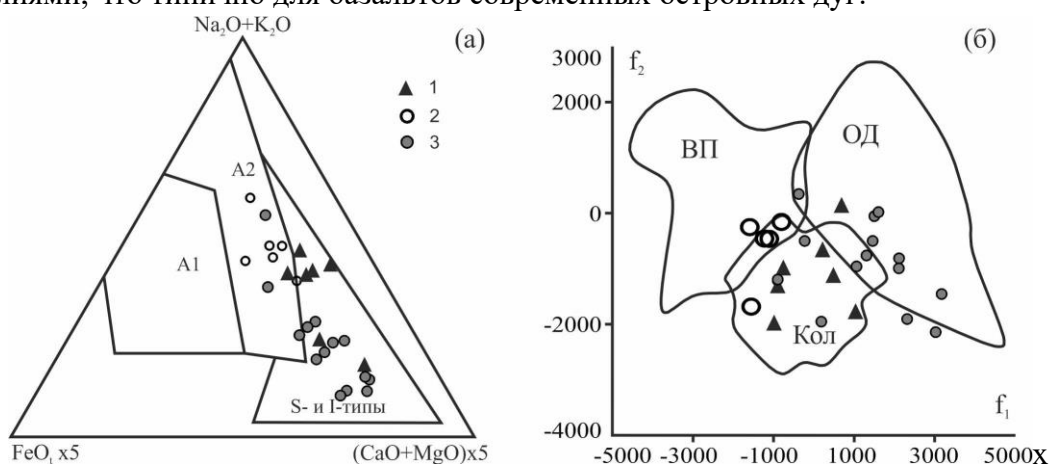


Рисунок 5. Дискриминационные диаграммы с точками гранитоидов раннебайкальского и онколнокитского комплексов.

(а) – диаграмма  $(Na_2O+K_2O)-FeO_1-5(CaO+MgO)$  (мол. кол.) (Гребенников, 2014); (б) -  $f_1-f_2$  (Великославинский, 2003).

Обозначения полей: (а) - A<sub>1</sub> – гранитоиды внутриплитных обстановок (океанические острова и континентальные рифты); A<sub>2</sub> – гранитоиды внутри- и окраинно-континентальных обстановок локального растяжения. I, S – гранитоиды I и S типов; (б) - ВП, ОД, Кол – внутриплитные, островодужные (субдукционные) и коллизионные гранитоиды соответственно.

Условные обозначения: 1-2 - гнейсо-граниты онколнокитского комплекса: 1 – Богучанской пластины 2 – Курлинской и Гасан-Дякитской пластин, 3 – гнейсо-граниты раннебайкальского комплекса.

Кислый состав демонстрируют также породы синметаморфического онколнокитского комплекса (615 млн лет), представленные гнейсо-гранитами, сопоставляемыми с лейкогранитами умеренной и нормальной щелочности. На дискриминационной диаграмме  $f_1$ - $f_2$  (Великославинский, 2003) фигуративные точки их составов попадают в поля внутриплитных и коллизионных гранитоидов (рисунок 5б). Граниты и лейкограниты нижнеангарского (~580 млн лет) и богучанского (~600 млн лет) комплексов, прорывающие породы нюрндуканского комплекса, обладают адакитовыми характеристиками. На дискриминационной диаграмме  $SiO_2$ - $D(x)$  (Великославинский и др., 2018) их фигуративные точки локализованы в поле коллизионных и постколлизионных адакитов (рисунок 6).

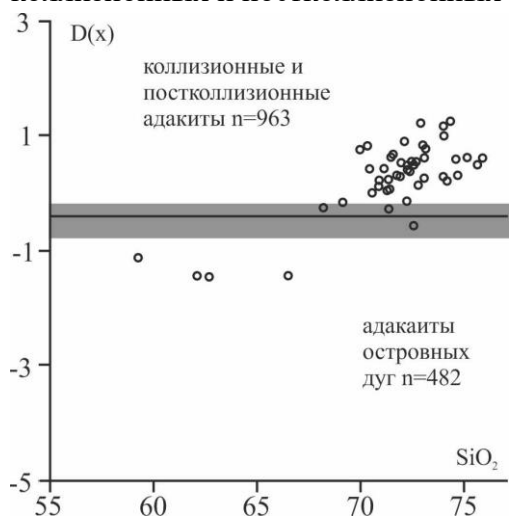


Рисунок 6. Дискриминационная диаграмма  $SiO_2$ - $D(x)$  (Великославинский и др., 2018) для геодинамической типизации островодужных, коллизионных и постколлизионных адакитов с фигуративными точками адакитовых гранитоидов Кичерской зоны.

### Выводы к главе 6.

1. Геохимические характеристики амфиболитов раннебайкальского комплекса Горемыкского блока указывают на их сходство с базальтами современных островных дуг, что отличает их от metabазитов нюрндуканского комплекса. Ряд геохимических характеристик наиболее дифференцированных калий-натровых гнейсо-гранитов раннебайкальского комплекса свидетельствует об их образовании в коллизионных обстановках.

2. Высокотитанистые metabазиты нюрндуканского комплекса юго-западной подзоны Кичерской зоны обладают внутриплитными характеристиками. Низко- и умереннотитанистые амфиболиты нюрндуканского комплекса центральной подзоны сопоставимы с классическими базальтами MORB-типа. Такая разница в геохимических характеристиках базитов нюрндуканского комплекса может указывать либо на их формирование в различных частях континентальной рифтовой системы, либо на формирование базальтов MORB-типа на завершающей стадии развития континентального рифта, близкой к начальному этапу океанического спрединга.

3. Гнейсо-граниты синметаморфического онколнокитского комплекса Богучанской, Курлинской и Гасан-Дякитской пластин имеют схожие геохимические характеристики, а положение точек составов, рассматриваемых гранитоидов, на дискриминационных диаграммах соответствует полям внутриплитных и коллизионных обстановок.

4. Геохимические характеристики адакитов Кичерской зоны в целом подобны и различаются лишь незначительными вариациями концентраций некоторых элементов. Положение точек их составов на дискриминационной диаграмме, позволяет исключить возможность формирования рассматриваемых адакитов в островодужных обстановках.

#### **Глава 7. Sm-Nd изотопные характеристики и источники протолитов пород нюрнудуканского комплекса.**

##### **Изотопный состав пород.**

Отличительной изотопно-геохимической особенностью пород нюрнудуканского комплекса является отсутствие отрицательных значений  $\epsilon_{Nd}(T)$ , и, в целом, повышенные значения  $^{147}Sm/^{144}Nd$ . Породам комплекса свойственны существенные вариации Nd-изотопного состава. Метабазиты MORB-типов центральной подзоны Кичерской зоны включают две группы составов. Для одной из них характерны высокие значения  $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.2012-0.2575$  и  $\epsilon_{Nd}(665)$  от +6.8 до +9.7. Базиты и диориты другой группы, включая продукты их метаморфического преобразования (плаггиомигматиты и трондьемиты), обладают значениями  $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1242-0.1944$  и  $\epsilon_{Nd}(665-630)$  +4.6 до +7.5. Подобные незначительные различия в Nd-изотопном составе могут быть обусловлены варьирующим вкладом раннебайкальского материала, участвовавшего в формировании исходных расплавов наряду с деплетированной мантией.

Высокотитанистым метабазитам Богучанской пластины юго-западной подзоны свойственны близкие к коровым отношения  $^{147}Sm/^{144}Nd$  (0,13-0,14) и положительные величины  $\epsilon_{Nd}(665) = +2,1-+5,1$ . Близкие характеристики имеют чарнокитоиды, жильные эндербиты и диориты агматитов ( $\epsilon_{Nd}(617-640) = +1,3-+3,1$ ). Принимая во внимание ряд геохимических особенностей описываемых пород, можно говорить об участии в их формировании обогащенного плюмового источника и добавки древнекорового материала.

Изотопный состав Nd метабазальтов кичерского комплекса близок к изотопному составу метабазитов нюрнудуканского комплекса центральной подзоны, отличаясь несколько меньшими значениями  $\epsilon_{Nd}(T) = +5.4 - + 6.3$ .

С породами нюрнудуканского комплекса резко контрастируют породы раннебайкальского комплекса. Для них типичны низкие отрицательные значения  $\epsilon_{Nd}(820-750)$  (от -2.4 до -12.3), среднекоровые значения  $^{147}Sm/^{144}Nd = 0,06-0,14$  и палеопротерозойские значениями  $T_{Nd}(DM-2st)$  (1.8–2.4 млрд лет), что предполагает участие раннедокембрийской континентальной коры в источнике протолитов этих пород.

В отличие от них в гнейсо-гранитах синметаморфических жильных тел онколнокитского комплекса величины  $^{147}Sm/^{144}Nd$  отношений варьируют в пределах от 0.08 до 0.14 при значениях  $\epsilon_{Nd}(615) = +1.5-+6.5$  и  $T_{Nd}(DM-2st) = 0.8-1.2$  млрд. лет, что может указывать на формирование их исходного расплава за счет частичного плавления вмещающих базитов нюрнудуканского комплекса. Близкие характеристики демонстрируют также адакитовые гранитоиды (нижнеангарский и богучанский комплексы), прорывающие породы нюрнудуканского комплекса, которые характеризуются невысокими положительными значениями  $\epsilon_{Nd}(T)$  от +2.0 до +5.7 и модельным возрастом  $T_{Nd}(DM-2st) = 0,86-1,1$  млрд лет, что позволяет связать их с плавлением ювенильного позднебайкальского источника с добавкой древнекорового компонента.

##### **Ювенильная кора и источники протолитов пород нюрнудуканского комплекса.**

На основании геологических и Nd-изотопных данных показано, что образование нюрнудуканского комплекса произошло в результате деструкции древней континентальной коры и связано преимущественно с ювенильным корообразованием, в котором участвовало

несколько источников магматизма. Область номер один на графике  $\epsilon_{Nd}(T) - T$  (рисунок 7) отвечает полю эволюции Nd-изотопного состава metabазитов MORB-типа, трондьемитов и плагиомигматитов нюрндукуканского комплекса с высокими Sm/Nd отношениями. Область номер два характеризует эволюцию Nd-изотопного состава metabазитов с внутриплитной геохимической спецификой и диорито-гнейсов, сформированных за счет обогащенных мантийных и древнекоровых источников. Третья область отражает изотопную эволюцию раннебайкальской коры, которая, очевидно, не оказывала существенное влияние на формирование metabазитов нюрндукуканского комплекса.

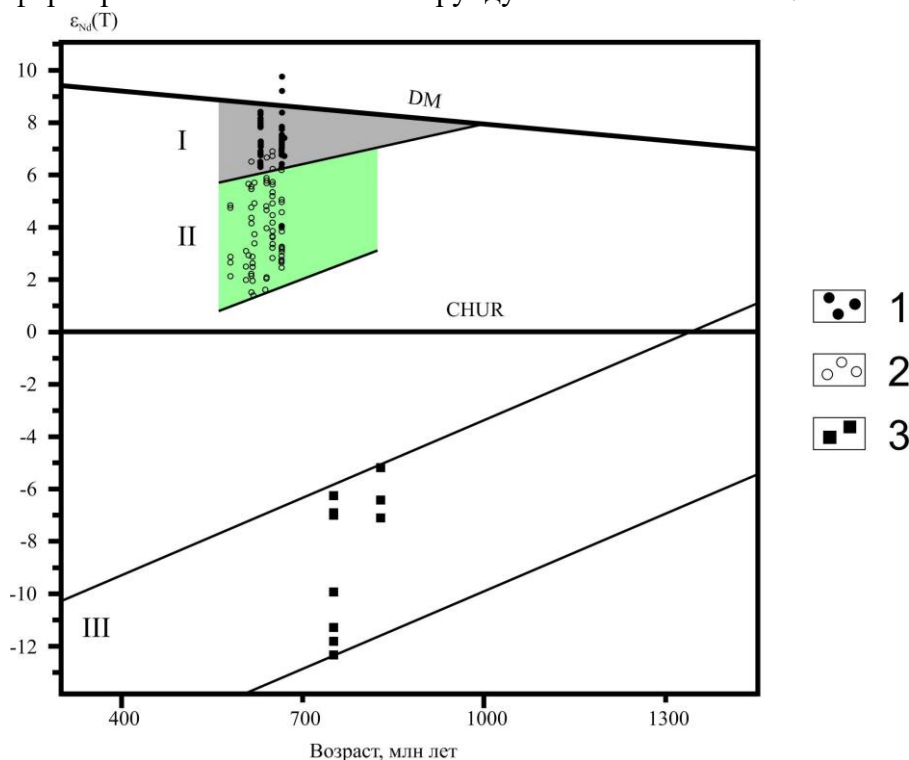


Рисунок 7. График  $\epsilon_{Nd}(T) - T$  для пород Кичерской зоны БМП.

1 – metabазиты, плагиомигматиты, трондьемиты нюрндукуканского комплекса центральной подзоны; 2 – нюрндукуканский комплекс: диорито-гнейсы центральной подзоны, metabазиты и метаморфические породы юго-западной подзоны; метавулканы и метаосадки кичерского комплекса; гнейсо-граниты и адakitовые граниты; 3 – гнейсо-граниты и эндербито-гнейсы раннебайкальского комплекса Горемыкского блока; I – ювенильная кора; II – ювенильная кора; III – раннебайкальская кора.

## Глава 8. Корообразующие процессы и геодинамические обстановки формирования неопротерозойских комплексов Кичерской зоны.

Полученные данные показывают, что образование пород нюрндукуканского мигматит-трондьемит-metabазитового комплекса было связано с процессами ювенильного корообразования, протекавшими в пределах Кичерской зоны в промежутке между 660 и 640 млн лет. Высокотемпературная метаморфическая переработка ювенильной коры охватила период между 640 и 615 млн лет и привела к образованию мигматитов и анатектических трондьемитов. Полученные в работе новые данные могут указывать на любую традиционную геодинамическую модель тектонического развития БМП. На наш взгляд, полученные результаты хорошо согласуются с моделями сдвигового тектогенеза и рифтогенной деструкции древних континентальных окраин (Rosenbaum et al., 2008; Лиханов, 2020; Меланхолина, 2008; Geoffroy, 2005; Koormann et al., 2014). При отсутствии большей части классического разреза

офиолитов, породы нюрндукуанского комплекса Кичерской палеорифтовой зоны могут рассматриваться как компоненты офиолитов окраинно-континентального типа (СМ тип) (Dilek, Furnes, 2011), ассоциирующие с фрагментами субконтинентальной литосферной мантии, которыми могут являться ультрабазитовые массивы БМП. Единственным отличием от СМ типа офиолитов по (Dilek, Furnes, 2011) является отсутствие лерцолитов, хотя учитывая практически полную серпентинизацию гипербазитов ряда массивов, их первичный состав остается дискуссионным.

Обобщение полученных в настоящей работе результатов позволяет говорить о следующей последовательности геологических событий, участвовавших в образовании Кичерской зоны.

Формирование раннебайкальских комплексов началось около 1-0.82 млрд лет назад и завершилось гранитообразованием и высокотемпературным метаморфизмом на рубеже 790-755 млн лет. Ранние байкалиты сохранились в Горемыкском и Умоликитском блоках Кичерской зоны БМП.

Начало *криогения* (~0.7 млрд лет) знаменуется растяжением и последующим распадом Родинии под воздействием мантийного плюма (Кузьмин, Ярмлюк, 2016). Процессы континентального рифтогенеза раннебайкальского этапа начавшиеся в Олокитской зоне завершились к рубежу 660-640 млн лет локализацией растяжения в Кичерской зоне БМП, которое привело к образованию позднебайкальской ювенильной коры в рифтогенных структурах различной степени раскрытия (Рыцк и др., 2017; Рыцк, 2020) (рисунок 8а,б).

С этого момента возможны два сценария последующего развития событий. Согласно первому, к рубежу 670-660 млн лет произошло зарождение Палеоазиатского океана (рисунок 8а), которое фиксируется офиолитами Баян-Хонгорской зоны (Коваленко и др., 2005; Ковач и др., 2005; Ярмлюк и др., 2005). Дальнейшее раскрытие палеоокеана привело к стагнации растяжения в Кичерской зоне БМП, а его дальнейшая эволюция к закрытию палеорифта. Коллизионные события на границе края Сибирского кратона и Баргузино-Витимского супертеррейна в период 640-615 млн лет отразились в интенсивных деформациях и метаморфизме ранне- и позднебайкальских комплексов Кичерской зоны (рисунок 8в). Постколлизионный этап развития региона маркируется адакитовыми гранитоидами нижнеангарского и богучанского комплексов (606-580 млн лет), а также накоплением молласовых толщ, которым может соответствовать терригенный комплекс Кичерской зоны.

Исходя из второго сценария, завершение активной фазы растяжения маркируется блокированием подводных каналов вследствие кристаллизации базитовых расплавов на глубине (рисунок 8б). Совокупность процессов поступления в кору мантийных базитовых расплавов, ремобилизации вмещающих блоков древней континентальной коры, высокотемпературного метаморфизма и анатексиса базитов, вполне соответствует условиям растяжения коры и аномального теплового потока в области рифтогенеза (рисунок 8в) (He et al., 2018; Zheng and Chen, 2021; Cao et al., 2022). Завершение этих процессов маркируется адакитовыми гранитоидами «постколлизионного» геохимического типа на рубеже 590 млн лет. Терригенный комплекс наложенных грабенов ( $\leq 580$  млн лет (неопубликованные авторские данные)) сформирован более чем через 30 млн лет после завершения высокотемпературного позднебайкальского метаморфизма.

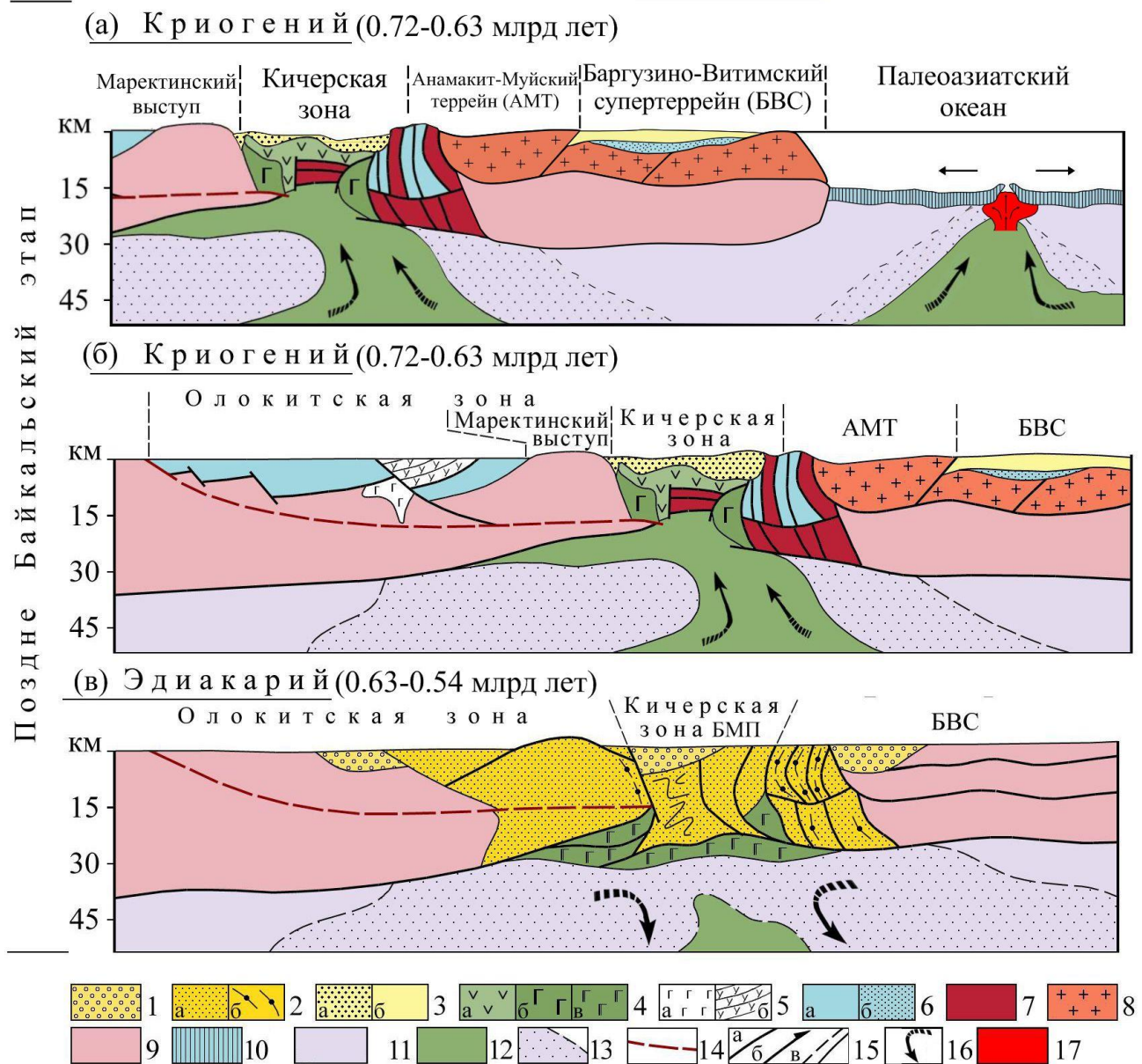


Рисунок 8. Схематическая модель эволюции тектонических обстановок Кичерской зоны БМП: область сочленения Сибирского кратона и Баргузино-Витимского супертеррейна ЦАОП.

**Позднебайкальские образования** (1 – 4): 1 – терригенный комплекс; 2 – область зонального метаморфического ореола (а), высокотемпературные бластомилониты (б); 3 – вулканогенно-осадочные комплексы: кичерский (а), катерский (б); 4 – ювенильная кора (в том числе нюрондуканский комплекс): толеиты различных типов (а), габбро и габбро-нориты (б), фрагменты нижней части разреза СМ-офиолитового комплекса (фрагменты субконтинентальной литосферной мантии) (в); **Раннебайкальские образования** (5 – 8). Иньяптукский вулканоплутонический комплекс (5): Довыренский плутон (а), базальты (б); 6 – зрелые осадки и континентальные базальты рифтовых бассейнов Олокитской зоны и БМП (а), осадочные серии Баргузино-Витимского супертеррейна (б); 7 – тектонические блоки рециклированной коры БМП; 8 – вулканоплутонический комплекс Анамакит-Муйского террейна; **Прочие обозначения** (9 – 16). 9 – континентальная кора; 10 – предполагаемая кора океанического типа; 11 – субконтинентальная мантия; 12 – астеносфера; 13 – измененная мантия; 14 – предполагаемый литосферный срыв; 15 – тектонические швы (а), надвиги (б) и границы, в том числе условные (в); 16 – стрелки – направления потоков; 17 – близповерхностный магматический очаг.

В целом, в геодинамической эволюции Кичерской зоны прослеживается цикл от начала рифтогенеза, инициированного мантийным плюмом, и формирования толеитов MORB-типа, до закрытия субокеанического бассейна (палеорифта) и метаморфизма, который может быть сопоставлен с редуцированным циклом Уилсона регионального масштаба.

### **Заключение**

Проведенные геологические, геохронологические и изотопно-геохимические исследования неопротерозойских образований Кичерской зоны Байкало-Муйского пояса, ранее в целом относимых к нюрндукуанскому комплексу, показали их возрастную и вещественную неоднородность. Среди них ограниченное распространение имеют раннебайкальские структуры, представленные блоками коры, сложенными преимущественно гнейсо-гранитами. Преобладающими в строении зоны являются позднебайкальские структуры, которые представлены, в первую очередь глубоко метаморфизованными породами основного состава. Они подразделяются на два комплекса. Один из них сложен породами плагиомигматит-трондьемит-метабазитовой ассоциации, другой наряду с породами основного состава содержит также метаосадочные породы. Первый из них доминирует и за ним сохраняется название нюрндукуанский комплекс, второй выделяется как кичерский комплекс. Наиболее поздними среди позднебайкальских образований являются массивы расслоенных габброидов и адацитов, которые прорывают породы нюрндукуанского комплекса.

Определены характеристические особенности пород нюрндукуанского комплекса. Комплекс сложен базитами и диоритами, которые формировались в диапазоне 660 – 640 млн лет и которые затем (в интервале 640-615 млн лет) были преобразованы в условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма в амфиболиты, метагаббро, кристаллические сланцы, метадiorиты и трондьемиты. Геохимические и Nd-изотопные характеристики этих метабазитов указывают на их связь с различными ювенильными источниками. Так в центральной части Кичерской зоны формировались толеиты MORB-типа, связанные с деплетированным мантийным источником, а в юго-западной части зоны возникли толеиты с внутриплитной изотопно-геохимической спецификой. Эти данные позволили сделать вывод, что образование пород нюрндукуанского комплекса протекало в режиме рифтогенеза и завершилось закрытием субокеанического бассейна (палеорифта) и метаморфизмом пород ювенильной коры.

### Список основных работ по теме диссертации

1. Рыцк Е.Ю., Котов А.Б., Андреев А.А. и др. Строение и возраст Байкальского массива гранитоидов: новые свидетельства раннебайкальских событий в Байкало-Муйском подвижном поясе // Докл. АН. 2013. Т. 453. № 6. С. 662–665.
2. Андреев А.А., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д. и др. Геодинамические обстановки формирования протолитов амфиболитов Кичерской зоны Байкало-Муйского складчатого пояса: результаты геохимических исследований // Докл. АН. 2015. Т. 460. № 6. С. 685–690.
3. Лебедева Ю.М., Рыцк Е.Ю., Андреев А.А. и др. Условия формирования основных гранулитов и высокоглиноземистых гнейсов Байкало-Муйского пояса (Северное Прибайкалье) // Докл. АН. 2018. Т. 479. № 1. С. 66–70.
4. Рыцк Е.Ю., Сальникова Е.Б., Ярмолук В.В., Андреев А.А. и др. Раннекембрийский возраст и коровые источники гранитоидов Горячинского плутона (Северное Прибайкалье): геодинамические следствия // Докл. АН. 2019. Т. 484. № 4. С. 468–471.
5. Андреев А.А., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Толмачева Е.В., Богомолов Е.С., Лебедева Ю.М., Федосеенко А.М. Возраст, состав и тектонические обстановки формирования позднебайкальских комплексов Кичерской зоны Байкало-Витимского пояса (Северное Прибайкалье): геологические, геохронологические (ID-TIMS, SIMS) и Nd-изотопные данные // Петрология. 2022. Т.30. № 4. С. 345-378.
6. Андреев А.А., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Котов А.Б., Ковач В.П. Геохимические индикаторы обстановок формирования ранне и позднебайкальских комплексов Кичерской зоны (Байкало-Муйский складчатый пояс) // Тез. докл. «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса». Иркутск, 2013. С. 17-18.
7. Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Богомолов Е.С., Андреев А.А., Толмачева Е.В. и др. Рифтогенная обстановка формирования гипербазит-базитовых комплексов Северного Прибайкалья: новые геологические, геохимические и изотопные данные // Тез. докл. «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал». Материалы V Международной конференции. Улан-Удэ. 2017. С. 239–241.
8. Андреев А.А. Нюрндуханский метаморфический комплекс Кичерской зоны Байкало-Муйского складчатого пояса: геологическое строение, возраст и геодинамические условия образования // Тез. докл. «Материалов Седьмой Российской молодежной научно-практической школы». Москва, 2017. С42-45.
9. Андреев А.А., Рыцк Е.Ю., Сальникова Е.Б., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Лебедева Ю.М., Богомолов Е.С., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М. О возрасте метабазитов раннебайкальского метаморфического комплекса (Кичерская зона, Байкало-Муйский пояс): U-Pb данные по циркону // Тез. докл. «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса». Иркутск, 2018. С. 13-14.
10. Андреев А.А., Рыцк Е.Ю. Нюрндуханский комплекс (Кичерская зона, Северное Прибайкалье): геологические границы и возраст // Тез. Докл. «Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика». Санкт-Петербург, 2019. С. 21-22.