

*На правах рукописи*

**Сергеева Людмила Юрьевна**



**СОСТАВ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ  
ХАРАКТЕРИСТИКА ЦИРКОНА ИЗ ГРАНУЛИТОВ  
ДАЛДЫНСКОЙ СЕРИИ АНАБАРСКОГО ЩИТА**

*Специальность 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы  
поисков полезных ископаемых*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**Санкт-Петербург – 2022**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук, доцент

*Скублов Сергей Геннадьевич*

**Официальные оппоненты:**

*Каулина Татьяна Владимировна*

доктор геолого-минералогических наук, Геологический институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», лаборатория геологии докембрия, заведующий;

*Мальшев Сергей Владимирович*

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о Земле, кафедра геохимии, доцент.

**Ведущая организация:** – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток.

Защита состоится 27 мая 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.04 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 25 марта 2022 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ГУЛЬБИН  
Юрий Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Древнейшие комплексы пород, метаморфизованные в условиях гранулитовой фации, широко распространены на щитах и в кристаллическом основании платформ. Они давно привлекают внимание исследователей, поскольку дают важную информацию о составе и степени преобразования континентальной коры, сформированной на ранних этапах развития Земли (Glikson, 2014). Исследователи считают, что эти комплексы слагают фундамент зеленокаменных поясов и так же, как и «серые гнейсы», относятся к древнейшим образованиям на Земле (Van Kranendonk et al., 2018). Оценка условий формирования континентальной коры является одной из фундаментальных проблем геологии раннего докембрия (Spencer et al., 2017).

В пределах Анабарского щита большое распространение имеют гиперстеновые плагиогнейсы (эндербиты) и связанные с ними метабазиты (кристаллосланцы), как правило, совместно с кварцитами образующие «слоистый» комплекс, занимающий около 2/3 поверхности щита и метаморфизованный в условиях гранулитовой фации.

Комплексное геохимическое и изотопно-геохимическое изучение циркона из пород, слагающих фундамент древних щитов, позволяет решить вопросы реконструкции процессов происхождения и эволюции ранней континентальной коры (Hawkesworth et al., 2017; Trail, 2018).

### **Степень разработанности темы исследования**

Гранулиты Анабарского щита систематически исследуются со второй половины прошлого века (Смирнов, Климов, 1949; Рабкин, 1959; Лутц, 1964; Розен и др., 1986; Ножкин и др., 2019; цикл работ Н.И. Гусева с соавторами, начиная с 2012 г. и по настоящее время). Однако многие вопросы, касающиеся возраста и условий образования протолита гранулитов, времени и параметров процессов метаморфизма остаются недостаточно изученными.

Использование локальных методов (SIMS, LA-ICP-MS), получивших широкое развитие в последние десятилетия, позволяет установить условия образования и возраст процессов, выявить

новые закономерности и особенности поведения редких и редкоземельных (REE) элементов в процессах гранулитового метаморфизма, а также пополнить банк данных по редкоэлементному составу метаморфического циркона.

**Цель работы** заключается в реконструкции возраста и этапов метаморфизма для гранулитов далдынской серии Анабарского щита на основе комплексного изотопно-геохимического и минералого-геохимического изучения циркона, а также вмещающих пород и породообразующих минералов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Установление особенностей химического состава (по главным, редким и редкоземельным элементам) пород и породообразующих минералов.

2. Локальное датирование циркона из главных разновидностей пород далдынской серии U-Pb методом, сопровождаемое изучением изотопного состава гафния и кислорода, а также исследование распределения редких и редкоземельных элементов в цирконе. Определение возраста пород области сноса для кварцитов.

3. Датирование гранатсодержащих парагенезисов из гранулитов Sm-Nd методом с контролем распределения редкоземельных элементов в минералах.

4. Определение P-T параметров и выделение этапов метаморфизма для гранулитов далдынской серии.

5. Сравнительный анализ данных по редкоэлементному составу циркона из гранулитов далдынской серии и сопоставление с данными для гранулитового циркона из других регионов мира.

#### **Научная новизна работы**

Проведенное изотопно-геохимическое исследование циркона из кварцитов далдынской серии вносит существенный вклад в решение проблем эволюции ранней континентальной коры Анабарского щита. Установленный для циркона возраст 3.5 млрд лет отражает преобладание в области сноса палеоархейских магматических пород. Изотопный состав кислорода в цирконе из кварцитов указывает на существенную контаминацию материнских расплавов супракрystalным веществом.

Для основных гранулитов далдынской серии установлены возраст и P-T параметры метаморфизма амфиболитовой фации, наложенного на палеопротерозойский гранулитовый метаморфизм.

Впервые выполнено обобщение и сравнение полученных данных по редкоэлементному составу циркона из гранулитов Анабарского щита и гранулитовых комплексов мира.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Проведенное исследование вносит вклад в развитие нового научного направления – петрохронологии, связывающего данные геохронологии с условиями протекания магматических и метаморфических процессов, а также способствует решению проблем эволюции ранней континентальной коры Анабарского щита.

Полученные результаты комплексного изотопно-геохимического исследования высокометаморфизованных пород Анабарского щита могут быть использованы при составлении Государственных геологических карт, а также в учебных курсах по «Общей геохимии» и «Изотопной геохимии».

**Методология и методы исследования.** Методологической основой исследования является научный подход с комплексированием современных изотопно-геохимических и минералого-геохимических методов. В диссертации были использованы образцы пород, собранные коллективом Отдела РГ и ПИ Восточной Сибири («ВСЕГЕИ») в ходе проведения геологосъемочных работ 1:1 000 000 масштаба на территории листа R-49 – Оленек в 2011–2014 гг. Опорная коллекция состоит из 17 образцов. Химический состав петрогенных (главных) элементов в породах определен методом XRF на спектрометре ARL-9800 по стандартной методике. Содержание редких и редкоземельных элементов в породе проанализированы методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартной методике (ВСЕГЕИ). Состав минералов исследован на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510 LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) в ИГГД РАН. Анализ минералов (циркона, граната, пироксенов и амфиболов) на содержание редких и редкоземельных элементов (459 анализов) выполнен методом SIMS на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (Ярославский филиал

ФТИАН РАН). Локальное датирование циркона U-Pb методом выполнено на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований (ЦИИ ВСЕГЕИ, 170 точек) и Cameca IMS-1280-HR в Институте геологии и геофизики Китайской Академии наук (IGG CAS, 60 точек). Изотопный состав Hf в цирконе (22 точки) измерен методом LA-ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ. Датирование пород и минералов Sm-Nd методом (3 образца) выполнено методом TIMS в ИГГД РАН. Изотопный состав кислорода в цирконе (60 точек) определен на ионном микрозонде Cameca IMS-1280 (IGG CAS).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Детритовый циркон из кварцитов далдынской серии с возрастом 3.5 млрд лет отражает преобладание в области сноса палеоархейских магматических пород. Изотопный состав кислорода в цирконе из кварцитов ( $\delta^{18}\text{O}$  от 5.4 до 9.8‰) указывает на контаминацию материнских расплавов супракристалльным веществом.

2. В основных гранулитах далдынской серии проявлен метаморфизм амфиболитовой фации (700°C и 6 кбар) с возрастом 1920 млн лет, наложенный на палеопротерозойский гранулитовый метаморфизм (775°C и 7.5 кбар).

3. Циркон из гранулитов далдынской серии, по сравнению с цирконом из гранулитов других регионов мира, имеет геохимические признаки (инверсию Eu-аномалии и редуцирование Ce-аномалии, выполаживание спектра в области LREE, обогащение Ca, Ti, Sr), отражающие воздействие флюида, обогащенного несовместимыми элементами.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена представительностью каменного материала и использованием аналитических данных, полученных в аккредитованных лабораториях.

**Апробация результатов.** Промежуточные итоги работы были представлены на следующих конференциях: IV Международная конференция памяти А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2015), XIV конференция СНО «Современные исследования в геологии» (Санкт-Петербург, 2015), X и XI Всероссийская молодежная конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2019, 2020), XII Международная

конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2020), Геологический международный студенческий саммит (Санкт-Петербург, 2021), XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2021).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, обработке и интерпретации полученных аналитических данных.

**Публикации по работе.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 15 печатных работах, в том числе в 9 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в издании, входящем в международные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Содержит 183 страницы, 70 рисунков, 4 таблицы в тексте и 29 таблиц, представленные в Приложении. Список литературы включает 170 источников.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю профессору С.Г. Скублову за помощь в процессе работы. Автор благодарит Н.И. Гусева (ВСЕГЕИ) за всестороннюю поддержку и предоставленный фактический материал.

За проведение аналитических работ и обсуждение результатов автор признателен К.И. Лохову (СПбГУ), А.В. Березину, О.Л. Галанкиной, А.Е. Мельнику и Е.С. Богомолу (ИГГД РАН), С.Г. Симакину и Е.В. Потапову (ЯФ ФТИАН РАН), Ч.-Л. Ли, С.-Х. Ли и Г. Тангу (IGG CAS). Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-35-50002 и 18-35-00229.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи исследования и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлена общая информация о геологическом строении района и объектах исследования (гранулитах далдынской серии Анабарского щита).

**Во второй главе** рассмотрены использованные в работе аналитические методы.

**В третьей главе** приведены геолого-петрографическая характеристика и особенности состава гранулитов и их породообразующих минералов, рассмотрена эволюция P-T параметров метаморфизма.

**В четвертой главе**, основной главе диссертационной работы, приведены результаты комплексного изотопно-геохимического исследования циркона из гранулитов далдынской серии (возраст, изотопно-геохимический и редкоэлементный состав, Sm-Nd изотопные данные), а также проведен сравнительный анализ данных по составу гранулитового циркона из пород далдынской серии и гранулитовых комплексов мира.

**Заключение** отражает обобщенные выводы по результатам исследования в соответствии с целью и решаемыми задачами.

### **Краткая характеристика объекта исследования**

Анабарский щит представляет собой выступ раннедокембрийского фундамента на севере Сибирской платформы (рисунок 1). Наибольшую распространенность в строении щита имеют полиметаморфические породы архейского и раннепротерозойского возраста. Гранулиты на Анабарском щите представлены гиперстеновыми плагиогнейсами (эндербитами) и мафитовыми кристаллосланцами, занимающими две трети обнаженной поверхности, а также гранатовыми гнейсами и метаосадочными породами (Розен и др., 1988, 1991). Далдынская серия распространена главным образом в центральной части Анабарского щита и простирается субмеридионально сквозной полосой шириной до 70 км. Состав гранулитов далдынской серии довольно однородный, для нее характерно широкое развитие мезо- и



меланократовых двупироксеновых, амфибол-пироксеновых кристаллосланцев, чередование последних с более лейкократовыми гиперстеновыми, двупироксеновыми и пироксен-амфиболовыми гнейсами, плагиогнейсами и линзами кварцитов (Гусев и др., 2016). Район детального исследования расположен в правобережье р. Большая Куонамка в районе устья р. Далдын. На территории участка преобладают гиперстеновые плагиогнейсы и двупироксеновые плагиокристаллосланцы с подчиненными маломощными прослоями небольшой мощности мафитовых кристаллосланцев, амфиболитов, реже ультрамафических кристаллосланцев. Анабарский щит представляет собой блоково-складчатое сооружение, испытывшее несколько этапов коллизии, которые сопровождались образованием крупных тектонических зон дробления разного возраста и многочисленных разнонаправленных разрывных нарушений (Розен и др., 2006).

Наиболее древний мезоархейский этап формирования протолита установлен для биотит-гиперстеновых кристаллосланцев с возрастом ~3.0 млрд лет (Гусев и др., 2012; Сергеева и др., 2017). Для пород далдынской серии выделяются два этапа гранулитового метаморфизма. Время раннего этапа преобразования пород в условиях гранулитовой фации, установленное по циркону (U-Pb метод), составляет ~2.7 млрд лет. Палеопротерозойский этап гранулитового метаморфизма с возрастом ~2.0 млрд лет определен по метаморфическим каймам циркона.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. **Детритовый циркон из кварцитов далдынской серии с возрастом 3.5 млрд лет отражает преобладание в области сноса палеоархейских магматических пород. Изотопный состав кислорода в цирконе из кварцитов ( $\delta^{18}\text{O}$  от 5.4 до 9.8‰) указывает на контаминацию материнских расплавов супракрустальным веществом.**

В пределах Анабарского щита в ассоциации с высокометаморфизованными породами широко распространены метаосадочные породы. В составе далдынской серии наиболее часто встречаются мономинеральные кварциты. Внешне они

представлены серыми, средне- и крупнозернистыми породами, часто с хорошо выраженной полосчатостью. По результатам изучения Sm-Nd системы породы для последующего изотопно-геохимического исследования циркона были выбраны два наиболее древних образца кварцитов (обр. 820 и 831-1), модельный возраст которых составляет 3.69–3.79 млрд лет (Сергеева и др., 2020).

Циркон из кварцитов (обр. 820) представлен темно-серыми до черных в катодолюминесцентном изображении (CL) призматическими кристаллами с реликтами тонкой осцилляционной зональности и секториальности в ядерных частях. В результате локального датирования ядер циркона получен широкий диапазон значений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возраста 3740–3450 млн лет, образующий два кластера в области 3740–3600 и 3510–3450 млн лет (рисунок 2а). Наиболее древнее зерно с  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возрастом 3740–3733 млн лет (в двух точках) имеет спектр распределения REE, характерный для неизмененного магматического циркона (рисунок 2б) и величину Th/U отношения около 0.4. Содержание Y составляет 1600–1650 ppm, Hf – 11650–12240 ppm, что характерно для циркона из гранитоидов. Низкое содержание Ca (около 5 ppm) свидетельствует об отсутствии гидротермального изменения циркона.

Пять зерен с  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возрастом 3634–3600 млн лет располагаются вдоль конкордии, для них отмечено некоторое обогащение LREE. Также выявлены два зерна циркона со значениями  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возраста 3554 и 3535 млн лет и более низкой величиной Th/U отношения 0.06. Во второй, преобладающей по количеству зерен, популяции циркона с  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возрастом 3510–3450 млн лет три зерна имеют распределение REE как у неизмененного магматического циркона, остальные четыре зерна обогащены LREE.

Во второй пробе кварцитов (обр. 831-1) циркон представлен слегка окатанными, призматическими кристаллами, темно-серыми в CL, с тонкими серыми оболочками. В ядрах циркона зональность, как правило, осцилляционная, для некоторых она затушевана или размыта. Для 12 точек циркона была построена дискордия с возрастом верхнего пересечения  $3487 \pm 11$  млн лет (рисунок 2в). Циркон характеризуется умеренной величиной Th/U отношения, в среднем 0.53. По характеру распределения редких элементов циркон

делится на два типа. Циркон первой группы характеризуется дифференцированными спектрами распределения REE с положительной Ce-аномалией ( $Ce/Ce^* = 9.49-56.9$ ) и отрицательной Eu-аномалией ( $Eu/Eu^* \sim 0.09$ ) (рисунок 2г). Величина Th/U отношения в среднем составляет 0.36. Содержание Ca варьирует в пределах от 0.55 до 26.7 ppm, Y – от 733 до 1247 ppm. На диаграмме  $(Sm/La)_N-La$  фигуративные точки циркона преимущественно попадают в поле неизменного магматического циркона (рисунок 2д). Для второго типа циркона характерны слабо дифференцированные спектры распределения REE ( $Sm_N/La_N$  не более 3) с редуцированной положительной Ce-аномалией ( $Ce/Ce^* = 1.12-4.46$ ) и отрицательной Eu-аномалией ( $Eu/Eu^*$  в основном варьирует от 0.08 до 0.46). В цирконе наблюдается обогащение LREE (от 18 до 112 ppm), средняя величина Th/U отношения составляет 0.41. Содержание Hf изменяется от 9461 до 10899 ppm, что характерно для циркона из гранитоидов.

Как следует из вышеизложенного, для обоих образцов кварцитов преобладающий циркон с возрастом  $\sim 3.5$  млрд лет имеет геохимические характеристики неизменного магматического циркона (рисунок 2д).

Значения  $\delta^{18}O$  в цирконе из кварцитов обр. 820 варьируют в широких пределах, от 5.38 до 7.37‰ (одно значение достигает 9.82‰, рисунок 2е). Только незначительная часть анализов показывает значения  $\delta^{18}O$  5.38–5.80‰, близкие к мантийным меткам ( $5.3 \pm 0.3$ ‰). Данный циркон характеризуется повышенным содержанием Hf (в среднем 11908 ppm), варьирующим количеством Y (от 652 до 1636 ppm) и характерной для магматического циркона величиной Th/U отношения (в среднем 0.35).

Фиксируемое утяжеление изотопного состава кислорода для циркона из кварцитов отражает существенный вклад древнего корового вещества (Valley et al., 2005). В цирконе с наибольшей величиной  $\delta^{18}O$  (9.82 ‰) наблюдается максимальное содержание Y 3637 ppm и минимальное Hf – 8887 ppm.

Аналогичная ситуация наблюдается и для кварцитов обр. 831-1. Только для четырех точек установлены близкие к мантийным значения  $\delta^{18}O$ : от 5.61 до 5.80‰ (рисунок 2е). Для остального циркона  $\delta^{18}O$  варьирует от 6.01 до 7.67 ‰, что также может быть

объяснено значительным вкладом в магматические расплавы супракрустального компонента.

**2. В основных гранулитах далдынской серии проявлен метаморфизм амфиболитовой фации (700°C и 6 кбар) с возрастом 1920 млн лет, наложенный на палеопротерозойский гранулитовый метаморфизм (775°C и 7.5 кбар).**

Изучение эволюции P-T параметров метаморфизма пород далдынской серии Анабарского щита проведено на примере амфиболитового гранат-ортопироксенового плагиокристаллосланца (обр. 174) (Сергеева и др., 2018). Порода сложена плагиоклазом (53%), амфиболом (32%), ортопироксеном (10%), гранатом (4%). Гранат соответствует Prp-Grs-Alm с содержанием Alm-компоненты около 60%. Повышенное содержание Sprs-компонента (4%) свидетельствует об образовании граната на ретроградной стадии метаморфизма. Полученные спектры распределения REE типичны для высококальциевого граната амфиболитовой фации. В гранате наблюдается повышенное содержание HREE (рисунок 5г). Спектры распределения REE дифференцированы с резким увеличением содержания от La к Lu, на них присутствует небольшая отрицательная Eu-аномалия ( $Eu/Eu^* = 0.63$ ). Зональность по легким и средним REE в гранате отсутствует, но при этом содержание HREE от центра к краю зерна повышается, что свидетельствует о понижении параметров метаморфизма (Скублов, 2005). Ортопироксен по составу соответствует смеси Fs- и En-минералов в равных соотношениях с незначительным присутствием Wo-компонента. Содержание Al не превышает 0.1 формульного коэффициента (ф.к.). Клинопироксен ( $X_{Mg} < 0.6$ ) практически всегда ассоциирует с ортопироксеном и содержит не более 6% Jd-компонента. Спектры распределения REE слабо дифференцированные, суммарное содержание REE не превышает 1 ppm (рисунок 5г). Величина Eu-аномалии ( $Eu/Eu^*$ ) в них варьирует от 0.51 до 1.01. Амфибол, замещающий пироксены, относится к кальциевой группе и представлен, в основном, ферропаргаситом  $Prg_{70}Fts_{20}Gln_{10}$  ( $X_{Mg} \sim 0.5$ ). Состав амфибола типичен для амфиболитовой фации метаморфизма, чему не противоречит его парагенезис с гранатом-альмандином. Амфибол характеризуется дифференцированными спектрами распределения REE  $(La/Yb)_N =$

5.19–0.59) с уменьшением содержаний редкоземельных элементов от La к Lu (рисунок 5г). Присутствует умеренная отрицательная Eu-аномалия ( $Eu/Eu^* = 0.57–0.71$ ). Содержание Ti в амфиболе составляет около 18000–20700 ppm, что наряду с составом по главным элементам соответствует параметрам амфиболитовой фации. Однако суммарное содержание REE довольно высокое (334–371 ppm, с преобладанием вклада LREE), что отвечает условиям гранулитовой фации (Skublov, Drugova, 2003). Таким образом, главные и редкие элементы в составе минералов демонстрируют регрессивное изменение параметров метаморфизма от гранулитовой до амфиболитовой фации, когда параметрам гранулитовой фации отвечают только малоподвижные элементы (например, REE в амфиболе).

Температура  $695 \pm 15^\circ\text{C}$  и давление  $6 \pm 1$  кбар для позднего парагенезиса Amp-Grt-Pl-Qz, полученные методом TWQ, соответствуют граничной области амфиболитовой и гранулитовой фаций (Сергеева и др., 2018) (рисунок 4). В ходе исследования были выполнены расчеты методом псевдосечений и изоплет (Theriak-Domino с базой данных JUN92d.bs). Для известного состава породы были построены изоплеты мольных долей конечных членов твердых растворов граната (Alm, Prp, Grs), плагиоклаза (An),  $X_{Mg}$  и содержания Al в ортопироксене (ф.к.). Полученные температура  $720 \pm 10^\circ\text{C}$  и давление  $7.0 \pm 0.2$  кбар практически совпадают с определенными ранее методом TWQ (рисунок 4). Для оценки параметров раннего этапа метаморфизма были рассчитаны изоплеты для An в плагиоклазе, Ts-компонентов и  $X_{Mg}$  в ортопироксене. Рассчитанная область отвечает максимальным P-T параметрам гранулитового метаморфизма с температурой  $775 \pm 35^\circ\text{C}$  и давлением  $7.5 \pm 0.7$  кбар (Сергеева и др., 2018).

Для гранат-гиперстенового плагиокристаллосланца по циркону получен конкордантный возраст  $1997 \pm 10$  млн лет (рисунок 5а). Поскольку протолитом плагиокристаллосланцев являются основные породы, не содержащие первичного магматического циркона, то установленный возраст отвечает времени проявления позднего гранулитового метаморфизма. Спектры распределения REE в гранулитовом цирконе часто сходны со спектрами для магматического циркона (рисунок 5б). Циркон из обр. 174 характеризуется умеренным

содержанием U (106–394 ppm) и пониженным Th (в среднем 66 ppm), величина Th/U отношения в среднем составляет 0.23. Температура кристаллизации циркона, определенная по Ti-термометру, варьирует в интервале 720–777 °C (Watson et al., 2006), что не противоречит температурным оценкам, полученным для породообразующих минералов.

Для гранат-гиперстенового плагиокристаллосланца в результате Sm-Nd датирования была получена трехточечная изохрона (WR, Amp, Grt) с возрастом  $1919 \pm 13$  млн лет (СКВО = 0.75). Полученный возраст можно рассматривать как время регрессивного амфиболитового метаморфизма (рисунок 5в).

**3. Циркон из гранулитов далдынской серии, по сравнению с цирконом из гранулитов других регионов мира, имеет геохимические признаки (инверсию Eu-аномалии и редуцирование Ce-аномалии, выполаживание спектра в области LREE, обогащение Ca, Ti, Sr), отражающие воздействие флюида, обогащенного несовместимыми элементами.**

Значительное количество аналитических данных по редкоэлементному составу гранулитового циркона из пород далдынской серии (426 анализов) позволяет провести обобщение и сравнение с опубликованными данными для гранулитового циркона из комплексов мира (322 анализа) (рисунок 6). Основные статистические характеристики определены в зависимости от типа породы (основные по составу гранулиты – 102, средние – 70, кислые – 137, кварциты – 117 анализов).

В целом поля содержания REE в значительной степени перекрываются для всех четырех групп циркона (рисунок 6а). Однако циркон из кислых гранулитов и кварцитов заметно отличается от циркона из основных и средних (с содержанием SiO<sub>2</sub> 52–65 мас.%) гранулитов повышенным содержанием LREE (около 20 и 30 ppm соответственно). Наименьшее среднее содержание REE установлено для циркона из средних гранулитов (около 400 ppm). Для всех четырех групп характерен выположенный спектр в области LREE (здесь и далее медианное среднее Sm<sub>N</sub>/La<sub>N</sub> отношение варьирует в интервале 7.6–12.6), проявлена отрицательная Eu-аномалия (Eu/Eu\* находится в интервале 0.35–0.42) и

редуцированная положительная Ce-аномалия ( $Ce/Ce^*$  находится в интервале 7.1–9.5).

Величина Th/U отношения также достаточно выдержана для всех четырех групп циркона и находится в интервале 0.35–0.46. При этом она превышает эмпирическую границу между магматическим и метаморфическим цирконом, установленную как 0.2 (0.1), и отвечает значениям, характерным для магматического циркона. Состав вмещающей породы отражается на содержании Hf – минимальном в цирконе из основных гранулитов (7900 ppm), и достаточно высоком – в остальных группах (9800–10900 ppm), максимальном в цирконе из кислых гранулитов и кварцитов.

В цирконе из кислых гранулитов также зафиксировано повышенное содержание U и Th. Аналогично ведет себя P, повышаясь от 165 ppm в основных и средних гранулитах до 195–208 ppm в кислых гранулитах и кварцитах. Циркон из средних гранулитов демонстрирует пониженное содержание Y (500 ppm против 800–970 ppm в других группах). Достаточно выдержано содержание Li в цирконе, составляющее около 1–3 ppm и повышаясь до 5 ppm в кислых гранулитах. Такое содержание Li является минимальным для циркона из пород континентальной коры (Ushikubo et al., 2008).

Распределение REE в гранулитовом цирконе из комплексов мира (рисунок 6а) отличается от такового циркона из гранулитов далдынской серии Анабарского щита более дифференцированным характером с четко проявленными положительной Ce-аномалией ( $Ce/Ce^* = 48$ ) и отрицательной Eu-аномалией ( $Eu/Eu^* = 0.10$ ). Только в цирконе из кислых гранулитов зафиксированы пологие спектры в области LREE, при этом  $Sm_N/La_N$  отношение (16.6) заметно превышает аналогичный показатель для всех групп циркона из гранулитов далдынской серии.

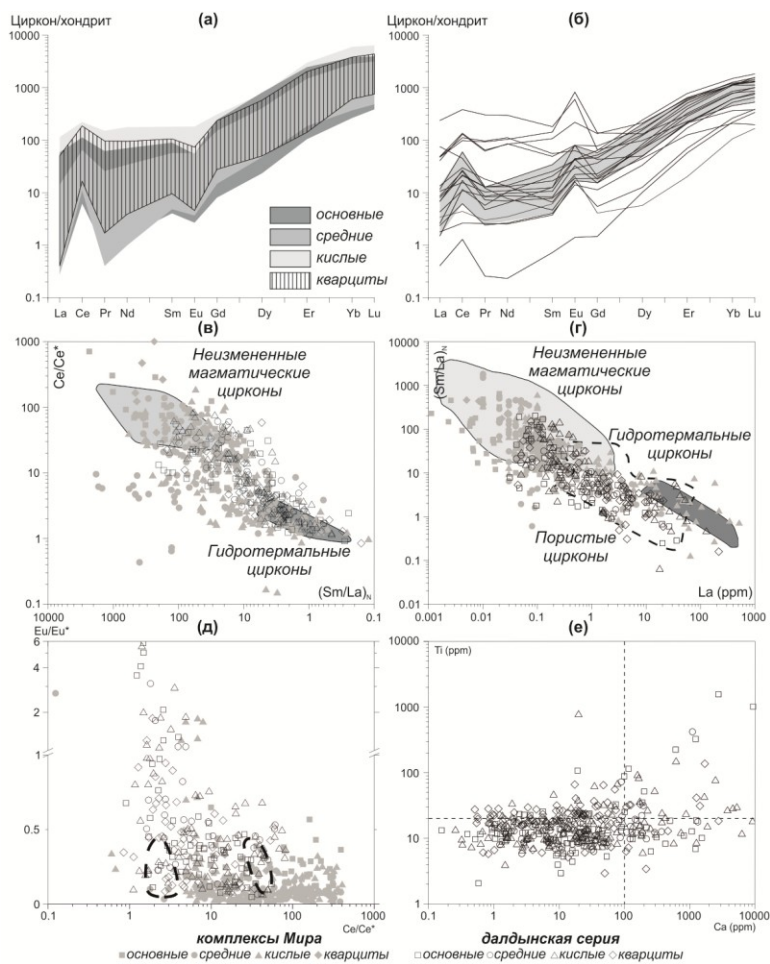


Рисунок 6 – Обобщенные спектры распределения REE в гранулитовом цирконе: из гранулитов далдынской серии и комплексов мира (ссылки в тексте диссертации) (а); в цирконе из гранулитов далдынской серии с положительной Eu-аномалией, заливкой выделены наиболее типичные спектры (б); соотношения  $(Sm/La)_N - Ce/Ce^*$  (в);  $La - (Sm/La)_N$  (г);  $Ce/Ce^* - Eu/Eu^*$  (д); поля циркона выделены по (Hoskin, 2005; и др.); Ca и Ti для гранулитового циркона (е), пунктиром показаны эмпирические лимиты содержания



На дискриминационной диаграмме (рисунок бв) точки циркона из гранулитов далдынской серии в основном попадают в поле пористых цирконов, испытавших флюидное воздействие и перекрывающихся по составу с гидротермальным цирконом. Фигуративные точки циркона из гранулитовых комплексов мира большей частью (за исключением циркона из кислых гранулитов) попадают в поле неизменного магматического циркона. На аналогичной дискриминационной диаграмме (рисунок бг) точки циркона из гранулитов далдынской серии в основном занимают поле гидротермального циркона и промежуточную область между полями магматического и гидротермального циркона. Циркон из гранулитовых комплексов мира демонстрирует значительное разнообразие составов и в большей степени тяготеет к полю неизменного магматического циркона.

На диаграмме соотношения величин Ce- и Eu-аномалии (рисунок бб) точки циркона из гранулитов далдынской серии отличаются от циркона из гранулитовых комплексов мира значительным количеством (около 30) точек с отсутствием или положительной Eu-аномалией. При этом также значительно количество точек с редуцированной отрицательной Eu-аномалией; вместе они образуют единый тренд. Циркон из других гранулитовых комплексов мира (таких же по составу пород и парагенезисов) не обладает данной особенностью – точек с положительной Eu-аномалией всего 5, а точки с редуцированной Eu-аномалией ( $Eu/Eu^* > 0.75$ ) отсутствуют. Вторым отличием является в целом пониженное значение  $Ce/Ce^*$  для циркона из гранулитов далдынской серии.

Положительная Eu-аномалия не характерна для циркона магматического и метаморфического генезиса. В основном она встречается в цирконе гидротермально-метасоматического типа, кристаллизовавшегося из флюида. Характерной особенностью состава такого циркона является повышенное содержание LREE, приводящее к выполаживанию всего спектра REE с редуцированием положительной Ce-аномалии, исчезновением отрицательной Eu-аномалии или смена ее знака на положительный, крайне низкое Th/U отношение, значительное количество неформульных элементов-примесей (таких как Ca, Sr, Ba, Ti). Геохимические

особенности циркона гидротермально-метасоматического типа, по всей видимости, унаследованы от состава флюида.

На рисунке 6б приведены спектры распределения REE в цирконе из гранулитов далдынской серии с положительной Eu-аномалией. Рассматриваемый циркон не демонстрирует аномального обогащения ни REE в целом (их содержание находится в интервале 34–1060 ppm), ни LREE. Только для пяти точек относительно повышенное содержание LREE приводит к выполаживанию спектров REE в цирконе. Остальные 15 спектров образуют компактную группу конформных спектров (рисунок 6д). Проведенный корреляционный анализ установил, что величина Eu-аномалии в цирконе ( $Eu/Eu^*$ ) имеет значимые положительные коэффициенты корреляции с содержанием Eu, а также с содержаниями Ca, Ti, Sr, Li, Th. Значимые отрицательные коэффициенты корреляции установлены для HREE (Er, Yb, Lu) и Ce/Ce\*. Неформульные для циркона элементы Ca, Ti и Sr являются характерным признаком флюидного воздействия на циркон (Geisler, Schleicher, 2000).

Рисунок 6е демонстрирует, что для значительного количества анализов циркона содержание неформульных элементов Ca и Ti превышает эмпирические верхние пределы, установленные для циркона, не испытавшего флюидное воздействие. Флюидом также были принесены Eu, Li, Th, U. Поскольку Li в составе циркона является индикатором коровых процессов (Ushikubo et al., 2008), то природа флюида тоже коровая. LREE этим флюидом в значительном количестве не приносились. Данная особенность отличает рассматриваемый гранулитовый циркон с положительной Eu-аномалией от циркона гидротермально-метасоматического типа, тоже с положительной Eu-аномалией, но отличающегося высоким содержанием всего спектра несовместимых элементов, включая LREE (Скублов и др., 2013).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой, в результате проведенного комплексного минералого-геохимического и изотопно-геохимического исследования циркона, а также вмещающих пород и породообразующих минералов была получена дополнительная информация о возрасте и этапах метаморфизма для гранулитов далдынской серии Анабарского щита (Гусев и др., 2019; Гусев и др., 2020; Сергеева и др., 2020; Сергеева и др., 2021).

Проведенное изотопно-геохимическое исследование циркона из кварцитов далдынской серии вносит существенный вклад в решение проблем эволюции ранней континентальной коры Анабарского щита. Установленный для циркона возраст 3.5 млрд лет отражает преобладание в области сноса палеоархейских магматических пород. Изотопный состав кислорода в цирконе из кварцитов указывает на существенную контаминацию материнских расплавов супракрустальным веществом.

В основных гранулитах далдынской серии проявлен метаморфизм амфиболитовой фации (700°C и 6 кбар) с возрастом 1920 млн лет, наложенный на палеопротерозойский гранулитовый метаморфизм (775°C и 7.5 кбар).

Проведен сравнительный анализ данных по редкоземельному составу циркона из гранулитов далдынской серии и сопоставление с данными для гранулитового циркона из других регионов мира (около 550 анализов). Установлено, что гранулитовый циркон из пород далдынской серии имеет геохимические признаки гидротермально-метасоматического циркона (инверсия Eu-аномалии и редуцирование Ce-аномалии, выполаживание спектра в области LREE, обогащение несовместимыми элементами Ca, Ti, Sr), отражающие флюидное воздействие в процессе метаморфизма.

В качестве перспективы продолжения изучения гранулитов далдынской серии Анабарского щита автор рассматривает их дальнейшее комплексное петрологическое и изотопно-геохимическое исследование гранулитов Анабарского щита, преимущественно на минеральном уровне.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из перечня ВАК:*

1. **Сергеева, Л.Ю.** Геохимия циркона из гранулитов далдынской серии, Анабарский щит / Л.Ю. Сергеева, С.Г. Скублов, Н.И. Гусев, А.Е. Мельник // Записки Российского минералогического общества. – 2016. – Т. 145, № 6. – С. 20–44.
2. Состав и соотношения ранней и позднеархейских гранулитов в бекелехской толще Анабарского щита (Сибирский кратон) / Н.И. Гусев, **Л.Ю. Сергеева**, С.Г. Скублов, Н.Г. Бережная, А.Н. Ларионов // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 70. – С. 17–35.
3. **Сергеева, Л.Ю.** Возраст и происхождение пород далдынской серии Анабарского щита по данным U-Pb датирования циркона, Sm-Nd и Lu-Hf изотопных систематик / Л.Ю. Сергеева, Н.И. Гусев, К.И. Лохов, В.А. Глебовицкий // Геохимия. – 2017. – № 4. – С. 358–362.
4. **Сергеева, Л.Ю.** Возраст и параметры метаморфизма гранулитов Капральско-Джегесского синклинория Анабарского щита / Л.Ю. Сергеева, А.В. Березин, Н.И. Гусев, С.Г. Скублов, А.Е. Мельник // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 13–21.
5. Гусев Н.И. Свидетельства переработанной эоархейской коры на Анабарском щите (Сибирский кратон) / Н.И. Гусев, **Л.Ю. Сергеева**, С.Г. Скублов // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 78. – С. 40–57.
6. Реликты эоархейской континентальной коры Анабарского щита, Сибирский кратон / Н.И. Гусев, **Л.Ю. Сергеева**, А.Н. Ларионов, С.Г. Скублов // Петрология. – 2020. – Т. 28, № 2. – С. 115–138.
7. **Сергеева, Л.Ю.** U-Pb возраст и геохимия детритового циркона из кварцитов далдынской серии (Анабарский щит) / Л.Ю. Сергеева, Н.И. Гусев, С.Г. Скублов // Геохимия. – 2020. – Т. 65, № 6. – С. 609–617.
8. Gusev N.I. Dating the sedimentary protolith of the Daldyn Group quartzite, Anabar Shield, Russia: New Detrital Zircon Constraints / N.I. Gusev, **L.Y. Sergeeva**, S.G. Skublov // Geosciences. – 2020. – Vol. 10 (6). – 208.
9. Гусев Н.И. Свидетельства субдукции палеопротерозойской океанической коры в Хапчанском поясе Анабарского щита Сибирского кратона / Н.И. Гусев, **Л.Ю. Сергеева**, С.Г. Скублов // Петрология. – 2020. – Т. 29, № 2. – С. 115–135.

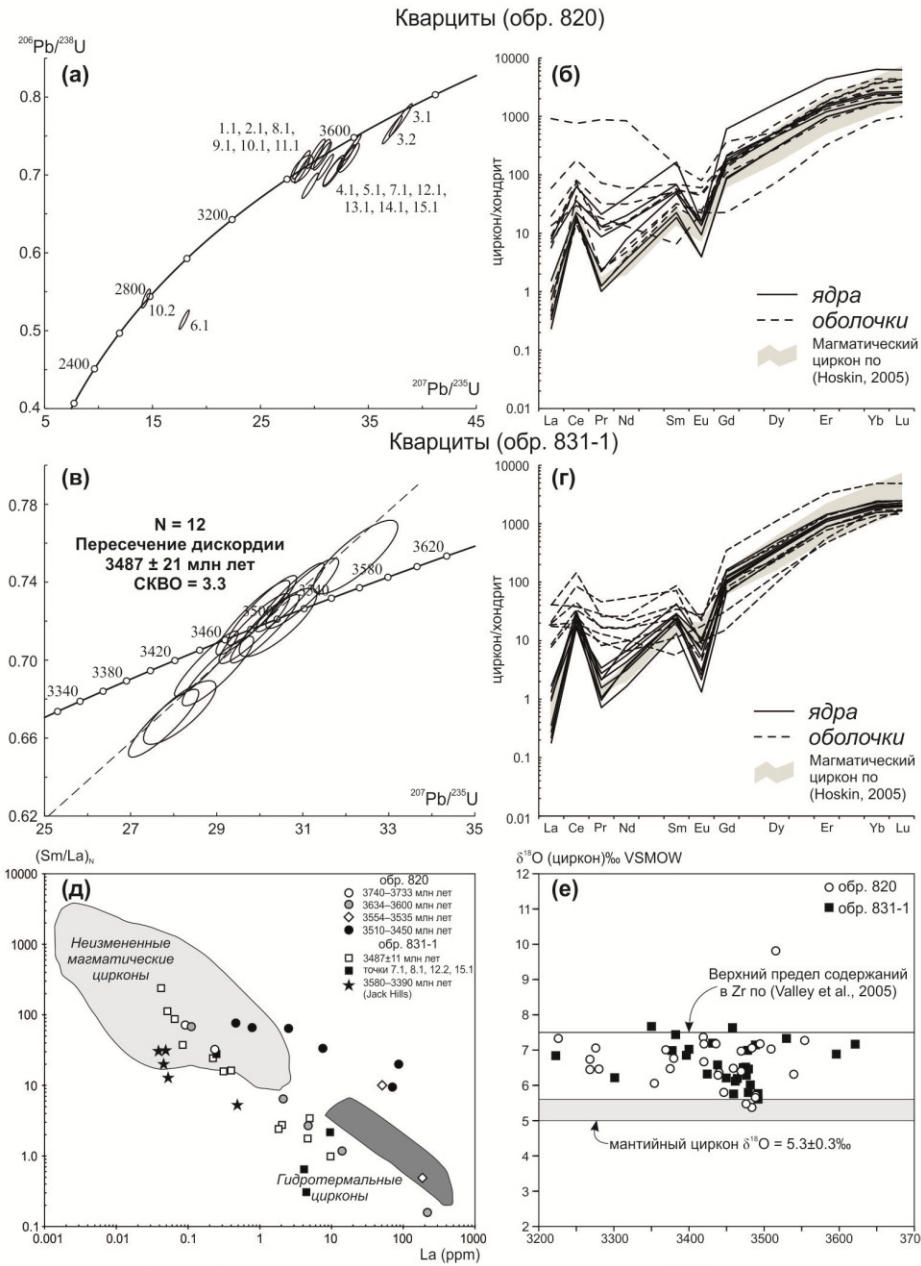


Рисунок 2 – Диаграмма с конкордией и спектры распределения REE для циркона из кварцитов (а, б); соотношение La и  $\text{Sm}_n/\text{La}_n$  (д); изотопный состав кислорода в цирконе (е)

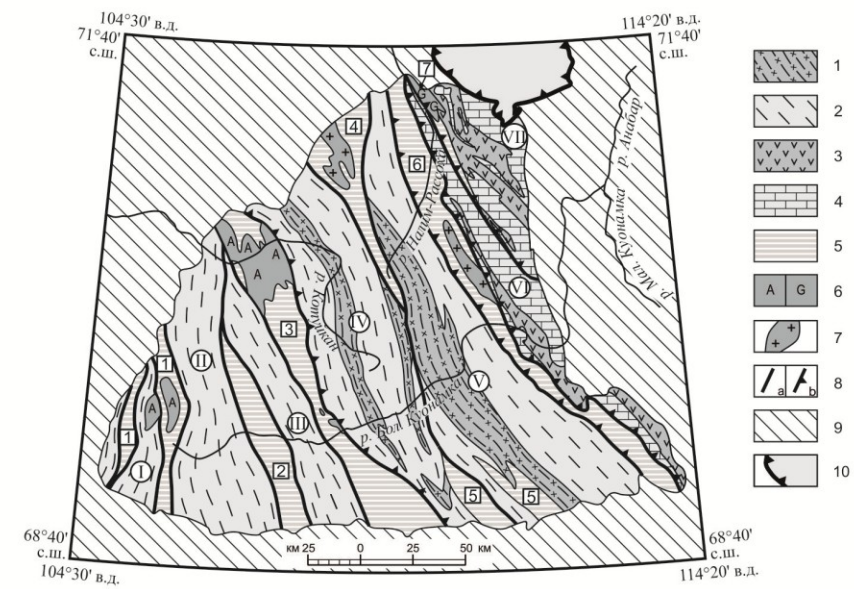


Рисунок 1 – Схема тектонического строения Анабарского щита. 1 – далдынская серия; 2 – верхнеанабарская серия; 3, 4 – палеопротерозойский гранулитовый Хапчанский пояс; 5 – зоны смятия; 6, 7 – интрузивные образования; 8 – главные разломы и надвиги; 9 – платформенный чехол; 10 – Попигайская астроблема. Римские цифры: в кружках – гранулитовые террейны, в квадратах – зоны смятия

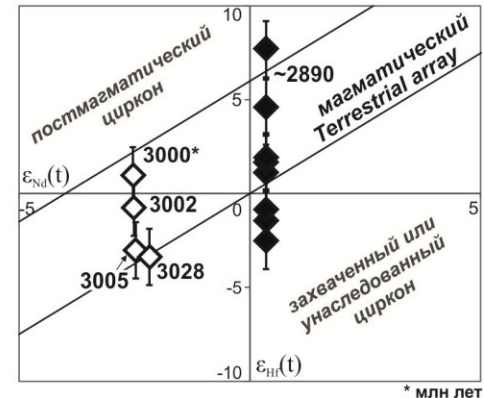


Рисунок 3 – Диаграмма  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Tm}}(t)$  для Vt-Нур-кристаллосланца (обр. 508) и Grt-Нур-амфиболита (обр. 166) (на основе диаграммы (Лохов и др., 2009))

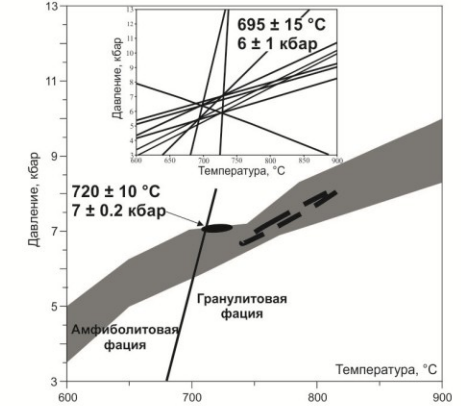


Рисунок 4 – Поле устойчивости минеральных парагенезисов (серая заливка) для системы MnNCMFATSH при  $a_{\text{H}_2\text{O}} = 0.8$

Гранат-гиперстеновый плагиокристаллосланец (обр. 174)

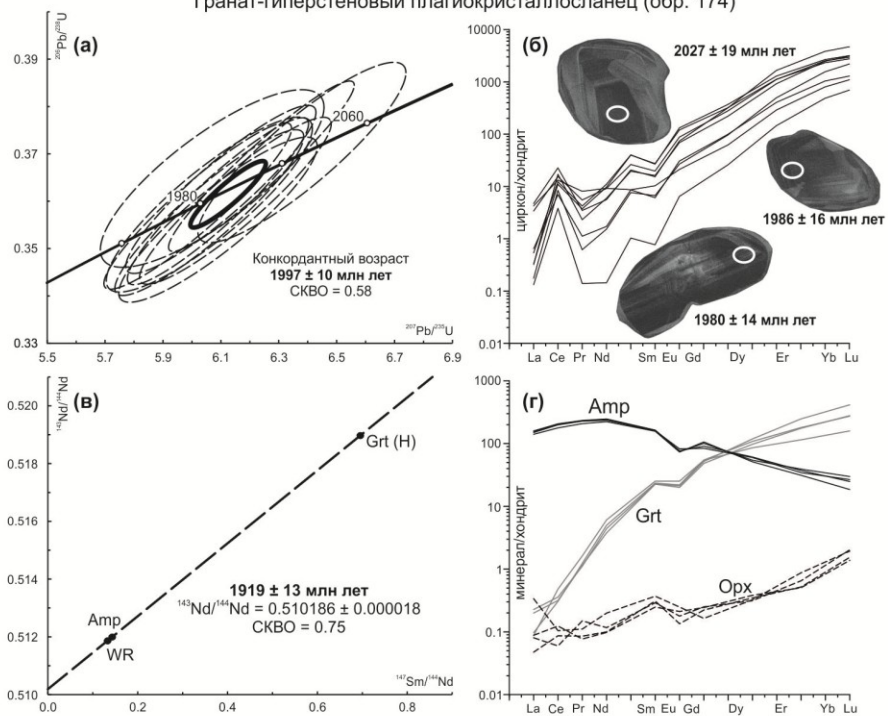


Рисунок 5 – Диаграмма с конкордией (а) и спектры распределения REE (б) для циркона; Sm-Nd изохрона (v); спектры распределения REE для породообразующих минералов (r)