

На правах рукописи

Мамыкина Мария Евгеньевна



**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВОЗРАСТ И УСЛОВИЯ
ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИТОИДОВ
БЕЛОКУРИХИНСКОГО МАССИВА (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

*Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография.
Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых*

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Скублов Сергей Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Холоднов Владимир Васильевич

доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория петрологии магматических формаций, главный научный сотрудник;

Баданина Елена Васильевна

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

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится **18 апреля 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.3 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 февраля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ГУЛЬБИН
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проблема происхождения и эволюции гранитоидных магм является одной из ключевых в современной магматической петрологии и геохимии (Chappel, White, 1974, 2001; Коваленко, 1977; Таусон, 1977; Бескин и др., 1979; Cerný et al., 1985; Frost et al., 2001; Коваль, 1998; Летников, 2003; Ярмолук, Коваленко, 2003; London, 2008; Алексеев, 2014; Wu et al., 2017; Крук, 2018; Бескин, Марин, 2019; Марин и др., 2023). Понимание механизмов генерации гранитоидных расплавов, их источников, закономерностей и путей эволюции дает бесценную информацию, необходимую для решения целого ряда проблем, начиная от самых глобальных (становление и геологическая история континентальной коры, корово-мантийное взаимодействие) и заканчивая региональными и прикладными, включая вопросы формирования месторождений полезных ископаемых (Добрецов и др., 2001; Летников, 2006; Condie et al., 2009; Johannes, Holtz, 2012; Nédélec, Bouchez, 2015).

Алтайский регион характеризуется широким распространением различных типов гранитов, типизация которых не имеет однозначного решения (Леонтьев, 1969; Владимиров и др., 1997, 2001; Гусев и др., 2008; Табакаева, 2011; Gavryushkina et al., 2017; Гаврюшкина, 2021). Появление современных минералого-геохимических и изотопно-геохимических, в том числе и локальных, аналитических методов исследования позволяет по-новому взглянуть на решении проблем возраста, петрогенезиса и геодинамических обстановок формирования различных типов гранитов. В связи с этим не вызывает сомнений актуальность проведения комплексного исследования, остающегося недостаточно изученным многофазного Белокурихинского массива, который является петротипом анорогенных и постколлизийных гранитоидов Горного Алтая.

Степень разработанности темы исследования

В изучение геологического строения, петрологии и геохимии гранитоидных массивов белокурихинского комплекса Горного Алтая, в состав которого входит Белокурихинский массив, и связанного с ними оруденения значительный

вклад внесли исследования Н.Н. Амшинского, Н.А. Берзина, А.Г. Владимирова, Е.В. Волбенко, О.А. Гаврюшкиной, А.И. Гусева, Н.И. Гусева, И.С. Дубинина, Н.И. Дурмановой, Ю.В. Емельяновой, И.И. Заболотниковой, А.Н. Леонтьева, И.П. Комарова, В.Н. Коржнева, В.А. Кривчикова, Н.Н. Крука, В.И. Крупчатникова, А.П. Пономарёвой, Е.М. Табакаевой, М.А. Усова, С.П. Шокальского. Тем не менее, несмотря на более чем полувековую историю исследования Белокурихинского массива, ряд вопросов, касающихся геохронологии и условий образования гранитоидов массива, остается недостаточно изученным.

Комплексное использование прецизионных и локальных методов (SIMS, ID-TIMS, SEM-EDS, EPMA) позволяет установить возраст и условия петрогенезиса, выявить новые закономерности и особенности поведения редких и редкоземельных (REE) элементов в процессах гранитоидного магматизма на минеральном и породном уровнях.

Объектом исследования являются гранитоиды Белокурихинского массива и содержащиеся в них минералы.

Предмет исследования изотопно-геохимические и минералого-геохимические характеристики гранитоидов Белокурихинского массива и входящих в их состав минералов.

Цель работы заключается в определении возраста и условий образования гранитоидов Белокурихинского массива на основе комплексного изотопно-геохимического и минералого-геохимического изучения гранитоидов и входящих в их состав акцессорных (циркона, титанита) и породообразующих минералов

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

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

2. Датирование циркона и титанита из гранитоидов U-Pb методом, исследование распределения редких и редкоземельных элементов в этих минералах.

3. Проведение Rb-Sr и Sm-Nd изотопного исследования. Оценка продолжительности формирования Белокурихинского массива.

4. Определение P-T параметров кристаллизации гранитоидов.

5. Построение модели дифференциации гранитоидов массива на основе фракционной кристаллизации.

Научная новизна:

1. Установлено закономерное изменение от ранней к поздней фазе состава гранитоидов Белокурихинского массива в отношении несовместимых элементов и ряда минералов (циркон, биотит, калиевый полевой шпат и плагиоклазы), а также индикаторных отношений редких элементов, обусловленное процессами фракционной кристаллизации.

2. Впервые для гранитоидов массива проведена оценка P-T параметров кристаллизации и диапазон их изменения на основе комплекса независимых минеральных геотермометров и барометров.

3. Впервые локальным U-Pb методом по циркону (SHRIMP-II) для гранитоидов трех фаз массива определен возраст кристаллизации, который подтверждает временной интервал формирования массива в пределах 255-245 млн лет.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых по пунктам 2, 3, 13, 15 и 18.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведенное исследование вносит определенный вклад в решение научных проблем магматизма и генезиса гранитоидов, условий их формирования и геохронологии.

Полученные результаты исследования Белокурихинского массива были использованы в отчетных материалах НИР ИГГД РАН «Совершенствование изотопных методов датирования докембрийских комплексов и разработка новых геохимических подходов использования минералов-геохронометров» (№ FMUW-2022-0005), что зафиксировано в акте внедрения от 13 мая 2024 г.

Материалы диссертационного исследования могут быть использованы при проведении геологического картирования и постановке работ по датированию гранитоидов и их последующей интерпретации. Результаты возможно применять в методических целях в учебных курсах «Общая геохимия» и «Изотопная геохимия».

Методология и методы исследования

В основе диссертационной работы лежит каменный материал, отобранный автором в ходе полевых работ 2019-2021 г. Кроме того, в работе использовались образцы гранитов (3 образца), предоставленные А.И. Гусевым и Н.И. Гусевым.

Изученная опорная коллекция состоит из 35 образцов гранитоидов, характеризующих северную часть массива. Химический состав пород по главным элементам определён методом XRF (ARL-9800, ВСЕГЕИ), содержание редких и редкоземельных элементов – методом ICP-MS (ELAN-DRC-6100, ВСЕГЕИ) по стандартным методикам (35 анализа). Изотопный анализ пород и титанита проводился методом ID-TIMS в ИГГД РАН на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI (Rb-Sr система – 9 проб (порода в целом и породообразующие минералы), Sm-Nd система – 9 проб (порода в целом), U-Pb система – 2 пробы титанита).

Состав породообразующих и акцессорных минералов определён методом SEM-EDS на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200 (примерно 340 точек в 94 зернах в 8 образцах). Кроме того, состав циркона был изучен на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL-JXA-8230 с тремя волнодисперсионными спектрометрами. Анализ породообразующих (плагиоклазов, калиевого полевого шпата, биотита, мусковита, кварца) и акцессорных (циркона, титанита и граната) минералов на содержание редких и редкоземельных элементов (примерно 140 точек в 70 зернах в 8 образцах) выполнен методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН РАН. Локальное датирование циркона U-Pb методом проведено на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (4 пробы, 59 точек). Изотопный состав кисло-

рода в цирконе определён в Институте геологии и геофизики Китайской академии наук на ионном микрозонде Cameca IMS-1280 (2 пробы, 27 точек). Аналитические методики приведены в соответствующем разделе диссертации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Лейкограниты третьей фазы Белокурихинского массива относятся к высокофракционированным гранитам и характеризуются закономерным, по сравнению с гранитоидами первой и второй фаз, понижением содержания ряда редких элементов (REE, Sr, Ba, V, Zn, Zr, Hf) и индикаторных отношений (Zr/Hf, Nb/Ta, Sr/Rb) и повышением содержания Rb.

2. U-Pb возраст циркона из трех фаз гранитоидов Белокурихинского массива и возраст титанита из первой фазы показывает, что гранитоиды массива формировались в интервале 255-245 млн лет.

3. Краевые зоны циркона из второй и третьей фазы гранитов Белокурихинского массива обогащаются LREE, Th, U, Hf и Li в процессе его кристаллизации по причине обогащения остаточного расплава несовместимыми элементами. Аномальное обогащение несовместимыми элементами установлено для циркона из лейкогранитов третьей фазы (REE до 38000 ppm, Y до 50000 ppm, U до 24000 ppm, вода до 3.5 мас.%).

Степень достоверности результатов исследования подкреплена опробованием гранитоидов Белокурихинского массива лично автором и представительностью каменного материала; использованием аналитических данных, полученных в аккредитованных лабораториях; применением современных технологий обработки и интерпретации данных.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Молодёжная научная школа-конференция, посвящённая памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (2020 и 2023 гг., Санкт-Петербург; 2022 г., Апатиты); Geological International Student Summit (2021 г., Санкт-Петербург); Всероссийский форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные

проблемы недропользования» (2021 г., Санкт-Петербург); Международный молодежный научный форум «Ломоносов» (2021 г., Москва); Всероссийская молодежная конференция, посвященная 110-летию член-корреспондента АН СССР М.М. Одинцова «Строение литосферы и геодинамика» (2021 г., Иркутск); Российская конференция по изотопной геохронологии «Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов» (2022 г., Санкт-Петербург); Годичное собрание Российского минералогического общества и Фёдоровская сессия (2023 г., Санкт-Петербург); XI международная конференция молодых ученых «Молодые – Научкам о Земле» (2024 г., Москва).

Личный вклад автора заключается в проведении всех этапов исследования: постановке цели и определении задач; самостоятельном отборе каменного материала; активном участии в выполнении аналитических работ; в анализе научной литературы по теме исследования; обработке, интерпретации и апробации результатов.

Публикации

Результаты диссертационного исследования освещены в 10 печатных работах, в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка, состоящего из 208 наименований, и приложений. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 21 таблицу и 6 приложений.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю С.Г. Скублову за всестороннюю поддержку, чуткое руководство и проявленное терпение. Автор благодарен за предоставление каменного материала и за об-

суждение результатов исследования А.И. Гусеву, Н.И. Гусеву и А.В. Березину. За проведение аналитических работ автор признателен О.Л. Галанкиной, Е.С. Богомолу, Н.Г. Ризвановой, Н.А. Сергеевой (ИГГД РАН), С.Г. Симакину, Е.В. Потопову (ЯФ ФТИАН РАН), Ч.-Л. Ли, С.-Х. Ли (IGG CAS).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрено состояние проблемы исследования гранитоидного магматизма и представлена общая информация о геологическом строении района и объекте исследования – гранитоидах Белокурихинского массива.

Во второй главе описаны использованные в работе аналитические методы.

В третьей главе приведена петрографическая и геохимическая характеристика исследуемых пород, рассмотрен состав породообразующих минералов, как по главным, так и по редким и редкоземельным элементам.

В четвертой главе, основной главе диссертационной работы, обсуждаются результаты датирования циркона и титаниста (U-Pb система) и их редкоэлементный состав, а также данные по Rb-Sr и Sm-Nd изотопным системам.

В пятой главе рассмотрена геохронология Белокурихинского массива (обобщение результатов датирования и оценка продолжительности магматических процессов) и условия его образования (изотопный состав кислорода в цирконе, R-T параметры, дифференциация в результате фракционной кристаллизации).

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

Краткая характеристика объекта исследования

Белокурихинский массив, входящий в состав одноименного комплекса, расположен в северной части Горного Алтая

(рисунок 1а). Гранитоиды Белокурихинского массива развиты в междуречье Ануй-Песчаная и включают восточную (основную) часть петротипического Белокурихинского массива и более мелкие Осокинский, Сосновский, Точильный и Курановский штоки (Волбенко, Гусев, 2015). Исследуемый массив относится к позднепалеозойско-мезозойским магматическим образованиям и зародился на заключительном (плюмовом) этапе формирования Горного Алтая (Крук и др., 2017).

Белокурихинский массив прорывает вулканогенно-осадочные отложения кембрий-ордовикского возраста и терригенные отложения раннедевонского возраста. Предполагаемая мощность массива (имеющего форму лакколита) составляет 2-3 км. В Белокурихинском массиве выделяют три фазы внедрения с четко проявленными контактами между ними: 1) гранодиориты, которые встречаются в северной части массива и занимают примерно 10% от площади массива; 2) биотитовые граниты, развитые по всей территории массива, занимают около 70%; 3) мусковитовые лейкограниты, занимают примерно 20% (Гусев и др., 2008). Жильные образования представлены редкими дайками аплитовидных микрогранитов, жилами аплитов и пегматитов (Государственная..., 2011).

К первой фазе относятся крупно- и среднезернистые гранодиориты светло-серого цвета с порфирированной структурой (среди основной массы встречаются крупные зерна калиевого полевого шпата размером до 3 см). Основная масса сложена плагиоклазом (35%), калиевым полевым шпатом (15%), кварцем (25%) и темноцветными минералами (роговой обманкой – 5%, биотитом – до 10%). Акцессорные минералы представлены титанитом, апатитом, цирконом. Кристаллы циркона (размером до 0.05 мм) встречаются в виде включений в биотите, развиты в основной массе на контактах кварца с плагиоклазом и калиевым полевым шпатом. Вторичные изменения проявлены в серицитизации плагиоклаза и хлоритизации биотита.

Вторая фаза представлена среднезернистыми биотитовыми гранитами, в состав которых входят кварц (30%),

плагиоклаз (25%), калиевый полевой шпат (25%) и биотит (8%). Акцессорные минералы – апатит и циркон (с размером кристаллов до 0.01 мм). Порода практически не затронута вторичными изменениями.

Третья фаза представлена мелкозернистыми мусковитовыми лейкогранитами, в состав которых входят калиевый полевой шпат (35%), кварц (35%), плагиоклаз (20%), мусковит (10%); темноцветные минералы отсутствуют. Акцессорные минералы: апатит, гранат (спессартин), циркон (с размером кристаллов до 0.01 мм), единичные зерна флюорита и топаза.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Лейкограниты третьей фазы Белокурихинского массива относятся к высокофракционированным гранитам и характеризуются закономерным, по сравнению с гранитоидами первой и второй фаз, понижением содержания ряда редких элементов (REE, Sr, Ba, V, Zn, Zr, Hf) и индикаторных отношений (Zr/Hf, Nb/Ta, Sr/Rb) и повышением содержания Rb.

Гранитоиды массива отличаются повышенной железистостью (рисунок 1б), по индексу насыщения глиноземом они располагаются в полях метаалюминиевых и умеренно пералюминиевых гранитов (рисунок 1в). Рассмотрение традиционных диаграмм Харкера позволяет сделать вывод об общих закономерностях дифференциации гранитного расплава (повышение кремнекислотности от ранних фаз к поздним и понижение содержания оксидов Ti, Al, Mg, Fe, Ca, P). На большинстве дискриминационных диаграмм, включая разработанные и для минералов (например, для биотита, рисунок 1г), гранитоиды массива попадают в область гранитов А-типа. На ряде диаграмм (например, $Zr+Nb+Ce+Y-10000 \times Ga/Al$, рисунок 1д) составы соответствуют эволюционному тренду гранитов А-типа.

От первой к третьей фазе закономерно понижается содержание REE (здесь и ниже в среднем, 260–180–40 ppm), глубина Eu-аномалии возрастает (Eu/Eu* составляет 0.61–0.41–0.16, рисунок 1е). Также установлена вариабельность для ряда

редких элементов, связанная с магматической дифференциацией материнского расплава (рисунок 1ж). Зафиксирован рост содержания (от первой к третьей фазе) для Rb (от 150 до 290 ppm), понижение – для Sr (от 345 до 30 ppm), Ba (от 480 до 20 ppm), Zr (от 330 до 20 ppm), Hf (от 7 до 2 ppm), Zn (от 50 до 20 ppm), V (от 50 до 1 ppm) и Th (от 14 до 5 ppm).

В итоге предложена модель формирования Белокурихинского массива гранитоидов (рисунок 2а), в основе которой лежит процесс фракционной кристаллизации, определяющий поведение индикаторных элементов и, в свою очередь, контролируемый наличием минералов-концентраторов соответствующих элементов. При кристаллизации гранитоидов первой фазы в состав кристаллизующихся плагиоклазов и калиевого полевого шпата входят Sr и Ba, циркона – Zr и Hf, биотита – V и Zn. Соответственно, остаточный расплав, из которого будут кристаллизоваться следующие фазы, обедняется перечисленными элементами и обогащается более несовместимым Rb.

Вторая фаза гранитов как по содержанию индикаторных редких элементов, так и по модальному (приблизительно оцененному) количеству концентрирующих их минералов, занимает промежуточное положение между первой и третьей фазой. Тренд изменения минерального состава состоит в уменьшении количества плагиоклаза, биотита, циркона за счет увеличения – калиевого полевого шпата, мусковита и кварца.

Граниты третьей фазы характеризуются минимальным содержанием Sr, Ba, Zr, Hf, Th, U и максимальным – Rb. От первой к третьей фазе последовательно уменьшаются значения геохимических индикаторов – отношений «родственных» элементов (Zr/Hf, Nb/Ta, Sr/Rb, Di и TEDI – индексы дифференциации, рисунок 2б-г), указывающие на сильно проявленную фракционную кристаллизацию (Wu et al., 2017). Рост амплитуды отрицательной Eu-аномалии определяется фракционированием плагиоклаза на ранних стадиях дифференциации массива. Понижение Zr/Hf отношения ниже хондритового уровня для гранитов третьей фазы не исключает переход от магматической системы к «гидротермальной» (Ван, 1996), и дает основание считать граниты третьей фазы высокофракционированными (Breiter et al., 2014). Значение Nb/Ta

отношения менее 5 для ряда образцов лейкогранитов указывает на их потенциальную редкометалльную рудоносность (Wu et al., 2017).

Ранее было установлено, что гранаты, присутствующие в высокофракционированных гранитах и пегматитах, как правило, содержат значительное количество Mn (Yu et al., 2021), отличаясь этим от гранатов из недостаточно эволюционировавших пород (London, 2008; Müller et al., 2012). Состав граната из лейкогранитов (обр. 202015) следующий (мол.%): Sps – 52, Alm – 46, Py + Grs – < 3. По соотношению MnO и CaO (рисунок 2е) фигуративные точки спессартина попадают в поле гранатов из высокофракционированных гранитов и пегматитов (Yu et al., 2021). Спектры распределения REE в спессартине отличаются дифференцированным характером с возрастанием содержаний от легких к тяжелым REE (рисунок 2д), на них проявлена глубокая отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0.01$). Следует отметить высокое содержание Hf (60 ppm). По характеру распределения REE гранат из лейкогранитов соответствует магматическим гранатам из гранитов других регионов (Zhou et al., 2017), попадая в поле гранатов из гранитов А-типа по соотношению содержания оксидов Fe, Mn и Mg (Sami et al., 2020, рисунок 2ж).

На поздней стадии дифференциации гранитного расплава на него воздействовал флюид, контактировавший с (мета)осадочными породами, вмещающими массив. В пользу этого предположения говорит утяжеленный изотопный состав кислорода в цирконе. Также нельзя исключать контаминацию метаосадочным веществом рифейского возраста, на что указывает присутствие детритового циркона в обр. ТНЗ-1 (Скублов и др., 2024). Для ряда гранитов третьей фазы установлены аномально высокие значения $^{87}Sr/^{86}Sr(T)$ (рисунок 2з) и значения Nd-модельного возраста (от 0.86 до 0.99 млрд лет). Близкие значения ϵ_{Nd} для гранитоидов всех трех фаз указывают на единый магматический источник и правомочность отнесения штоков лейкогранитов третьей фазы к Белокурихинскому массиву.

От первой к третьей фазе температура кристаллизации менялась от 820-770°C до 700-650°C. Можно оценить степень

понижения температуры по мере дифференциации магмы от первой и третьей фазы гранитов – как 100-150°C. Параметры давления в ходе кристаллизации гранитоидов массива составляли 3-6 кбар, что отвечает уровню средней коры.

Фракционирование редких элементов проявлено и на минеральном уровне. От ранней к поздней фазе калиевый полевой шпат, биотит и мусковит обогащаются Rb; плагиоклаз и калиевый полевой шпат обедняются Sr и Ba; биотит и калиевый полевой шпат обогащаются Li; биотит обедняется V. Основной причиной наблюдаемых закономерностей является обеднение расплава примесями на предшествующей стадии, в процессе кристаллизации минералов-концентраторов данных элементов.

2. U-Pb возраст циркона из трех фаз гранитоидов Белокурухинского массива и возраст титанита из первой фазы показывает, что гранитоиды массива формировались в интервале 255-245 млн лет.

Из ранее опубликованных данных по возрасту Белокурухинского массива следует отметить результаты датирования слюд из гранитов второй и третьей фазы Ar-Ar методом (по биотиту – 250 ± 2.7 млн лет, по мусковиту из пегматитов Точильного штока – 247 ± 3 млн лет, по мусковиту из лейкогранитов Осокинского штока – 250 ± 3.5 млн лет), которые совпадают в пределах погрешности и составляют около 250 млн лет (Gavryushkina et al., 2017). Однако Ar-Ar система по слюдам уступает U-Pb системе по циркону при определении возраста кристаллизации магматических пород: Ar-Ar система имеет существенно более низкую температуру закрытия (около 500°C) относительно циркона – самого надежного минерала-геохронометра (Villa, 1998). Кроме того, слюды зачастую подвержены поздне- и постмагматическим изменениям. Ранее проведенное (Владимиров и др., 1997) датирование циркона из порфириовидных биотитовых гранитов (второй?) фазы было выполнено по навеске зерен «классическим» методом, не учитывающим возможную гетерогенность циркона, при этом определения возраста не получились конкордантными. По верхнему пересечению дискордии был получен возраст 232 ± 4.7 млн лет, существенно отличающийся от результатов датирования слюд Ar-Ar методом.

Нами было проведено определение U-Pb возраста титанита из гранитоидов первой фазы методом ID-TIMS, которое дало конкордантное значение возраста 255 ± 2 млн лет (рисунок 3а). По геохимическим характеристикам, включая характер распределения REE (рисунок 3б), генезис титанита является магматическим (Скублов и др., 2021).

Датирование циркона из гранитоидов всех трех фаз осуществлялось локальным U-Pb методом на ионном зонде высокого разрешения SHRIMP-II, выбор точек основывался на катодоллюминесцентных (CL) изображениях зерен, при расчете возраста учитывался редкоэлементный состав циркона.

Возраст циркона из гранитоидов первой фазы (обр. 2020-13) был определен по точкам из центральных частей зерен с ростовой полосчатой осцилляционной зональностью и без черных в CL кайм. Конкордантный возраст составил 249 ± 3 млн лет (MSWD = 0.15, рисунок 3в).

Циркон из гранитов второй фазы (обр. ТН1-2) образует на диаграмме с конкордией единый кластер со значением конкордантного возраста 247 ± 2 млн лет (MSWD = 1.12, рисунок 3г). Отметим, что диапазон индивидуальных значений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возраста для точек из центральной части зерен находится в достаточно узком интервале 244-251 млн лет.

Циркон из лейкогранитов третьей фазы (обр. 2424) на диаграмме с конкордией занял широкий диапазон от 225 до 280 млн лет. Для определения возраста кристаллизации циркона потребовалась селекция точек, учитывая возможное омоложение возраста по причине потери радиогенного свинца при частичной метамиктности, с одной стороны, и эффект «удревления» возраста для высокоурановых доменов циркона (White, Ireland, 2012), с другой стороны. Поэтому из расчета были исключены все внешние высокоурановые каймы. В результате было рассчитано значение конкордантного возраста 245 ± 3 млн лет (MSWD = 0.013, рисунок 3д).

Циркон из лейкогранитов третьей фазы Точильного штока (обр. 2016-5) показал значение конкордантного возраста 251 ± 2 млн лет (MSWD = 0.16).

Результаты датирования Rb-Sr методом не противоречат данным по циркону: для гранита второй фазы (обр. ТН1-2)

получена *Bt-Pl-WR* изохрона, возраст которой определен как 255 ± 8 млн лет (MSWD = 3.1).

С учетом приборных погрешностей определения возраста (для метода SIMS – 1-1.5 отн.%), возраст гранитоидов всех трех фаз Белокурихинского можно считать сближенным, находящимся в интервале от 255 до 245 млн лет (Скублов и др., 2024), что согласуется с данными Ar-Ar метода по слюдам (Gavryushkina et al., 2017).

3. Краевые зоны циркона из второй и третьей фазы гранитов Белокурихинского массива обогащаются LREE, Th, U, Hf и Li в процессе его кристаллизации по причине обогащения остаточного расплава несовместимыми элементами. Аномальное обогащение несовместимыми элементами установлено для циркона из лейкогранитов третьей фазы (REE до 38000 ppm, Y до 50000 ppm, U до 24000 ppm, вода до 3.5 мас.%).

Циркон из гранитоидов первой фазы (обр. 202013) характеризуется дифференцированным характером распределения REE с ростом содержаний от легких к тяжелым REE (рисунок 4а). Суммарное содержание Σ REE составляет 1700 ppm, отношение Lu_N/La_N – 950, хорошо проявлены отрицательная Eu- ($\text{Eu}/\text{Eu}^* - 0.27$) и положительная Ce-аномалия ($\text{Ce}/\text{Ce}^* - 11$), содержание U равно 480 ppm, Th – 340 ppm, $\text{Th}/\text{U} - 0.51$, Li – 7.8 ppm. Перечисленные признаки являются характерной чертой циркона магматического генезиса (Belousova et al., 2002). Содержание Hf составляет 12000 ppm, что отвечает циркону из гранитоидов. Наблюдается ростовая осцилляционная зональность в CL, а также наименьшее содержание Ca, которое является критерием ненарушенности изотопно-геохимических характеристик. Количество циркона с повышенным содержанием несовместимых элементов для первой фазы минимальное.

Циркон из гранитов второй фазы (обр. TH1-2) отличается гетерогенным строением, почти во всех зернах присутствует краевая зона (шириной до 40 мкм) с черной окраской в CL. Спектры распределения REE в центральных частях характеризуются дифференцированным характером распределения от легких к тяжелым REE (рисунок 4б). Отношение Lu_N/La_N составляет 2600, суммарное содержание Σ REE – 1500 ppm, про-

явлены отрицательная Eu- ($Eu/Eu^* = 0.29$) и положительная Ce-аномалия ($Ce/Ce^* = 26.7$), содержание U равно 560 ppm, Th – 320 ppm, Th/U – 0.58, Hf – 11300 ppm. Черные в CL краевые зоны отличаются повышенным содержанием U (4250 ppm) и Th (1200 ppm), Th/U равно 0.30. Также они отличаются повышенным содержанием Li (54 ppm), в центральных частях кристаллов содержание Li на порядок ниже (4.4 ppm). Спектры распределения REE отличаются пологим характером ($Lu_N/La_N = 190$), за счет повышенного содержания легких REE, $\Sigma REE = 2150$ ppm. Хорошо проявлена отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0.22$). Положительная Ce-аномалия, напротив, в значительной степени редуцирована ($Ce/Ce^* = 3.54$). Содержание Hf повышено (16100 ppm), как и содержание неформульных для циркона элементов – Ca, Sr, Ba, Ti. Для одной точки был установлен нетипичный для циркона отрицательный угол наклона спектра в области LREE. В итоге спектр приобрел форму «крыльев птицы», возможно, такая форма спектра является специфическим проявлением тетрадного эффекта в распределении REE, возникающего под воздействием флюида.

Циркон из лейкогранитов третьей фазы (обр. 2424) также характеризуется зональным строением зерен с темно-серой в CL центральной частью с тонкополосчатой ростовой осцилляционной зональностью и черной краевой зоной, мощность которой (до 50 мкм) максимальна на вершинах зерен. Спектры распределения REE в центральных частях характеризуются дифференцированным характером распределения от легких к тяжелым REE (рисунок 4в), отношение Lu_N/La_N составляет 1160, $\Sigma REE = 570$ ppm, проявлены отрицательная Eu- ($Eu/Eu^* = 0.27$) и положительная Ce-аномалия ($Ce/Ce^* = 28.2$), содержание U равно 370 ppm, Th – 110 ppm, Th/U – 0.36, Y – 740 ppm, Hf – 11750 ppm, Li – 6.0 ppm. Каймы циркона отличаются выположенным характером распределения REE, отношение Lu_N/La_N в них составляет 150, $\Sigma REE = 2080$ ppm, амплитуда Eu-аномалии не меняется ($Eu/Eu^* = 0.26$), положительная Ce-аномалия редуцирована ($Ce/Ce^* = 1.90$), содержание U равно 5450 ppm, Th – 800 ppm, Th/U – 0.15, Y – 740 ppm, Hf – 19300 ppm, Li – 73 ppm.

Среди циркона из другого образца лейкогранитов (обр. ТНЗ-1) была установлена популяция пористого циркона, наряду с цирконом с осцилляционной зональностью (Levashova et al., 2023). Пористый циркон отличается аномальным содержанием Y (до 50700 ppm), REE (до 38800 ppm), U (до 24700 ppm), повышенным содержанием Hf (до 50500 ppm), P (до 2800 ppm), воды (до 3.5 мас.%) и летучих компонентов (F – 3 900 ppm, Cl – 3000 ppm). Спектры REE в нем выположены в области LREE ($Sm_N/La_N - 3$, рисунок 4Г), Ce-аномалия в значительной степени редуцирована и меняет знак ($Ce/Ce^* - 0.51-1.62$), Eu-аномалия сохраняет отрицательные значения, Th/U – 0.03. Вторая разновидность циркона (зональный циркон) в целом имеет невысокое содержание примесей, более «магматический» тип спектров распределения REE, и геохимические индексы, соответствующие типичному магматическому циркону.

Среднее значение $\delta^{18}O$ в пористом цирконе составило 11.55‰ (9.22-12.54‰), что значительно выше мантийного значения (около 5.3‰) и выше значения $\delta^{18}O$ 6-8‰, установленного для типичного циркона из гранитоидов фанерозойского возраста (Valley et al., 2005). Можно предположить, что повышенные значения $\delta^{18}O$ обусловлены внешним воздействием флюидов, взаимодействовавших с (мета)осадочными породами.

При рассмотрении на дискриминационной диаграмме $La-Sm_N/La_N$ фигуративных точек циркона из гранитоидов Белокурихинского массива, разделенных по фазам, заметно значительное перекрытие их составов. В каждой фазе есть типичный магматический циркон и измененный циркон, имеющий геохимические черты «гидротермально-метасоматического» циркона, в частности, повышенное содержание легких REE и выположенный характер спектра в этой области. Соответственно, циркон был разделен на три геохимических типа: 1) отвечающий неизмененному магматическому циркону по уровню элементов-примесей и характеру спектра REE; 2) демонстрирующий флюидное воздействие (повышенное содержание несовместимых элементов, выположенный характер спектра REE в области легких REE с редуцированной Ce аномалией); 3) с аномальными геохимическими характеристиками (аномально

высокое содержание ряда неформульных элементов, нетипичный характер спектра REE).

Установлено, что циркон первого типа попадает в основном в поле магматического циркона и, частично, в область «пористого» циркона (рисунок 4д). Циркон второго типа попадает в области составов «пористого» и гидротермально-метасоматического циркона. Циркон третьего типа расположен обособленно, тяготея к полю циркона гидротермально-метасоматического типа. Циркон второго и третьего типов отличается от циркона первого типа повышенным содержанием Th и U (рисунок 4е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплексного минералого-геохимического и изотопно-геохимического исследования гранитоидов Белокурихинского массива (Горный Алтай) были определены возраст и условия образования пород массива.

Установлено, что гранитоиды массива дифференцированы от первой к третьей фазе с закономерным понижением содержания REE, Sr, Ba, V, Zn, Zr и Hf и ростом – Rb в результате фракционной кристаллизации минералов-концентраторов этих элементов – плагиоклазов, биотита и циркона в ранних фазах и калиевого полевого шпата в поздней фазе. Пониженные значения Zr/Hf, Nb/Ta и Sr/Rb отношений, как и присутствие спессартина, позволяют отнести лейкограниты третьей фазы к высокофракционированным гранитам.

Использование комплекса геотермометров и барометров позволило установить, что от первой к третьей фазе гранитоидов температура их кристаллизации менялась от 820-770°C до 700-650°C. Параметры давления в ходе кристаллизации гранитоидов Белокурихинского массива составляли 3-6 кбар, что отвечает уровню средней коры.

Для гранитоидов Белокурихинского массива величина $\epsilon_{Nd}(250)$ варьирует в сравнительно узком диапазоне положительных значений от 0.43 до 1.72 (в среднем 0.97), что говорит о вкладе как мантийной, так и коровой компоненты. Близкие значения ϵ_{Nd} для гранитоидов всех трех фаз указывают на единый магматический источник и правомочность отнесения

штоков лейкогранитов третьей фазы к Белокурихинскому массиву.

Возраст трех фаз гранитоидов Белокурихинского массива, определенный по результатам изотопно-геохимического исследования U-Pb системы для циркона (SIMS метод) и титанита (ID-TIMS метод) находится в интервале 255-245 млн лет.

Краевые зоны и каймы циркона из второй и третьей фазы гранитов обогащаются LREE, Th, U, Hf и Li в процессе его кристаллизации по сравнению с центральными частями зерен, что отражает обогащение остаточного расплава несовместимыми элементами. Наибольшая степень обогащения этими элементами установлена для циркона из лейкогранитов третьей фазы.

В качестве перспективы продолжения исследования гранитоидов Белокурихинского массива запланировано количественное моделирование процессов фракционной кристаллизации на основе данных по содержанию редких и редкоземельных элементов в породах и минералах с помощью существующих программных комплексов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Скублов, С.Г. U-Pb возраст и редкоэлементный состав титанита из гранитов Белокурихинского массива, Горный Алтай / С.Г. Скублов, **М.Е. Мамыкина**, Н.Г. Ризванова // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24. – № 2. – С. 168-177.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. Levashova, E.V. Geochemistry (TE, REE, Oxygen) of zircon from leucogranites of the Belokurikhinsky Massif, Gorny Altai, as indicator of formation conditions / E.V. Levashova, **М.Е. Мамыкина**, S.G. Skublov, O.L. Galankina, Q.L. Li, X.H. Li // *Geochemistry International*. – 2023. – V. 61. – P. 1323-1339.

3. Скублов, С.Г. Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона / С.Г. Скублов, Е.В. Левашова, **М.Е. Мамыкина**, Н.И. Гусев, А.И. Гусев // Записки Горного института. – 2024. – Т. 268. – С. 552-575

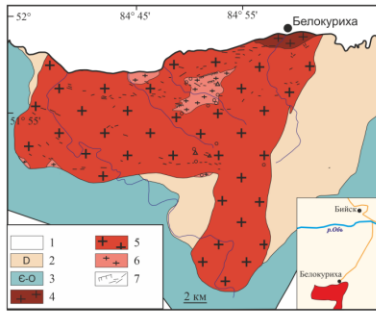


Рисунок 1а - Схема геологического строения Белокурихинского массива гранитов (по (Леонтьев,1969) с дополнениями автора) Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – терригенные отложения девона; 3 – отложения кембрия и ордовика; 4 – гранодиориты первой фазы; 5 – биотитовые граниты второй фазы; 6 – лейкограниты третьей фазы; 7 – пегматиты и кварцевые жилы.

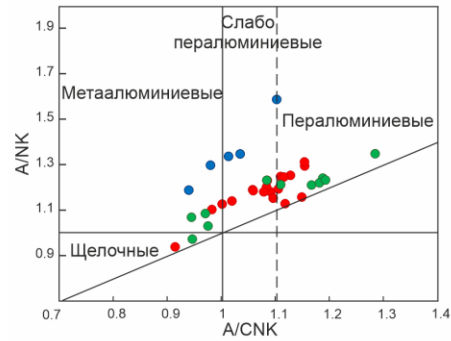


Рисунок 1в- Диаграмма A/NK - A/CNK (индекс насыщения глиноземом/индекс Шенда; Frost, Frost, 2011) с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

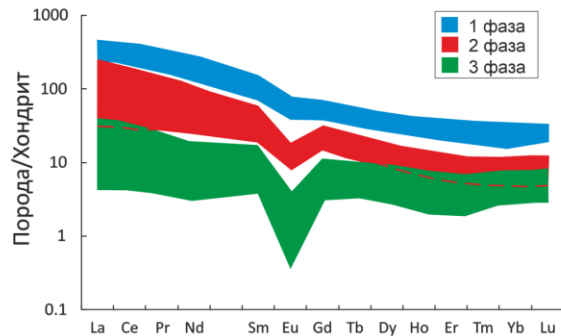


Рисунок 1е- Спектры распределения редкоземельных элементов в гранитоидах Белокурихинского массива, нормированные на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

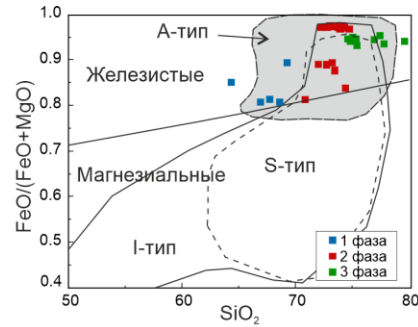


Рисунок 1б- Диаграмма железистости (Frost et al., 2001) с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

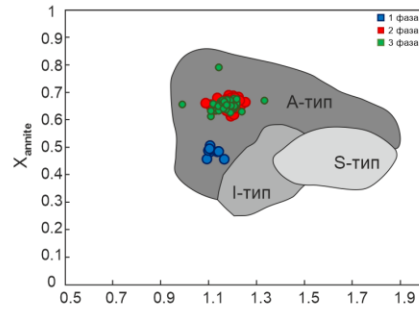


Рисунок 1г- Диаграмма соотношения общего алюминия и доли анититового компонента в биотите с полями для гранитов А-, S- и I-типа (Gion et al., 2022) с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

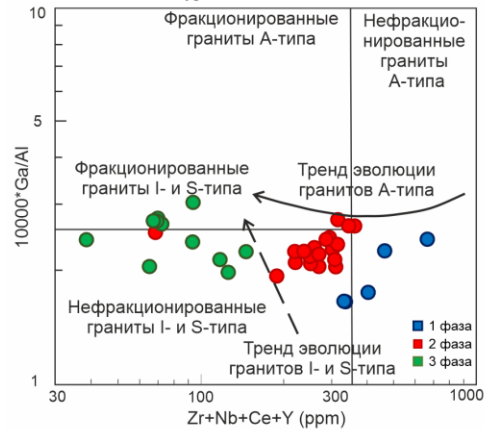


Рисунок 1д- Диаграмма $(Zr+Nb+Ce+Y)-10000*Ga/Al$ с полями для гранитов А-, S- и I-типа (Yang et al., 2023) и трендами эволюции гранитов А-типа (Landenberger et al., 1996) и S- и I-типа (Shuai et al., 2021) с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

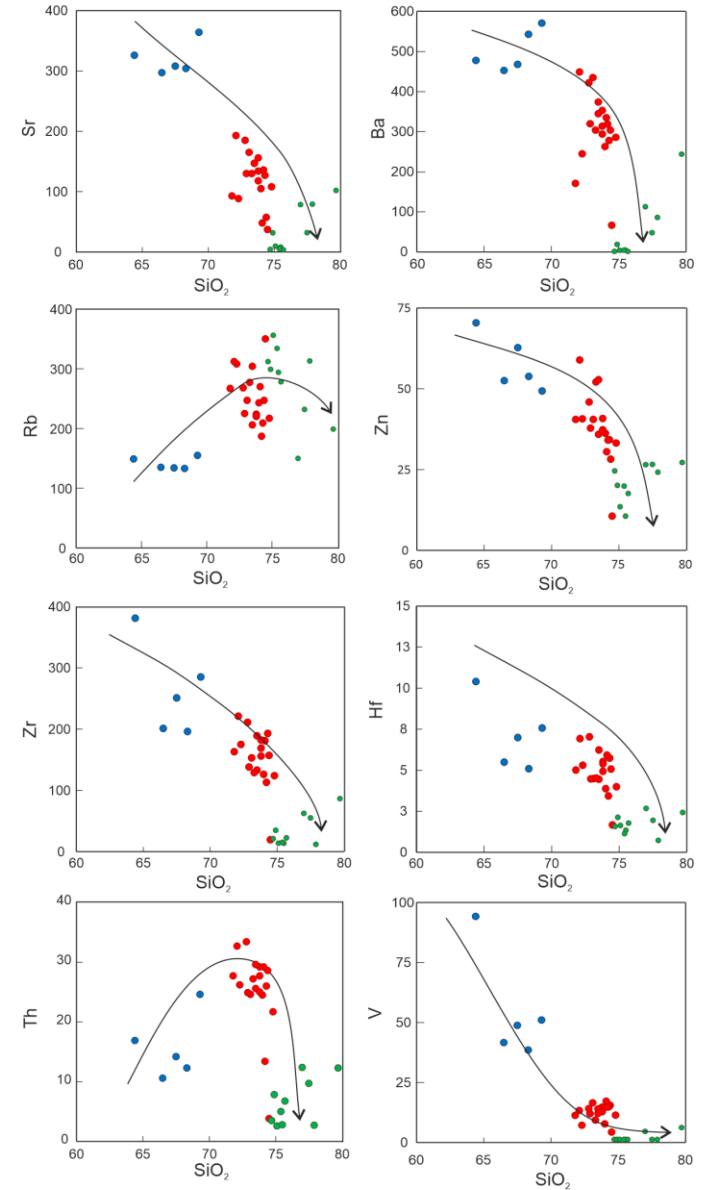


Рисунок 1ж - Диаграммы Харкера (Harker, 1909) для редких элементов (ppm) с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

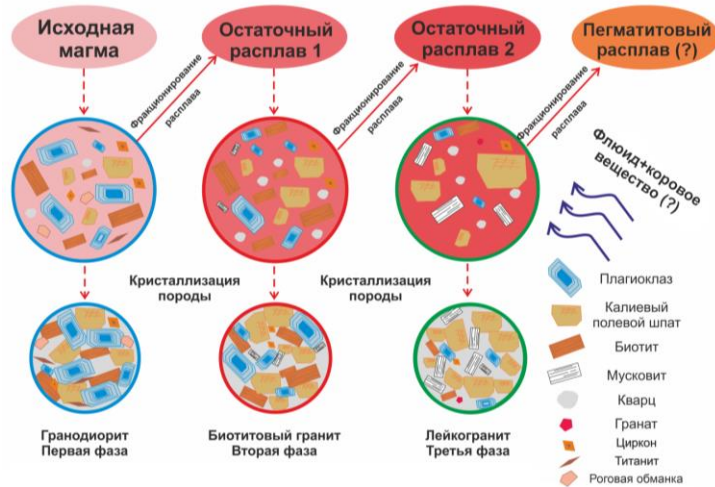


Рисунок 2а – Модель формирования гранитоидов Белокурихинского массива



Рисунок 2б – Диаграмма Zr/Hf–Nb/Ta (Breiter et al., 2014) с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

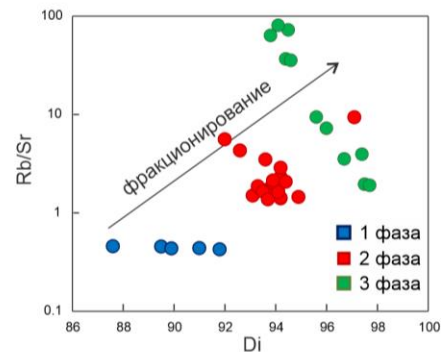


Рисунок 2в – Диаграмма Di (индекс дифференциации) – Rb/Sr с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

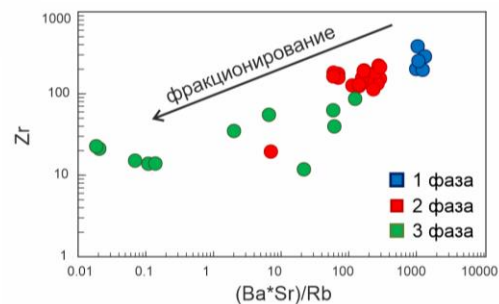


Рисунок 2г – Диаграмма TEDI (Ba*Sr)/Rb (индекс дифференциации) – Zr с фигуративными точками гранитоидов Белокурихинского массива

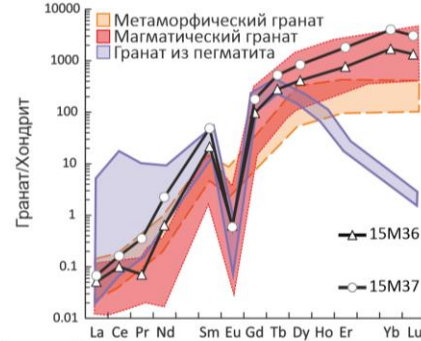


Рисунок 2д – Спектры распределения редкоземельных элементов в гранате из лейкогранитов третьей фазы (обр. 202015) с полем граната из пегматитов и граната магматического, метаморфического генезиса (Graupner et al., 2010; Zhou et al., 2017; Скублов, 2005)

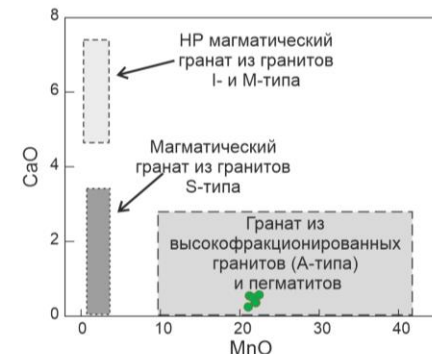


Рисунок 2е – Диаграмма MnO–CaO для граната из лейкогранитов Белокурихинского массива с полями для гранатов из гранитов M-, A-, S- и I-типа (Yu et al., 2021)

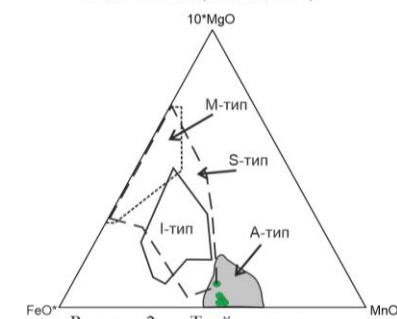


Рисунок 2ж – Тройная диаграмма FeO*–10*MgO–MnO с полями гранатов из гранитов M-, A-, S- и I-типа (Sami et al., 2020)

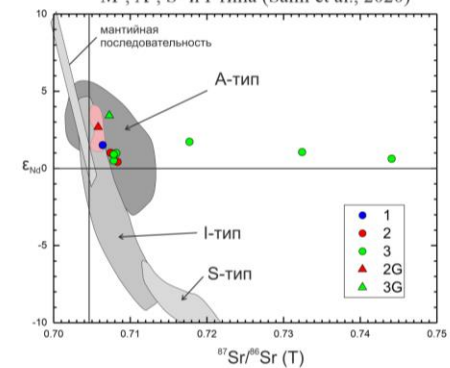


Рисунок 2з – Изотопные характеристики гранитоидов Белокурихинского массива в координатах $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(250)$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(250)$. Арабскими цифрами обозначена фаза гранитоидов. Розовым цветом закрашена область пермо-триасовых гранитоидных серий Алтая, точки с индексом Г для гранитов Белокурихинского массива – по данным О.А. Гаврюшкиной (2021) с полями A-, I-, S-типа гранитов (King et al., 1997).

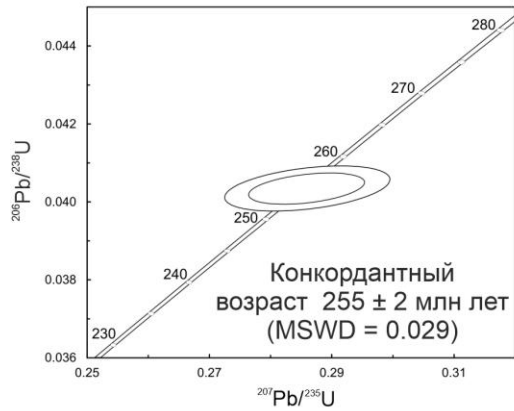


Рисунок 3а – Диаграмма с конкордией для титанита из гранодиоритов первой фазы Белокурихинского массива (обр. 202013)

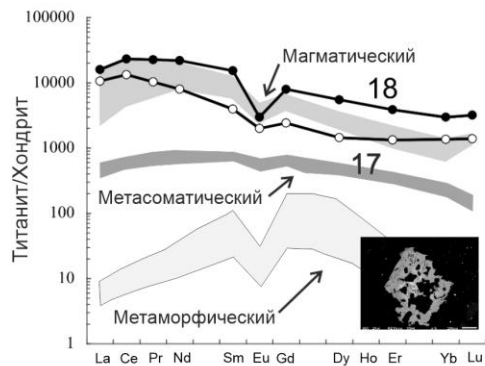
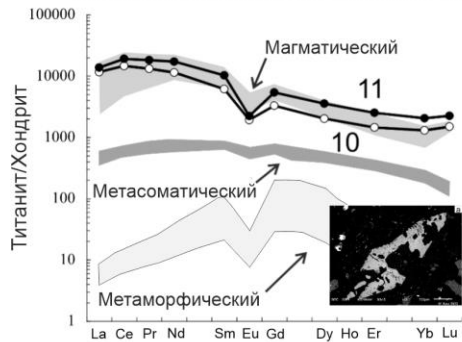


Рисунок 3б – Спектры распределения редкоземельных элементов в титаните из гранодиоритов первой фазы Белокурихинского массива (обр. 202013), нормированные на хондрит CI (McDonough, Sun, 1995) с полями для магматического (Матреничев и др., 2015), метаморфического (Mazdab et al., 2007) и метасоматического (Buick et al., 2007) титанита

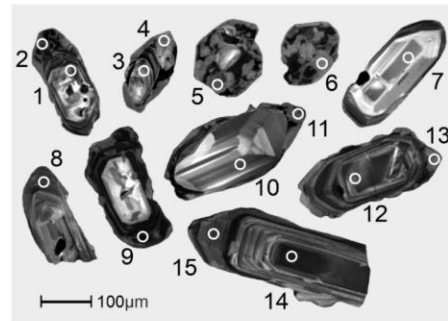


Рисунок 3в – Изображение зерен циркона из гранодиоритов первой фазы Белокурихинского массива (обр. 202013) в режиме катодолуминесценции (CL) и диаграмма с конкордией

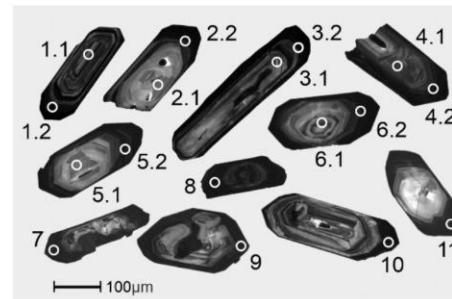
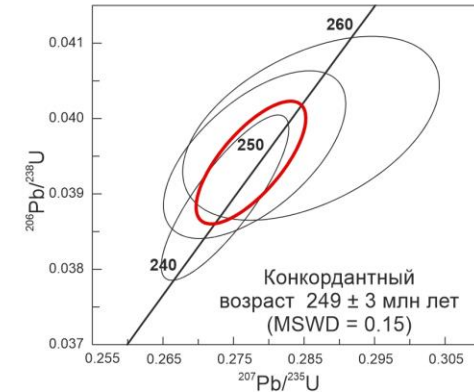


Рисунок 3г – Изображение зерен циркона из гранитов второй фазы Белокурихинского массива (обр. ТН2-1) в режиме катодолуминесценции (CL) и диаграмма с конкордией

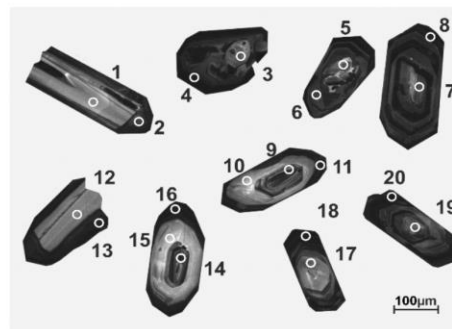
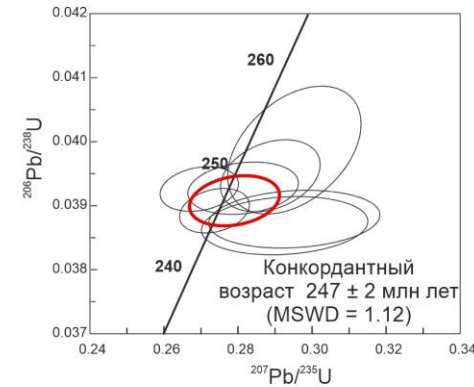
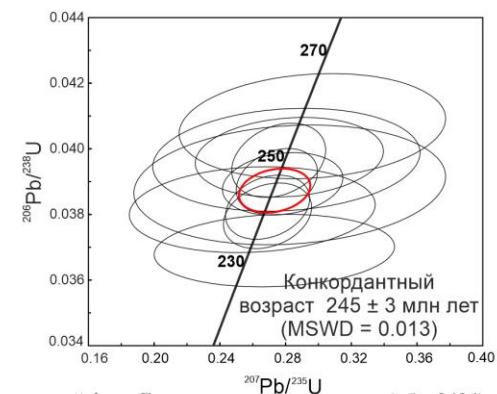


Рисунок 3д – Изображение зерен циркона из лейкогранитов третьей фазы Белокурихинского массива (обр. 2424) в режиме катодолуминесценции (CL) и диаграмма с конкордией



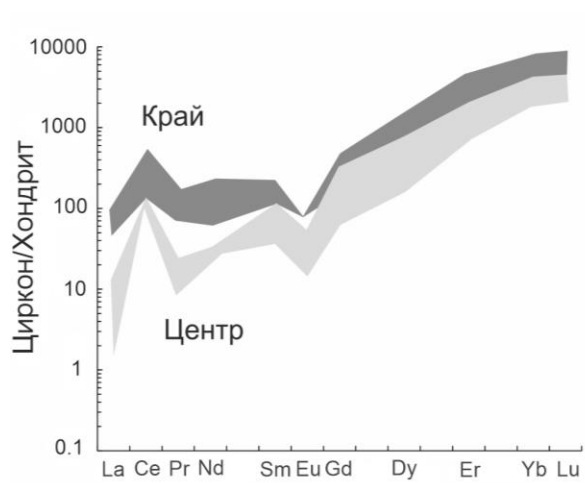


Рисунок 4а – Спектры распределения редкоземельных элементов в цирконе из гранодиорита первой фазы

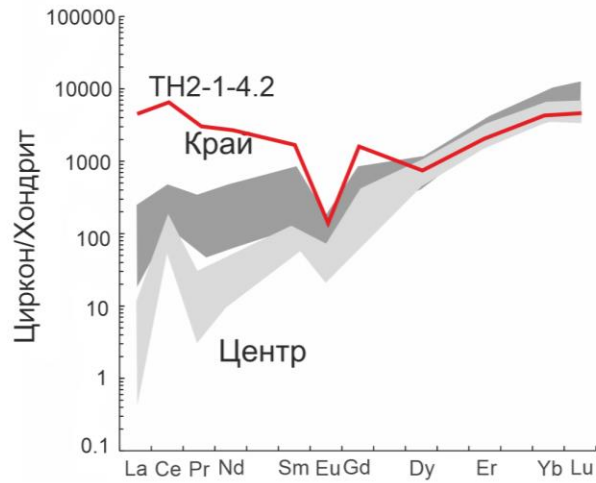


Рисунок 4б – Спектры распределения редкоземельных элементов в цирконе из гранита второй фазы

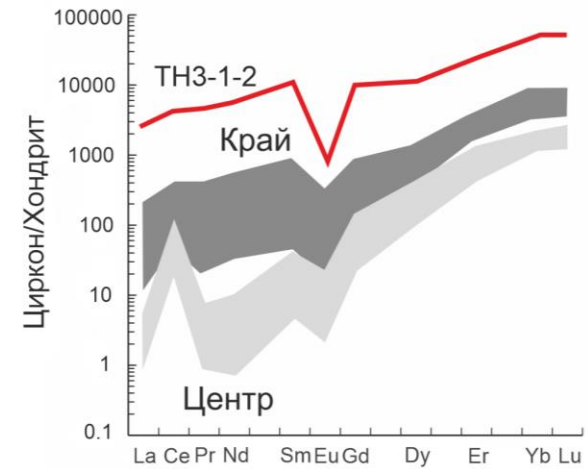
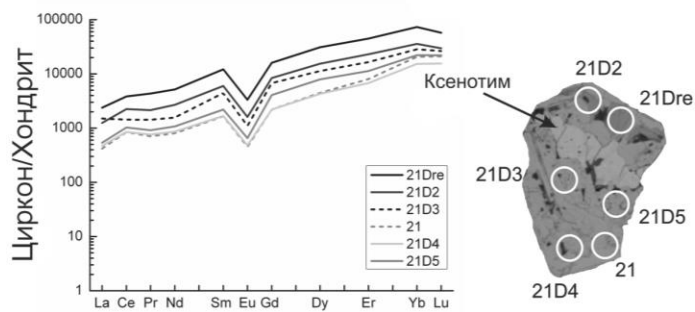


Рисунок 4в – Спектры распределения редкоземельных элементов в цирконе из лейкогранита третьей фазы



	Th	U	Hf	Li	P	Y	LREE	REE
21	620	13432	32699	121	2154	8067	1048	7982
21D2	3114	4900	22052	40	3547	24695	3097	19690
21D3	3138	10748	44926	109	7388	20000	2084	14795
21D4	603	8071	32498	8	2072	7628	1099	6802
21D5	1863	10656	36081	95	5774	15076	1333	10376
21Dre	6719	6721	31816	54	7913	50698	5685	38828

Рисунок 4г – Спектры распределения редкоземельных элементов и содержание редких элементов (ppm) в цирконе из лейкогранитов третьей фазы (обр. ТН3-1)

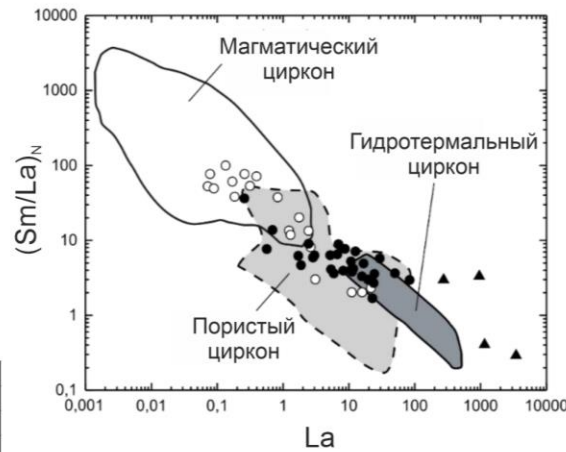


Рисунок 4д – Дискриминационная диаграмма $La(ppm) - (Sm/La)_N$ для определения генезиса циркона. Поля составов приведены по (Hoskin, 2005, Bouvier et al., 2012, Grimes et al., 2009) (полые кружки – соответствующий неизмененный магматическому циркону; заливные кружки – испытывавший флюидное воздействие; треугольники – с аномальными геохимическими характеристиками)

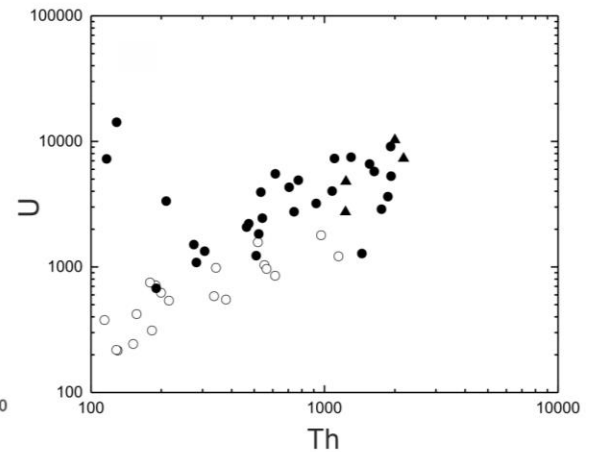


Рисунок 4е – Соотношение содержания элементов (ppm) в цирконе Th-U (полые кружки – соответствующий неизмененный магматическому циркону; заливные кружки – испытывавший флюидное воздействие; треугольники – с аномальными геохимическими характеристиками)