

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора геолого-минералогических наук, старшего научного сотрудника Холоднова Владимира Васильевича на диссертацию Мамыкиной Марии Евгеньевны на тему: «Минералого-геохимические характеристики, возраст и условия формирования гранитоидов Белокурихинского массива (Горный Алтай)», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

1. Актуальность темы диссертации

Горный Алтай характеризуется широким распространением различных типов гранитов, типизация которых не имеет однозначного решения. 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 и их источников.

В связи с этим не вызывает сомнений актуальность проведения подобного комплексного исследования, остающегося до сих пор недостаточно еще изученным многофазного Белокурихинского массива, который является одним из петротипов для гранитоидов Горного Алтая.

Комплексное использование прецизионных и локальных методов (SIMS, ID-TIMS, SEM-EDS, EPMA) позволяет получить новые данные о возрасте всех трех фаз этого массива, установить возраст и условия его петрогенезиса, выявить новые закономерности и особенности поведения редких и редкоземельных (REE) элементов в процессах гранитоидного магматизма на минеральном и породном уровнях.

2. Научная новизна диссертации

В основе диссертационной работы лежит новый представительный геологический материал, с коллекцией из 35 образцов, значительная часть которых отобрана лично автором в ходе полевых работ 2019-2021 г и который исследован комплексом самых современных методов.

Химический состав пород определен 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, Sm-Nd система – 9 проб, U-Pb система – 2 пробы титанита).

ВХ. № 9-60 ОТ 03.04.25
АУ УС

Состав породообразующих и акцессорных минералов определён методом SEM-EDS на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA, с энергодисперсионной приставкой JED-2200.

Состав циркона дополнительно 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 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).

Изотопный состав кислорода в цирконе определён в Институте геологии и геофизики Китайской академии наук на ионном микрозонде Cameca IMS-1280 (2 пробы).

Благодаря такому многообразию методов исследования было установлено следующее: выявлено закономерное изменение от ранней к поздней фазе - состава гранитоидов Белокурихинского массива в отношении несовместимых элементов и синхронной эволюции в составах ряда породообразующих и акцессорных минералов (плагиоклаз, биотит, калиевый полевой шпат, циркон), а также индикаторных отношений редких элементов, обусловленное процессами фракционной кристаллизации.

Впервые для гранитоидов этого массива проведена оценка P-T параметров кристаллизации и также впервые локальным U-Pb методом по циркону (SHRIMP-II) для гранитоидов всех трех фаз массива определен возраст их кристаллизации, временной интервал формирования которых составил 255-245 млн. лет.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Это определяется комплексным характером выполненных автором исследований, с использованием самых современных и прецизионных методов изучения минерального вещества (SIMS, ID-TIMS, SEM-EDS, EPMA). Это позволяет на более высоком качественном уровне установить возраст формирования данного массива, определить условия его петрогенезиса, выявить новые закономерности и особенности в поведении многих индикаторных редких и редкоземельных (REE) элементов в процессах гранитообразования на минеральном и породном их уровнях. А также широкой апробацией полученных результатов на многочисленных семинарах и конференциях в различных научных центрах России.

4. Научные результаты, их ценность

Белокурихинский массив, расположенный в северной части Горного Алтая, представлен в работе в виде трех фаз внедрения: 1) гранодиориты (10% от площади массива), 2) биотитовые граниты (около 70%); 3) мусковитовые лейкограниты (20%). Жильные образования - дайки аплитовидных микрогранитов, аплиты и пегматиты. Прорывает массив вулканогенно-

осадочные отложения кембрий-ордовикского возраста и терригенные отложения раннего девона, его сопровождают более мелкие интрузивные штоки: Осокинский, Сосновский, Точильный и Курановский.

По литературным данным (Крук и др., 2017) Белокурихинский массив относится к позднепалеозойско-мезозойским магматическим комплексам, которые формировались на заключительном (плюмовом) этапе развития Горного Алтая

В диссертационной работе Марии Евгеньевны Мамыкиной **(в третьей ее главе)** петрогеохимический состав трех основных фаз Белокурихинского массива охарактеризован представительным аналитическим материалом: I фаза (5 ан.), II (19 ан.), III (10 ан.).

Анализ петрохимических данных показал, что породы массива на фоне общего повышения кремнекислотности гранитных пород от ранних фаз к поздней, отличаются повышенной железистостью, по насыщению глиноземом отвечают метаалюминиевых и умеренно пералюминиевых гранитам.

По геохимическим данным в породах от первой к третьей фазе закономерно понижается содержание REE, растет глубина Eu-аномалии, одновременно понижается содержание Sr и Ba, Zr и Hf, Th и U, Zn и V **(а также, как свидетельствуют данные таблицы Б.1. – Nb и Y)**, тогда как для Rb характерен рост содержаний.

С этой геохимической закономерностью согласуются данные по фракционированию редких элементов на минеральном уровне. Этот вид исследований представляет особый интерес и имеет самую высокую положительную оценку. Подобные исследования очень важны, так как они позволяют более детально и объективно характеризовать процессы фракционирования в магматических расплавах, и не так часто они выполняются на таком представительном и высоком аналитическом уровне.

В соответствии с выявленными геохимическими закономерностями, как на породном, так и минеральном уровнях, для гомодромной в целом серии пород Белокурихинского массива М. Е. Мамыкиной разработана авторская модель фракционной кристаллизации и сделан следующий вывод (который отражен в первом, защищаемом научном положении): **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.**

Это направление фракционирования (в работе оно оформлено в виде ряда наглядных рисунков - схем) контролируется кристаллизацией в породах разных фаз тех или иных основных для них породообразующих и акцессорных минералов, являющихся концентраторами соответствующих (REE, Sr, Ba, V, Zn, Zr, Hf + **Nb и Y**) элементов.

Данная эволюция в составах пород (от первой к третьей фазе) происходит на фоне спада температуры кристаллизации (от 820-770°C до 700-650°C), при параметрах давления близких мезоабиссальной фации (3-6 кбар), что по глубинности отвечает уровню средней коры.

Оценивая в целом положительно этот научный вывод и результаты его обоснования, необходимо в виде пожеланий на будущее отметить следующее.

В Белокурихинском массиве тренду его общего фракционирования (от I к III фазе) в составе третьей фазы (таблица анализов Б.1.) следует только ограниченное число проанализированных пород (это пробы ТНЗ-1, 20203-2, ТН2424 и ТН2425). Это лейкограниты, с максимальной кремнекислотностью (77 - 81,8 % SiO_2) и самым низким содержанием глинозема (9,96-12,6% Al_2O_3).

Другая относительно более многочисленная группа пород, также выделяемых в III фазу (6 анализов гранитов и лейкогранитов: это пробы 20205, 202010, 202011, 202012-2, 202015, 202018), отличается от первой группы более низким содержанием SiO_2 74,7 – 75,7 % и более высоким Al_2O_3 14,1-14,8%.

Эти две группы (в III фазе) отличаются и по геохимии таких базовых для петрогенетических интерпретаций высокочarged элементов – как Nb и Y. Первая группа бедна Nb – менее 10 г/т и имеет широкий диапазон в содержаниях Y, что определяет вариацию Y/Nb отношения (от 0,7 до 2 - 5).

Вторая группа гранитов и лейкогранитов, отличается от первой, не только петрохимией пород, но резко повышенными содержаниями Nb от 20 до 50 г/т. Значения Y/Nb индекса и содержания Y в этой второй группе снижаются с ростом содержаний Nb: Y/Nb индекс от 1,0 до 0,1⁰, содержание Y от 22 г/т до 5-6 г/т. В связи с этим, в наиболее богатых Nb породах (пробы 202011 и 202012-2) - Nb преобладает над Y в 10 раз. В Айском массиве, образующем единый гранитоидный ареал с Белокурихинским массивом, ранее также были выявлены породы (граносиениты, граниты и лейкограниты), резко обогащенные Nb (Табакиева, 2011-диссертация и др.). Содержание Nb здесь более высокое до 90 г/т, которое в координатах Y/Nb отношений (0,50-0,10) перекрывается с составами (40-50 г/т Nb) подобных пород в Белокурихинском массиве. Можно предположить, что это фрагменты единой дифференцированной плюм-зависимой серии.

В связи с обнаружением в составе Белокурихинского массива пород с такими аномальными содержаниями Nb, ранее здесь неизвестными, можно порекомендовать автору диссертации, после ее защиты, продолжить в приоритетном порядке изучение пород именно этой группы (датирование возраста, изучение изотопно-геохимических и петролого-минералогических особенностей). Это позволит в перспективе оценить влияние мантийно-корового взаимодействия, с участием плюм-зависимого компонента, на особенности состава, формирующегося в коре крупного гранитного массива и его рудоносность. Айский массив может быть другим объектом такого исследования.

Научные результаты, изложенные в четвертой главе диссертации (наиболее значимой для автора), имеют самую высокую оценку. Здесь впервые для массива локальным

U-Pb методом по циркону (SHRIMP-II) для гранитоидов трех основных фаз массива, а также титаниту определен возраст их кристаллизации, с временным интервалом в пределах 255-245 млн лет.

При этом, по мнению официального оппонента, данные по циркону свидетельствуют и о некотором омоложении возраста от гранитоидов первой и второй фазы (первая 249+/-3 млн лет, вторая 244-251 млн лет) к лейкогранитам третьей (245+/-млн. лет). Результаты датирования Rb-Sr методом одной из проб гранита второй фазы (255 ± 8 млн лет) близки к данным по циркону.

Второе защищаемое научное положение полностью отражает этот важный обобщающий результат: 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.

Следующий результат, также высокого научного уровня.

В каждой фазе **Белокурихинского массива** присутствует как типичный зональный магматический циркон, так и измененный циркон, имеющий геохимические черты «гидротермально-метасоматического» генезиса.

Выделены три геохимических типа: 1) по уровню элементов-примесей и характеру спектра REE, отвечающий магматическому циркону; 2) циркон, демонстрирующий флюидное воздействие (с повышенным содержанием несовместимых элементов, с выположенным спектром в области легких REE и редуцированной Ce аномалией) и 3) циркон, с аномальными геохимическими характеристиками.

Третье защищаемое положение, подводит итог этим исследованиям, оно обосновано хорошим аналитическим материалом и формулируется так «**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.%)**».

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Проведенные исследования вносят заметный вклад в решение научных теоретических проблем гранитоидного магматизма: в изучение состава, генезиса, условий формирования гранитоидов подобного типа, в интерпретацию их источников и что особенно важно в связи с особенностями геодинамического режима, в проблемы геохронологии и т.д.

Полученные результаты исследования Белокурихинского массива были использованы, например, 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.

Практическая значимость также очевидна. Возрастные и многие другие петрологические, минералого-геохимические и иные новые данные из этой диссертации могут быть полезны в геологической практике.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Материалы диссертационного исследования могут быть использованы при проведении геологического картирования подобных интрузий и оценке их потенциальной рудоносности. Результаты возможно применять и в методических целях в учебных курсах, например, по изотопной геохимии.

7. Замечания и вопросы по работе

Пожелания высказаны выше, а замечание практически одно, нужны дополнительные данные (в процессе защиты диссертации) о том, что Белокурихинский массив является петротипом постколлизийных и анорогенных гранитов Горного Алтая. Это важно потому, что у оппонента с учетом состава других гранитоидных комплексов Горного Алтая, датируемых аналогичным возрастом 255-245 млн лет, сложилось несколько иное мнение о природе магматизма этого возрастного периода. Оно кратко следующее. Белокурихинский массив это, скорее всего, массив переходного типа: от синколлизийного этапа орогенеза (I и II фазы) к постколлизийному (III фаза, а в ней только граниты наиболее бедные Nb). Самостоятельный тип – это редкометальные граниты, обогащенные Nb, они специализированы также на Ta и Be. На дискриминационных диаграммах, которые приведены в данной диссертационной работе, гранитоиды этого массива, как считает ее автор, ближе соответствуют гранитам A-типа (ряд рис. это подтверждают), но есть и диаграммы (например, см в диссертации рис 1000: Ga/Al – Zr+Nb+Ce+Y), где такого соответствия нет.

Результаты изотопно-геохимических исследований, также свидетельствуют о заметной гетерогенности Белокурихинского массива по составу источников:

Для гранитоидов Белокурихинского массива величина $\epsilon_{Nd}(250)$ варьирует в диапазоне положительных значений от 0.43 до 1.72, что говорит о заметном вкладе мантийной компоненты. В то же время для ряда гранитов третьей фазы установлены аномально высокие значения $^{87}Sr/^{86}Sr(T)$. Значения Nd-модельного возраста (от 0.86 до 0.99 млрд лет) могут при этом также свидетельствовать о природе возможных протолитов, включая фрагменты океанической коры.

Следует отметить, что О.А. Гаврюшкиной [24] на основании анализа данных по петро- и геохимии пермо-триасовых гранитоидов Алтая был сделан вывод об их образовании за счет плавления пород нижней коры, без значимого участия мантийного вещества (мантийные очаги обеспечивали поступление тепловой энергии и, возможно, флюидов). Значение $\epsilon_{Nd}(250)$, по данным О.А. Гаврюшкиной [24] для Белокурихинского массива, даже несколько выше: 2.7 для гранитов второй фазы, 3.4 – для третьей фазы.

Автор же данной диссертации делает вывод, что близкие значения ϵNd для гранитоидов всех трех фаз указывают **на единый магматический источник** и правомочность отнесения штоков лейкогранитов третьей фазы к Белокурихинскому массиву.

По данным, из диссертации (Гаврюшкина, 2021), опять же следует, что на диаграммах (Pearce et.al., 1984) точки состава пермо-триасовых гранитоидов Алтая образуют плотный рой точек на грани полей синколлизийных, внутриплитных и островодужных серий. В поле внутриплитных пород попадают только граниты и лейкограниты Айского массива.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Минералого-геохимические характеристики, возраст и условия формирования гранитоидов Белокурихинского массива (Горный Алтай)», представленная на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Мамыкина Мария Евгеньевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник лаборатории петрологии магматических формаций
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук (ИГГ УрО РАН),
Доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник,
заслуженный деятель науки РФ

25.03.2025

Холоднов Владимир Васильевич.

Подпись Холоднова Владимира Васильевича официального оппонента заверяю
Заведующая отдела кадров Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института геологии и геохимии имени академика А.Н.Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук



С. В. Верхоглядова.

Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии и геохимии имени академика А.Н.Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук
ИГГ УрО РАН

Почтовый адрес: 620110, Екатеринбург, ул. академика Вонсовского, д.15,

тел.-факс: (343) 287-90-12, *e-mail: director@igg.uran.ru*

Официальный сайт в сети Интернет: <http://www.igg.uran.ru/>

эл. почта: holodnov@igg.uran.ru

тел. 89222160730