

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата геолого-минералогических наук Морозовой Людмилы Николаевны, на диссертацию Хамдард Назифулла на тему: «Типохимизм минералов и вертикальная зональность сподуменовых пегматитов месторождения Пашки, провинция Нуристан (Афганистан)», 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

Диссертация Хамрад Назифулла на тему «Типохимизм минералов и вертикальная зональность сподуменовых пегматитов месторождения Пашки, провинция Нуристан (Афганистан)» посвящена одной из важнейших фундаментальных проблем геологии – формирование месторождений редкометалльных литиевых пегматитов, что и определяет ее актуальность. Литий играет огромную роль в современных технологиях по возобновляемым источникам энергии, в производстве фармацевтических препаратов, смазочных материалов, электроники, керамики, стекла, литий-алюминиевых сплавов и литий-ионных аккумуляторов для электромобилей. Литий извлекают в основном из литийсодержащей рапы соляных озер и редкометалльных гранитных пегматитов. Австралия, Зимбабве, Китай, Бразилия, Португалия, США и Канада являются странами, которые добывают литий из редкометалльных гранитных пегматитов. Кроме того, редкометалльные пегматиты содержат попутные редкие металлы, включая олово, бериллий, тантал, ниобий, цезий и рубидий. Для удовлетворения растущего мирового спроса на литий, многие страны, включая Афганистан, начинают геологическое доизучение собственных месторождений редкометалльных пегматитов, которые планируется разрабатывать. Ресурсы лития в восточном Афганистане сосредоточены в пегматитовых полях Паруна, Шамакат и Нилау-Кулам. В то же время, редкометалльные пегматиты месторождения Пашки из пегматитового поля Паруна, требует доизучения в геологическом и минералогическом плане. Все это обуславливает актуальность темы диссертации.

2. Научная новизна диссертации

Установлены главные закономерности вертикальной минералого-геохимической зональности редкометалльных пегматитовых жил месторождения Пашки.

Выявлены типохимические характеристики сподумена, полевых шпатов, берилла, турмалина и граната, отражающие закономерности эволюции пегматитового расплава в ходе формирования месторождения.

Получены новые данные о зонально-секториальном строении минеральных индивидов типоморфных минералов пегматитов.

О Т З Ы В

Получены новые геохронологические данные о возрасте редкометалльных пегматитов.

Выявлены типохимические характеристики акцессорного граната, указывающие на генетическое родство сподуменовых пегматитов с лейкогранитами 3-й фазы комплекса Лагман.

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

Высокая степень обоснованности и достоверность научных положений и выводов, изложенных в диссертации, определяется представительностью подборки образцов пород и минералов, использованием современных прецизионных аналитических методов и апробацией результатов исследования в научной печати и научных конференциях. 130 образцов каменного материала были отобраны автором в ходе полевых работ 2022-2023 г.г. на месторождении Пашки. Анализы минералов были получены в аккредитованных лабораториях, которые оснащены современным оборудованием. Научные результаты обрабатывались с применением методов математической статистики, расчет кристаллохимических формул минералов проводился по апробированным алгоритмам. Интерпретация результатов исследования опиралась на научные точки зрения из опубликованных литературных источников.

Содержания примесных элементов, включая редкие и редкоземельные элементы, в сподумене, берилле, калиевом полево шпате, плагиоклазе, кварце, гранате и цирконе (210 точек анализа) были определены методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f. Состав граната, циркона и микровключений в минералах (более 160 точек анализа) изучен методом SEM-EDS на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200. Состав турмалина (125 точек анализа) был исследован на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8230 Superprobe (фирма Jeol) с четырьмя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром. Изотопный анализ (Rb-Sr система) валовой пробы пегматита, мусковита и калиевого полевого шпата из этой пробы проводился методом ID-TIMS на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI.

4. Научные результаты, их ценность

В диссертации на основе комплексных минералого-геохимических исследований получены следующие научные результаты:

Вертикальная минералогическая зональность жил сподуменовых пегматитов месторождения Пашки проявлена в смене минеральных парагенезисов по восстанию жил. Нижние горизонты жил сложены пегматоидными гранитами с гнездами кварц-микроклин-альбитовых пегматитов, содержащих шерл и фторэльбаит. Верхние горизонты жил сложены гигантозернистым сподумен-микроклин-альбитовым пегматитом с Mn-Zn-содержащим эльбаитом и фторэльбаитом и щелочным Na-Li-содержащим бериллом.

Выявлены характеристики состава порообразующих и акцессорных минералов (повышенные, близкие к предельным, содержания Na, Mn и Zn в сподумене, Li, Na, K – в голубом и бесцветном берилле, Li, Rb, Cs, P – в калиевом полево шпате, P – в альбите, Mn, Zn, F – в эльбаите и фторэльбаите, Mn – в гранате), свидетельствующие о крайне высокой степени фракционирования пегматитового расплава.

Установлены основные тренды геохимической эволюции пегматитового расплава: накопление от нижних к верхним горизонтам жил и от ранних к поздним стадиям щелочных металлов (Na, K, Li, Rb, Cs), Mn, Zn, при уменьшении содержаний Fe, Ti, Y, REE, нашедшие отражение в изменчивости состава сподумена, калиевого полевого шпата, берилла, турмалина и граната. Геохимическим индикатором процессов кристаллизационной дифференциации выступает уменьшение K/Rb отношения с ростом содержаний Rb и Cs в калиевом полево шпате и берилле.

Освещены вопросы распределения элементов-примесей по зонам и секторам роста кристаллов сподумена и берилла, продемонстрирована необходимость учета кристаллохимического фактора при изучении типохимических свойств минералов.

Разработан геохимический критерий генетической связи редкометалльных пегматитов с материнскими гранитами, основанный на особенностях редкоэлементного состава акцессорного граната.

Ценность научных результатов обусловлена их актуальностью и научной новизной. Новые изотопно-геохронологические данные по возрасту пегматитов могут быть использованы для уточнения легенды к геологической карте изученного района и выделения этапов формирования редкометалльных пегматитов в восточном Афганистане. Новые данные по составу минералов из пегматитов месторождения Пашки имеют ценность для дальнейшего изучения технологических свойств литиевой руды, включая минералогический состав рудной и безрудной части пегматитовой руды. Установление минералого-геохимических критериев рудоносности пегматитов может быть использовано при поисковых работах в пегматитовых полях.

Представляется весьма важным результат датирования сподуменовых пегматитов месторождения Пашки, что позволяет автору диссертации говорить о генетическом родстве литиевых пегматитов и гранитных источников - лейкогранитов 3-й фазы комплекса Лагман, имеющих сходный возраст формирования. Полученные результаты позволяют автору с наибольшей долей вероятности рассматривать изученные пегматиты как продукты экстремального фракционирования остаточного гранитного расплава, обогащенного летучими компонентами (H_2O , B, F, Cl, PO_4) и редкими элементами (Li, Rb, Cs). Высокая степень фракционирования необходима для концентрации несовместимых редких и летучих элементов в остаточном гранитном расплаве, что приводит к кристаллизации пегматитов, богатых Li, Nb, Ta и Be.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях - 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 международные базы данных и системы цитирования Scopus.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Результаты изотопно-геохронологических исследований и генетической связи пегматитов и лейкогранитов будут способствовать решению научной проблемы генезиса сподуменовых пегматитов восточной части Афганистана.

Результаты исследований позволяют уточнить и детализировать существующие представления о вертикальной зональности сподуменовых пегматитов месторождения Пашки и проследить изменение химического состава минералов по восстанию жил пегматитов.

Современные методы исследования состава минералов и база данных по минералам пегматитов месторождения Пашки могут быть использованы при разработке учебных курсов по дисциплинам «Прикладная минералогия» и «Прикладная геохимия».

Результаты изотопно-геохронологических исследований, направленных на определение времени формирования пегматитов месторождения Пашки, были использованы при подготовке научного отчета «Совершенствование изотопных методов датирования докембрийских комплексов и разработка новых геохимических подходов использования минералов-геохронометров» (НИР ИГГД РАН, (№ FMUW-2022-0005).

6. Замечания и вопросы по работе

Несмотря на общее положительное впечатление о диссертации, необходимо отметить ряд замечаний и вопросов по работе.

Глава 1 называется: «Состояние проблемы сподуменовых пегматитов». По тексту главы и в выводах проблемы сподуменовых пегматитов не сформулированы.

В разделе 1.1 приводится краткая характеристика классификаций пегматитов. Необходимо дополнить, что до настоящего времени нет классификации, которая удовлетворяла бы всем характеристикам пегматитов. Первую классификацию разработал П. Нигли (1920), в которой он выделил типы и подтипы пегматитов на основе минералогии и геохимических характеристик. Среди пегматитов было выделено девять типов гранитных пегматитов, включая литиевые. Однако классификация П. Нигли не получила широкого распространения. Первую классификацию пегматитов, признанную в мире и применяемую до сих пор, разработал А.Е. Ферсман (1930). В основе классификации лежит температура кристаллизации пегматитов на различных стадиях их формирования: магматической, эпимагматической, пневматолитовой,

гидротермальной и гипергенной. В своей классификации А.Е. Ферсман выделил 10 типов пегматитов чистой линии, включая натро-литиевые пегматиты, которые он рассматривал как наиболее поздние пегматитовые образования. В то же время А.Е. Ферсман отмечал, что для определения типа пегматитов недостаточно определить температуру кристаллизации, нужно учитывать и другие факторы, такие как источник пегматитового расплава и ассимиляцию вмещающих пород. С увеличением знаний о минералогии, геохимии и генезисе пегматитов классификации пегматитов совершенствовались и базировались на различных критериях: химических, минералогических, внутреннем строении пегматитов, глубине формирования, генезисе.

В разделе 1.1 рассматривается одна из точек зрения на генезис пегматитов – образование пегматитов путем экстремального фракционирования остаточного гранитного расплава, обогащенного летучими компонентами и редкими элементами. В то же время до сих пор не существует общепринятой точки зрения на генезис редкометалльных пегматитов. В XIX веке существовали две модели формирования пегматитов – магматическая (De Beaumont, 1847; Hitchcock, 1883) и гидротермальная (Hunt, 1871). В конце XIX века Бреггер (Brögger, 1890) предложил магмато-гидротермальную модель образования пегматитов. Дальнейшее изучение пегматитов породило различные модели. Метасоматическая модель формирования пегматитов была предложена А.Н. Заварицким (1939), согласно которой пегматиты образуются при перекристаллизации пород, близких по составу к граниту, под воздействием постмагматических гидротермальных растворов. Наибольший вклад среди отечественных геологов в изучение пегматитов внес академик А.Е. Ферсман (1960), который считал, что пегматиты являются продуктами конечной кристаллизации остаточного гранитного расплава в условиях закрытой системы. В связи с тем, что связь между редкометалльными пегматитами и гранитным источником не всегда может быть установлена, была предложена модель формирования пегматитов путем прямого анатексиса верхнекоровых пород в присутствии флюидов (London,

Стр. 22. Автор пишет, что турмалин относится к числу «сквозных» минералов редкометалльных пегматитов. Однако это не всегда так. Турмалин широко присутствует в богатых бором пегматитах, но его содержание незначительно в пегматитах, обедненных бором. Например, в редкометалльных пегматитах Колмозерского месторождения турмалин встречается только в зоне контакта пегматитов с вмещающими породами в ассоциации с холмквиститом, биотитом, апатитом и эпидотом, поэтому на этом месторождении турмалин не является «сквозным» минералом. В редкометалльных пегматитах Полмостундровского месторождения турмалин развит повсеместно в различных частях жильных тел и может рассматриваться в качестве «сквозного» минерала.

Что имеется в виду под терминами: «глыбовый кварц», «глыбовый микроклин» (стр. 42), «мелкоячеистый альбит» (стр. 40)?

Стр. 66. Раздел «Летучие элементы» нужно расположить на две строчки ниже.

Название таблицы 4.1.3 и Приложения E1 – Примесный состав (ppm) сподумена. Среди элементов-примесей обозначен Li, в то время как литий является минералообразующим элементом для сподумена.

Раздел 5.1.1. В приложении E1 приведены содержания Li (ppm) для сподумена из верхних и нижних горизонтов жилы пегматитов. В тексте нигде не отмечено, что при пересчете Li (ppm) в оксид Li (мас. %), среднее содержание оксида Li в сподумене из нижних (9.66 мас. %) и верхних (8.9 мас. %) горизонтов, превышает его теоретическое содержание в формуле минерала. Следовательно, к определению содержания Li методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) в минералах с высоким содержанием лития следует подходить с осторожностью.

стр. 111. Автор пишет, что «уровень содержания железа в изученном сподумене заметно ниже, чем в сподумене из других месторождений, что является индикатором крайне высокой степени фракционирования пегматитового расплава». Необходимо отметить, что содержание железа в сподумене не определяется степенью фракционирования пегматитового расплава. Например, колмозерский сподумен является высокожелезистым по сравнению со сподуменом из пегматитов месторождения Пашки. В то же время, альбит-сподуменовые пегматиты Колмозерского месторождения имеют высокий экономический потенциал Li-минерализации и высокую степень фракционирования, индикаторами которой являются низкие отношения Zr/Hf (<7.4) и Mg/Li (<0.05) в пегматитах. Содержание элементов-примесей в минералах зависят от различных факторов, таких как изоморфное замещение в структуре минерала, РТ-условия кристаллизации, и др. Согласно (Гинзбург, 1959), высокое содержание Fe в колмозерском сподумене может быть связано с существенной заменой Al на Fe³⁺ и подчиненной заменой Li на Fe и Mn в структуре сподумена.

Стр. 117. В разделе 5.1.2. «Калиевый полевой шпат», автор пишет, что сподумен «образуется синхронно с полевым шпатом». На основании каких данных сделано такое заключение? По вопросу о взаимоотношении сподумена и калиевого полевого шпата существуют различные точки зрения. Например, В.В. Гордиенко (1970) на основе минералогических исследований выделил ранний сподумен, который кристаллизуется позже блокового микроклин-пертита и поздний сподумен из центральной части пегматитовой жилы блоковой структуры, который кристаллизуется одновременно с блоковым калиевым полевым шпатом. По данным А.И. Гинзбурга (1959) основная масса сподумена выделяется после кристаллизации блокового калиевого полевого шпата, а при высоких содержаниях лития в пегматитовом расплаве сподумен может кристаллизоваться раньше блокового калиевого полевого шпата.

В выводах по главе 5 не учтена кристаллизация сподумена (кунцита) и турмалина из миароловых полостей, что позволяет рассматривать процесс кристаллизации сподуменовых пегматитов месторождения Пашки более сложным, чем описано в тексте. До настоящего времени

нет единого мнения об условиях образования миарол. Согласно одной точке зрения (Jahns, Burnham, 1969), формирование миарол возможно в пегматитовых камерах на этапе кристаллизации силикатных расплавов за счет накопления флюидных фаз, обогащенных летучими компонентами. Согласно другой точке зрения (Перетяжко, 2010), формирование миарол (флюидных обособлений) происходит в очагах накопления гетерогенного пегматитового расплава до его внедрения во вмещающие породы.

В своих построениях модели формирования сподуменовых пегматитов месторождения Пашки автор диссертации не учитывает тот факт, что в пределах пегматитового поля Паруна, к которому относится месторождение Пашки, отмечаются пегматитовые жилы различного состава. Согласно тексту диссертации (стр. 39), «в распределении пегматитов разного состава наблюдается латеральная зональность». «В юго-восточном направлении олигоклаз-микроклиновые и биотит-мусковитовые пегматитовые жилы сменяются альбитизированными микроклиновыми и сподумен-микроклин-альбитовыми жилами». Из текста диссертации не очень понятно, как безрудные пегматиты в генетическом плане связаны со сподуменовыми пегматитами и лейкогранитами – источниками литиевых пегматитов. Этот вопрос обусловлен тем, что в некоторых пегматитовых полях в идеализированном виде около гранитного источника располагаются менее фракционированные безрудные пегматиты и пегматиты с Be-минерализацией, которые сменяются пегматитами с Be-Nb-Ta-минерализацией, а на максимальном удалении от гранитного источника находятся высокофракционированные пегматиты с Be-Nb-Ta-Li и Be-Nb-Ta-Li-Cs-минерализацией. Возможным механизмом формирования таких пегматитов рассматривается длительная фракционная кристаллизация гранитного источника (Černý, 1991). Следовательно, дополнительные данные о пегматитах различного состава в пределах пегматитового поля Паруна могут внести корректировку в модель формирования сподуменовых пегматитов месторождения Пашки.

Замечания к оформлению рисунков: 1) рисунок 4.2.4. – на вынесены единицы измерения на вертикальных осях; 2) рис. 5.1.1 – на вынесены единицы измерения на вертикальных и горизонтальных осях; 3) рис. 4.3.7; рис. 5.1.3; рис. 5.1.5; рис. 5.1.10 – в условных обозначениях написано «верх», «низ». Лучше использовать – «нижние горизонты», «верхние горизонты» как на других диаграммах.

Высказанные замечания имеют, преимущественно, рекомендательный, дискуссионный или технический характер и не влияют на положительную оценку диссертации. Работа хорошо написана и иллюстрирована, легко читается, сопровождается большим списком используемой отечественной и зарубежной литературы.

Содержание автореферата отражает содержание диссертации.

7. Заключение по диссертации

Диссертация «Типохимизм минералов и вертикальная зональность сподуменовых пегматитов месторождения Пашки, провинция Нуристан (Афганистан)» является завершённым исследованием и вносит существенный вклад в изучение геологии, минералогии и генезиса литиевых пегматитов. Все три защищаемых положения убедительно и полновесно обоснованы, хорошо аргументированы и подтверждаются результатами проведённых геологических, минералогических, геохимических и геохронологических исследований на обширном каменном материале. Большим достоинством работы является изучение разных генераций главных и акцессорных минералов пегматитов, рудных и ювелирных минералов пегматитов, акцессорных минералов гранитного источника. Хамдард Назифулла является высококвалифицированным геологом и минералогом, который владеет разнообразными методами исследований, приемами минералого-геохимического моделирования для выявления особенностей литиевых месторождений и закономерностей распределения микроэлементов и рудных элементов в минералах различных генераций.

Диссертация «Типохимизм минералов и вертикальная зональность сподуменовых пегматитов месторождения Пашки, провинция Нуристан (Афганистан)», 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 **Хамдард Назифулла** заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Официальный оппонент

ФГБУ «ВИМС»

Геологическое отделение 2, ведущий геолог

Кандидат геолого-минералогических наук

Морозова Людмила Николаевна

(полностью)

19.12.2025 г.

Подпись ФИО оппонента заверяю

М.П.

Сведения об официальном оппоненте:

Подпись Морозовой Людмилы Николаевны заверяю
Начальник отдела геохронологии Е.В. Мартынов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Почтовый адрес: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31

Официальный сайт в сети Интернет: vims-geo.ru

эл. почта: morozova@vims-geo.ru телефон: +7(495) 950 3302