

*На правах рукописи*

**Хамдард Назифулла**

*hamdard nazif*

**ТИПОХИМИЗМ МИНЕРАЛОВ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ  
ЗОНАЛЬНОСТЬ СПОДУМЕНОВЫХ ПЕГМАТИТОВ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАШКИ, ПРОВИНЦИЯ  
НУРИСТАН (АФГАНИСТАН)**

*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

*Гульбин Юрий Леонидович*

**Официальные оппоненты:**

*Попов Михаил Петрович*

доктор геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра геологии, минералогии и петрографии, профессор;

*Морозова Людмила Николаевна*

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского», Геологическое отделение 2, ведущий геолог.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 23 января 2026 г. в 14:00 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 № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 21 ноября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КОЗЛОВ  
Александр Владимирович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Гранитные пегматиты, как было показано многолетними исследованиями Н.А. Солодова (1962, 1971), А.И. Гинзбурга (1960, 1979), П. Черны (Černý, 1991, 2005), Б.М. Шмакина и В.Е. Загорского с коллегами (1997), Д. Лондона (London, 2008, 2018), С.М. Бескина и Ю.Б. Марина (2013, 2019), являются важнейшими источниками таких редких металлов как Li, Ta, Be и Cs. Тема востребованности и дефицитности литиевого сырья в настоящее время широко известна. Именно поэтому на фоне грядущего истощения запасов активно разрабатываемых месторождений сподумена возрастает интерес к поискам новых и оценке мало изученных редкометалльно-пегматитовых объектов.

Афганистан обладает крупнейшими в мире пегматитовыми месторождениями лития. Гранитные пегматиты месторождения Пашки, расположенного в высокогорном районе провинции Нуристан, известны высоким содержанием этого редкого элемента, главным минералом-концентратором которого является сподумен. Упомянутое месторождение рассматривается как перспективное для промышленной разработки. Вместе с тем оно слабо изучено в геологическом и минералогическом отношении. Поэтому представленная работа, направленная на изучение минерального состава, вертикальной зональности пегматитовых жил и геохимических особенностей типоморфных минералов пегматитов Пашки, будет способствовать решению актуальной проблемы освоения этого месторождения.

### **Степень разработанности темы исследования**

Редкометалльные пегматиты LCT-типа (специализированные на Li, Cs и Ta) широко развиты в восточной части страны, в основном, в провинции Нуристан. Существенный вклад в их открытие и последующее изучение внесли советские геологи (Солодов, 1971; Россковский, Чмырев и др., 1976). К сожалению, детальные минералогическо-геохимические исследования этих перспективных рудных объектов не проводились со времени их открытия (Benham,

Coats, 2007; Cocker, 2011). Сказанное касается в том числе и месторождения Пашки, которое до сих пор остается мало изученным объектом.

**Объектом исследования** являются сподуменовые пегматиты месторождения Пашки.

**Предмет исследования** – минералого-геохимические особенности минералов, слагающих пегматиты.

**Цель работы** – получение типохимических характеристик минералов сподуменовых пегматитов месторождения Пашки и выявление главных закономерностей эволюции пегматитовой системы и вертикальной зональности пегматитовых жил.

**Задачи исследования:**

1. Провести полевые исследования с отбором каменного материала на нижних и верхних горизонтах пегматитовых жил (на примере жилы № 3), а также из обнажений лейкогранитов 3-й фазы комплекса Лагман, с которыми по геологическим данным тесно связаны пегматиты.

2. Выявить главные закономерности распределения породообразующих минералов по восстанию пегматитовых жил.

3. Изучить особенности химического состава породообразующих (сподумена, полевых шпатов, кварца) минералов пегматитов и акцессорных (берилла, турмалина, граната, циркона) минералов пегматитов и лейкогранитов.

4. Изучить зональность и секториальность минеральных индивидов типоморфных минералов пегматитов (сподумена, берилла, турмалина).

5. Оценить Р-Т параметры минералообразования и определить изотопный возраст пегматитов.

6. Проинтерпретировать полученные данные для решения вопросов вертикальной зональности и генезиса пегматитов.

**Научная новизна:**

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

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

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

4. Получены новые данные о возрасте пегматитов.

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

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

Результаты диссертационного исследования будут способствовать решению научной проблемы генезиса сподуменовых пегматитов редкометалльной провинции востока Афганистана. Выводы работы, посвященные типохимическим характеристикам минералов пегматитов, можно использовать для разработки геохимических критериев поисков и оценки пегматитовых жил, перспективных на обнаружение промышленного литиевого оруденения, а также в учебных курсах по дисциплинам «Прикладная минералогия» и «Прикладная геохимия».

Отдельные разделы диссертации 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), что зафиксировано в акте внедрения от 24.04.2025 г.

#### **Методы исследований**

В основу диссертационной работы положен каменный материал, отобранный автором в ходе полевых работ 2022–2023 гг. Изученная коллекция состоит из 130 образцов пегматитов и ассоциирующих с ними гранитов.

Состав граната, циркона и включений в них (более 160 точек анализа) изучен методом SEM-EDS на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200 (ИГГД РАН,

аналитик О.Л. Галанкина). Состав турмалина (125 точек) исследовался с помощью электронно-зондового микроанализатора JXA-8230 Superprobe (фирма Jeol) с четырьмя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром (Горный университет, аналитик А.С. Иванов). Содержания примесных (в том числе редких и редкоземельных) элементов в сподумене, берилле, калиевом полево шпате, плагиоклазе, кварце, гранате и цирконе (210 точек) определялись методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (Ярославский филиал ФТИАН РАН, аналитики Е.В. Потапов и С.Г. Симакин). 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 (ИГД РАН, аналитик Е.С. Богомолов).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Увеличение по восстанию жил пегматоидных гранитов количества гнезд и прожилков кварц-микроклин-альбитовых пегматитов блоковой структуры с крупными кристаллами светло-зеленого сподумена и черного турмалина (шерла, при подчиненном количестве темно-зеленого турмалина – фторэльбаита) и широкое развитие на верхних горизонтах сподумен-микроклин-альбитовых пегматитов гиганто-зернистого строения с Na-Li-содержащим бериллом и кварцевыми обособлениями, в состав которых входят розовато-белый сподумен и полихромный турмалин (Mn-Zn-содержащий эльбаит и фторэльбаит), определяют вертикальную зональность месторождения Пашки.

2. Закономерные вариации примесного состава минералов пегматитовых жил: сподумена (уменьшение содержаний Fe, Ti, Be и увеличение содержания B), калиевого полевого шпата (уменьшение содержания Li и увеличение содержаний Rb, Cs), плагиоклаза (увеличение содержаний Sr и Ba) при переходе от нижних к верхним горизонтам пегматитовых жил; берилла (уменьшение содержаний Fe, Ti и увеличение – Li, Na, K, Rb) при смене голубой разновидности бесцветной; полихромного турмалина (уменьшение

содержаний Fe, Mn, Zn от центра к краям кристаллов) являются индикаторами геохимической эволюции пегматитового расплава.

3. Пониженный уровень содержаний иттрия и редкоземельных элементов в акцессорном гранате выступает дополнительным критерием генетической связи пегматитов месторождения Пашки с гранитами 3-й фазы комплекса Лагман, а вариации состава граната (более высокая марганцовистость этого минерала из пегматитов по сравнению с гранитами; закономерное изменение содержаний Y и REE в гранате из гранитов, из пегматитов нижних и верхних горизонтов жил) отражают процессы кристаллизационной дифференциации гранитовой магмы.

**Степень достоверности результатов исследования** подкреплена представительностью каменного материала, отобранного автором из пегматитовых жил месторождения Пашки; использованием анализов минералов, полученных в аккредитованных лабораториях; применением методов математической статистики при обработке данных измерений; применением апробированных алгоритмов расчета кристаллохимических формул; учетом опубликованных литературных данных при интерпретации результатов исследования.

#### **Апробация результатов**

Основные положения диссертационной работы докладывались на научных конференциях. В их числе: Годичное собрание Российского минералогического общества «Минералого-геохимические исследования для решения проблем петро- и рудогенеза, выявления новых видов минерального сырья и их рационального использования» и Фёдоровская сессия (СПб, 2023 г.); Молодежная научная школа-конференция, посвященная памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (Петрозаводск, 2024 г.); VI международная конференция молодых ученых и специалистов памяти А.П. Карпинского «Геология XXI века – передовые технологии и научно-методическое обеспечение

регионального геологического изучения недр Российской Федерации» (СПб, 2024 г.).

#### **Личный вклад автора**

Автор самостоятельно провел полевые работы с отбором образцов пегматитов и гранитов, определил цели и задачи исследования, выполнил анализ научной литературы, участвовал в изучении вещественного состава минералов, провел обработку и интерпретацию результатов измерений, сформулировал научные выводы диссертации.

#### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 4 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, 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, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 203 наименования, и 9 приложений. Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 24 таблицы.

#### **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф. Ю.Л. Гульбину и чтит память своего первого научного руководителя проф. М.А. Иванова. Проф. С.Г. Скублов оказал всестороннюю поддержку на всех этапах выполнения работы. Автор благодарен за помощь и обсуждение результатов исследования проф. Ю.Б. Марину, В.В. Смоленскому, Е.В. Коваленко, Д.А. Петрову, В.С. Стативко.

За проведение аналитических работ автор признателен О.Л. Галанкиной, Е.С. Богомолу (ИГГД РАН), С.Г. Симакину, Е.В. Потапову (ЯФ ФТИАН РАН), А.С. Иванову (Горный университет).



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна диссертации, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. В **первой главе** охарактеризовано современное состояние проблемы сподуменовых пегматитов. Во **второй главе** приведена геологическая характеристика сподуменовых пегматитов месторождения Пашки. В **третьей главе** описаны использованные в работе аналитические методы. В **четвертой главе** рассмотрены типохимические особенности состава минералов пегматитов и гранитов. В **пятой главе** суммированы главные закономерности минералого-геохимической зональности пегматитовых жил и описаны результаты геохронологического изучения пегматитов. В **заключении** даны основные выводы работы.

### Геологическая характеристика объекта исследования

Месторождение Пашки расположено в пределах Парунского пегматитового поля, в горах на высоте от 3000 до 4300 м. Здесь на площади 2×3.5 км среди метаморфических пород кашмундской серии верхнего триаса – кристаллических сланцев, кварцито-песчаников и мраморизованных известняков – обнажена серия крутопадающих незональных жил пегматоидных гранитов с гнездами и прожилками сподумен-микроклин-альбитовых пегматитов (рисунок 1). Наиболее крупная жила № 1 прослежена по простиранию на 1 км. В рельефе она обнажена на 600 м. Мощность жилы достигает 60 м. Жила № 3 прослежена по простиранию на 600 м и обнажена в рельефе на 450 м при мощности от 2 до 8 м (рисунок 2). Азимуты простирания жил – 300–310°, углы падения – 60–70°. Прожилковая зона № 2 имеет протяженность 2.5 км при общей мощности 5–10 м. Она состоит из множества эшелонированных жил сложной морфологии (линзовидных, типа «конского хвоста» и др.).

В жилах, в составе пегматитовых гнезд, широко развит сподумен в виде длиннопризматических кристаллов, средний размер которых колеблется от 5 до 30 см, достигая в некоторых случаях 3 метров (жила № 1). Сподумен

ассоциирует с блоковым микроклином и кварцем, клевеландитом (реже – мелкоячеистым альбитом), агрегатами светло-зеленой слюды. Характерными минералами пегматитовых гнезд являются черный и полихромный турмалин, берилл. На нижних горизонтах жилы № 3 отмечается вкрапленность литиевых фосфатов ряда трифилин–литиофилит. К числу второстепенных минералов относятся поллуцит, танталит-колумбит, касситерит.

Для всех трех жил месторождения Пашки характерно наличие миарол, содержащих кунцит (водяно-прозрачную разновидность сподумена), светло-зеленый мусковит и горный хрусталь. Экзоконтактовые изменения выражены в мусковитизации и турмалинизации сланцев на расстоянии 5–15 см от контактов жил. Также для сланцев характерно множество ветвящихся прожилков мелкокристаллического сахаровидного альбита.

### **ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

**1. Увеличение по восстанию жил пегматоидных гранитов количества гнезд и прожилков кварц-микроклин-альбитовых пегматитов блоковой структуры с крупными кристаллами светло-зеленого сподумена и черного турмалина (шерла, при подчиненном количестве темно-зеленого турмалина – фторэльбаита) и широкое развитие на верхних горизонтах сподумен-микроклин-альбитовых пегматитов гигантозернистого строения с Na-Li-содержащим бериллом и кварцевыми обособлениями, в состав которых входят розовато-белый сподумен и полихромный турмалин (Mn-Zn-содержащий эльбаит и фторэльбаит), определяют вертикальную зональность месторождения Пашки).**

Жила № 1 в нижней части сложена кварц-микроклин-альбитовыми крупнозернистыми (пегматоидными) гранитами, содержащими черный турмалин и мелкие кристаллы сподумена. Выше по разрезу в гранитах увеличивается количество гнезд и прожилков кварц-микроклин-альбитовых пегматитов с блоковой структурой, наблюдаются участки гигантозернистого строения с кварцевыми обособлениями и крупным сподуменом. Характерными для таких участков

являются мелкокристаллические агрегаты розового турмалина и его крупные полихромные кристаллы, светло-зеленый и бесцветный мусковит, гнезда и прожилки мелкочешуйчатого лепидолита.

Жила № 3 сложена сподумен-микроклин-альбитовым пегматоидным гранитом с пегматитовыми гнездами, в которых наблюдаются призматические кристаллы грязно-зеленого сподумена размером до 20–30 см и крупные (5–10 см) кристаллы черного турмалина. Характерной особенностью жилы является широкое распространение сахаровидного альбита, замещающего кварц и частично сподумен. В верхней (головной) части жилы часто наблюдаются мелкие (1–2 см) кристаллы берилла. Здесь же в кварцевых обособлениях кварц-микроклин-альбитовых пегматитов встречаются розовый и полихромный турмалин, лепидолит и полунцит.

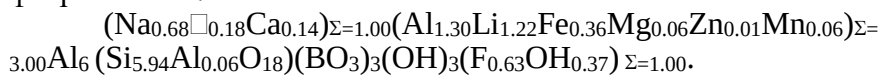
Сподумен в пегматитовых жилах представлен тремя разновидностями. Первая разновидность – зеленовато-белый сподумен, развитый по всему объему жил. Он встречается в виде крупных призматических кристаллов. Их размер по удлинению составляет 10–15 см, в пегматитах с блоковой структурой – до 50 см. Содержание варьирует от 5 до 25 % (рисунок 2). Вторая разновидность – розовато-белый сподумен с фиолетовым оттенком, приуроченный к кварцевым обособлениям в сподумен-микроклин-альбитовых пегматитах верхних горизонтов. Третья разновидность – бесцветный водяно-прозрачный сподумен (кунцит) из миарол. По существующим классификациям (Типоморфизм минералов, 1989; Brennan et al., 2024), кунцит из миарол относится к поздней гидротермальной стадии, в отличие от более раннего магматического сподумена.

Берилл образует кристаллы столбчатого облика размером до 2–3 см по удлинению, обладающие сине-голубым оттенком (рисунок 2). Наряду с голубым бериллом на верхних горизонтах жилы № 3 встречены кристаллы бесцветного берилла (гошенита). По данным ионно-зондового анализа, голубой берилл отличается максимально высокими для LCT-пегматитов содержаниями Li (910–2000 ppm), Na (3900–6000 ppm) и K (190–400 ppm), а также Ca, Ti, но пониженными

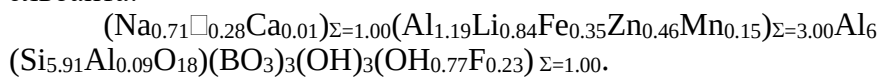
содержаниями Cs (150–400 ppm) и Fe (рисунок 3). Подобный состав характерен для берилла щелочного (натриево-литиевого) типа, типоморфного для сподуменовых пегматитов (Куприянова, 1989; Загорский и др., 1997).

Турмалин встречается в виде нескольких разновидностей. На нижних горизонтах доминирует черный турмалин при подчиненной роли темно-зеленого турмалина. На верхних горизонтах широко распространены прозрачные и полупрозрачные кристаллы турмалина зеленого, розового и светло-голубого цвета, часто полихромные; реже здесь встречается черный турмалин. По данным микронзондового анализа, все изученные турмалины являются Na-содержащими разновидностями и относятся к шерл-эльбаитовой изоморфной серии (рисунок 4).

Черный турмалин нижних горизонтов по составу отвечает высоко-железистому шерлу ( $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  0.80–0.98 с повышенным содержанием фтора (0.3–1.0 мас.%) и рассчитанным содержанием лития 0.2–0.7 коэффициента в формуле (к.ф.). Темно-зеленый турмалин является фторэльбаитом. Измеренное содержание фтора в нем составляет около 1.2 мас.%, что соответствует доле фтора в одной позиции с гидроксидом  $>0.5$  к.ф. Пример формулы фторэльбаита:



Полихромный турмалин, развитый на верхних горизонтах, по составу отвечает эльбаиту и фторэльбаиту. Особенностью этих минералов является повышенное содержание примесей марганца и цинка (MnO до 2.2 мас.%, ZnO до 4.05 мас.%). Пример формулы Mn-Zn-содержащего эльбаита:



Выявленные закономерности изменения структуры и минерального состава пород по восстанию продуктивных жил позволяют считать вертикальную зональность пегматитов месторождения Пашки примером прямой зональности первого

рода (с сохранением парагенетического типа пегматита) по Н.А. Солодову (1971).

**2. Закономерные вариации примесного состава минералов пегматитовых жил:** сподумена (уменьшение содержаний Fe, Ti, Be и увеличение содержания B), калиевого полевого шпата (уменьшение содержания Li и увеличение содержаний Rb, Cs), плагиоклаза (увеличение содержаний Sr и Ba) при переходе от нижних к верхним горизонтам пегматитовых жил; берилла (уменьшение содержаний Fe, Ti и увеличение – Li, Na, K, Rb) при смене голубой разновидности бесцветной); полихромного турмалина (уменьшение содержаний Fe, Mn, Zn от центра к краям кристаллов) являются индикаторами геохимической эволюции пегматитового расплава.

Для изучения скрытой вертикальной зональности пегматитовых жил было проанализировано содержание элементов-примесей в основной разновидности сподумена месторождения Пашки – зеленовато-белом сподумене нижних и верхних горизонтов жилы № 3. По сравнению с другими месторождениями (Brennan et al., 2024), изученный сподумен характеризуется повышенными содержаниями Na (740–2320 ppm), Mn (80–1450 ppm), Ti (2–130 ppm) и, особенно, Zn (115–2340 ppm) при умеренном содержании Fe (17–3890 ppm). На месторождении Пашки сподумен верхних горизонтов обеднен Fe, Ti и Be, но обогащен B по сравнению со сподуменом нижних горизонтов (рисунок 5). В отличие от зеленовато-белого сподумена, бесцветный сподумен (кунцит) из миаролы обеднен Na, B и Be; в тоже время он характеризуется повышенным содержанием Zn, которое достигает максимальных значений 2500–3215 ppm (рисунок 5).

Детальное исследование кристалла кунцита показало, что он обладает зонально-секториальным строением. Секториальность (на фоне общего обеднения примесями) выражена в обогащении Fe, B и Be пирамиды роста 2-го пинакоида относительно пирамиды роста призмы (021). От центра к краю кристалла в пирамиде роста грани призмы увеличиваются содержания Fe, Mn, Be, B, но уменьшаются – Ti и Ga (Иванов и др., 2024).

Для калиевого полевого шпата типоморфное значение имеют содержания примесей редких щелочных металлов – Li, Rb и Cs. По сравнению с другими месторождениями, Kfs месторождения Пашки предельно обогащен этими элементами (Li 92–660 ppm, Rb 2190–8130 ppm, Cs 62–980 ppm), что служит свидетельством их высокого содержания в расплаве. В распределении примесей наблюдается вертикальная зональность. От нижних к верхним горизонтам содержания Rb и Cs увеличиваются, а содержание Li – падает (рисунок 6). Первые два элемента являются несовместимыми ( $K_d(\text{Rb}) \approx 0.6$ – $0.8$ ,  $K_d(\text{Cs}) \approx 0.03$ – $0.1$ ; Icenhower, London, 1996; Hulsbosch et al., 2014) и их накопление на верхних горизонтах связано с процессом кристаллизационной дифференциации пегматитового расплава. Об этом свидетельствует уменьшение K/Rb отношения по восстанию пегматитовой жилы (рисунок 6). Поведение Li обусловлено его вхождением в состав сподумена, который образуется синхронно с полевым шпатом.

Еще одной особенностью состава изученного калиевого полевого шпата выступает его обогащенность фосфором (вплоть до максимальных значений, присущих редкометалльным пегматитам 1930–4700 ppm; рисунок 7). Фосфором обогащен и щелочной плагиоклаз – альбит (87–1375 ppm; рисунок 8). Снизу вверх в альбите увеличиваются содержания примесей Sr и Ba (рисунок 8).

Кварц из пегматитов Пашки характеризуется повышенными содержаниями Al (113–448 ppm), Li (3.3–83 ppm), Ge (8.3–23 ppm), B (0.8–14.3 ppm), но пониженным содержанием Ti (1.7–11.6 ppm). Эти особенности примесного состава кварца характерны для LCT-пегматитов (Müller et al., 2021). Температура, оцененная с помощью «Ti-в-кварце» геотермометра (Wark, Watson, 2006), составляет 415–540 °C. Закономерностей распределения элементов-примесей в кварце, связанных с вертикальной зональностью, не выявлено.

Как отмечалось выше, голубой берилл месторождения Пашки относится к щелочному (натриево-литиевому) типу. В еще большей степени, чем голубой, обогащен щелочами бесцветный берилл (рисунок 9). Как видно на графиках, он накапливает Li, Na, K и Rb. Одновременно бесцветный берилл

обеднен Fe, Ti. По аналогии с калиевым полевым шпатом, линейная зависимость  $K/Rb - Rb$  (в билогарифмических координатах), характеризующая вариации состава берилла, может служить индикатором процесса кристаллизационной дифференциации. Основываясь на вариациях состава берилла, можно предположить, что: (1) бесцветная и голубая разновидности этого минерала являются последовательными генерациями, (2) накопление щелочных компонентов в бесцветном берилле по сравнению с голубым отражает закономерности эволюции состава расплава во времени.

Кристаллы бесцветного берилла характеризуются зонально-секториальным строением. В секторе роста грани призмы содержания большинства примесей растут от центра к краю. Это касается, например, щелочных металлов, Fe, Ti, Mg. В секторе грани пинакоида содержания Cs и Rb также растут; в то же время содержания Mg, Ti, K падают. Такое разнонаправленное поведение примесей свидетельствует о важной роли кристаллохимического фактора при формировании внутрикристаллической неоднородности (Skublov et al., 2024).

Зональным строением обладают и кристаллы полихромного турмалина. Их характерной особенностью является наличие ядер, окрашенных в зеленые тона и обогащенных Fe, Mn и Zn, а также краевых зон розового цвета, обедненных перечисленными элементами (рисунок 10). Для объяснения наблюдаемых закономерностей предлагается двустадийная модель. Согласно этой модели, на ранней стадии турмалин кристаллизовался из высокофракционированного расплава, обогащенного Mn и Zn. На поздней стадии средой кристаллизации могли выступать «водный флюид, водно-силикатная или водно-солевая жидкости» (Смирнов, 2015), обедненные этими элементами и железом, но насыщенные Al, Li и F.

Установленные характеристики примесного состава породообразующих минералов свидетельствуют о крайне высокой степени фракционирования пегматитового расплава, из которого формировались продуктивные жилы месторождения Пашки. Ряд признаков (в первую очередь

уменьшение K/Rb отношения с ростом содержаний Rb и Cs в калиевом полевом шпате и берилле) указывает на важную роль процессов кристаллизационной дифференциации гранитовой магмы, изначально обогащенной редкими элементами, в последующей эволюции пегматитовой системы.

**3. Пониженный уровень содержаний иттрия и редкоземельных элементов в акцессорном гранате выступает дополнительным критерием генетической связи пегматитов месторождения Пашки с гранитами 3-й фазы комплекса Лагман, а вариации состава граната (более высокая марганцовистость граната из пегматитов по сравнению с гранитами, закономерное изменение содержаний Y и REE в гранате из гранитов, из пегматитов нижних и верхних горизонтов жил) отражают процессы кристаллизационной дифференциации гранитовой магмы.**

По данным Rb-Sr метода, возраст пегматитовых жил месторождения Пашки составляет ~21 млн лет ( $21.3 \pm 1.8$  млн лет, СКВО = 5.4), что согласуется с оценками возраста гранитов комплекса Лагман и пегматитов провинций Нуристан и Бадахшан, ранее полученных этим методом (Desio et al., 1964). Граниты комплекса Лагман слагают Алингарский плутон – крупную межформационную интрузию, приуроченную к области контакта нуристанской (PR<sub>1</sub>) и кашмундской (Т<sub>3</sub>) серий. Плутон сложен породами трех фаз внедрения: 1) средне-крупнозернистыми диоритами, кварцевыми диоритами, гранодиоритами, 2) крупнозернистыми порфиroidными биотитовыми гранитами, 3) средне-мелкозернистыми, иногда аплитовидными и крупнозернистыми пегматоидными биотитовыми и мусковитовыми гранитами. Граниты 3-й фазы образуют многочисленные массивы-сателлиты; наблюдаются постепенные переходы этих гранитов в шлировые пегматиты с нерезкими границами и в секущие пегматитовые жилы, расположенные в кровле массивов (Rossovskiy, Chmyrev, 1977). По особенностям минерального и химического состава они относятся к гранитам плюмазитового ряда. Их типичными аксессуориями выступают гранат, силлиманит, турмалин и берилл (Rossovskiy, Chmyrev, 1977).



Для сравнительной характеристики акцессорной минерализации были отобраны образцы мусковитовых гранитов из штокообразного тела в районе месторождения Пашки и гранитного массива, удаленного примерно на 10 км от месторождения. Отличительная особенность этих образцов – повышенное содержание акцессорного граната (в виде идиоморфных кристаллов размером 0.2–0.5 мм). Еще четыре образца с акцессорным гранатом были взяты с нижних и верхних горизонтов жилы № 3. Гранат здесь образует множественные кристаллы размером 0.4–2 мм, находящиеся в тесном сростании с турмалином.

По содержанию главных компонентов изучаемый гранат является альмандином с повышенным содержанием спессартинового минала ( $X_{\text{Sps}}$ ). Подобный гранат является типичным для плюмазитовых гранитов и пегматитов (Miller, Stoddard, 1981; du Bray, 1988). По сравнению с гранитами, где величина  $X_{\text{Sps}}$  составляет 0.16–0.20, гранат из пегматитов более марганцовистый ( $X_{\text{Sps}}$  0.26–0.58). На нижних горизонтах жилы № 3 гранат характеризуется зональностью. От центра к краям зерен  $X_{\text{Sps}}$  растет от примерно 0.30 до 0.45–0.50 и более. На верхних горизонтах гранат незональный.  $X_{\text{Sps}}$  в нем варьирует от 0.30 до 0.40.

По современным представлениям, образование спессартин-альмандинового граната в гранитах и пегматитах тесно связано с процессами кристаллизационной дифференциации магм и свидетельствует о высокой степени фракционирования расплавов, показателем чего выступает повышенное  $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe})$  отношение (du Bray, 1988). Зональность граната по марганцу может быть как прямой, так и обратной и отражает локальные факторы эволюции гранитовых магм, например, сокристаллизацию с гранатом минералов, обогащенных марганцем (Allan et al., 1981; Dahlquist et al., 2007; Samadi et al., 2014; Yu et al., 2021).

Кроме Mn, типоморфными примесями акцессорного граната выступают Y и редкоземельные элементы (REE). Уровень их содержаний в акцессорном гранате из гранитов зависит от того, к какому типу в рамках геохимической S-I-A-M классификации относятся граниты. В коллизионных

гранитах S-типа содержания Y и REE в акцессорном гранате понижены по сравнению с постколлизийными и анорогенными гранитами A-типа. Это обусловлено различиями геохимических характеристик гранитов (обогащенностью Y и REE A-гранитов по сравнению с S-гранитами) (Pearce et al., 1984). Сходные закономерности имеют место для пегматитов: в LCT-пегматитах, связанных преимущественно с S-гранитами (Černý, 1991), гранат обеднен Y и REE в сравнении гранатом из NYF-пегматитов (Nb, Y, F), ассоциированных главным образом с A-гранитами (Černý, Ercit, 2005).

В изученном гранате из гранитов 3-й фазы комплекса Лагман содержание суммы REE изменяется от 40 до 170 ppm, содержание иттрия – от 120 до 420 ppm. Сходные (хотя и несколько повышенные) содержания этих элементов наблюдаются в гранате нижних горизонтов пегматитовой жилы № 3 ( $\Sigma\text{REE}$  15–260 ppm, Y 70–695 ppm).

На верхних горизонтах содержания примесей заметно уменьшаются ( $\Sigma\text{REE}$  2.1–103 ppm, Y 4.3–314 ppm). Наблюдаемые закономерности можно связать с процессами кристаллизационной дифференциации гранитовой магмы: на ранних стадиях формирования пегматитовых жил Y и REE ведут себя как несовместимые элементы и накапливаются в магме, на поздних – их содержания падают благодаря кристаллизации минералов (в первую очередь самого граната) связывающих лантаноиды.

Уровень содержаний суммы редкоземельных элементов и иттрия в гранате из гранитов Лагман и пегматитов месторождения Пашки соответствует уровню содержаний этих элементов в гранате из S-гранитов и LCT-пегматитов. В тоже время он заметно ниже уровня содержаний  $\Sigma\text{REE}$  и Y в гранате из A-гранитов и NYF-пегматитов (рисунок 11).

Примерно те же закономерности можно видеть на редкоземельных спектрах (рисунок 12). Спектры располагаются в области граната из S-гранитов и LCT-пегматитов. Гранат из гранитов Лагман и нижних горизонтов жилы № 3 характеризуется близким уровнем содержаний тяжелых лантаноидов ( $\Sigma\text{HREE}$  43–168 ppm и 15–260 ppm),

сходными значениями лютеций-лантанового отношения ( $\text{Lu}_N/\text{La}_N$  520–7300 и 530–9700) и отрицательной европиевой аномалии ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  0.04–0.32 и 0.04–0.27). Гранат верхних горизонтов отличается пониженным содержанием тяжелых лантаноидов ( $\Sigma\text{HREE}$  2–103 ppm), менее дифференцированным характером редкоземельных спектров ( $\text{Lu}_N/\text{La}_N$  140–2700) и менее выраженной отрицательной европиевой аномалией ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  0.25–1.15).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований изучен минеральный состав сподуменовых пегматитов месторождения Пашки, рассмотрены главные закономерности вертикальной минералого-геохимической зональности продуктивных жил и получены новые данные о процессах эволюции пегматитового расплава.

Показано, что в состав пегматоидных гранитов с гнездами кварц-микроклин-альбитовых пегматитов, слагающих продуктивные жилы, входят шерл и фторэльбаит (нижние горизонты), Mn-Zn-содержащие эльбаит и фторэльбаит, щелочной Na-Li-содержащий берилл (верхние горизонты).

Выявлены характеристики состава порообразующих и аксессуарных 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 рудоносной гранитовой магмы.

Установлены основные тренды геохимической эволюции пегматитового расплава: накопление от нижних к верхним горизонтам 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 полевом 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.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение кристаллохимии минералов пегматитов с помощью рентгенографических и спектроскопических методов.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

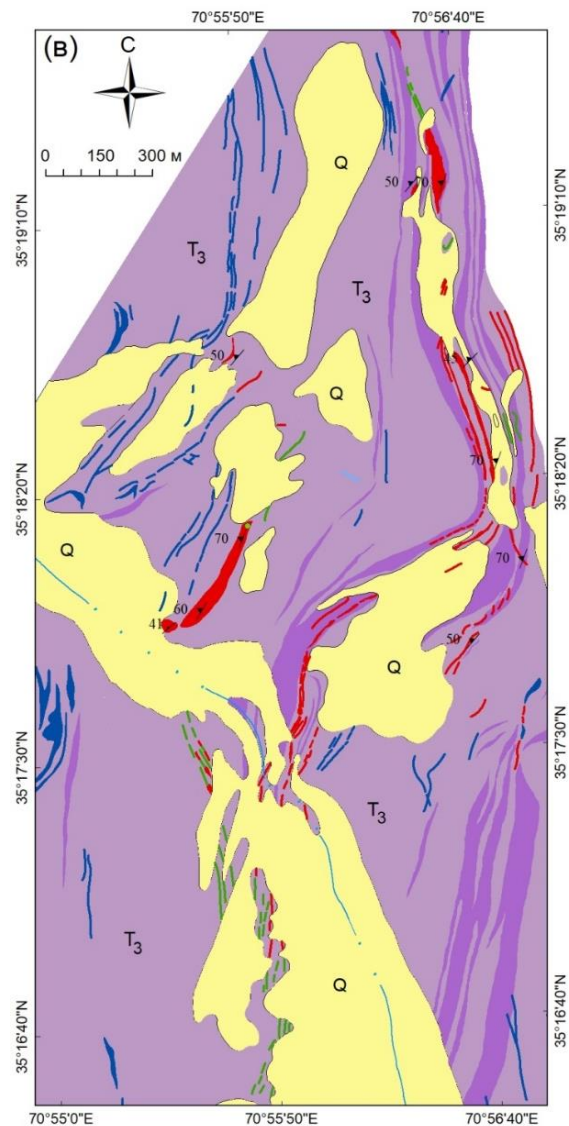
1. Иванов, М.А. Распределение элементов-примесей по зонам и секторам роста кристаллов сподумена (месторождение Пашки, Нуристан, Афганистан) / М.А. Иванов, Н. Хамдард, С.Г. Скублов, В.В. Смоленский // Минералогия. – 2024. – Т. 10. – № 2. – С. 46-57.

2. Скублов, С.Г. Примесный состав берилла из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан) / С.Г. Скублов, Н. Хамдард, М.А. Иванов, А.К. Гаврильчик, В.С. Стативко // Вестник геонаук. – 2024. – № 2. – С. 46-50.

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

3. Левашова, Е.В. Геохимия циркона из пегматитоносных лейкогранитов комплекса Лагман, провинция Нуристан, Афганистан / Е.В. Левашова, С.Г. Скублов, Н. Хамдард, М.А. Иванов, В.С. Стативко // Russian Journal of Earth Sciences. – 2024. – V. 24. – ES2011.

4. Skublov, S.G. Trace element zoning of colorless beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan) / S.G. Skublov, N. Hamdard, M.A. Ivanov, V.S. Stativko // Frontiers in Earth Science. – 2024. – V. 12. – 1432222.



- Q** Делювиальные, пролювиальные, коллювиальные и флювиогляциальные образования
- T<sub>3</sub>** Гранат-ставролит-мусковитовые, гранат-мусковит-биотитовые, биотит-амфиболовые сланцы, филлиты, филлитовые песчаники
- T<sub>3</sub>** Известняки, мраморизованные известняки
- Альбитизированные микроклиновые пегматиты
- Сподумен-микроклин-альбитовые пегматиты
- Интенсивно альбитизированные пегматиты со сподуменом
- Зональная сподуменовая микроклин-альбитовая жила с поллцитом
- Элементы залегания

Рисунок 1 – Схема геологического строения месторождения Пашки (по данным Б.Я. Вихтера и Г.К. Ерименко, 1973 г.)

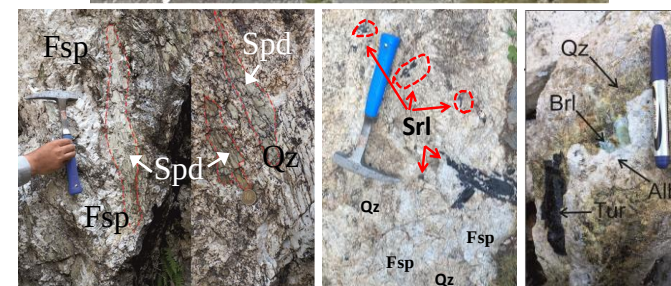
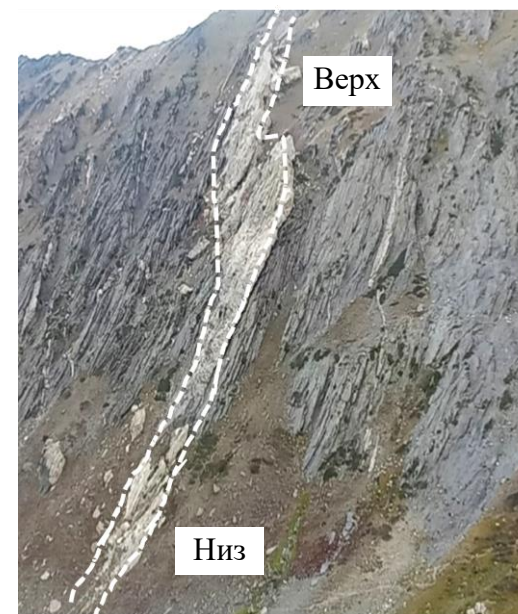


Рисунок 2 – Вверху: жила № 3. Расстояние между верхними и нижними горизонтами – 400 м. Внизу: фрагменты обнажений пегматитовых гнезд с крупными призматическими кристаллами зеленовато-белого сподумена, кристаллами шерла и берилла. Здесь и далее обозначения минералов по: Warr, 2021

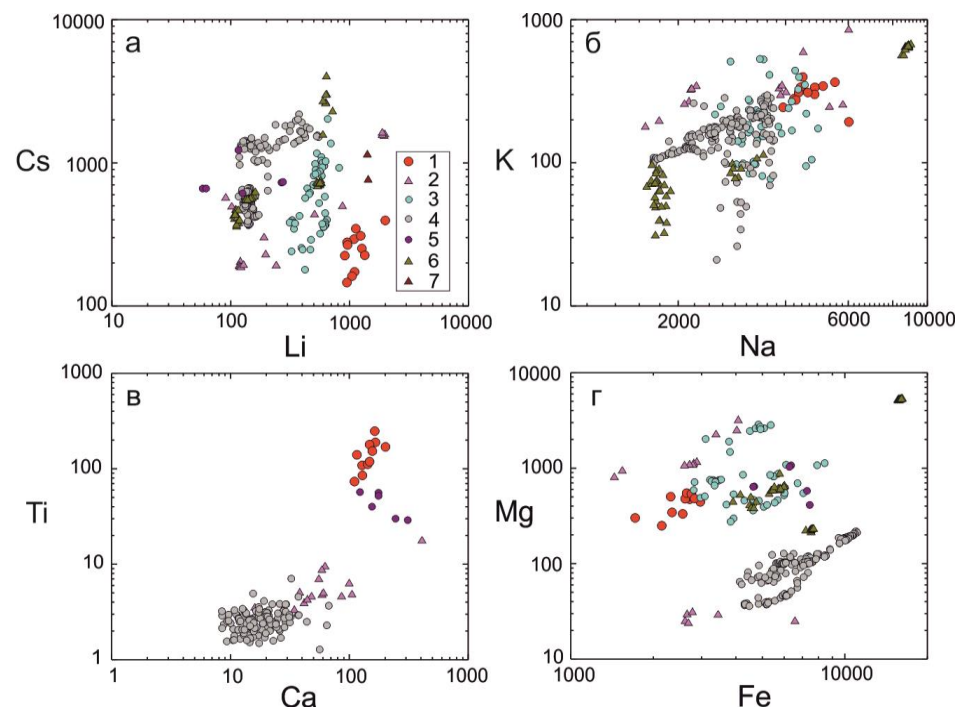


Рисунок 3 – Соотношение примесей в голубом берилле: 1 – месторождение Пашки, жила № 3; 2 – неопубликованные данные С.Г. Скублова и А.К. Гаврильчик; 3 – пегматиты Ямранга, Восточный Непал (Bhandari et al., 2023); 4 – месторождение Блю Майн, Калифорния, США (Pauy et al., 2021); 5 – пегматиты Ц. Альп, Италия (Vocchio et al., 2009); 6 – пегматиты Коктогая (Китай), Минас-Жерайс (Бразилия) и Ноумас (Южная Африка) (Cui et al., 2023); 7 – пегматиты района Хунянь, Китай (Jiang et al., 2023)

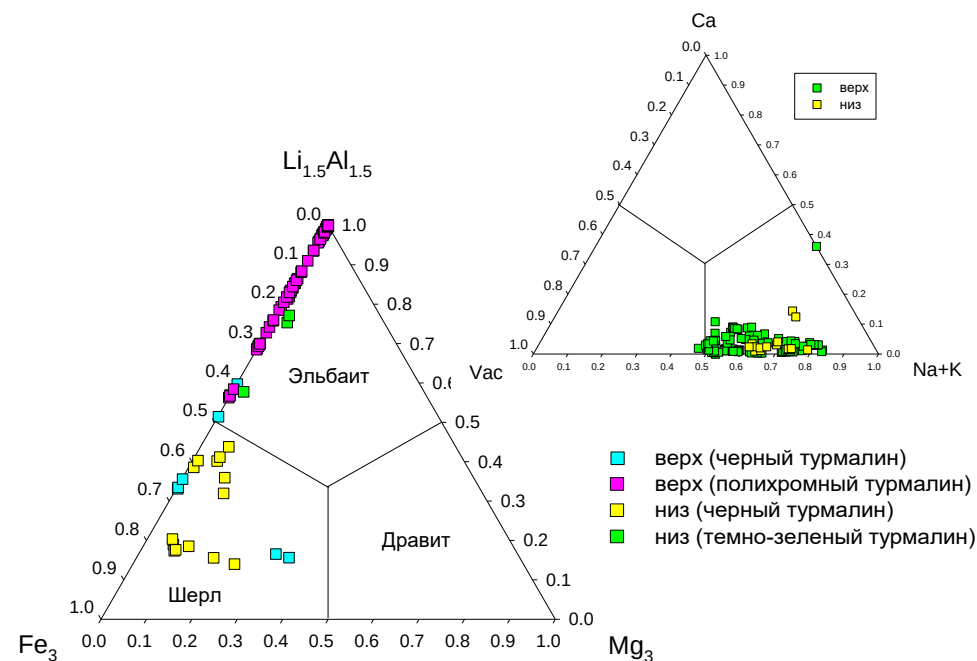


Рисунок 4 – Особенности состава турмалина жилы № 3 на тройных диаграммах (Hawthorne, Henry, 1999; Henry et al., 2011). Vac – вакансия в позиции X. Расчет кристаллохимических формул выполнялся на 15 катионов ( $Y+Z+T=15$ ). Содержание Li рассчитывалось при условии:  $B = 3$  к.ф.,  $Fe_{\Sigma} = Fe^{2+}$ ,  $OH+F=4$  к.ф., в предположении, что сумма отрицательных зарядов составляет 49 ( $O = 24.5$ )

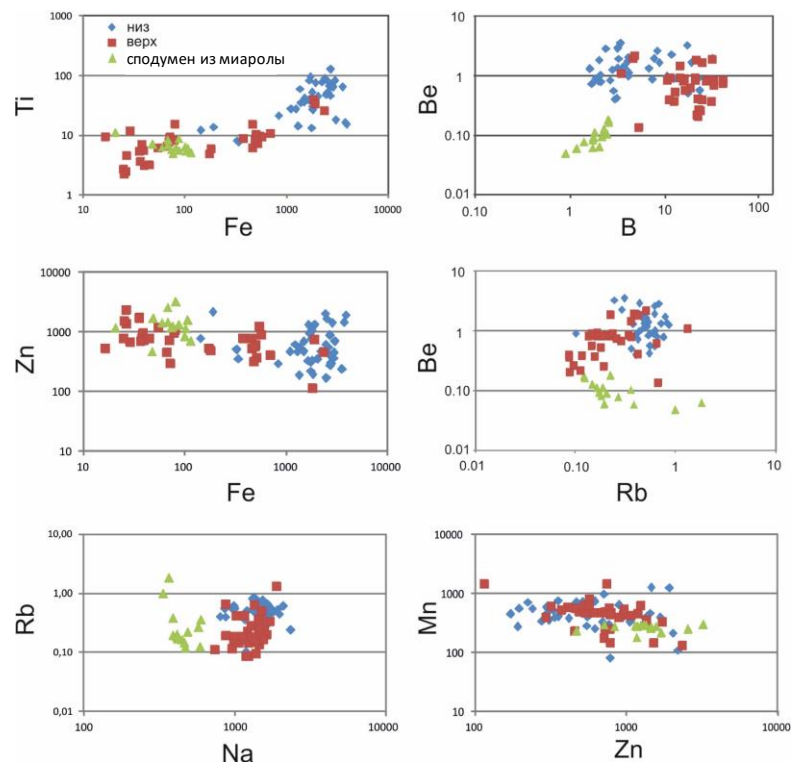


Рисунок 5 – Вариации состава сподумена из жилы № 3

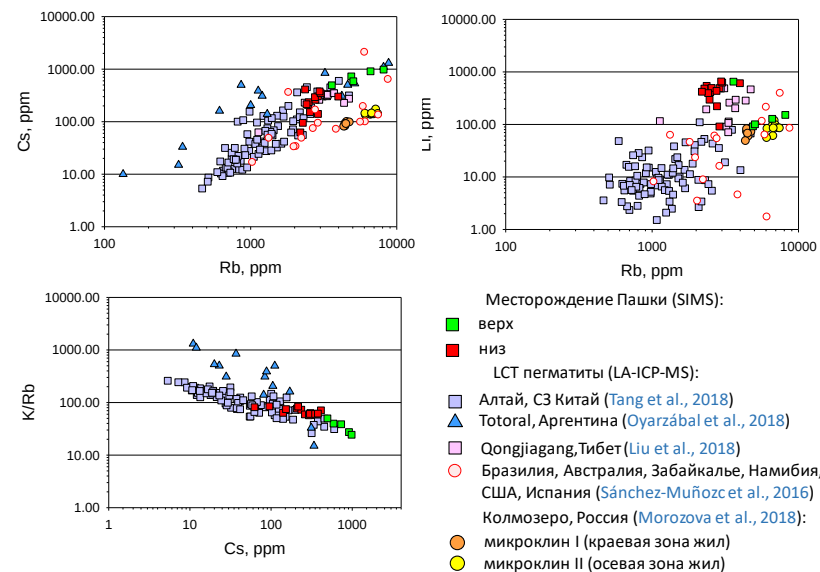


Рисунок 6 – Вариации состава калиевого полевого шпата из жилы № 3. Линейная зависимость K/Rb – Cs (в билогарифмических координатах) является индикатором процесса кристаллизационной дифференциации пегматитового расплава (Hulsbosch et al., 2014)

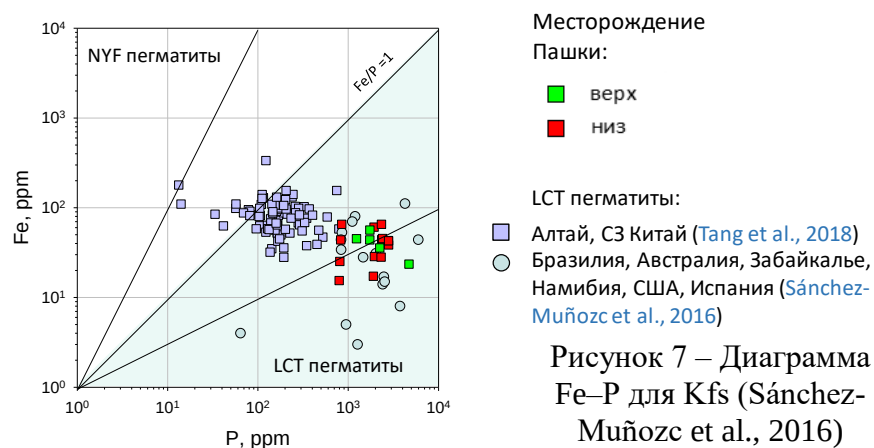


Рисунок 7 – Диаграмма Fe–P для Kfs (Sánchez-Muñoz et al., 2016)

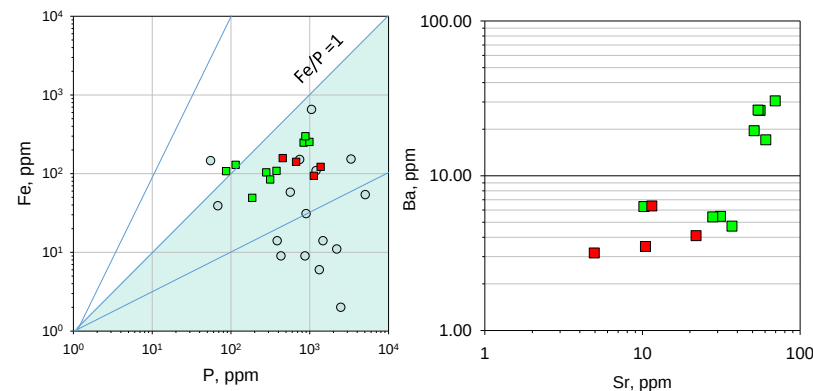


Рисунок 8 – Диаграммы для альбита. Условные обозначения см. рисунок 7



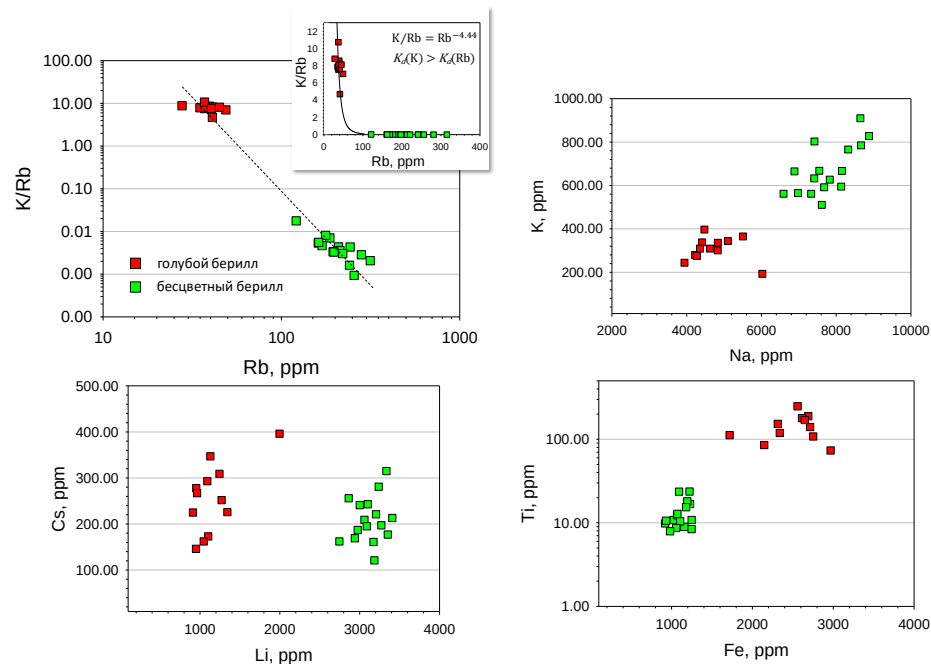


Рисунок 9 – Соотношение примесей в голубом и бесцветном берилле. Степенная зависимость  $C_{\text{Br}}^{\text{K}}/C_{\text{Br}}^{\text{Rb}} \sim [C_{\text{Br}}^{\text{Rb}}]^n$  описывает процесс рэлеевского фракционирования расплава

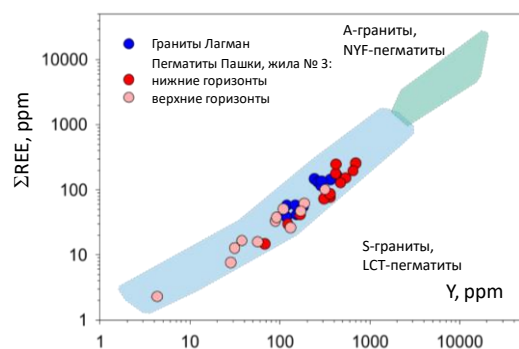


Рисунок 11 – Диаграмма Y–ΣREE с полями составов акцессорного граната из гранитов и пегматитов

Для построения графика использованы данные из работ: S-граниты, LCT пегматиты – Jung et al., 2009; Samadi et al., 2014; Zhou et al., 2015; Yu et al., 2021; Hernández-Filiberto et al., 2021; Feng et al., 2023; Zhao et al., 2023; A-граниты, NYF пегматиты – Harrison, 1988; Smeds, 1994; Wang, 2003; Müller et al., 2012; Hönig et al., 2014

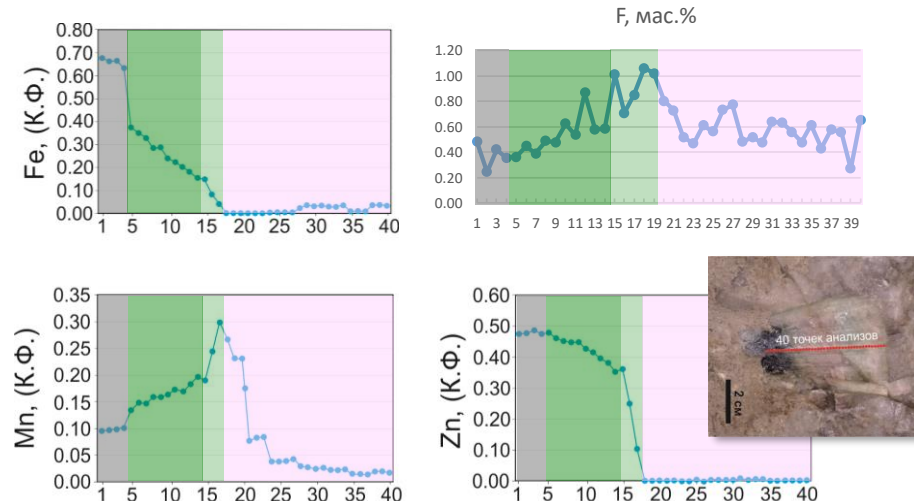


Рисунок 10 – Графики зональности кристалла полихромного турмалина

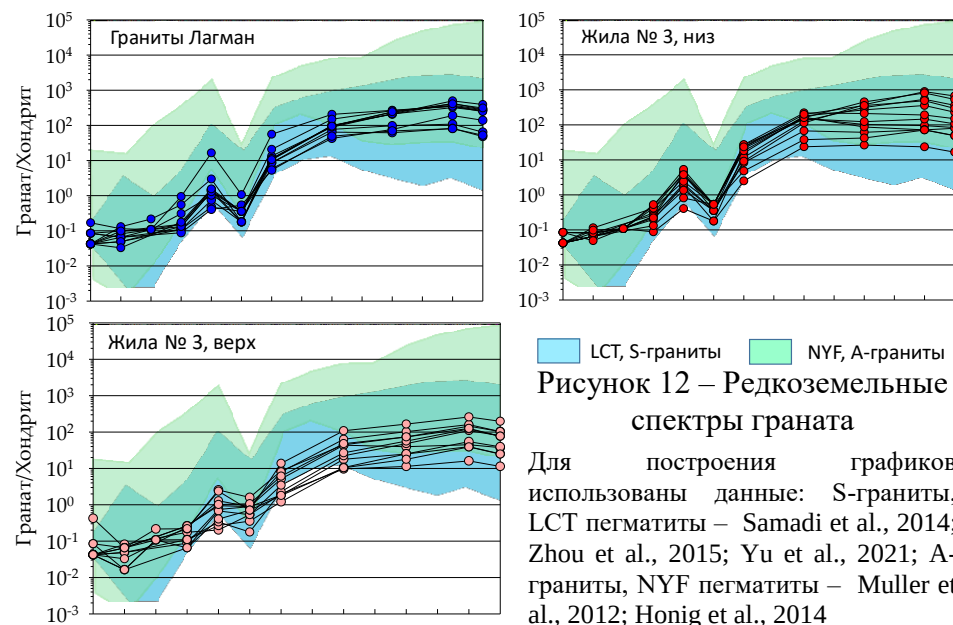


Рисунок 12 – Редкоземельные спектры граната

Для построения графиков использованы данные: S-граниты, LCT пегматиты – Samadi et al., 2014; Zhou et al., 2015; Yu et al., 2021; A-граниты, NYF пегматиты – Muller et al., 2012; Honig et al., 2014