

Санкт-Петербургский государственный университет

Сороченко Ксения Андреевна
Выпускная квалификационная работа

Геологическая позиция, состав и условия формирования редкометальных пегматитов Виртаоя (Карелия)

Уровень образования: бакалавриат
Направление 05.03.01 «Геология»
Основная образовательная программа СВ.5018 «Геология»

Научный руководитель:
Алексеев Иван Александрович
к.г.-м.н., заведующий кафедрой
ГМПИ, доцент

« » _____ 2024

Рецензент:
Коньшев Артем Александрович
в.н.с., Институт Геологии КарНЦ РАН. к.г.-м.н.

« » _____ 2024

Санкт – Петербург
2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	5
2. РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.....	6
3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ	8
4. ПЕГМАТИТОВОЕ ТЕЛО «ВИРТАОЯ»	11
4.1 Геологическая характеристика участка Виртаоя.....	11
4.2 Химический состав	14
4.3 Минеральный состав	16
4.3.1 Породообразующие минералы	16
4.3.2 Минералы тяжелой фракции	20
4.4 Условия формирования.....	32
5. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭТАЛОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ	34
6. РЕЗУЛЬТАТЫ	36
Список литературы.....	37

ВВЕДЕНИЕ

Литий является одним из критически важных для мировой промышленности металлов. Большая часть добываемого в мире лития используется для производства аккумуляторов, которые употребляются в телефонах и электромобилях. Как раз с ростом количества последних и связано повышение цен и спроса на литий. Помимо производства аккумуляторов, литий широко применяется и в других областях. В металлургии – для повышения прочности и гибкости металлов, в оптике – для производства стекол, которые защищают от ультрафиолетовых лучей, в атомной энергетике – для получения трития, необходимого для термоядерного синтеза. Также его применяют в авиации и военной технике, где необходимы литиевые консистентные смазки. Такой широкий спектр задач, которые выполняет литий в современной промышленности, влечет повышенный интерес к данному металлу.

Во всем мире промышленные месторождения лития представлены редкометальными пегматитами и рапой соляных озер. Несмотря на широкое использование рапы для получения лития, роль редкометальных пегматитов, как основного источника лития, вероятно, будет сохраняться. Это связано с тем, что запасы оксида лития в месторождениях альбит-сподуменовых пегматитов достигают первых миллионов тонн. Редкометальные пегматиты также могут служить источниками попутных элементов – тантала, ниобия, цезия и бериллия.

Примерами месторождений редкометальных пегматитов на территории России являются: Колмозерское (Кольский полуостров), Тастыгское (Республика Тыва), Завитинское (Восточное Забайкалье), Гольцовое (Восточные Саяны) (Загорский В.Е., 2010). Известные в мире крупные месторождения: Бикита (Зимбабве), Кингс-Маутин (Северная Каролина, США) (Kesler S.E., 2012), Вольта-Гранде (Бразилия) (Lagache M.), Гринбушес (Австралия) (Gruber P.W., 2001) и др.

Колмозерское месторождение сподуменовых пегматитов является самым крупным разрабатываемым месторождением на литий на территории России. Более того, по разным оценкам там сосредоточено примерно 26 % всех запасов Li в стране (Быховский, Архипова, 2016). Месторождение расположено в архейском зеленокаменном поясе на границе Мурманского блока и зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.

Объектом исследования в данной работе является альбит-сподуменовое пегматитовое тело участка Виртаоя. Участок находится в юго-западной части Республики Карелия, Северное Приладожье, в Суоярвском районе, недалеко от деревни Хаутаваара.

Схожая геологическая позиция, расположение в зеленокаменных поясах участка «Виртаоя» и Колмозерского месторождения вызывают научный интерес для их сравнения,

и соответственно более подробного изучения особенностей строения, минерального и химического состава, условий формирования объекта исследования.

Высокий спрос на литий и рост его потребления, с учетом ограниченной на данный момент его добычи на территории России, обуславливает практический интерес данной работы.

Основная цель работы: дать геологическую характеристику участка и определить позицию, особенности состава и условия формирования пегматитового тела.

Для выполнения заявленной цели были поставлены следующие задачи:

- Составить геологическую схему участка Виртаоя
- Установить особенности химического состава пегматита
- Установить минеральный состав пегматита
- Описать вмещающие породы посредством микроскопического изучения
- Определить состав и температурные условия газовой-жидких включений
- Составить заключение об условиях формирования

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика работ включает два этапа полевой и камеральный. Полевой этап проводился в два заезда (июнь и сентябрь 2023).

В ходе учебной геолого-геохимической практики в июне 2023 года была изучена территория участка Виртаоя. Проводилась детальная съемка участка масштаба 1:200, велась полевая документация и были отобраны образцы. В результате составлена геологическая схема (М 1:200).

В сентябре 2023г в научно-исследовательских целях проводились дополнительные работы на участке Виртаоя. Были отобраны образцы пегматита и вмещающих его пород, также отобрано 10 бороздовых проб по трем бороздам, проведена фотодокументация отобрано 7 образцов по вмещающим породам. Была дополнена схема, составленная летом 2023г масштаба 1:200, а также составлена схема в масштабе 1:100.

В качестве фактического материала для ВКР используется около 15 образцов, 10 бороздовых проб.

Камеральные исследования включали: использование визуальных (описание образцов), оптических (изучение шлифов), масс-спектрометрических (ICP-MS) и рентгеноспектральных (рентгеноспектральный микроанализ) методов изучения (Таблица 1). Эти исследования были проведены благодаря ресурсным центрам СПбГУ.

Ожидаемые результаты: составление схемы геологического строения участка, а также его описание и уточнение особенностей минерального и химического состава редкометальных пегматитов Виртаоя.

Таблица 1 Методы используемые для исследования

Вид исследования (что делали)	Цель (для чего)	Количество (т.е. объем)	Результат (что получено)
Петрографические исследования	Для изучения особенностей породообразующих минералов в пегматите. Для определения вмещающих пород	~ 20 образцов	Диагностированы вмещающие породы. Выделены особенности породообразующих минералов в пегматите.
Рентгеноспектральный микроанализ	Для определения минералов тяжелой фракции	1400 спектров	Установлены акцессорные минералы и их видообразующий состав, рассчитаны формулы
ICP MS	Для изучения химического состава	11 анализов	Получены валовые содержания химических элементов

2. РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

По составу материнской породы различают пегматиты гранитные и негранитные – щелочные, основные и ультраосновные. Наиболее распространены гранитные пегматиты. Которые в свою очередь разделяются по типу добываемого минерального сырья на слюдяные, редкометальные и хрусталеносные.

Редкометальные пегматиты являются важным источником Li, Cs, Ta, Nb и других редких металлов. Они распространены на всех континентах. Возрастной интервал их формирования еще шире, поскольку среди крупных пегматитовых месторождений лития и ряда других редких элементов есть и альпийские, т.е. мезо-кайнозойские объекты, однако главную массу редкометальных пегматитов составляют все же докембрийские образования — архейские и протерозойские. (Загорский В.Е., 1997)

Существуют разные подходы к классификации редкометальных гранитных пегматитов с использованием различных классификационных признаков. Ниже более подробно описаны наиболее часто используемые классификации.

Так, по классификации Н.А. Солодова редкометальные гранитные пегматиты подразделяются по соотношению породообразующих минералов: микроклина, сподумена и альбита, в результате выделяют следующие типы пегматитов: микроклиновые, микроклин-альбитовые, альбитовые, альбит-сподуменовые, амазонит-альбитовые, микроклин-петалитовые, мусковит-альбитовые и лепидолит-альбитовые (Солодов Н.А., 1962).

Согласно классификации В.Е. Загорского, В.М. Макагона и Б.М. Шмакина, гранитные пегматиты подразделяются на пять формаций: редкометально-редкоземельную, редкометальную, слюдоносную и полевошпатовую. Среди пегматитов редкометальной формации выделяются петалитовая и сподуменовая подформации, в составе которых выделяются минерагенические эволюционные ряды и парагенические типы (Таблица 2) (Загорский В.Е., 2003).

Таблица 2 Классификация редкометалльных пегматитов по Загорскому В.Е., Макагону В.М., Шмакину Б.М.

Формация	Подформация	Минерагенический эволюционный ряд	Парагенетический тип
Редкометалльная	Петалитовая	Цезий-тантал-литиевый (комплексный)	Петалит-калишпат-альбитовый
		Фтор-тантал-литиевый	Лепидолит-альбитовый
		Фосфор-тантал-литиевый	Амблигонит-альбитовый
		Литиевый	Петалит-калишпат-альбитовый
		Бериллиевый	Альбитовый
	Сподоуменовая	Цезий-тантал-литиевый (комплексный)	Сподоумен-калишпат-альбитовый
		Фосфор-тантал-литиевый	Монтебразит-сподоумен-калишпат-альбитовый
		Тантал-олово-литиевый	Сподоумен-калишпат-альбитовый
		Литиевый	Сподоумен-калишпат-альбитовый
		Тантал-бериллиевый	Альбитовый

Таким образом, характеристика редкометалльных пегматитов может быть различной в зависимости от используемой классификации и используемых в ней классификационных признаков.

Редкометалльные пегматиты имеют богатый минеральный и химический состав. Наиболее распространенные порообразующие минералы: кварц (SiO_2), микроклин ($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$), альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$), мусковит ($\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$), сподоумен ($\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$). Акцессорные: берилл ($\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$), турмалины ($\text{Na}(\text{Y})_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4]$), топаз ($\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{F},\text{OH})_2$), колумбит ($(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$), танталит ($(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$), поллуцит ($(\text{Cs}, \text{Na})_2(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), касситерит (SnO_2), апатит ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$), гранат ($(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$, $\text{Ca}_3(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Cr})_2[\text{SiO}_4]_3$), флюорит (CaF_2).

3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Территория участка Виртаоя приурочена к Хаутаваарской зеленокаменной структуре, которая является южным окончанием Ведлозерско–Сегозерского архейского зеленокаменного пояса. Пояс расположен в пределах архейского Карельского кратона (Рисунок 1).

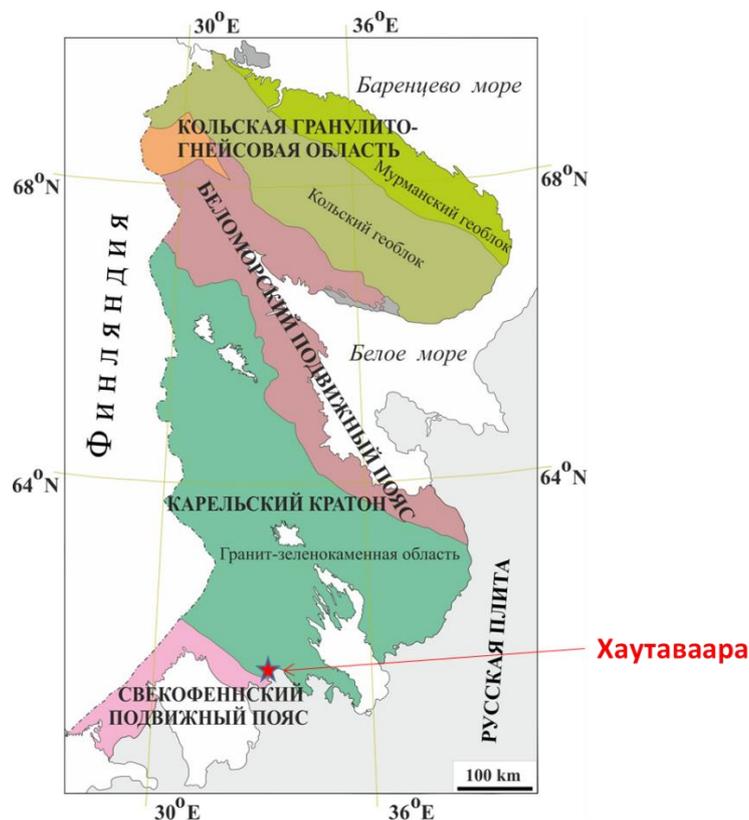


Рисунок 1 Схема тектонического районирования

Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс протягивается более чем на 300 километров в субмеридиональном направлении при ширине 50-60 километров. Пояс преимущественно состоит из метаморфизованных и деформированных осадочно-вулканогенных пород коматиит-базальтовой и базальт-андезит-дацитовый серий. (Кожевников В.Н., 2000)

Геологическое строение Хаутаваарской структуры описано на основании отчета о результатах съемки масштаба 1:50000 и среднемасштабного геологического картирования (Сиваев В.В., 1988г).

Хаутаваарская зеленокаменная структура расположена в юго-западной оконечности Ведлозерского зеленокаменного пояса и вытянута в меридиональном направлении на 100 километров при максимальной ширине 10-12 километров (Рисунок 2).

Стратиграфический разрез Хаутаваарской зеленокаменной структуры представлен осадочно-вулканогенными образованиями верхнего архея: породами коматиит-базальтовой, базальтовой, андезит-дацитовый и дацит-риолитовой формаций.

В пределах Хаутаваарской зеленокаменной структуры присутствуют стратиграфические образования только верхнего архея. Осадочно-вулканогенные образования верхнего архея относят к лопийскому комплексу и подразделяют на шотозерскую толщу, состоящую из трех подтолщ, и хаутаваарскую серию, состоящую из лоухиваарской, калаярвинской, кульюнской, усмитсанъярвинской и виетуккалампинской свит.

На Хаутаваарской площади четвертичный покров имеет сложное многослойное строение. Образования четвертичной системы представлены ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями.

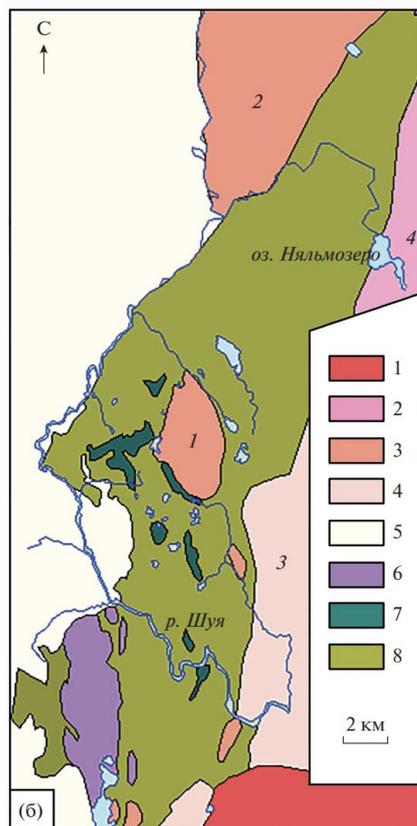


Рисунок 2 Упрощенная схема геологического строения Хаутаваарской зеленокаменной структуры (б) по материалам Карельской ГЭ (производственный отчет В.В. Сиваева и А.Ф. Горошко за 1988г.) и геологической карте СССР м-ба 1 : 200000 (лист Р-36-ХV) с дополнениями (б): 1 – граниты рапакиви Улялегского массива (1.5 млрд лет), 2 – умеренно-щелочные лейкограниты Няльмозерского массива, 3 – гранитоиды Хаутаваарского комплекса (2.74 млрд лет), 4 – Шуйский гранодиоритовый массив, 5 – нерасчлененные граниты и гранито-гнейсы, 6 – гипербазиты Хюрсюльского комплекса, 7 – феррогаббро Виетуккалампинского комплекса (2.9 млрд лет), 8 – мезоархейские вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы (3.0–2.85 млрд лет). Массивы: 1 – Хаутаваарский, 2 – Чалкинский, 3 – Шуйский, 4 – Няльмозерский.

В пределах Хаутаваарской площади развиты разнообразные по возрасту и составу интрузивные и ультраметаморфогенные образования, занимающие около 60% территории, слагая крупные массивы и мелкие тела различной формы.

Наиболее древними образованиями являются ранне-позднеархейские ультраметаморфогенные плагиогранито-гнейсы, полимигматиты, мигматит-граниты нерасчлененного сямозерского комплекса.

В позднеархейское время сформировались пять комплексов интрузивных пород разнообразного состава (от ультраосновного до ультракислого и щелочного), для которых характерна пространственная связь с лопийскими зеленокаменными структурами: Силлово-дайковый комплекс Кайнооя ультраосновных-основных пород, Хюрсюльский комплекс мафит-ультрамафитов, Шуйский комплекс синорогенных гранитоидов, Хаутаварский комплекс позднеорогенных гранитоидов и комплекс малых интрузий Виртаоя.

В раннепротерозойское время сформировался Улялегский подкомплекс гранитов рапакиви, к нему относят Салминский и Улялегский массивы. На территории располагается только Улялегский массив.

Наибольший интерес представляет комплекс малых интрузий Виртаоя. Так как, со второй фазой этого комплекса и связывают сподумен-микроклин-альбитовые пегматиты, микроклин-плагиоклазовые пегматиты и турмалин-мусковитовые граниты.

4. ПЕГМАТИТОВОЕ ТЕЛО «ВИРТАОЯ»

4.1 Геологическая характеристика участка Виртаоя

Участок представлен коренным выходом пегматитового тела протяженностью около 30м и видимой мощностью от 3 до 10м. Генеральное простирание площади коренного выхода северо-восточное. Отмечены три старые канавы, пройденные в крест простирания выхода пегматита. Контакты с вмещающими породами тектонической (Рисунок 3).

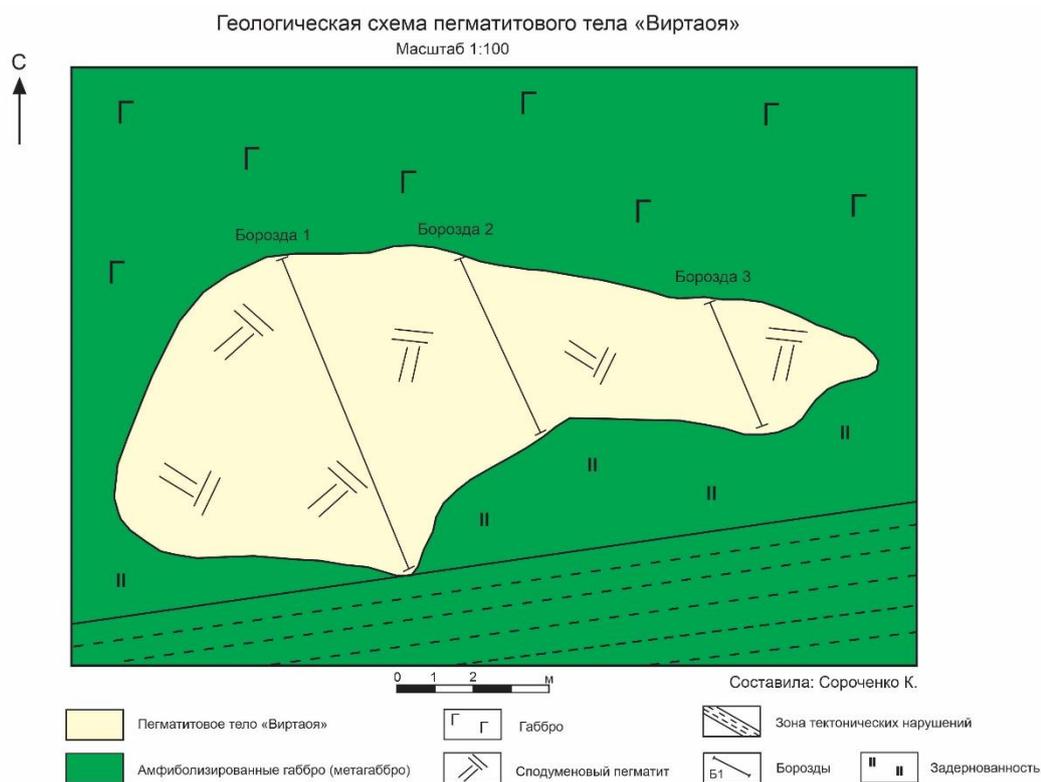


Рисунок 3 Геологическая схема масштаба 1:100 пегматитового тела "Виртаоя"

Пегматиты сложены крупными кристаллами кварца, микроклина, светлой слюды, сподумена и альбита (в том числе и его пластинчатой разновидности – клевеландит). Размеры кристаллов сподумена до 30-35см по удлинению и до 7см в поперечнике. Среди второстепенных минералов выделены турмалин (шерл) и гранат (Рисунок 4).



Рисунок 4 Западная часть пегматитового тела. Борозда 1.

Вмещающие породы описаны по 10 точкам наблюдения, а также по 7 шлифам, сделанным из отобранных образцов.

Визуально представляют собой темно серую, зеленовато-серую мелкозернистую, массивную породу. Наблюдаются мелкие светлые жилки кварца. На выветрелой стороне прослеживается пятнистая текстура (Рисунок 5).



Рисунок 5 Образец 3B13 - амфиболитованное габбро (а – свежий скол, б- выветрелая сторона)

В ходе петрографического описания порода определена как амфиболитованное габбро (метагаббро). Микроструктура – нематобластическая. Порода сложена роговой обманкой, средним плагиоклазом. Как вторичный минерал присутствует кварц и биотит. Также наблюдаются плеохроичные дворики разрушенного циркона. Роговая обманка интересная так как дает и слабые и аномальные цвета интерференции, вероятно большое содержания Al и присутствие Na в химическом составе. О том, что это было габбро можно судить только по текстуре породы, так как клинопироксен не сохранился (Рисунок 6).

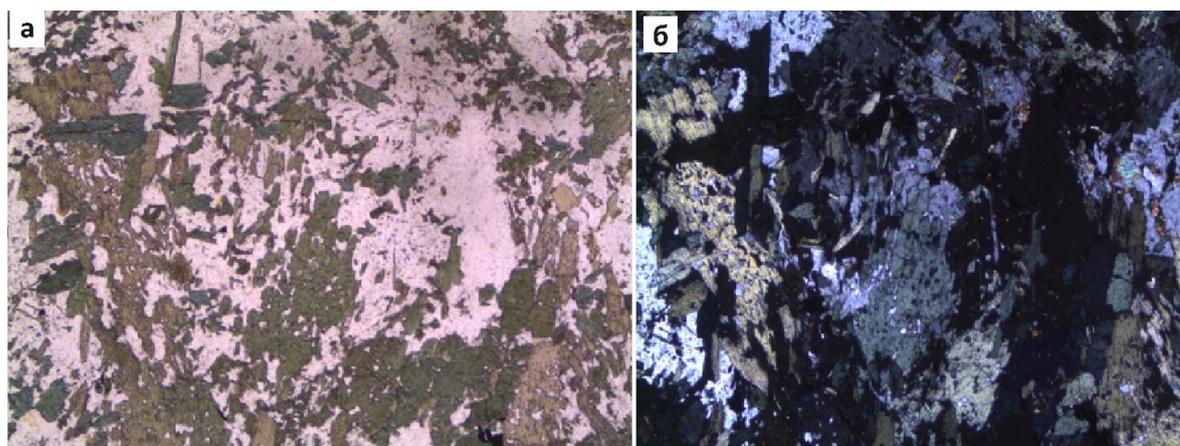


Рисунок 6 Образец 3B08 (а – в параллельных николях, б – в скрещенных)

Также определен минеральный состав жилок. Они сложены хлоритом, кварцем и эпидотом. Центральная часть сильно ожелезненная (Рисунок 7).

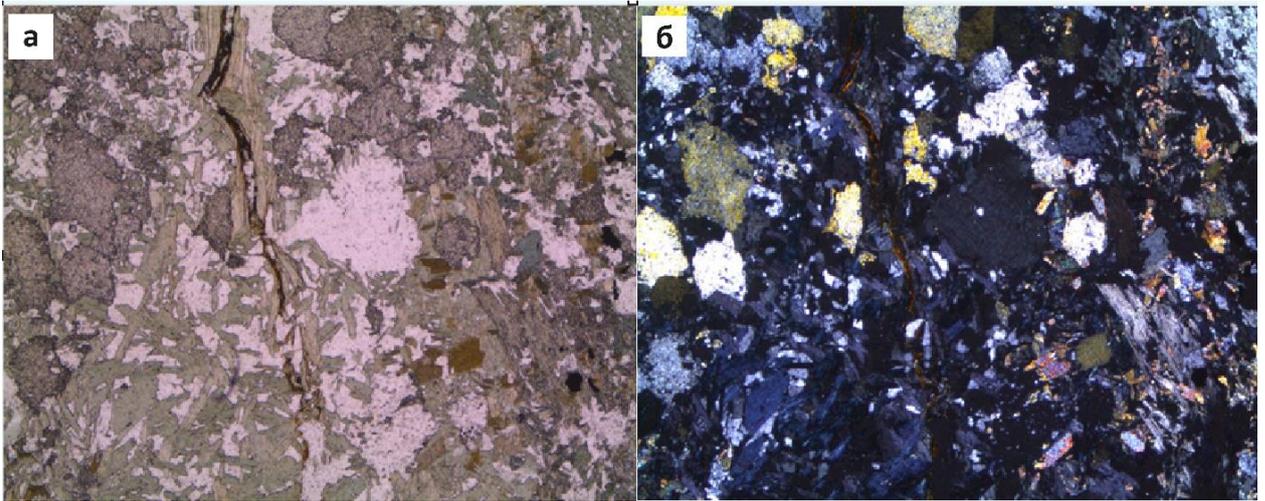


Рисунок 7 Образец 3B11 (а – в параллельных николях, б – в скрещенных)

4.2 Химический состав

Редкометалльные пегматиты и пегматиты Виртаоя, в частности, характеризуются широкими вариациями химического состава.

Содержание лития по данным ICP-MS варьирует от 89 до 157 ppm (по бороздам), а в валовой пробе достигает 537 ppm. С вероятностью 95% литий коррелирует с марганцем, бериллием, цинком и легкими редкими землями (La, Ce, Pr, Nd) (Рисунок 8).

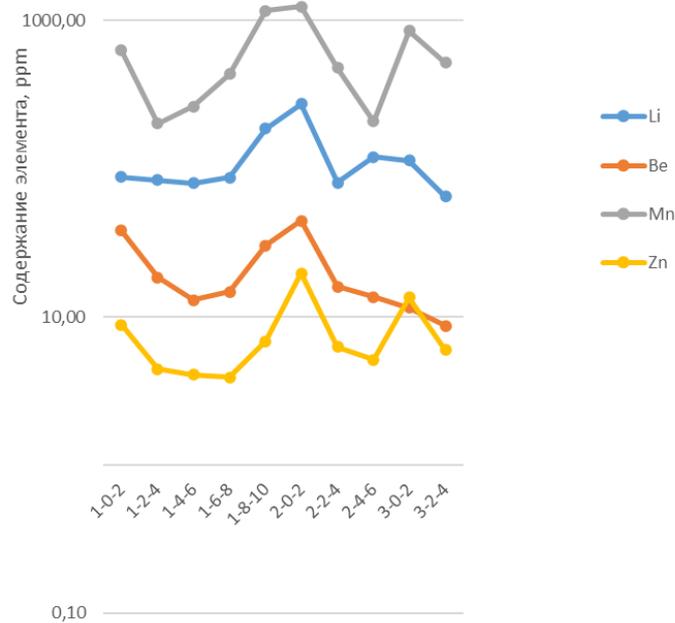


Рисунок 8 График распределения Li, Be, Mn и Zn по бороздам

Также отмечено высокое содержание марганца, в среднем 598,69 ppm. Помимо этого, высокие содержания Ta и Nb, 128 и 32 ppm соответственно. Кроме того, содержание

цезия варьируют в бороздовых пробах от 31 до 46 ppm, в то время как в валовой пробе достигает 238 ppm. Вместе с тем установлены высокие содержания рубидия от 111 до 374 ppm по бороздам и 765 ppm в валовой пробе (Рисунок 9). В то же время довольно низкие содержания бериллия, в среднем по бороздам около 21 ppm, хотя в валовой пробе достигает 847 ppm. При этом берилл не обнаружен.

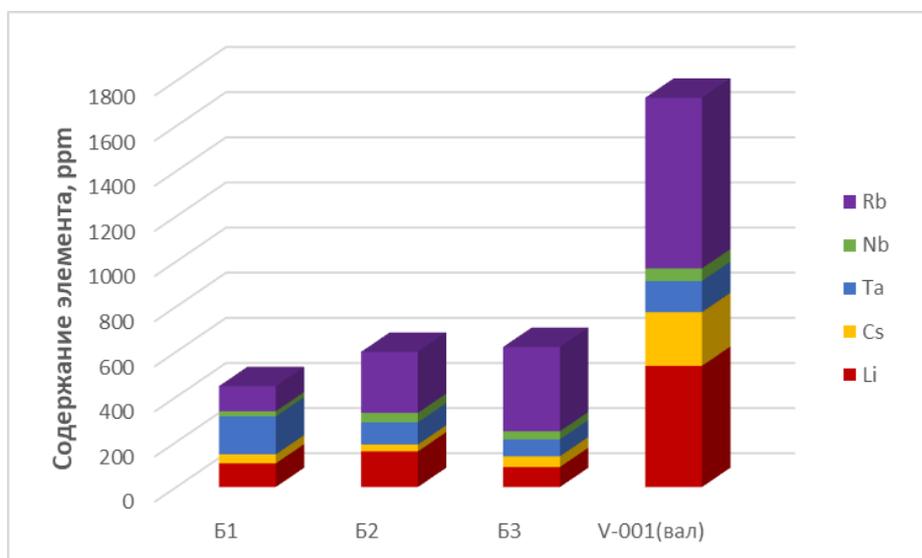


Рисунок 9 Гистограмма содержаний Li, Cs, Ta, Nb и Rb в каждой борозде и в валовой пробе

Касательно редкоземельных элементов можно подчеркнуть обеднённость как легкими, так и тяжелыми РЗЭ. Нормирование РЗЭ проводилось по (Boynnton W.V., 1984). На графике хорошо прослеживается равномерность, несмотря на разные содержания элементов. Также можно отметить наличие европейского минимума, наиболее сглаженного для первой борозды и более контрастного для валовой пробы и борозды два и три. Кроме того, четко прослеживается М-образный вид спектров распределения редкоземельных элементов (Рисунок 10).

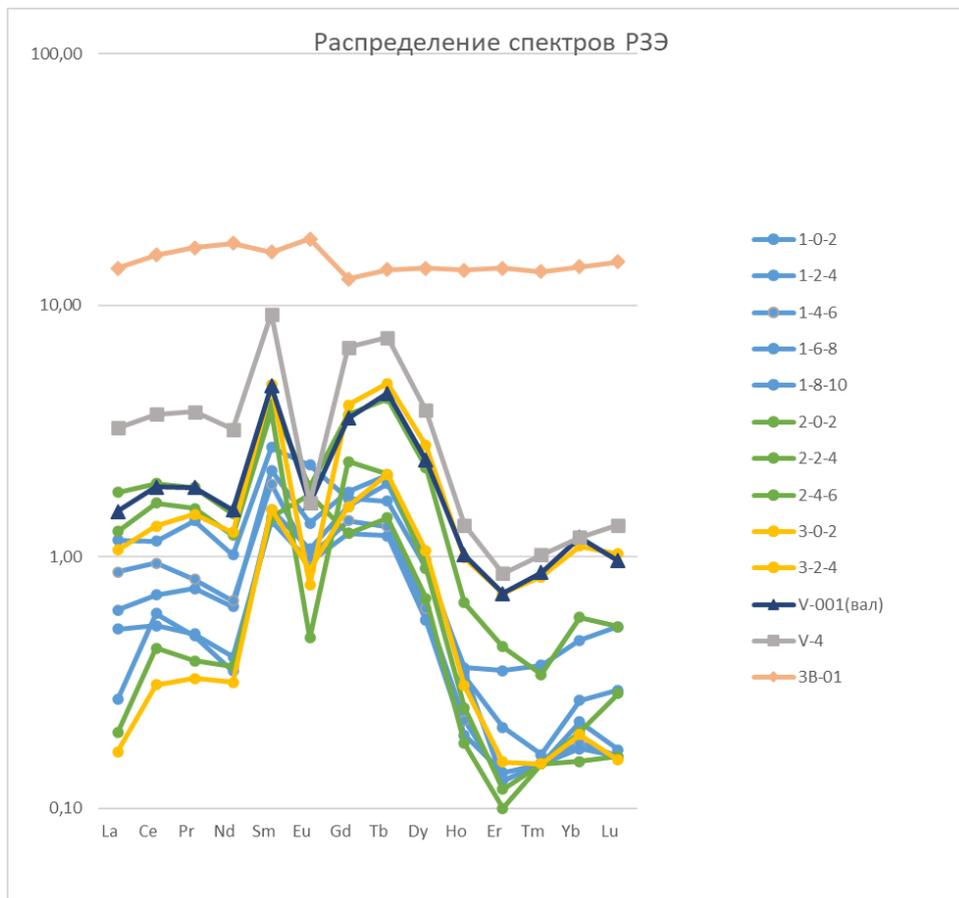


Рисунок 10 Спектры распределения РЗЭ. Синим - борозда 1, зеленым - борозда 2, желтым - борозда 3, черным - валовая проба. Серым – полевошпатовый пегматит, а оранжевым - вмещающие

4.3 Минеральный состав

4.3.1 Породообразующие минералы

Среди породообразующих минералов, слагающих пегматитовое тело можно выделить: сподумен, плагиоклаз (альбит и клевеландит), КПШ (микроклин), слюды и кварц.

Сподумен

Кристаллы сподумена идиоморфные, хорошо видна длиннопризматическая форма кристаллов (досковидный облик). Ориентировка кристаллов отсутствует, т.к. видны различные сечения. Цвет серовато-белый. Встречаются шестоватые и пластинчатые агрегаты – клевеландит. Размеры кристаллов 3-6 см в поперечном разрезе, а по удлинению достигают 30-40 см. Присутствуют следы ожелезнения, выраженные мелкими красно-бурыми пятнами (Рисунок 11).



Рисунок 11 Пегматит. Красным цветом выделен сподумен, синим – слюда.

Плагиоклаз

Минералы группы плагиоклаза в пегматите представлены кристаллами альбита (Рисунок 12) и его пластинчатой разновидностью – клевеландитом. Цвет – белый. Размеры от 3 до 6 -7 см. Имеют совершенную спайность. Менее идиоморфные чем кристаллы сподумена. Более сильно выражено ожелезнение. Также встречаются радиально лучистые агрегаты клевеландита.

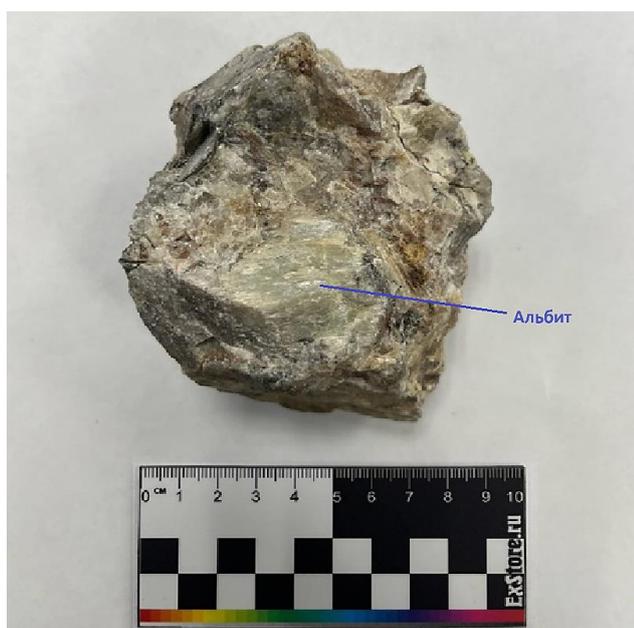


Рисунок 12 Образец ВИ-1, кристалл альбита в пегматите

КПШ

Представлен микроклином (Рисунок 13). Кристаллы чуть менее идиоморфные, чем кристаллы сподумена. Цвет красноватый, мясо-красный, розоватый. Совершенная спайность. В шлифах микроклин не имеет ни явной микроклиновой решетки, ни пертитовой структуры, отмечены только вторичные изменения – пелитизация и серицитизация.



Рисунок 13 Кристалл микроклина из пегматита Виртаоя. Образец ВИ-4

Слюда

Слюды пегматита Виртаоя характеризуются разнообразием форм выделения: крупные (до 3-5 см) кристаллы, отдельные чешуйки и шпирь, рассеянные в основной массе, мелкие выделения, развивающиеся по трещинам в минералах, включения в породообразующих минералах.

Химический состав слюд характеризуется широкими вариациями составов и не позволяет однозначно выделять отдельные разновидности, т.к. даже в пределах одного зерна слюды состав значительно варьирует (Рисунок 14, Таблица 3).

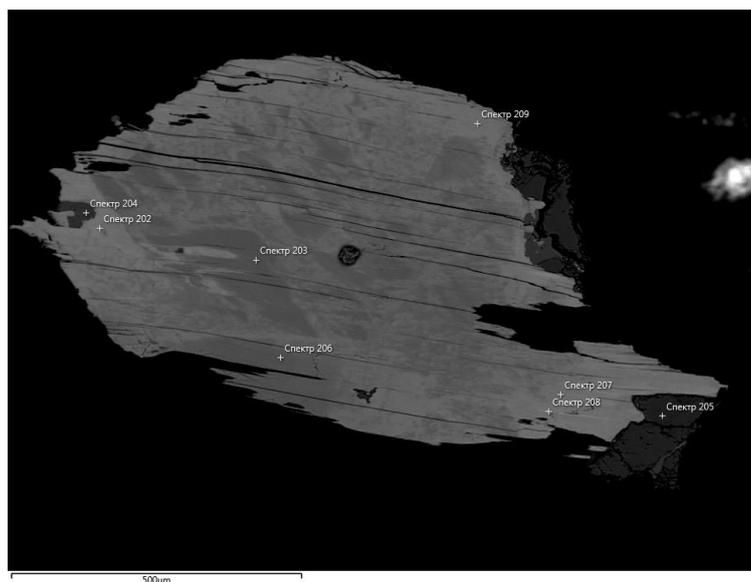


Рисунок 14 Зерно слюды. Изображение в BSE

Таблица 3 Вариации состава слюды в пределах одного зерна

	202	203	206	207	208
SiO ₂	49,28	44,87	44,72	47,05	47,39
Al ₂ O ₃	21,42	36,08	34,56	23,97	21,96
FeO _{total}	5,76	1,65	1,82	4,43	5,23
MnO	2,09	0,21	0,44	1,59	1,91
Na ₂ O	Н.о	0,3	0,35	Н.о.	Н.о.
K ₂ O	8,68	10,2	9,9	8,72	7,78
Rb ₂ O	2,32	1,13	0,91	2,71	2,6
Cs ₂ O	1,44	0,27	Н.о.	1,38	3,55
F	6,31	Н.о.	Н.о.	4,98	5,43
Сумма	97.3	94.7	92.7	94.83	95.85

Примечание: Н.о. – содержания ниже предела обнаружения

Как известно, для слюд одним из важных и определяющих параметров является содержание лития, которое невозможно определить методом электроннозондового анализа. Предлагаемые для расчета содержаний лития формулы Тишendorфа различаются для ди- и триоктаэдрических слюд и позволяют рассчитывать содержания этого элемента по содержаниям SiO₂, MgO, Rb₂O или F для триоктаэдрических и Rb₂O и F для диоктаэдрических. Однако, применение подобного расчета требует предварительного определения принадлежности слюды к одному из двух типов. Поэтому, для определения видового состава слюд была использована диаграмма, не учитывающая содержания лития в составе слюды (Рисунок 15). Расчет кристаллохимических формул проводился по методу Стивенс.

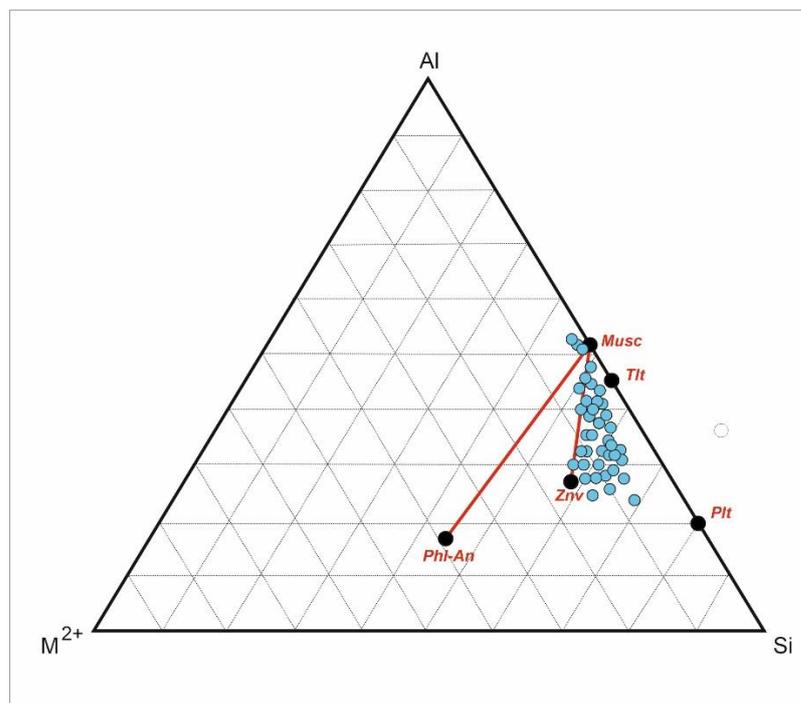


Рисунок 15 Положение точек состава слюд пегматита Вартаоя на классификационной диаграмме

Как видно из рисунка, слюды пегматита Вартаоя варьируют по составу от мусковита до циннвальдита.

Среди особенностей слюды следует отметить не только неоднородность их состава, но и высокое (для слюды) содержание цезия (до 3,55 масс. % Cs_2O) и фтора (до 10,8 масс. % F), в меньшей мере рубидия (до 2,71 масс. % Rb_2O).

Кварц

Выделяется несколько кристаллических разновидностей кварца – морион, дымчатый, обычный белый. Также встречается сахаровидная форма кварца. Цвет разный, белый, серый, бесцветный, черный. Говорить о размерах кварца сложно из-за их ксеноморфной формы, но определенно это гигантозернистые агрегаты. Количество кварца по телу пегматита увеличивается в 3-СЗ направлении.

4.3.2 Минералы тяжелой фракции

В редкометалльных пегматитах большое разнообразие акцессорных минералов, однако нами были изучены только минералы тяжелой фракции.

Гранат

Зерна граната представлены ограненными кристаллами округлой формы (возможно, ромбододекаэдры), буроватого, оранжеватого цвета (Рисунок 17). Представлен преимущественно марганцовистой разновидностью – спессартином, но также присутствуют разновидности, отвечающие составу гранатов альмандин-спессартинового ряда с содержанием

альмандинового минала до 15 масс.% (Рисунок 16). Составы изученных зерен и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах представлены в таблице ниже (Таблица 4). Формулы рассчитывались на 12 атомов кислорода.

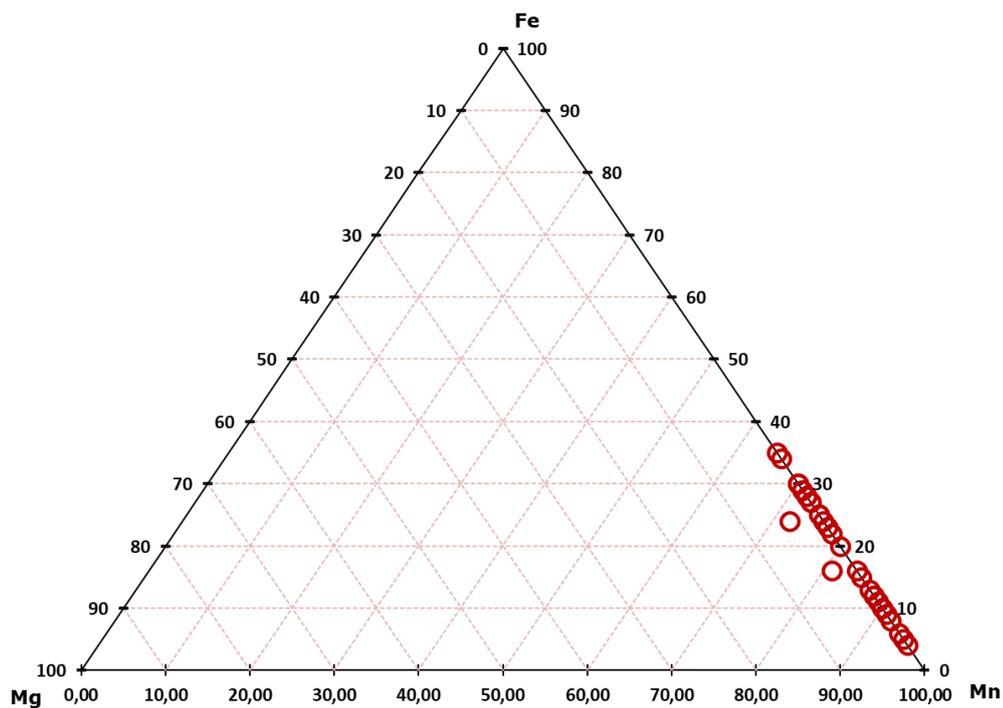


Рисунок 16 Положение точек состава гранатов пегматита Виртаоя на классификационной диаграмме Mg-Fe-Mn.

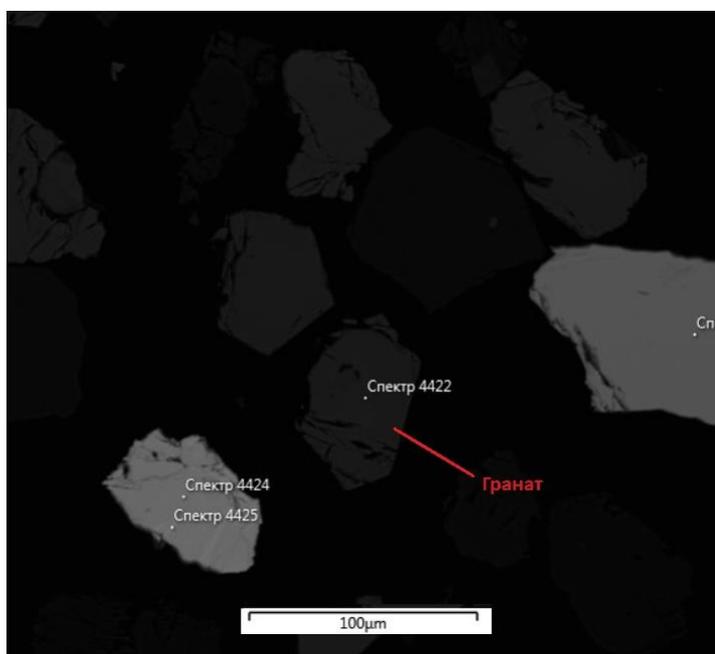


Рисунок 17 Зерно граната. Изображение в BSE

Таблица 4 Вариации состава (масс. %) и кристаллохимические формулы гранатов из пегматита Виртаоя

Элемент	Вариации содержания элементов, масс. %	Элемент	Вариации коэффициентов в формуле
Al ₂ O ₃	19,11 – 23,29	Al	1,9 - 2
SiO ₂	34,22 – 41,1	Si	2,9 – 3,07
CaO	0 – 4,66	Ca	0 – 0,4
TiO ₂	0 – 0,25	Ti	0 – 0,02
MnO	28,45 – 42,55	Mn	2,0 – 2,8
FeO	1,84 – 15,33	Fe	0,1 – 1,06
n	64	n	64

Примечание. n – число анализов

Турмалин

В пегматите Виртаоя турмалин присутствует в виде сростков практически черных кристаллов, достигающих 1,5 см. по длинной оси, распространен неравномерно. Характеризуется практически безмагнезиальным составом, высокими содержаниями марганца (до 1,06 масс. % MnO) и цинка (до 0,6 масс. % ZnO) (Таблица 5).

Таблица 5 Средние составы и кристаллохимические формулы турмалинов из пегматита Виртаоя.

Компонент, масс. %	
SiO ₂	36,97±0,86
TiO ₂	0,23±0,05 (5)*
Al ₂ O ₃	36,01±1,12
Cr ₂ O ₃	Н.о.
FeO _{total}	8,88±1,46
MnO	0,84±0,22
MgO	0,74±0,07 (2)*
CaO	0,49±0,20 (56)*
Na ₂ O	2,16±0,27
K ₂ O	Н.о.
ZnO	0,51±0,09 (27)*
n	(67)
Формульные коэффициенты нормализованные на T+Y+Z=15	
Ca	0,00-0,19
Na	0,45-0,86
K	0,00
Vac (X)	0,07-0,55
X	1
Si	5,80-6,00
Al	0,00-0,20

Компонент, масс. %	
T	6
Ti	0,00-0,08
Al	6,03-7,18
Cr	0,00
Fe	0,66-1,58
Mn	0,00-0,23
Mg	0,00-1,12
Zn	0,00-0,08
Y+Z	8,07-8,55

Примечание. n – число анализов; (1)*- количество анализов, в которых присутствует компонент, Н.о. – не обнаружено;

На классификационной диаграмме (Рисунок 18) соотношения катионов в позиции X точки состава турмалинов пегматита Виртаоя располагаются в области щелочных составов, совпадая с полем составов шерлов из керамических пегматитов.

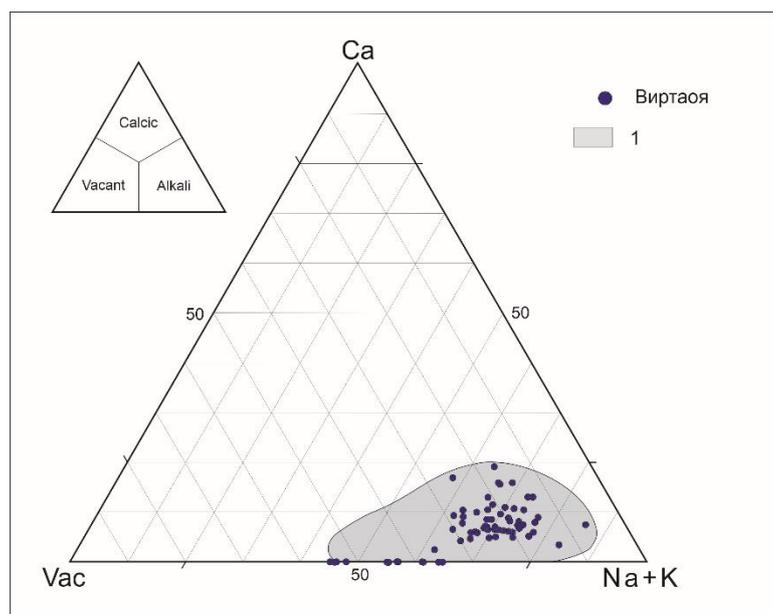


Рисунок 18 Положение точек составов турмалинов из пегматита Виртаоя на классификационной диаграмме соотношения катионов в позиции X. 1-область составов турмалинов из керамических пегматитов Северного Приладожья.

Однако, по сравнению с турмалинами из керамических пегматитов, отвечающим составам шерла-дравита, на диаграмме соотношения Al-Mg-Fe (Рисунок 19) точки состава турмалинов пегматита Виртаоя занимают обособленное положение в области составов шерла-эльбаита.

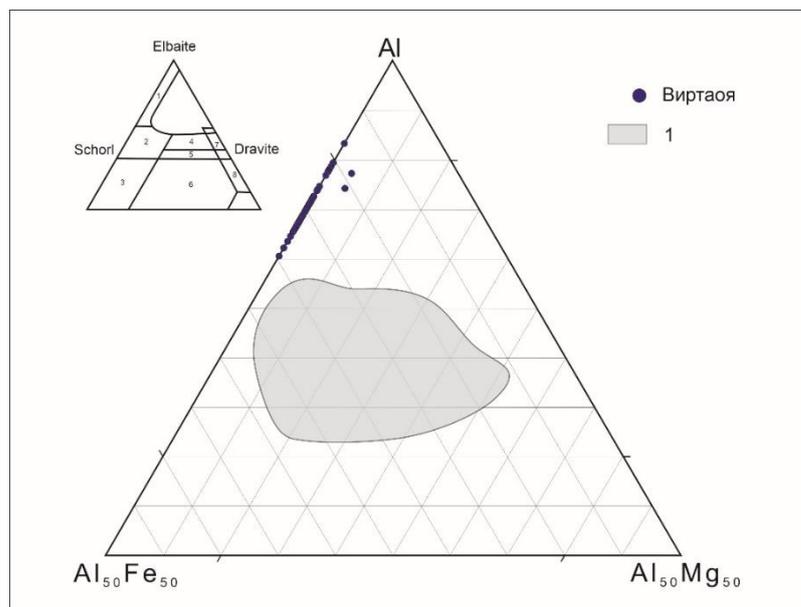


Рисунок 19 Положение точек составов турмалинов из пегматита Виртаоя на классификационной диаграмме соотношения Al-Mg-Fe. 1-область составов турмалинов из керамических пегматитов.

Минералы тантала и ниобия

Среди минералов тантала и ниобия присутствуют минералы как ряда колумбит – танталит ((Fe, Mn)(Nb,Ta)₂O₆), так и ряда пироклор – микролит ((NaCa)(Nb, Ta)₂O₆(OH,F)). Отмечены как преимущественно Nb, так и преимущественно Ta минералы (Рисунок 20). Наибольшее распространение имеют минералы Nb, в частности колумбиты (Рисунок 21).

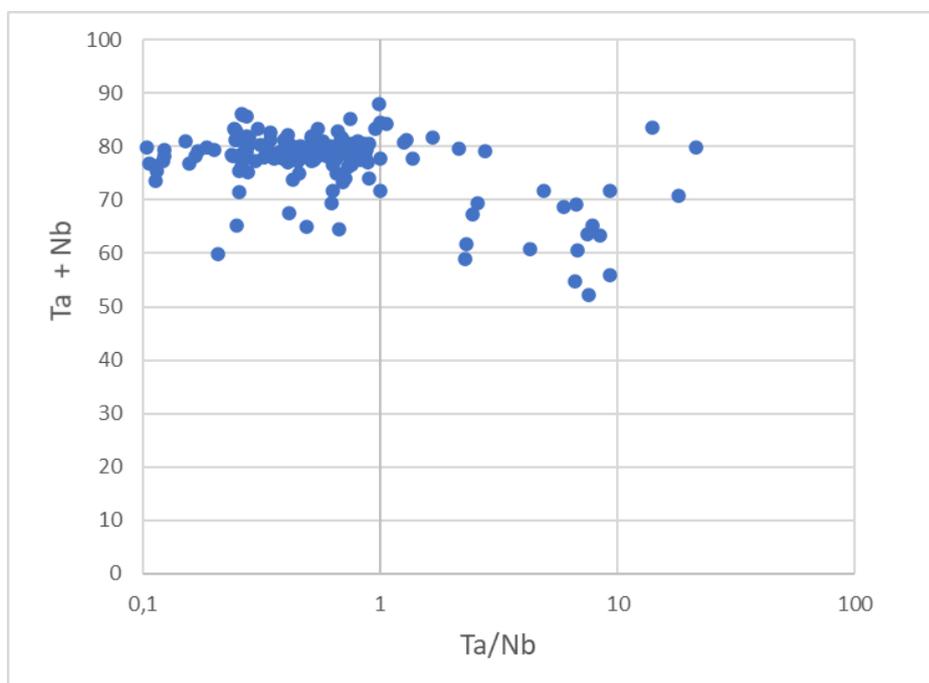


Рисунок 20 Диаграмма распределения Ta и Nb в тантало-ниобатах пегматита Виртаоя

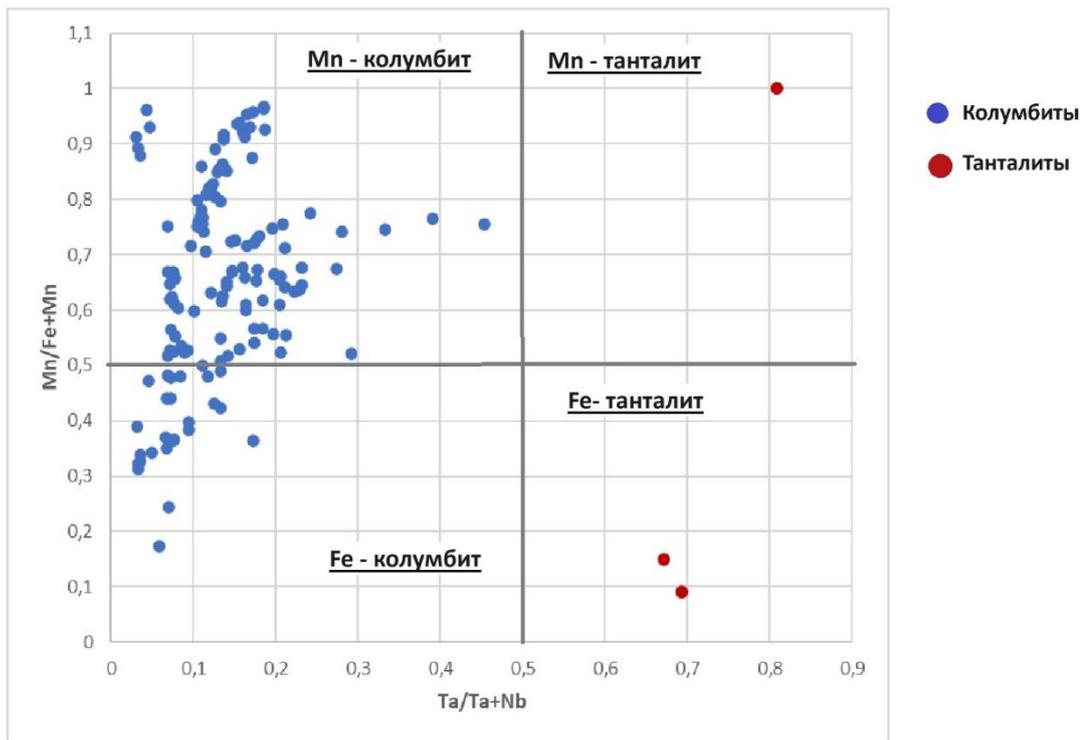


Рисунок 21 диаграмма $Mn/(Mn+Fe)-Ta/(Ta+Nb)$ для колумбитов-танталитов из пегматита Виртаоя

Как видно на диаграмме (Рисунок 22), в ряде пироклор-микролит большее распространение имеет микролит.

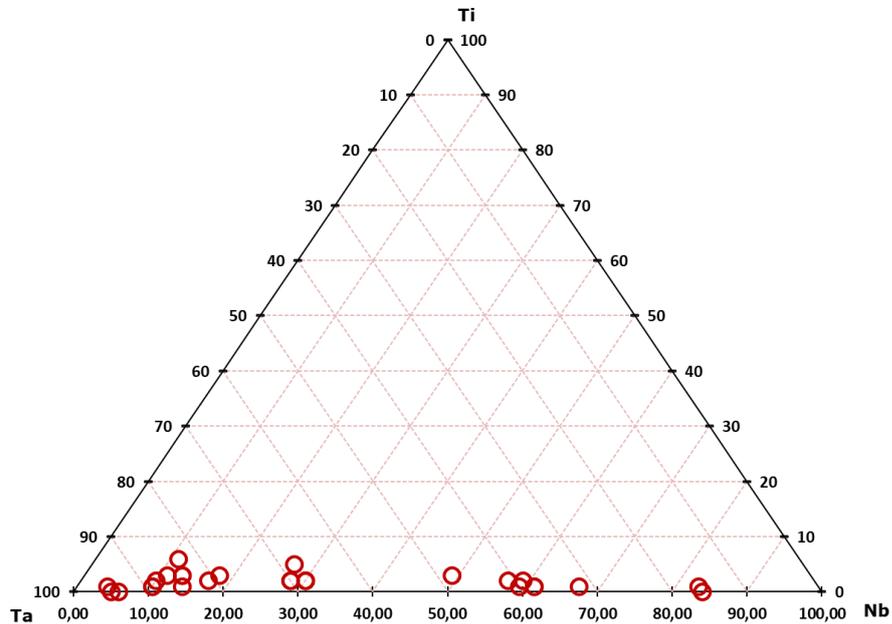


Рисунок 22 Положение точек составов минералов ряда пироклор-микролит из пегматита Виртаоя на классификационной диаграмме соотношения Ta-Ti-Nb

Зерна имеют сложное строение, некоторые трещиноватые, происходит замещение по трещинам (Рисунок 24). В других присутствует железистая оторочка (Рисунок 23). Для всех минералов тантала и ниобия в изученных пробах характерно содержание Ti, Mn и Fe,

в единичных зернах присутствует U (до 3 масс. % UO_2) и Bi (до 12 масс. % Bi_2O_3), а для минералов ряда пироклор – микролит характерны довольно высокие содержания Pb (до 25 масс. % PbO), а также в некоторых зернах слишком низкое содержание Ca (2,3 масс. % CaO). Ниже представлены составы изученных зерен и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах (Таблица 6).

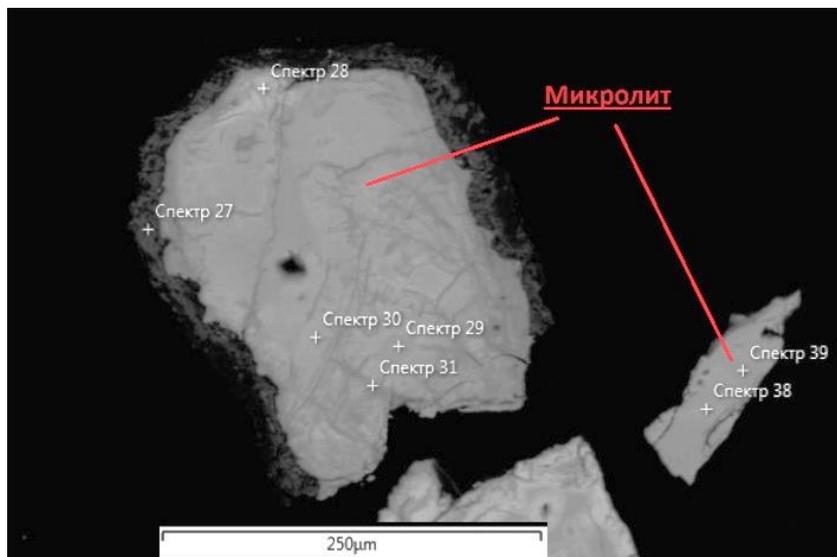


Рисунок 23 Зерно микролита с железистой оторочкой. Изображение в BSE

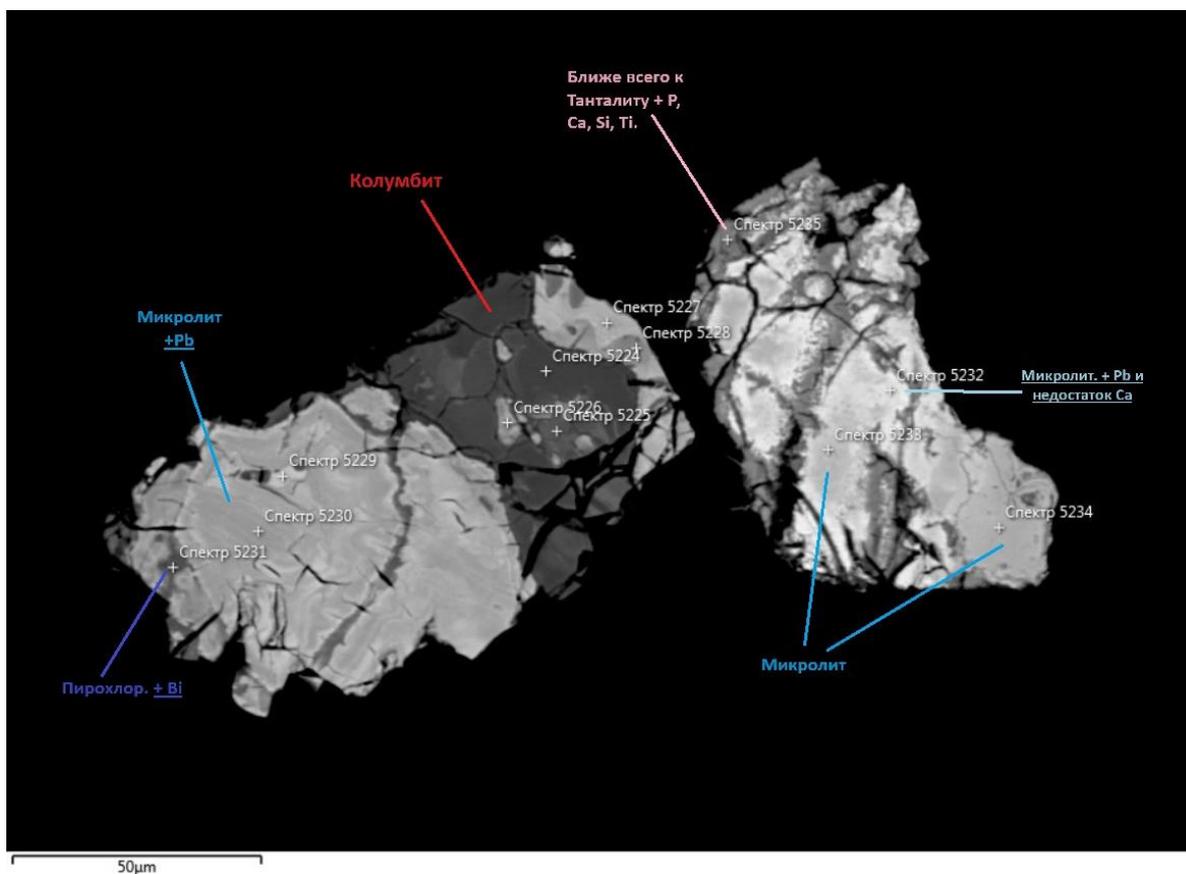


Рисунок 24 Сложное строение зерен минералов Ta и Nb. Изображение в BSE

Таблица 6 Вариации состава (масс. %) и кристаллохимические формулы минералов групп колумбита-танталита и пирохлора-микролита из пегматита Виртаоя

Колумбит – танталит			Пирохлор – микролит		
	Вариации содержания элементов, масс. %	Вариации коэффициентов в формуле		Вариации содержания элементов, масс. %	Вариации коэффициентов в формуле
F			F	0 – 3,06	0 – 0,77
Na ₂ O			Na	0 – 3,2	0 – 0,26
Al ₂ O ₃	0 – 2,06	0 – 0,14	Al	0 – 1,35	0 – 0,19
SiO ₂			Si	0 – 6,26	0 – 0,57
K ₂ O			K	0 – 0,32	0 – 0,05
CaO	0 – 1,3	0 – 0,6	Ca	2,33 – 20,62	0,52 – 1,43
Sc ₂ O ₃	0 – 0,26	0 – 0,01	Sc		
TiO ₂	0,32 – 2,23	0 – 0,16	Ti	0 – 3,9	0 – 0,33
MnO	0,36 – 19,33	0,03 – 0,98	Mn	0 – 3,48	0 – 0,20
FeO _{total}	0,59 – 26,06	0,01 – 1,44	Fe	0 – 5,46	0 – 0,31
SrO	0 – 1,28	0 – 0,07	Sr	0 – 6	0 – 0,35
Y ₂ O ₃	0 – 1,38	0 – 0,05	Y		
Nb ₂ O ₅	5,55 – 72,31	0,22 – 1,87	Nb	3,2 – 67,33	0,16 – 2,11
SnO ₂			Sn	0 – 1,31	0 – 0,05
Sb ₂ O ₃			Sb	0 – 3,06	0 – 0,09
BaO	0 – 1,24	0 – 0,05	Ba	0 – 4,3	0 – 0,16
Ce ₂ O ₃			Ce	0 – 2,64	0 – 0,06
Ta ₂ O ₅	7,37 – 78,09	0,06 – 0,95	Ta	12,45 – 72,06	0,11 – 1,26
PbO	0 – 7,93	0 – 0,22	Pb	0 – 25,53	0 – 0,87
Bi ₂ O ₃	0 – 12,71	0 – 0,34	Bi	0 – 2,97	0 – 0,07
UO ₂	0 – 3,01	0 – 0,07	U	0 – 5,39	0 – 0,12
n	142		n	36	

Примечание. n – число анализов

Фосфаты редких земель. Монацит и Ксенотим.

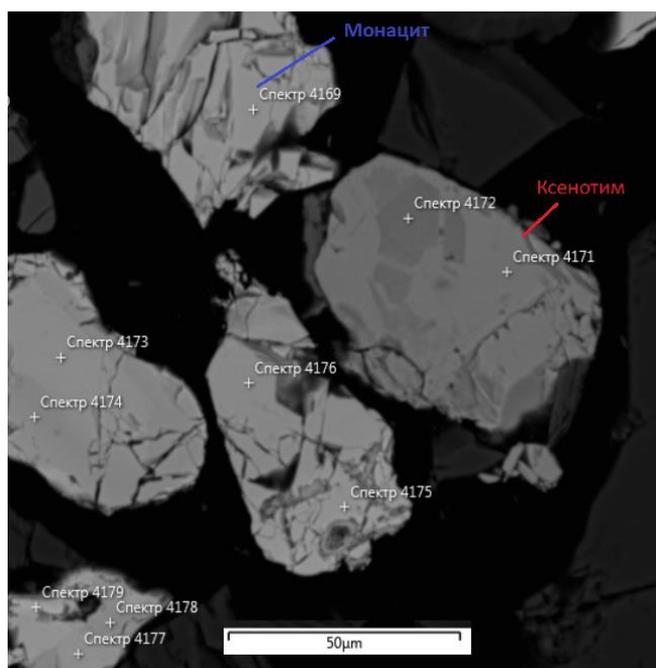


Рисунок 25 Зерна Ксенотима и Монацита. Изображение в BSE

Средние составы изученных зерен и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах представлены в таблице (Таблица 7). Особенностью монацитов является присутствие тория в составе, содержание которого варьирует от 0,68 до 15,2. В ксенотиме торий присутствует лишь в одном зерне, но зато в ксенотимах прослеживается небольшая зональность (Рисунок 25).

Таблица 7 Вариации состава (масс. %) и кристаллохимические формулы монацитов и ксенотимов из пегматита Виртаоя

Элемент	Вариации содержания элементов, масс. %		Элемент	Вариации коэффициентов в формуле	
	Ксенотим	Монацит		Ксенотим	Монацит
SiO ₂	0 - 1,06	0 - 4,47	Si	0 - 0,04	0 - 0,2
P ₂ O ₅	32,55 - 39,17	20,09 - 33,37	P	0,99 - 1,05	0,76 - 0,97
CaO	0 - 0,47	0 - 0,73	Ca	0 - 0,01	0 - 0,03
FeO	0 - 1,44		Fe	0 - 0,04	
Y ₂ O ₃	45,45 - 37,51	0 - 4,52	Y	0,72 - 0,82	0 - 0,08
La ₂ O ₃		8,07 - 17,26	La		0,23 - 0,42
Ce ₂ O ₃		17,52 - 26,16	Ce		0,27 - 0,35
Pr ₂ O ₃		2,64 - 4,1	Pr		0,03 - 0,06
Nd ₂ O ₃		10,49 - 17,16	Nd		0,15 - 0,21
Sm ₂ O ₃	0,55 - 3,12	2,74 - 11,99	Sm	0,007 - 0,03	0,03 - 0,15
Gd ₂ O ₃	2,15 - 9,99	1,27 - 7,3	Gd	0,03 - 0,11	0,01 - 0,09
Tb ₂ O ₃	0 - 2,88		Tb	0 - 0,02	
Dy ₂ O ₃	4,6 - 5,95	0 - 1,44	Dy	0,04 - 0,07	0 - 0,02
Ho ₂ O ₃	0 - 1,1		Ho	0 - 0,01	
Er ₂ O ₃	0 - 7,3		Er	0 - 0,07	

Yb ₂ O ₃	0 – 6,2		Yb	0 – 0,06	
Ta ₂ O ₅	0 – 2,42		Ta	0 – 0,02	
PbO		0 – 1,22	Pb		0 – 0,01
ThO ₂	0 – 2,55	0 – 15,2	Th	0 – 0,02	0 – 0,15
UO ₂	0 – 1,88		U	0 – 0,01	
n	10	36	n	10	36

Примечание: n – количество анализов. Коэффициенты в формулах рассчитанны на 4 O.

Некоторые зерна ксенотима имеют обрастания (Рисунок 26). Нарастающий минерал не определен, но имеет преимущественно железистый состав (82,98 масс.%FeO, 6 масс.% SiO₂, 2,35 масс.% Al₂O₃ и 1,3 масс.% Nb₂O₅).

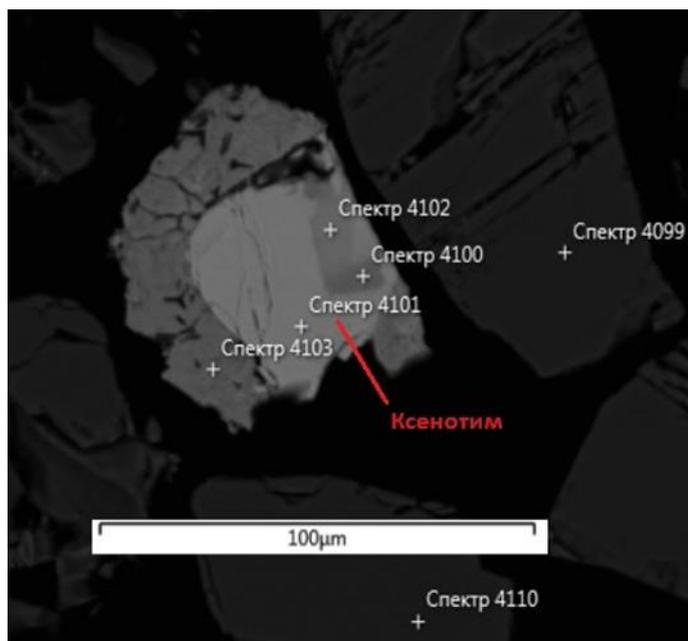


Рисунок 26 Обрастание зерна ксенотима. Изображение в BSE

Циркон

Зерна циркона разрушенные, со сложным строением. Присутствуют в единичном количестве (Рисунок 27). Разные по интенсивности свечения участки отличаются по химическому составу, в них появляются продукты замещения такие как Hf, а также элементы примеси Fe, Y, Ca, Nb. Ниже в таблице представлены составы трех изученных зерен (спектр 14,15 – одно зерно; 41-44 – второе и 144 – третье) и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах (Таблица 8).

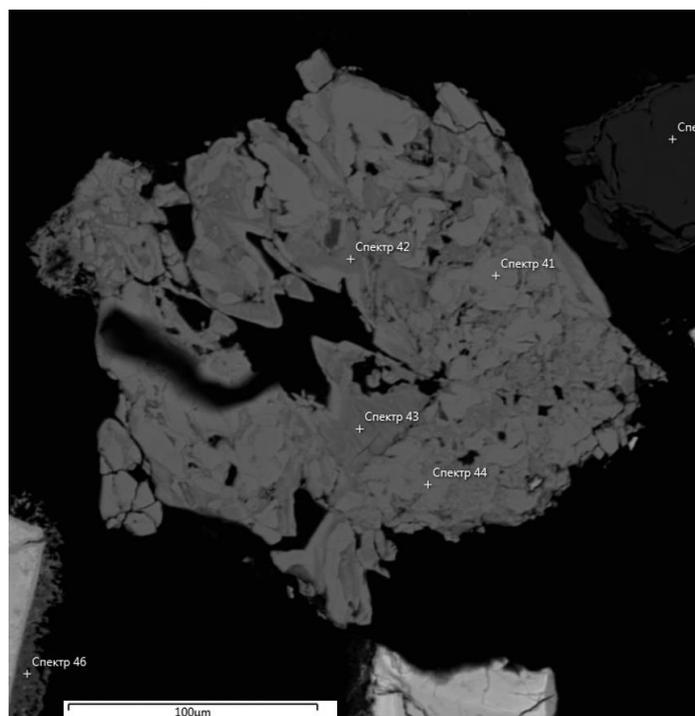


Рисунок 27 Зерно циркона. Изображение в BSE

Таблица 8 Вариации состава (масс. %) и кристаллохимические формулы цирконов из пегматита Виртаоя.

№ спектра	14	15	41	42	43	44	144
Al ₂ O ₃				1,22	1,17		0,81
SiO ₂	32,44	26,77	33,1	25,04	26,64	32,38	31,55
CaO				0,46	0,53	0,16	
FeO		0,76		2,57	2,34	0,45	0,44
Y ₂ O ₃		0,95		6,12	5,61		
ZrO ₂	46,43	42,76	46,08	33,7	33,8	44,82	46,11
Nb ₂ O ₅				1,48			
Ce ₂ O ₃					0,56		
HfO ₂	20,91	18,88	21,78	13,4	14,4	20,99	18,46
Ta ₂ O ₅		4,66					
Сумма	99,78	94,78	100,96	83,99	85,07	98,8	97,37
Коэффициенты в формулах, рассчитанные на 4 O							
Al				0,06	0,05		0,03
Si	1,06	0,97	1,07	0,98	1,03	1,07	1,05
Ca				0,02	0,02	0,01	
Fe		0,02		0,08	0,08	0,01	0,01
Y		0,03		0,13	0,11		
Zr	0,74	0,75	0,73	0,64	0,63	0,72	0,75
Nb				0,03			
Ce					0,01		
Hf	0,20	0,19	0,20	0,15	0,16	0,20	0,18
Ta		0,05					

Поллуцит

Отдельных зерен поллуцита нет, он присутствует в виде ламелей в сподумене (Рисунок 28). Среди особенностей можно выделить примесь железа или кальция. Составы изученных зерен и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах представлены в таблице ниже (Таблица 9).

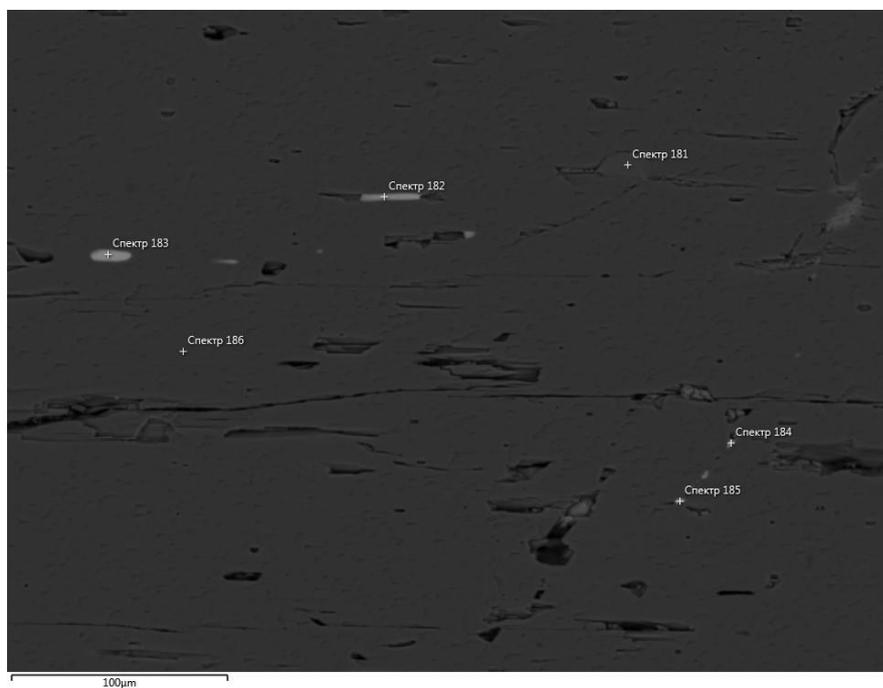


Рисунок 28 Ламели поллуцита в сподумене. Изображение в BSE

Таблица 9 Вариации состава (масс. %) и кристаллохимические формулы поллуцитов из пегматита Виртаоя

Элемент	Вариации содержания элементов, масс. %	Элемент	Вариации коэффициентов в формуле
Na ₂ O	0,85 – 3,9	Na	0,07 – 0,3
Al ₂ O ₃	16,18 – 22,98	Al	0,86 – 1,01
SiO ₂	45,19 – 57,56	Si	2,08 – 2,14
CaO	0 – 0,44	Ca	0 – 0,02
FeO	0 – 0,54	Fe	0 – 0,02
Cs ₂ O	14,32 – 34,43	Cs	0,23 – 0,66
n	15	n	15

Примечание: n – количество анализов

Прочие минералы

Также среди минералов тяжелой фракции были обнаружены: апатит, ганит (ZnAl₂O₄) (Рисунок 29) и самородный висмут (Рисунок 30).

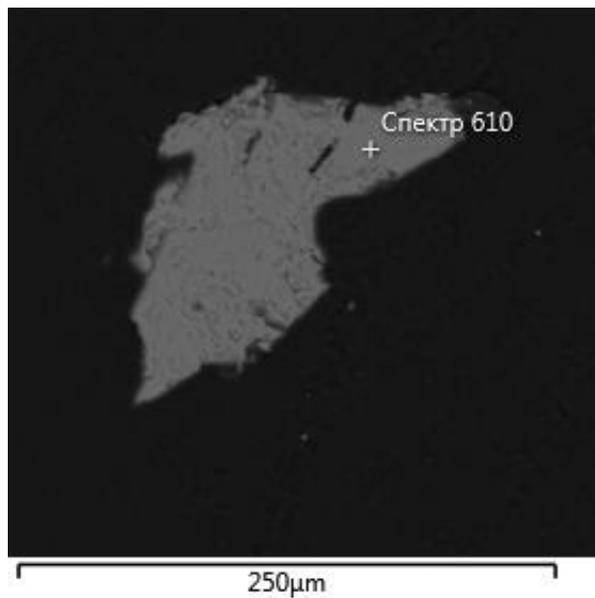


Рисунок 29 Ганит. Изображение BSE.

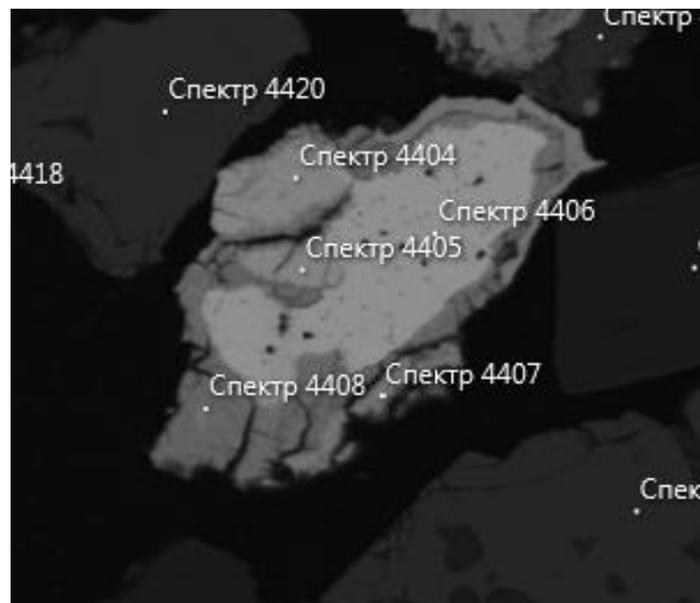


Рисунок 30 Самородный висмут в «рубашке» из оксидов висмута. Изображение BSE

4.4 Условия формирования

Говоря об условиях формирования пегматита Виртаоя, в первую очередь хотелось бы отметить древний возраст (AR_2), что говорит о многочисленных преобразованиях территории, изменении условий и неоднократном воздействии процессов метаморфизма. Помимо этого, большое количество разрывных нарушений на территории оказывает влияние на условия формирования и дальнейшие преобразования пегматитового тела Виртаоя. Широкое распространение дизъюнктивных нарушений на территории позволяют предполагать, что тело было разбито на блоки и перенесено, о чем косвенно могут свидетельствовать

валуны кварц-мусковит-полевошпатового пегматита, зафиксированные близ участка (Рисунок 31).

Помимо этого, необходимо отметить, что в изученных альбит-сподуменовых пегматитах отсутствует графическая зона и концентрическая зональность, типичная для пегматитов. Это может являться следствием их сложного и многоэтапного формирования.

На данном этапе изучения говорить об источнике вещества, сформировавшем эти редкометальные пегматиты, сложно. Ближайшим источником гранитной магмы является Улялегский массив гранитов рапакиви. Также, оказать влияние могли и породы Хаутаваарского умереннощелочного дифференцированного комплекса, но для подтверждения или опровержения их связи необходимо более детальное изучение.

Помимо этого, для определения температуры и давления были подготовлены кварцевые пластинки для изучения газовой-жидких включений, но в эту работу они, к сожалению, не вошли.



Рисунок 31 Схема геологического строения участка "Виртаоя" масштаба 1:1000

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭТАЛОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Таблица 10 Сопоставление пегматита Виртаоя и пегматитов Колмозеро

	Виртаоя	Колмозеро
Положение в региональной структуре	В пределах архейского Карельского кратона, вблизи сочленения с Раахе-Ладожской зоной. Локализовано в Хаутаварской структуре Ведлозеро-Сегозерского зеленокаменного пояса.	Локализовано в Патчемварекском массиве в зоне сочленения двух крупных региональных структур - Мурманского блока и зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.
Возраст	AR ₂	AR ₂
Вмещающие породы	Амфиболизированные габбро (метагаббро)	Метагаббро-анортозиты
Форма и размер тела	Протяженность около 30 м и видимая мощностью от 3 до 10м	Крутопадающие на ЮЗ жилы (12 крупных и неск. мелких) Протяженность до 1400м и мощность от 5 до 65м
Породообразующие минералы	Кварц, альбит, микроклин, сподумен, мусковит	Кварц, альбит, микроклин, сподумен, мусковит
Акцессорные минералы	Эльбаит, спессартин, монацит, ксенотим, танталит, колумбит, пироклор, микролит, поллуцит, циркон, апатит, ганит, самородный висмут	трифилит-литофилит, турмалин, апатит, спессартин, сфалерит и пирит, берилл
Петрографические особенности	В шлифах кварц, сподумен, микроклин и альбит. Пелитизация и серицитизация по левым шпатам. Довольно много граната.	В шлифах установили третью генерацию сподумена (Морозова Л.Н., 2020).
Химический состав	Обогащены Li, Cs, Ta, Nb, Rb, Mn, Zn, F, Обедненность как тяжелыми, так и легкими РЗЭ. Отрицательная Eu аномалия.	Обогащены Li, Be, Nb, Ta, Cs, Rb, Cu, Ni, Cr, Ga, Ge, Mo, Zn и обеднены TiO, MgO, CaO, Sr, Ba, Zr, Th, Y (Морозова Л. Н., 2018). Обедненность как тяжелыми, так и легкими РЗЭ. Отрицательная Eu и Ce аномалии.
Проводимые анализы	Микрозонд, ICP-MS	Микрозонд, ICP-MS, химический анализ (содерж. Li ₂ O),

Сравнивая пегматиты Виртаоя и пегматиты месторождения Колмозеро по параметрам, представленным в таблице выше (Таблица 10), можно подчеркнуть схожее расположение в региональной структуре и возраст. Помимо этого, можно отметить схожесть вмещающих пород и одинаковые породообразующие минералы. Химический состав пегматита Виртаоя подобен составу пегматитов Колмозеро, возможно, разве что с более низкими содержаниями некоторых элементов, но для более точного утверждения необходимо больше

данных. В целом, можно сказать, что пегматит Виртаоя очень похож на пегматиты Колмозера. Исходя из этого, можно предположить, что тело пегматита Виртаоя также имеет крутопадающее залегание (падение измерить не удалось, так как выход тела на уровне современного эрозионного среза). Помимо этого, увеличивается вероятность наличия на территории участка Виртаоя или в пределах близлежащих территорий и других тел редкометалльных пегматитов, так как они обычно встречаются роями, что хорошо прослеживается на месторождении Колмозера.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований в первую очередь были установлены размеры тела, контакт с вмещающими породами, изучены породообразующие минералы пегматита – кварц, альбит, сподумен, полевые шпаты и на основании этого пегматит получил свое название. Так, согласно классификации Н.А. Солодова по соотношению породообразующих минералов пегматиты участка Виртаоя относятся к альбит-сподуменовому типу, а по классификации Е.В. Загорского с соавторами – редкометальной формации, подформации сподуменовых пегматитов, литиевому эволюционному ряду.

Также методом ICP-MS был изучен химический состав пегматита Виртаоя. Отмечены довольно высокие содержания Li, Cs, Ta, Nb, Rb, Mn, обедненность как тяжелыми, так и легкими РЗЭ, выделена отрицательная Eu аномалия.

Помимо этого, методом рентгеноспектрального микроанализа были изучены минералы тяжелой фракции. Среди них выделены такие минералы как гранат – спассартин, турмалин – эльбаит, железистый и марганцовистый колумбит, единичные зерна танталита, пироклор и микролит, ксенотим и монацит, единичные зерна циркона, ламели поллуцита, ганит и самородный висмут. Кроме того, были детально изучены слюды из пегматита Виртаоя. Из-за широких вариаций химического состава однозначно выделять отдельные разновидности сложно, можно только сказать, что по составу слюды варьируют от мусковита до цинвальдита.

В дополнение к этому составлена геологическая схема участка Виртаоя масштаба 1:1000 и геологическая схема пегматитового тела «Виртаоя» масштаба 1:100.

В заключении нужно отметить необходимость дальнейшего изучения пегматита Виртаоя, более детального изучения химического состава, проведение химического анализа для расчета содержания Li_2O , а также изучения территории в целом и поиска новых пегматитовых тел.

Благодарности

Автор работы выражает свою благодарность научному руководителю – доценту, заведующему кафедрой геологии месторождений полезных ископаемых, кандидату геолого-минералогических наук Алексееву Ивану Александровичу за советы, поддержку и возможность собрать материалы для работы лично и старшему преподавателю кафедры геохимии Волковой Елене Викторовне за уделенное время и ценную помощь, оказанную для написания этой работы. А также работникам ресурсных центров СПбГУ за проведение анализов.

Список литературы

- Владимиров А.Г., Загорский В.Е., Шварцев С.Л., Исупов В.П., Смирнов С.З.** Геохимические тенденции концентрирования лития в земной коре и на ее дневной поверхности, Новосибирск, 2012.
- Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Загорский В.Е., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г. и др.** Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири. Новосибирск, 2012.
- Галеева Е.В., Кудряшов Н.М.** Редкометалльные пегматитовые месторождения зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья (Кольский регион). Апатиты : Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2022.
- Гинзбург А.И., Родионов Г.Г.** О глубинах образования гранитных пегматитов //Геология руд. месторождений, 1960. Т. 2.
- Загорский В.Е., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Владимиров А.Г., Михеев Е.И., Савинский И. А., Котлер П.Д.** Геотектоническое положение месторождений сподуменовых пегматитов Сибири. Тезисы докладов, 2010. Т. 1.
- Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М.** Систематика гранитных пегматитов // Геология и геофизика. Иркутск : Сибирское отделение РАН, 2003.
- Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М., Макрыгина В.А., Кузнецова Л.Г.** Редкометалльные пегматиты. Новосибирск : Наука, 1997. - Т. 2.
- Кожевников В.Н.** Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск, 2000.
- Морозова Л. Н.** Систематика литиевых пегматитов, типичные черты строения и состава. Апатиты : Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2018 г., Т.15, с 259-262.
- Морозова Л.Н., Базай А.В.** Сподумен – основной источник лития редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения. Апатиты : Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020.,с 369-373.
- Солодов Н.А.** Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматитов. АН СССР, 1962.
- Boynton W.V.** Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies // Rare earth element geochemistry. Amsterdam : Elsevier, 1984.
- Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Kesler S.E., Everson M.P., Wallington T.J.,** Global Lithium Availability. Journal of Industrial Ecology, 2001.

Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Everson M.P., Wallington T.J.
Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 2012. - №48.

Lagache M. The Volta Grande pegmatites, Minas Gerais, Brazil: an example of rare-element granitic pegmatites exceptionally enriched in lithium and rubidium. - *The Canadian Mineralogist*, 1997 - №35.

Фондовые материалы:

Сиваев В. В., Горошко А. Ф. Геологическое строение и полезные ископаемые Улягского массива гранитов рапакиви и его обрамления. Отчет о результатах групповой геологической съемки масштаба 1:50000 и среднемасштабного геологического картирования, проведенных Ведлозерской партией в 1983–1988 гг. в Южной Карелии. Петрозаводск, 1988. Фонды ТГФ. Инв. № 228–1.