

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Выпускная квалификационная работа

По направлению «Геология».

Васильев Степан Сергеевич

*Акцессорная минерализация керамических пегматитов
Имплахтинского учебного полигона (Северное Приладожье)*

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5018.2018 «Геология»

Научный руководитель:

Доцент г.-м.н., Петров С.В.



«_»_____2022

Рецензент:

руководитель проектов

ООО "АЛРОСА"

Терехов А.В.

«_»_____2022

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

Оглавление	2
Введение.....	3
1 Краткий геологический очерк Северного Приладожья.....	5
2 Пегматиты Северного Приладожья.....	7
2.1 Пегматит Линнаваара.....	8
2.2 Пегматит «Голубая дорога».....	9
2.3 Пегматит «Железная дорога»	10
2.4 Пегматит «Харитоновский».....	11
2.5 Пегматит «Тетрамяки»	12
2.6 Пегматит «Калуга»	14
3 Методические аспекты работы	14
4 Характеристика минералов тяжелой фракции	16
4.1 Фосфаты редкоземельных элементов.....	16
Монацит.....	16
Ксенотим.....	21
4.2 Минералы титана.....	22
4.3 Минералы тантала и ниобия.....	26
4.4 Апатит.....	31
4.5 Циркон.....	33
4.6 Гранат.....	38
4.7 Касситерит.....	42
4.8 Минералы урана и тория.....	42
4.9 Турмалин.....	43
4.10 Минералы висмута.....	46
4.11 Минералы золота и серебра	48
4.12 Остальные акцессорные минералы.....	48
Заключение.....	49
Список литературы.....	50

Введение.

Гранитные пегматиты широко распространены в древних кристаллических щитах и складчатых областях континентальной коры. Они играют важную роль в добыче многих полезных ископаемых: редких металлов (литий, тантал, цезий, бериллий и др.), керамического, пьезооптического и ювелирного сырья, и являются главным и единственным источником листового мусковита. Пегматиты – дифференцированные зонально построенные геологические тела, валовый минеральный состав которых отвечает граниту. Зональность наиболее полнодифференцированных пегматитовых тел представляет собой смену от контакта четко различающихся по структурно-текстурным особенностям минеральных зон и, в общем виде, отвечает последовательности образования: аплитовая зона – наиболее мелко-равномернозернистая на контакте с вмещающими породами, графическая – с эпитаКСическими срастаниями полевого шпата и кварца или турмалина, блоковая – сложенная крупными кристаллами полевого шпата, кварца, слюды, кварцевое ядро и, в наиболее дифференцированных – полости-миаролы. Не полностью дифференцированные пегматитовые тела могут состоять только из графической и блоковой зон со слабо проявленной аплитовой оторочкой, или только из блоковой и аплитовой зон - пегматоиды.

Существует много классификаций пегматитов, основанных в основном на особенностях минерального состава и рудной нагрузки. Чаще всего на этой основе выделяют формации керамических, слюдоносных, редкометально-слюдоносно-керамических, редкометальных, редкометально-редкоземельных и хрусталеносных пегматитов. Каждая из этих формаций помимо своего набора структурных и текстурных особенностей характеризуется определенными минеральными парагенезисами и условиями образования.

Все пегматиты Северного Приладожья относятся к формации керамических пегматитов по классификации В.В. Гордиенко (Гордиенко 1996) основанной на минерально-текстурных признаках: минеральный состав – набор главных породообразующих минералов - определяет принадлежность пегматита к определенному типу, а текстурная характеристика, отражающая степень неоднородности минерального состава пегматитового тела в различных его частях – позволяет оценить степень дифференцированности.

Обладающие одинаковым набором главных породообразующих минералов пегматиты Северного Приладожья различаются по размерам и степени дифференцированности, кроме того, локализованы в разных по составу и генезису

вмещающих породах: гранитогнейсовых куполах, метаморфических породах различного состава и происхождения, что должно было отразиться в особенностях состава акцессорных минералов характеристике которых посвящены настоящая работа.

В отличие от редкометалльных пегматитов, в изучении керамических делается упорна породообразующие минералы, что в первую очередь обусловлено потребностями промышленности. В связи с этим исследование акцессорной минерализации керамических пегматитов Северного Приладожья ранее не изучалось столь детально.

Цель работы: изучение акцессорной минерализации пегматитовых тел ... и особенностей распределения в них химических элементов.

Автор выражает благодарность научному руководителю – доценту кафедры геологии месторождений полезных ископаемых, кандидату геолого-минералогических наук Сергею Викторовичу Петрову и старшему преподавателю кафедры геохимии Волковой Елене Викторовне за ценную помощь, советы и поддержку, которые позволили подготовить данную работу.

Таблица 1 Условные обозначения в работе приняты едиными для всех рисунков и таблиц:

На рисунке	В таблице	Объект
	1	Харитоновский участок
	2	Линноваара
	3	Железная Дорога
	4	Калуга (валовая проба)
	4а	Калуга (центральная часть)
	4б	Калуга (краевая часть)
	5	Голубая дорога
	6	Тетрамяки (центральная часть)
	6б	Тетрамяки (слюдяная оторочка)

1 Краткий геологический очерк Северного Приладожья

Балтийский щит состоит из трех масштабных геоблоков: Дальсландского, Свекофеннского и Карело-Кольского. На западе находится Свекофеннский геоблок, который представлен коллизионными структурами раннепротерозойского подвижного пояса и представлен турбидитами, глубоководными осадочными породами и преимущественно толеитовыми вулканитам¹ Карело-Кольский геоблок разнообразен по строению, поэтому его принято разделять на три массива, а именно: Кольский, Беломорский и Карельский (рис. 1). Дальсландский мегаблок представлен преимущественно переработанными протерозойскими (готскими) породами (Шаров 2017).

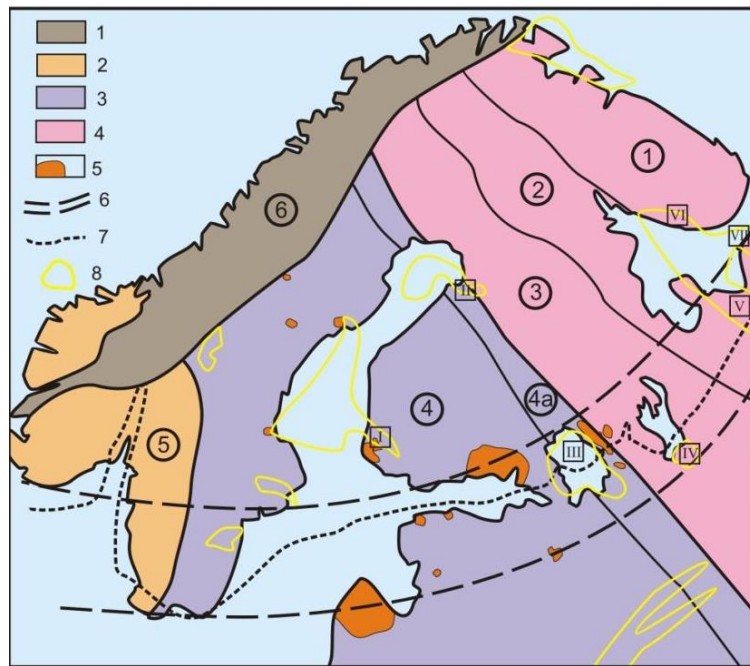


Рисунок 1 Схема тектонического строения Балтийского щита (Шурилов, 2005). 1 - Область палеозойского надвига: (6)-каледониды; 2 - Область верхнепротерозойского крастогенеза: (5)-Дальсландскиймегаблок; 3 - Область нижнепротерозойского крастогенеза: (4)-Ладожско-Ботнический мегаблок, (4а) Раахе-Ладожская зона; 4 - Области архейского крастогенеза, мегаблоки: (1)-Кольский, (2)-Беломорский, (3)-Карельский; 5 - Нижнерифейские массивы формации гранитов-рапакиви; 7 - Граница распространения платформенных отложений; 8 - Бассейны рифейской седиментации.

Зона сочленения Карело-Кольского и Свекофеннского геоблоков в литературе называется Раахе-Ладожской. Она является взбросо-надвиговой системой с правым смещением, который прослеживается на 1000 км. Ширина зоны сочленения более сотни километров (Шурилов, 2005).. С юго-востока она перекрывается отложениями чехла Русской плиты. Раахе-Ладожская зона является результатом субдукции протерозойского Свекофеннского геоблока под архейский Карело-Кольский кратона и окончательно сформировалась 1,80-1,78 млрд. лет назад.

Северное Приладожье располагается на юге Раахе-Ладожской зоны и находится на северном берегу Ладожского озера. В пределах Северного Приладожья выделяют две группы куполов: западную (Сортавальскую) и восточную (Питкярантскую). Прогреты между куполами заполнены сильно метаморфизованными протерозойскими породами, которые с юго-запад и юго-востока прорывают относительно молодые массивы гранитов рапакиви.

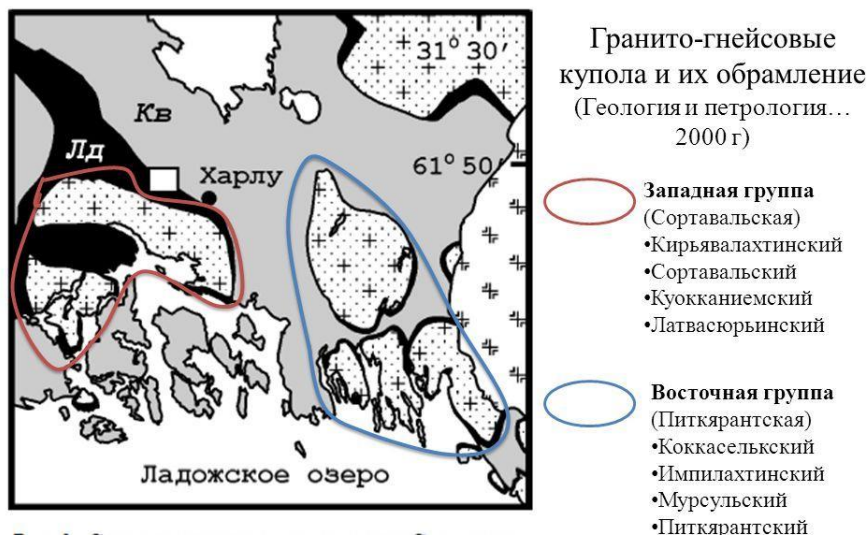


Рисунок 2 Принципиальная схема расположения куполов и их групп (Геология и петрология 2000г)

В геологическом строении Северного Приладожья можно выделить два комплекса пород: породы купольных структур и обрамляющие их породы. Породы купольных структур считаются ремобилизованным веществом, представленным гранитогнейсами, которые местами сменяются на серые и полосчатые гнейсы. Гранитогнейсовые купола секутся телами амфиболитового состава и плагио-микроклиновыми гранитами, которые могли быть связаны с Карельским тектоно-магматическим циклом (Хазов, 1973).

Второй комплекс пород представлен породами нижнего протерозоя (верхнего Карелия), который разделяют на два надгоризонта: Людоковийский (2,1-1,92 млрд. лет) и Калевийский (1,92-1,8 млрд. лет). Людоковийский в изучаемом регионе представлен породами сортавальской серии питкярантской свиты. Амфиболиты, сланцы, кварциты и мрамора (частично скарнированные), которыми сложена питкярантская свита, образуют узкие зоны обрамляющие купольные структуры. Калевийский надгоризонт сложен породами ладожской серии – сланцеватыми метапесчаниками и двуслюдяными (мусковит-биотитовыми) сланцами с гранатами. Они залегают согласно с породами питкярантской свиты.

2 Пегматиты Северного Приладожья.

Гранитные пегматиты, широко распространенные в Северном Приладожье, были описаны еще в 1948 году В. Д. Никитиным, и К. А. Шуркиным. Они разделяли пегматиты района на доладожские, широко распространенные в гранито-гнейсовых куполах, и постладожские- преимущественно в зоне контакта гранито-гнейсовых куполов с питкярнтской свитой и в породах ладожской серии³.

К.И. Розановым (Розанов и др. 1978) пегматитовые тела Северного Приладожья возрасту и минеральному составу были поделены на ранние пегматиты - возраст определен К-Аг методом как 1750-1875 млн. лет, получившие развитие в пределах разломных зон и характеризующиеся дифференцированным строением и более поздние, менее дифференцированные (1690-1710 млн лет, К-Аг метод).

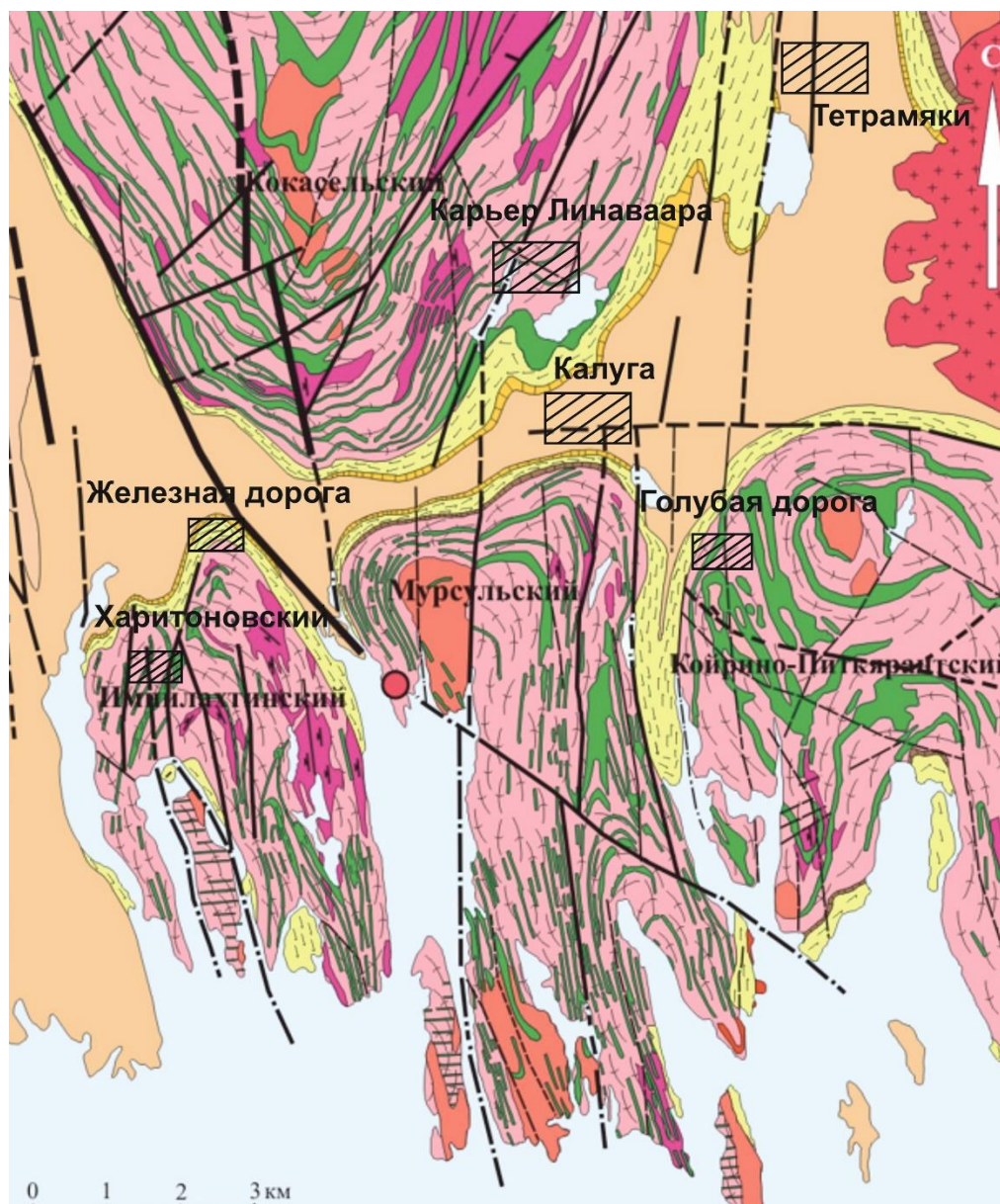


Рисунок 3 На карте заштрихованным прямоугольником отмечены области, где находится пегматитовые тела.

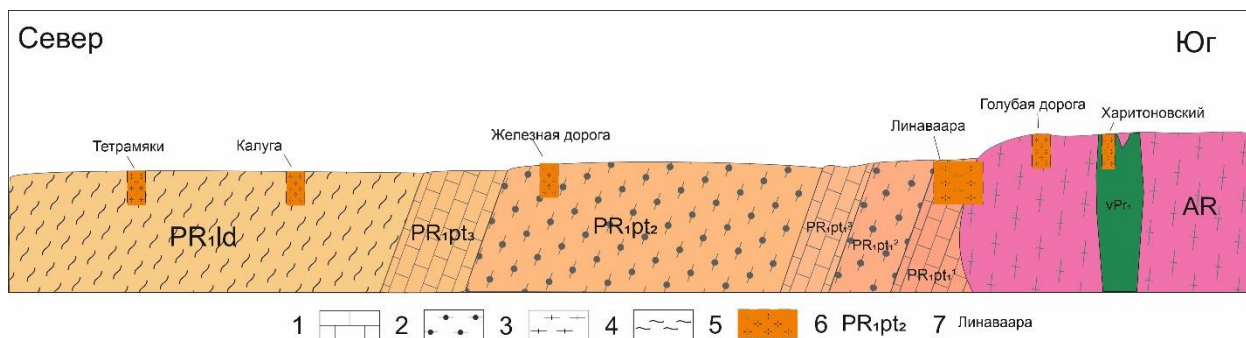


Рисунок 4 Условный разрез, показывающий в каких толщах, залегают пегматитовые тела. Условные обозначения: 1 – мрамора; 2 – амфиболиты; 3 – гранитогнейсы; 4 – слюдит; 5 – пегматитовое тело; 6 – индекс толщи; 7 – название пегматита.

2.1 Пегматит Линнаваара.

Месторождение Линнаваара расположено 1,2 км от села Леппясилта в Питкярантском районе, в 25 км к северо-северо-западу от г. Питкяранта и приурочено к юго-восточной оконечности Коккасельского гранито-гнейсового купола, на контакте с породами питкярантской серии. Карьер разрабатывали, добывая керамическое сырье из трёх самых крупных жил: Западной, Южной и Северной.

Западная жила с мощностью до 19 м и длиной до 200 м развита в верхней части западного склона. Жила характеризуется хорошо проявленной дифференциацией состава с ассиметричной зональностью.

Южная жила обнажается в виде вытянутой линзы длиной 300 м на восточном склоне южной части гряды Линнаваара. Мощность пегматитового тела составляет 35-40 м. Залегание тела согласное с вмещающими сланцами с азимутом простирания 100° и падением на восток-юго-восток под углом до 60° .

Северная жила приурочена к самой высокой части восточного склона гряды Линнаваара и представлена в виде линзовидным дифференцированным телом почти меридианального простирания с падением на восток, юго-восток под углом $45-60^\circ$. Южная оконечность жилы срезается тектоническими нарушениями. Мощность жилы увеличивается от юга к северо-востоку от 4-5 м до 70-75, местами до 100 м. Общая протяженность составляет около 650-700 м. В приконтактной части жилы присутствуют ксенолиты амфиболитовых сланцев.

Проба для исследования отбиралась из карьера Северной жилы.



Рисунок 5 изображение образцов из пегматита «Линаваара»

2.2 Пегматит «Голубая дорога».

Пегматитовое тело локализовано в коренном выходе гранито-гнейсов Питкярантского купола в борту дороги и прослежено на расстояние порядка 30 м., максимальная видимая мощность порядка 28 м. Пегматитовое тело в коренном выходе состоит из отдельных жильных тел различной мощности (от 0,7 до 2 м), имеющих неясные контакты с вмещающими породами и, очевидно, является краевой частью нескрытого пегматита. Пегматит в целом характеризуется дифференцированным строением: присутствуют аплитовая, графическая зона, блоковая зона, сложенная гигантозернистыми кристаллами мясо-красного калиевого полевого шпата размером до 10-12 см, центральная часть сложена монокристаллами кварца размером до 0,5 м.



Рисунок 6 изображение образца из пегматита «Голубая дорога»



Рисунок 7. Пегматитовое тело «Голубая дорога»

2.3 Пегматит «Железная дорога»

Пегматит «Железная дорога» расположен борту железнодорожной колеи на восточном въезде в посёлок Импилахти, вблизи с ответвлением на станцию Импилахти. Пегматитовая жила видимой мощностью до 7 м., северо-западного простирания (рис.7) прослежена на расстояние порядка 30 м.

Вмещающей породой пегматитового тела является брекчированный осветленный на контакте амфиболит, переслаивающийся с тонкими слоями карбонатов (в среднем 1 см). Зональность проявляется присутствием аплитовой зоны, местами с обилием сульфидов, графической зоны, иногда с крупными (до 5-6 см) выделениями турмалина, блоковой зоны с размерами кристаллов микроклина до 10 см и слабо выраженного кварцевого ядра.



Рисунок 8. Изображение образца из пегматита «Железная дорога»

Детальная схема пегматово-жильного поля участка „Железная дорога”

Масштаб 1:50

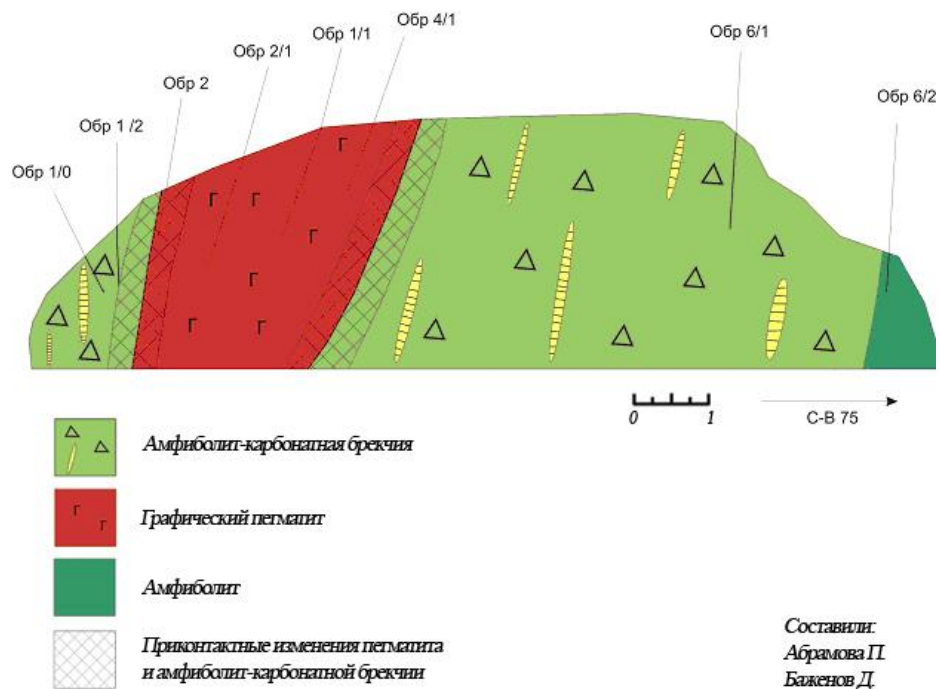


Рисунок 9 Детальная схема пегматового участка “Железная дорога” (Романов, 2008)

2.4 Пегматит «Харитоновский»

Пегматовое тело локализовано во внутрикупольных амфиболитах Импилахтинского купола, мощностью до 1 м, прослежено на расстояние до 3 м. Сложено преимущественно блоковыми кристаллами калиевого полевого шпата, размером до 8-10 см. На контакте с пегматовым телом амфиболиты интенсивно гранитизированы.



Рисунок 10. Изображение образца из пегматита «Харитоновский»



Рисунок 11. Пегматит «Харитоновский» в гранито-гнейсах Импилахтинского купола

2.5 Пегматит «Тетрамяки»

Жильные тела *пегматита Тетрамяки* расположены в 5 км на север от озера Руокоярви, около горы Тетрамяки, в области выхода пород ладожской серии между Коккасельским и Кулисмайокским гранитогнейсовыми куполами.

Пегматитовые тела располагаются субсогласно вмещающим породам и приурочены к локальным флексурным изгибам пачек переслаивающихся биотитовых сланцев и метапесчаников ладожской серии. Максимальная мощность тел – до 4 м, прослеженная протяженность – 7-8 м. Пегматитовая зональность проявлена слабо: присутствуют блоковая и кварцевая зоны, нечетко проявленные фрагменты графической зоны. На контакте пегматиты окружены достаточно мощной (до 0,5 м) слюдяной оторочкой, состоящей преимущественно из биотита, отдельных просечек кварца и крупных (до 5 см) кристаллов турмалина.

Характер контакта с вмещающими породами позволяет предполагать, что образование пегматитовых тел происходило «in situ»

В жилах наблюдаются ксенолиты фрагменты «непереваренных» или частично «переваренных» пород ладожской свиты.

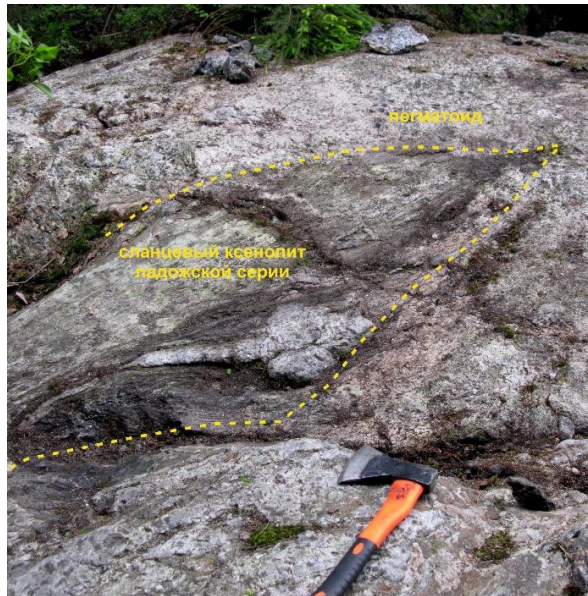


Рисунок 12 Фрагмент сильно переработанных в результате переплавления метаосадочных пород ладожской серии (теневого ксенолит) в пегматоиде Тетрамяки



Рисунок 13. Изображения образцов с пегматита «Тетрамяки». Сверху изображения образцов самого из самого тела, снизу изображения образцов вмещающих пород – слюдиты. В обоих образца наблюдаются включения зерен турмалина

2.6 Пегматит «Калуга»

Пегматитовое тело локализовано в коренном выходе метаосадочных пород ладожской серии в борту дороги Сортавала-Питкяранта. Видимая мощность до 4-5 м, прослежено по простиранию (на запад) на 60-80 м. Падение крутое, вертикальное, согласное с залеганием вмещающих пород, контакт резкий. Пегматит азональный, слабо дифференцированный: к центру жилы несколько увеличивается зернистость, кристаллы микроклина достигают 3-5 см), наблюдаются небольшие сегрегации дымчатого кварца (до 20 см). Очевидно, что в коренном выходе вскрыта только периферийная часть пегматитового тела.

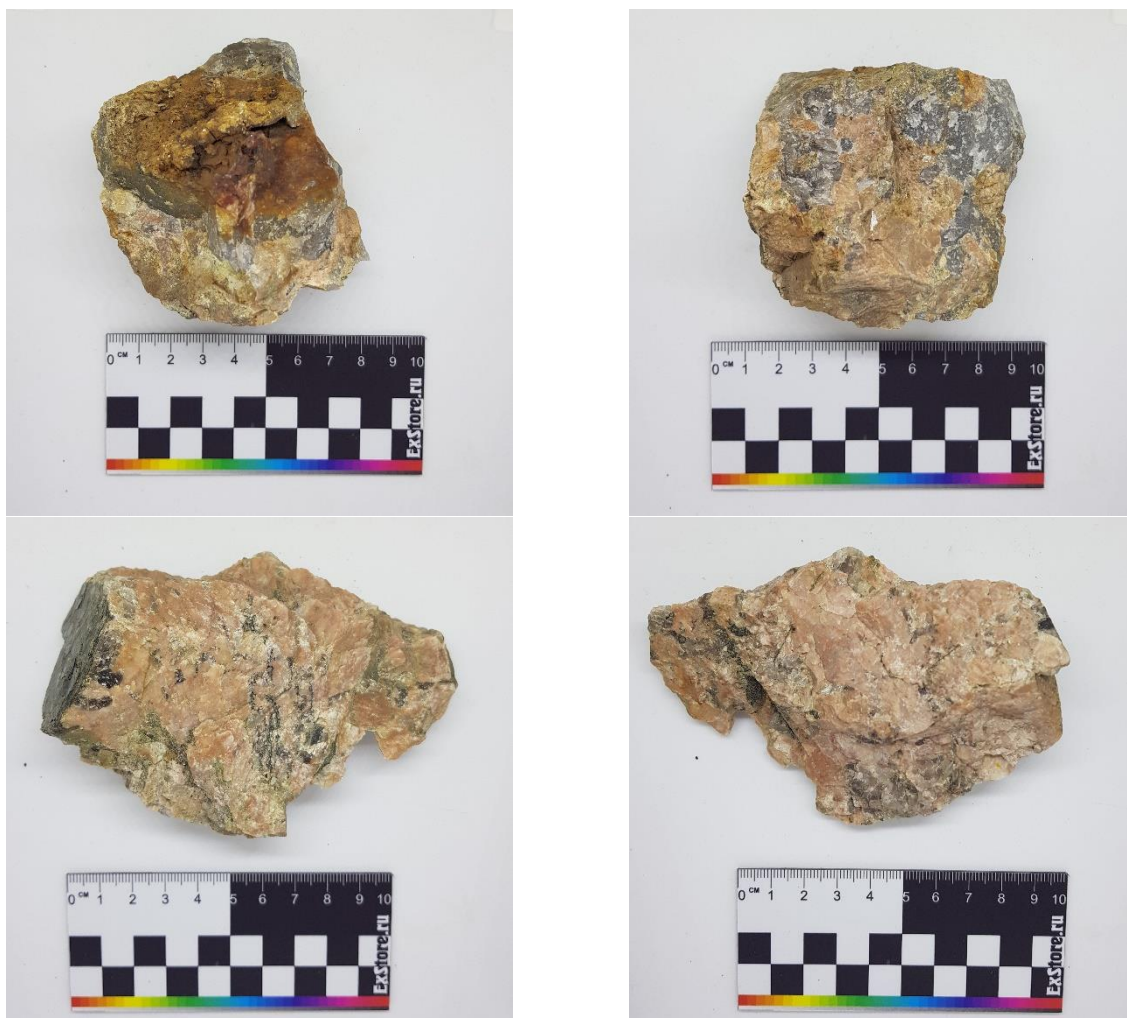


Рисунок 14. Изображение образца из пегматита «Калуга»

3 Методические аспекты работы

Сбор фактического материала для проведения этого исследования проходил во время полевых работ на территории Питкярантской группы гранитогнейсовых куполов.

Для минералогических и геохимических исследований отбирался каменный материал: крупные весовые пробы и штучные образцы.

Валовые пробы пегматитов весом от 5 до 10 килограмм были отобраны из 6 пегматитовых тел - «Железная дорога», «Калуга», «Голубая дорога», «Харитоновский», «Линнаваара» и «Тетрамяки». К валовой пробе пегматита «Калуга» были добавлены пробы внешней (приконтактной) и внутренней зон, а для пегматоида Тетрамяки была дополнительно отобрана проба из слюдяной оболочки.

Всего было отобрано и использовалось в работе – 9 проб.

После измельчения отобранных проб до размеров щебня, каждая проба дробилась с использованием щековой дробилки «ШД-б» до крупности 1 мм, пропускалась через сито с размерностью ячейки 1 мм и при необходимости додрабливалась. Разделение проб на тяжелую и легкую фракции проводилось с помощью концентрационного стола «СКЛ-2». Полученные навески тяжелой фракции, т.н. «серый шлик» «доводились» вручную в фарфоровых чашках, а после разделялись на магнитную, парамагнитную и немагнитную фракции и просматривались по биноклю. Затем немагнитная фракция была расситована на две - крупностью +1мм. и -1мм. Фракция менее 1 мм была полностью использована для изготовления препарата для исследования (шайбы). Фракция крупностью +1 мм исследовалась под биноклем и из нее проводился отбор отдельных зерен граната, циркона, апатита и монацита и изготовление полированных шайб для последующего изучения. Всего было подготовлено 14 шайб.

Изучение проб проводилось в несколько этапов. Для изучения отдельных зерен и получения их изображений зерна минералов помещались на угольный скотч. Изготовленные препараты были изучены в ресурсном центре «Геомодель» с помощью сканирующего электронного микроскопа-анализатора Hitachi S-3400N с аналитической приставкой Oxford Instruments X-Max 20.

Видообразующий и примесный состав минералов определялся в РЦ «Геомодель» с помощью сканирующего электронного микроскопа-анализатора Hitachi S-3400N с аналитической приставкой Oxford Instruments X-Max 20. Микроскоп позволяет определять состав областей твердотельных образцов без их разрушения. Ускоряющее напряжение при исследовании образцов составляло 20 кВт, разрешение 70 нм. У аппарата имеется ряд ограничений. Точность анализа составляет 1 весовой процент. Пределы обнаружения рентгеноспектрального микроанализа – порядка 10^{-2} мас. %. Основной недостаток метода - невозможность определять легкие элементы: такие, как, например, литий или бериллий и определять различные валентные формы элементов, что, например, для железа, которое в

виде разных валентных форм может занимать разные структурные позиции в составе минералов, является исключительно важным.

4 Характеристика минералов тяжелой фракции

Акцессорная минерализация в пегматитах весьма разнообразна. В пробах пегматитов в составе тяжелой фракции обнаружены и изучены методом микрозондового анализа гранаты, апатиты, цирконы, монацит и ксенотим, различные минералы висмута и титана, уранинит, колумбит-танталит и электрум, сульфиды и др. Это позволило провести сравнительный анализ минералов из различных пегматитовых тел.

Представлены итоги исследования акцессорной минерализации 6 пегматитовых тел Северного Приладожья. В работе демонстрируется, что главными акцессорными минералами являются циркон, вторично преобразованный и измененный; фтор-апатит, в котором массовый процент фтора достигает 5,6; железистый колумбит из изоморфного ряда колумбит-танталит; гранаты с преобладающим алмандиновым миналом; монациты, в которых в среднем суммарно содержится до 63 масс. % элементов редкоземельной группы и турмалины в основном принадлежащие к щелочной группе. Часть кристаллов имеет характерную форму и огранку. Монациты, гранаты, цирконы и апатиты были отобраны в отдельные пробы для последующего более детального исследования, которое планируется продолжить в дальнейших работах. Также в отдельных пробах были обнаружены минералы титана, касситерит, минералы урана-тория и электрум.

4.1 Фосфаты редкоземельных элементов.

Из фосфатов РЗЭ во всех изученных пробах присутствуют монацит и ксенотим, последний в незначительном количестве и чаще в виде включений в цирконе, апатите или гранате.

Монацит.

Присутствует во всех изученных пробах. Представлен варьирующими от бурого до коричневого, иногда коричнево-желтого цвета непрозрачными или слабопрозрачными изометричными зернами размером до 3 мм. В наибольшем количестве отмечается в пробах из пегматитов «Голубая Дорога» и «Тетрамяки». Часто содержит в себе включения мелких зерен циркона.

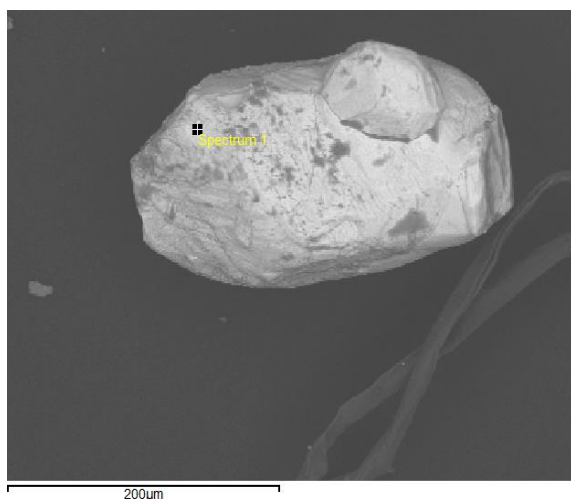


Рисунок 15. Сrostок кристаллов монацита.Изображение получено с помощью электронного микроскопа TM3000

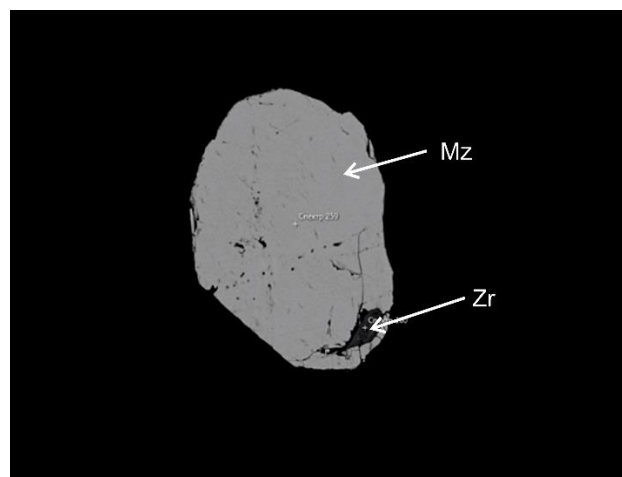


Рисунок 16. Включение циркона в зерне монацита.Тетрамяки 67 (259-260) Изображение в BSE.

Средние составы изученных зерен и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах представлены в таблице

Особенностью всех изученных монацитов является постоянное присутствие в их составе тория, содержания которого значительно варьируют - от 2,13 в монаците из слюдяной оторочки пегматита Тетрамяки до до 22,29 масс.% ThO_2 в зерне монацита из краевой зоны пегматита Калуга и свинца – от 0,55 до 1,98 масс.% PbO . В отдельных зернах отмечается примесь железа – до 1,88 масс.%, FeO , урана – до 4,26 масс.% UO_2 , стронция, в единичном случае тантала – 1,51 масс.% Ta_2O_5 в зерне монацита из пегматита Линноваара. Практически во всех монацитах, за исключением зерен из слюдяной оторочки пегматита Тетрамяки, присутствует примесь кремния – до 2,71 масс.% SiO_2 .

Содержания $\text{PЗЭ}_{(\text{La-Gd})}$ в изученных монацитах возрастают по мере снижения содержания тория (Рис.15), которые могут рассматриваться в качестве косвенного показателя температуры ⁴. Как видно из рисунка, самыми высокими содержаниями РЗЭ и низкими тория характеризуются монациты из краевой и центральной зон пегматита Тетрамяки и пегматита Харитоновского участка, поля состава которых располагаются достаточно компактно. Еще одно компактное поле образуют составы монацитов из пегматита Голубая Дорога. Монациты остальных пегматитовых объектов характеризуются широкими вариациями соотношений тория и РЗЭ, что свидетельствует об их образовании в более широком диапазоне температур.

Таблица 2 Состав монацитов из пегматитов Северного Приладожья.

	1	2	3	4a	4б
SiO ₂	1,06±0,31	1,30±0,40	0,83±0,12	1,29±0,30	1,01±0,24
P ₂ O ₅	25,37±7,06	26,9±0,67	28,39±1,62	25,82±0,68	27,41±0,66
CaO	1,05±0,46	2,75±0,77	3,28±0,88	1,05±0,57	2,04±1,40
FeO		1,03±0,12 (2)	1,88 (1)		0,51 (1)
Y ₂ O ₃	2,73±0,64	3,22±0,50	3,33±0,38	2,72±0,65	2,94±0,51
La ₂ O ₃	15,71±2,81	12,70±2,19	16,98±3,10	15,59±3,05	15,32±4,82
Ce ₂ O ₃	24,58±3,63	20,11±3,08	22,62±5,80	25,01±3,19	22,81±4,70
Pr ₂ O ₃	2,97±0,39	2,20±0,34	2,06±0,33	2,71±0,49	2,66±0,72
Nd ₂ O ₃	11,78±1,83	8,60±1,12	8,27±1,50	11,16±0,76	10,36±2,25
Sm ₂ O ₃	3,53±1,09	3,42±0,90	2,52±0,47	2,90±1,08	3,91±1,17
Gd ₂ O ₃	2,30±0,63	2,75±0,58	1,93±0,27	1,89±0,49	2,82±0,74
Ta ₂ O ₅	1,51 (1)*				
PbO	0,85±0,18 (6)	1,59±0,25	1,53±0,48	0,97±0,30	1,08±0,53
ThO ₂	6,19±1,54	14,57±3,46	13,54±2,38	7,80±2,65	10,28±5,87
UO ₂			2,07±0,39 (4)		1,02±0,38 (4)
n	11	10	7	15	17
∑PЗЭ _{La-Gd}	63,13±2,77	48,89±4,95	51,58±11,29	58,20±5,50	53,81±8,59
Вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах, рассчитанных на 4 O					
Ce	0,353-0,396	0,204-0,357	0,232-0,493	0,309-0,454	0,182-0,435
La	0,204-0,478	0,123-0,239	0,173-0,471	0,171-0,312	0,108-0,312
Pr	0,037-0,051	0,024-0,043	0,026-0,037	0,029-0,053	0,023-0,053
Nd	0,150-0,199	0,094-0,150	0,079-0,139	0,140-0,185	0,090-0,209
Sm	0,039-0,081	0,030-0,066	0,025-0,043	0,018-0,074	0,029-0,080
Gd	0,024-0,052	0,026-0,050	0,019-0,028	0,019-0,042	0,021-0,052
Y	0,040-0,081	0,054-0,094	0,058-0,078	0,045-0,091	0,041-0,086
Ca	0,029-0,083	0,082-0,183	0,091-0,185	0,014-0,114	0,026-0,174
Fe		0,000-0,065			0,000-0,018
Ta	0,000-0,017				
Pb	0,000-0,013	0,012-0,022	0,008-0,022	0,007-0,018	0,005-0,024
Th	0,028-0,078	0,104-0,198	0,100-0,164	0,032-0,123	0,037-0,208
U			0,000-0,023		0,000-0,014
sum	1,054-1,094	1,042-1,100	0,956-1,183	0,986-1,096	0,982-1,094
P	0,911-0,961	0,883-0,957	0,875-0,997	0,881-0,948	0,900-1,010
Si	0,000-0,058	0,000-0,081	0,026-0,039	0,041-0,078	0,025-0,065
sum	0,944-0,976	0,942-0,988	0,914-1,034	0,942-1,012	0,900-1,014
O	4	4	4	4	4

Таблица 3 Состав монацитов из пегматитов Северного Приладожья

	4	5	6	6б
SiO ₂	1,39±0,27	1,24±0,26	0,76±0,19	
P ₂ O ₅	28,20±1,07	25,66±1,33	28,09±1,28	28,58±0,44
CaO	2,63±0,96	2,08±0,92	1,21±1,08	1,15±0,28
FeO	1,53±1,00 (2)	1,44±0,48 (6)	1,08±0,59 (4)	
Y ₂ O ₃	3,53±0,65	2,35±0,40	2,42±0,35	2,85±0,27
La ₂ O ₃	12,90±2,61	18,79±1,55	20,51±2,02	20,78±0,41
Ce ₂ O ₃	21,45±3,12	24,26±2,24	27,75±1,57	27,79±0,49
Pr ₂ O ₃	2,56±0,44	2,21±0,39	2,60±0,47	2,49±0,35
Nd ₂ O ₃	10,27±1,46	8,69±1,22	10,93±1,30	11,09±0,27
Sm ₂ O ₃	3,54±0,62	1,56±0,37	1,85±0,35	1,48±0,02
Gd ₂ O ₃	2,56±0,55	1,55±0,30	1,54±0,23	1,51±0,05
SrO			1,02±0,35 (2)	
PbO	1,55±0,43	1,03±0,30	0,93±0,20	0,91±0,02
ThO ₂	14,75±4,24	9,93±2,77	4,46±1,26	3,25±1,12
UO ₂	1,52±0,14 (2)		3,09±1,16(3)	1,55±0,29
n	18	30	32	4
∑P3Э _{La-Gd}	53,28±6,40	54,41±5,21	63,43±4,10	63,26±1,51
Вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах, рассчитанных на 4 O				
Ce	0,242-0,404	0,340-0,466	0,363-0,455	0,388-0,416
La	0,139-0,302	0,253-0,344	0,245-0,428	0,293-0,318
Pr	0,025-0,049	0,024-0,046	0,027-0,050	0,031-0,043
Nd	0,107-0,162	0,098-0,170	0,109-0,173	0,149-0,171
Sm	0,023-0,057	0,015-0,033	0,019-0,033	0,010-0,020
Gd	0,022-0,046	0,018-0,028	0,016-0,027	0,019-0,020
Y	0,038-0,096	0,040-0,070	0,039-0,065	0,053-0,067
Ca	0,017-0,171	0,021-0,301	0,013-0,232	0,040-0,066
Fe	0,000-0,081	0,000-0,090	0,000-0,074	
Sr			0,000-0,032	
Pb	0,011-0,026	0,004-0,017	0,008-0,014	0,009-0,010
Th	0,048-0,184	0,027-0,125	0,018-0,083	0,020-0,045
U	0,000-0,014		0,000-0,038	0,010-0,018
sum	1,040-1,163	0,996-1,194	0,984-1,166	1,014-1,099
P	0,883-0,938	0,843-0,954	0,858-0,985	0,944-0,992
Si	0,037-0,078	0,023-0,073	0,020-0,056	
sum	0,934-0,986	0,901-1,019	0,892-1,014	0,944-0,992
O	4	4	4	4

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга; 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

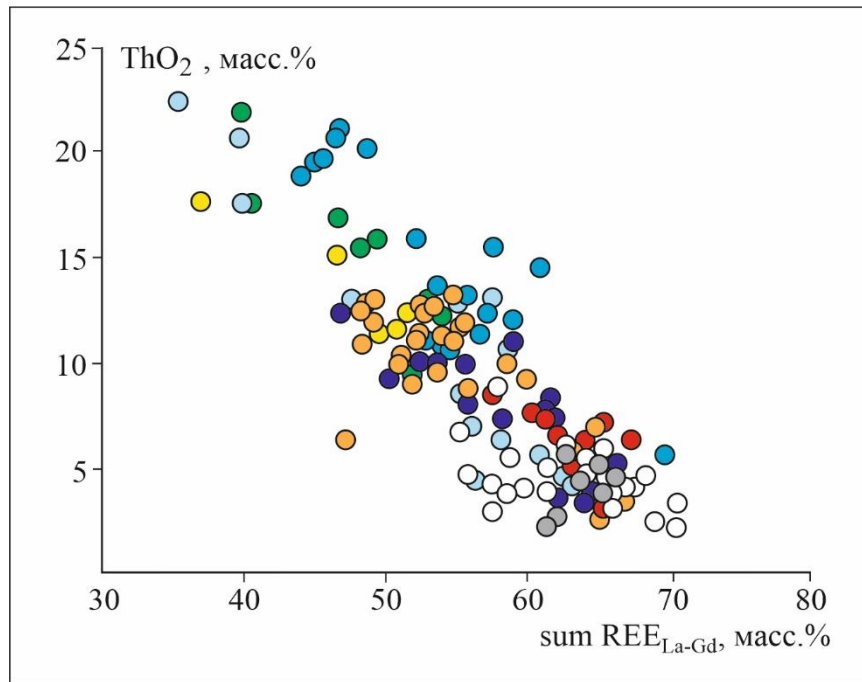


Рисунок 17 Соотношение суммарного содержания РЗЭ_(La-Gd) и тория в монацитах.

Ксенотим.

Чаще этот минерал находится в виде очень мелких включений в зернах монацита, граната или циркона.

Отдельные мелкие темно-желтые зерна ксенотима присутствуют в незначительном количестве в пробах краевой и центральной части пегматита «Калуга». Наиболее контрастно они различаются по содержанию тория – в ксенотимах из краевой части его больше. От краевой к центральной зонам пегматита в составе ксенотима незначительно увеличивается суммарное содержание $P3Э_{Sm-Yb}$ и иттрия.

Таблица 4 Состав ксенотимов из пегматитов Северного Приладожья.

	4а	4б
Si	5.45	2.82
P	32.71±2.32	32.00±0.59
Ca	0.29±0.08	0.70 (1)
FeO	1.89 (1)	1.67±1.46
Y	41.99±2.29	39.51±3.29
Zr	8.04 (1)	
Sm	0.99±0.38	0.97 (1)
Gd	2.96±0.84	2.48±0.65
Tb	0.90±0.02	
Dy	5.28±1.27	4.94±0.66
Er	2.62±0.58	3.09±0.26
Yb	4.32±1.12	4.62±1.27
Th	0.54±0.21	1.59±1.00
U	0.78±0.02	0.49 (1)
$\sum P3Э_{La-Gd}$	16.30±3.60	15.37 ±2.85
	6	4
SiO ₂	0-0.185	0-0.106
P ₂ O ₅	0.819-1.005	0.951-0.992
sum	1.004-1.005	0.992-1.053
CaO	0-0.012	0-0.026
FeO	0-.054	0-0.079
Y ₂ O ₃	0.723-0.820	0.701-0.846
ZrO ₂	0-0.133	
Sm ₂ O ₃	0-0.019	0-0.012
Gd ₂ O ₃	0.019-0.050	0.021-0.039
Tb ₄ O ₇	0-0.010	
Dy ₂ O ₃	0.032-0.072	0.046-0.064
Er ₂ O ₃	0.019-0.038	0.032-0.038
Yb ₂ O ₃	0.032-0.063	0.034-0.068
ThO ₂	0-0.003	0-0.016
UO ₂	0-0.006	0-0.004
sum	0.997-1.030	0.948-1.013
O	4	4

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга: 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

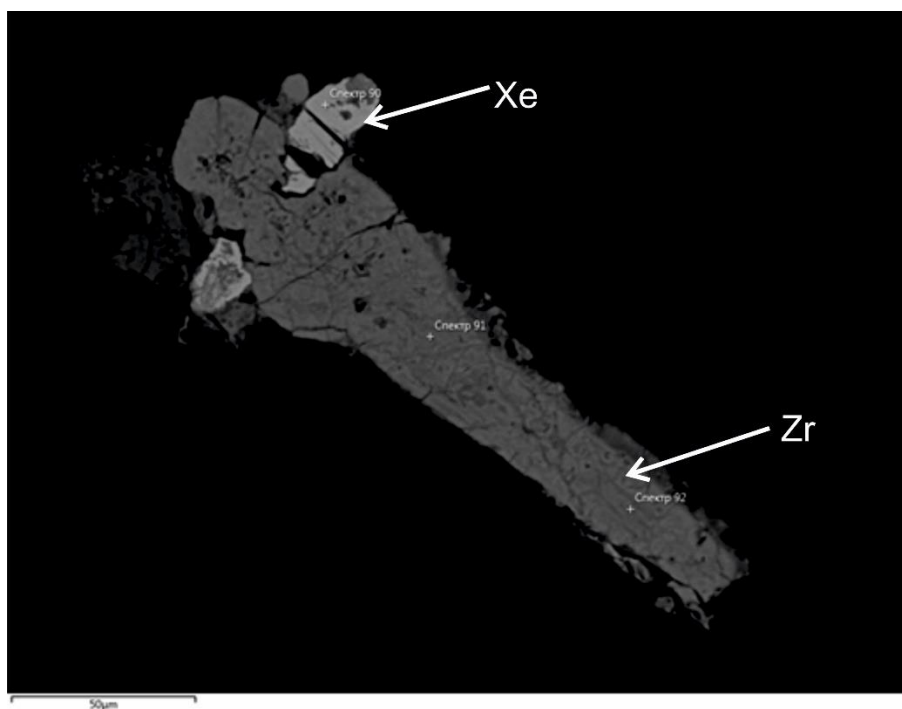


Рисунок 18 Включение ксенотима в цирконе

4.2 Минералы титана.

Минералы титана обнаружены не во всех изученных пробах. Они отсутствуют в пробах из пегматитов «Линноваара», «Харитоновский Участок» и пробе из слюдяной оторочки пегматита «Тетрамяки». Наибольшим разнообразием минералов титана отличается проба из пегматита «Голубая дорога», помимо широко распространенного рутила в ней обнаружены ильменит и стрюверит.

Рутил характеризуется широкими вариациями состава, как в пределах отдельных пегматитовых тел, так и в целом для изученных объектов. В качестве постоянной примеси в нем присутствуют ниобий, железо, ванадий и, за исключением рутилов из пегматита «Голубая дорога», тантал. В рутиле из пегматитов «Железная дорога» и «Калуга» отмечаются постоянные примеси олова и вольфрама. Примесь скандия отмечается в отдельных зернах рутила из пегматита «Железная дорога», а вот содержания хрома присутствуют только в рутилах пегматита «Калуга» и обнаружены в одном из зерен рутила из слюдяной зоны пегматита «Тетрамяки». Кроме того, в качестве примесей присутствуют ремний, в единичных случаях марганец, алюминий и стронций.

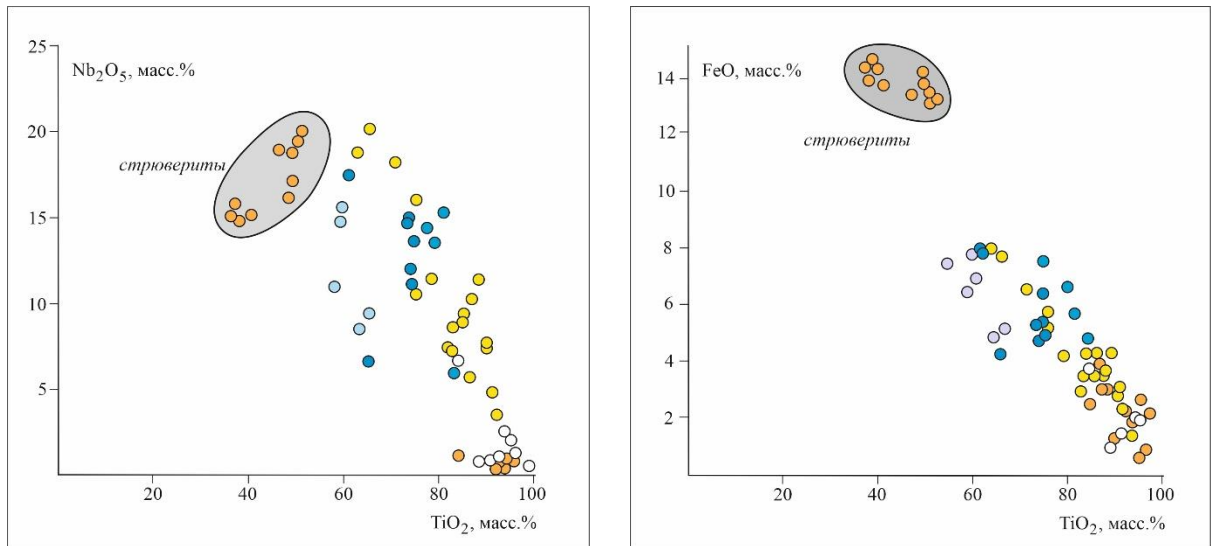


Рисунок 19 Содержания TiO_2 , FeO и Nb_2O_5 в минералах титана из пегматитов Северного Приладожья.

Самые широкие вариации содержаний ниобия и тантала отмечаются для рутила из пегматита «Железная дорога», в изученных зернах содержания этих элементов варьируют от 3,53 до 20,11 масс.% Nb_2O_5 и от 0,84 до 9,36 масс.% Ta_2O_5 в рутилах из пегматита «Железная дорога» и от 7,5 до 16,16 масс.% Nb_2O_5 и от 2,1 до 16,10 масс.% Ta_2O_5 в рутилах из пегматита «Калуга» при этом здесь рутил из краевой части пегматита более танталовый, в нем фиксируются более высокие содержания примеси вольфрама (до 3 масс.% WO_3) и олова (до 0,92 масс.% SnO_2).

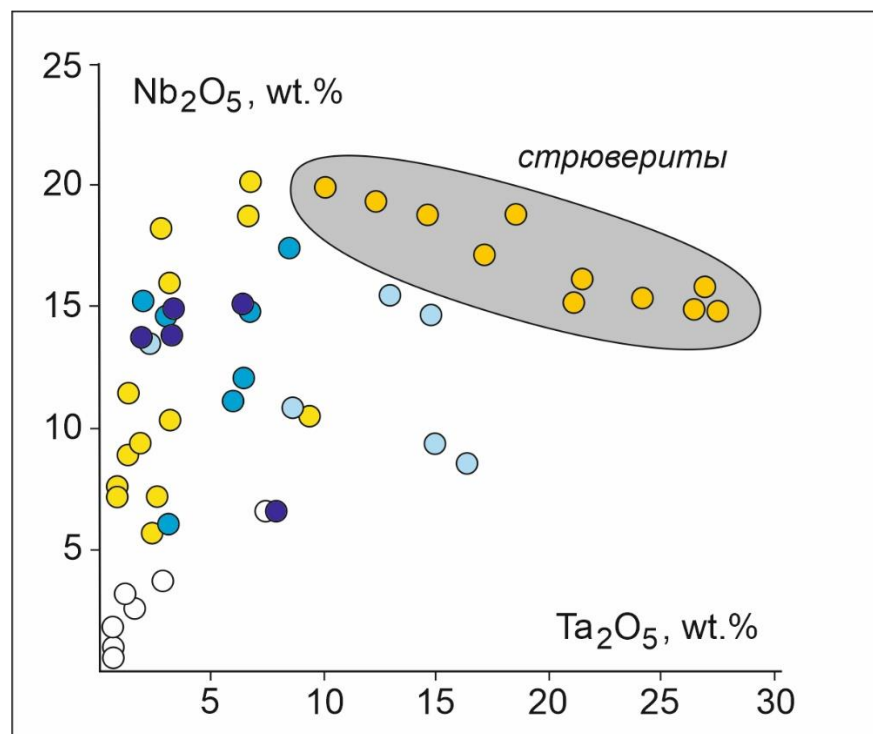


Рисунок 20 Диаграмма состава минералов титана показывающая соотношение тантала и ниобия.

Таблица 5 Состав минералов титана из пегматитов Северного Приладожья.

	3	4a	4б	4
SiO ₂	0,94±0,53	1,35±0,64	2,08(1)	1,02±0,19
TiO ₂	83,66±9,90	71,03±5,14	61,25±2,80	82,45±2,84
Al ₂ O ₃	0,34 (1)			0,90 (1)
Sc ₂ O ₃	0,47±0,09 (2)			
V ₂ O ₃	0,79±0,01 (2)	1,69±0,43 (5)	3,75±0,68	1,55±0,12(2)
Cr ₂ O ₃		0,63±0,14 (4)	0,89±0,24	
MnO	0,72±0,02 (2)		0,78 (1)	
FeO	3,71±2,00	5,53±1,14	5,90±1,18	7,10±2,54
SrO	0,73 (1)			
Nb ₂ O ₅	10,42±4,72 (18)	12,92±3,24	12,13±2,62	11,55±4,00
Ta ₂ O ₅	3,28±2,54 (13)	5,76±2,25	13,55±2,67	3,12±1,03
SnO ₂	1,72±0,80		0,85±0,09	
WO ₃	1,42±0,39 (10)	1,33±0,05 (2)	2,81±0,28	
n	20	7	6	4
Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅	8,09-26,89	14,37-25,96	19,69-29,50	8,90-17,93
Nb ₂ O ₅ /Ta ₂ O ₅	1,12-9,24	0,83-7,10	0,53-6,19	0,52-6,19
Ta ₂ O ₅ /(Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅)	0,10-0,47	0,12-0,55	0,44-0,65	0,44-0,65
Вариации коэффициентов в кристаллохимических формулах				
Ti	0,711-0,997	0,714-0,842	0,689-0,741	0,809-0,906
Fe	0,004-0,100	0,059-0,102	0,062-0,113	0,057-0,132
Nb	0,022-0,135	0,051-0,122	0,060-0,185	0,038-0,094
Ta	0,008-0,093	0,019-0,092	0,045-0,172	0,018-0,041
Sn	0,004-0,017		0,004-0,006	
W	0,000-0,008	0,000-0,005	0,010-0,012	
Sc	0,000-0,007			
V	0,000-0,009	0,000-0,025	0,031-0,054	0,000-0,018
Cr		0,000-0,010	0,007-0,014	
Mn	0,000-0,000		0,000-0,020	
Sr	0,000-0,006			
Si	0,004-0,030	0,010-0,037	0,000-0,063	0,011-0,017
Al	0,000-0,006			0,000-0,015
sum	1,002-1,082	1,025-1,070	1,043-1,113	1,018-1,070
O	2	2	2	2

Таблица 6 Состав минералов титана из пегматитов Северного Приладожья.

	5	5	5	66
	рутил	ильменит	стриверит	
SiO ₂	0,66±0,33 (7)		3,12±0,44 (9)	0,55±0,19 (4)
TiO ₂	91,99±4,26	50,25	44,29±5,25	93,50±5,21
Al ₂ O ₃	0,76±0,34 (3)			0,87±0,26 (2)
Sc ₂ O ₃			0,36±0,05 (2)	
V ₂ O ₃	0,84±0,05 (3)		0,79 (1)	1,13±0,32 (6)
Cr ₂ O ₃				1,17 (1)
MnO		2,01		
FeO	2,09±0,93	42, 85	13,78±0,48	1,83±1,01 (5)
SrO				
Nb ₂ O ₅	0,78±0,23 (4)		16,92±1,87	1,94±1,89
Ta ₂ O ₅			20,09±5,77	3,22±3,01 (3)
SnO ₂				2,00 (1)
WO ₃			2,40±0,17 (3)	3,86±3,01 (3)
n	12	1	11	8
Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅			30,00-42,85	1,45-14,10
Nb ₂ O ₅ /Ta ₂ O ₅			0,54-1,95	0,89-1,62
Ta ₂ O ₅ /(Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅)			0,34-0,65	0,38-0,53
Вариации коэффициентов в кристаллохимических формулах				
Ti	0,955-0,994	1,002 (Ti)	1,493-1,889	0,864-0,985
Fe	0,007-0,048	0,950	0,529-0,648	0,000-0,042
Nb	0,000-0,008		0,358-0,440	0,000-0,041
Ta			0,338-0,998	0,000-0,069
Sn				0,000
W			0,000-0,036	0,000
Sc			0,000-0,017	
V	0,000-0,012		0,000-0,031	0,000-0,018
Cr				0,000-0,013
Mn		0,045		
Sr				
Si	0,000-0,067		0,000-0,204	0,000-0,024
Al	0,000-0,019			0,000-0,017
sum	1,002-1,024	1,998 (Fe+Mn)		0,997-1,049
O	2	3	6	2

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга; 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

4.3 Минералы тантала и ниобия.

Из минералов тантала и ниобия в пробах пегматитов присутствует железистый колумбит и минерал, который не удалось идентифицировать.

Колумбит присутствует в виде мелких непрозрачных зерен во всех пегматитах за исключением пегматита «Тетрамяки».

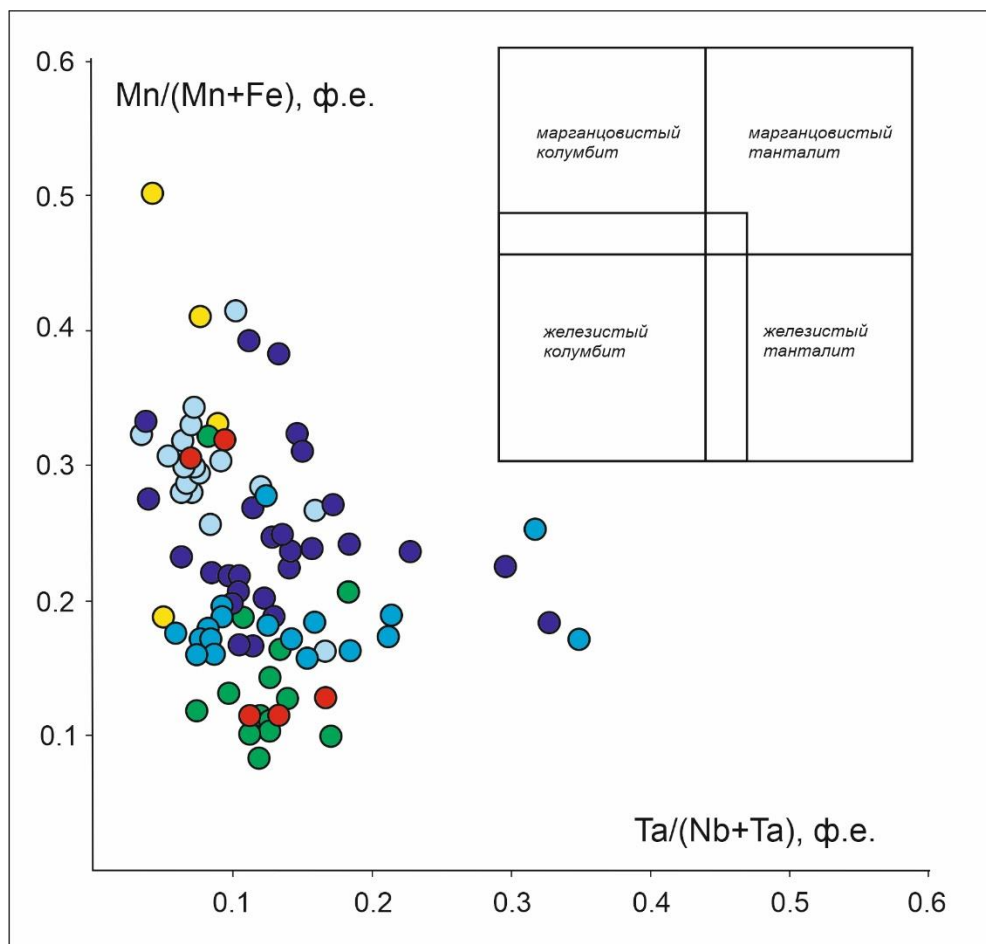


Рисунок 21 диаграмма состава минералов танталита-колумбита

Все колумбиты представлены его железистой разновидностью, однако в пределах отдельных пегматитовых тел состав этого минерала достаточно широко варьирует по содержанию железа и марганца. Суммарные содержания Ta_2O_5 и Nb_2O_5 и их отношения в составе колумбитов также варьируют в широких пределах. Из примесей в составе колумбитов постоянно присутствует титан (до 7,76 масс.% TiO_2), отмечается скандий, (до 2,5 масс.% Sc_2O_3) и вольфрам (до 8,7 масс.% WO_3) Самые высокие содержания этих элементов-примесей отмечаются в колумбитах из пегматита «Железная Дорога». В колумбитах из пегматита «Калуга» отмечается примесь кремния – до 3,7 масс.% SiO_2 .

Таблица 7 Состав колумбитов из пегматитов Северного Приладожья.

	1	2	3	4a
SiO ₂				2,34±0,36 (3)
TiO ₂	2,63±1,75	1,66±0,89	6,13±1,61	1,78±0,88
MgO				0,95±0,10 (5)
Sc ₂ O ₃	1,60 (1)	0,79±0,25 (2)	1,73±0,73	0,85±0,33 (7)
MnO	3,43±1,69	2,78±1,09	5,68±3,20	4,45±1,08
FeO	15,61±2,17	17,22±1,54	13,49±2,77	13,82±1,16
Nb ₂ O ₅	60,95±2,93	63,07±3,51	62,69±1,47	59,48±6,12
Ta ₂ O ₅	14,77±4,27	14,72±3,17	6,37±2,66	15,38±6,59
SnO ₂			1,14 (1)	
WO ₃	7,60 (1)	3,46±1,30 (6)	7,10±1,63	3,62±0,98 (7)
n	3	15	5	27
Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅	67,20-81,41	70,19-83,34	65,76-73,05	63,94-77,98
Nb ₂ O ₅ /Ta ₂ O ₅	3,01-5,77	2,68-7,44	6,08-21,44	0,25-15,15
Ta ₂ O ₅ /(Ta ₂ O ₅ + Nb ₂ O ₅)	0,15-0,25	0,12-0,27	0,04-0,14	0,06-0,80
Fe	0,614-0,868	0,654-0,904	0,459-0,793	0,448-0,818
Mg				0,000-0,092
Sc	0,000-0,082	0,000-0,052	0,026-0,132	0,000-0,079
Mn	0,104-0,288	0,081-0,311	0,036-0,462	
Si				0,000-0,173
sum	0,957-0,984	0,950-1,030	0,961-0,995	0,857-1,193
Nb	1,514-1,738	1,535-1,799	1,499-1,618	0,492-1,852
Ta	0,158-0,327	0,145-0,355	0,043-0,159	0,065-1,167
Ti	0,057-0,224	0,038-0,211	0,183-0,359	0,038-0,498
W	0,000-0,115	0,000-0,094	0,000-0,025	0,000-0,076
sum	2,012-2,031	2,001-2,024	2,007-0,043	1,869-2,157
O	6	6	6	6

Таблица 8 Состав колумбитов из пегматитов Северного Приладожья.

	4б	4
SiO ₂	0,95 (1)	2,99±0,27 (2)
TiO ₂	4,15±0,84	1,38±0,32
MgO	0,85 (1)	0,65±0,04 (4)
Sc ₂ O ₃	1,17±0,23	0,39 (1)
MnO	5,66±0,95	3,68±0,66
FeO	13,63±0,93	16,51±0,80
Nb ₂ O ₅	61,96±3,89	63,75±8,77
Ta ₂ O ₅	9,41±3,47	16,67±8,57
WO ₃	4,83±0,66	3,02±0,55 (4)
n	18	18
Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅	67,65-79,00	76,79-88,44
Nb ₂ O ₅ /Ta ₂ O ₅	3,03-16,90	1,13-9,51
Ta ₂ O ₅ /(Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅)	0,06-0,25	0,09-0,47
Fe	0,554-0,782	0,738-0,839
Mg	0,000-0,074	0,000-0,059
Sc	0,031-0,093	0,000-0,020
Mn	0,151-0,391	0,153-0,280
Si	0,000-0,055	0,000-0,173
sum	0,953-1,061	0,964-1,109
Nb	1,397-1,733	1,258-1,820
Ta	0,062-0,299	0,113-0,673
Ti	0,099-0,287	0,040-0,084
W	0,056-0,096	0,000-0,050
sum	1,0965-2,032	1,903-2,030
O	6	6

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга: 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

Так же в составе тяжелой фракции в пробе из пегматита «Калуга» были обнаружены зерна минералов, внешне весьма сходных с колумбитом, но отличающихся от него по составу.

Эти минералы пока идентифицировать не удалось, но они также содержит в своем составе тантал и ниобий, хотя и в меньших количествах, чем колумбит, но, в отличие от последнего в них также присутствуют в значимых количествах во всех зернах уран (до 25,06 масс.% UO₂), кремний (до 11,08 масс.% SiO₂), в отдельных зернах свинец (до 11,97 масс.% PbO).

Таблица 9 Не идентифицированные минералы

Спектр	1128	1150	1152	1170	1194
SiO ₂	6,98	11,08	10,54	12,69	8,24
TiO ₂	0,99	1,02	0,91	1,14	1,09
Al ₂ O ₃	2,43	1,72	2,68	2,23	1,14
MnO	0,69				0,61
FeO	9,86	4,02	11,59	2,63	8,99
Nb ₂ O ₅	32,4	32,82	24,76	32,91	36,19
Ta ₂ O ₅	8,82	14,08	18,58	16,7	15,86
PbO	3,77	11,97		9,39	
ThO ₂					
UO ₂	25,06	12,03	8,07	10,92	7,55
sum	91,00	88,74	79,08	88,61	81,10
Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅	41,22	46,90	43,34	49,61	52,05
Nb ₂ O ₅ /Ta ₂ O ₅	3,67	2,33	1,33	1,97	2,28
Ta ₂ O ₅ /(Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅)	0,21	0,30	0,43	0,34	0,30

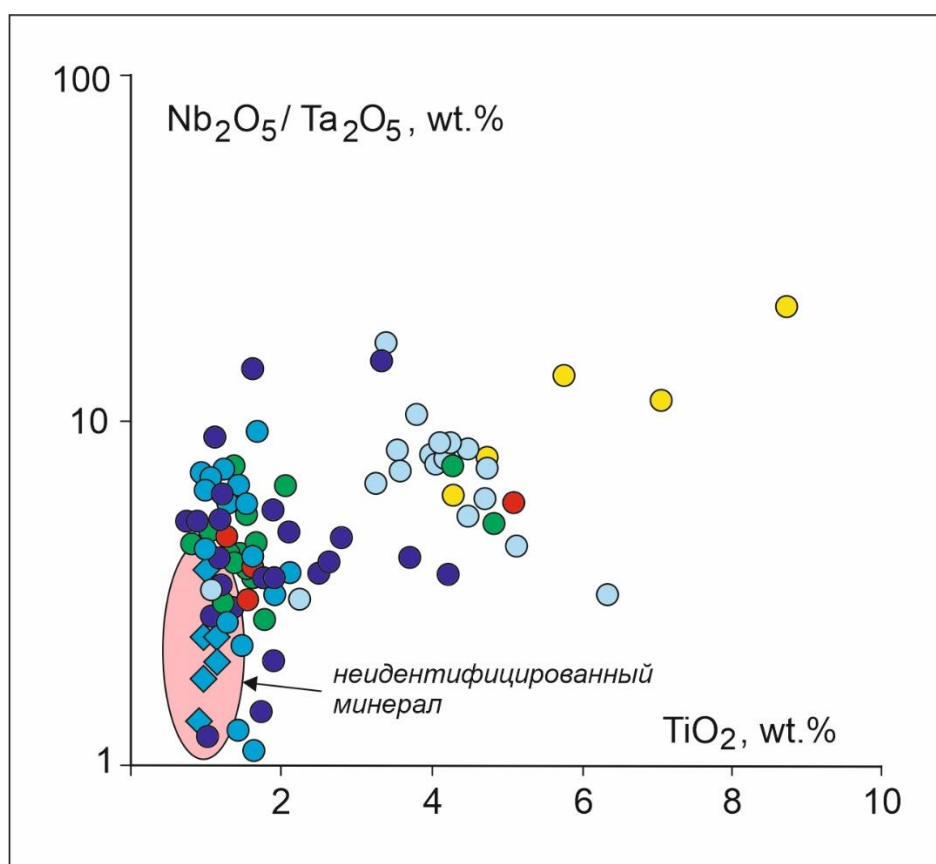


Рисунок 22 Диаграмма составов минерала тантала и ниобия

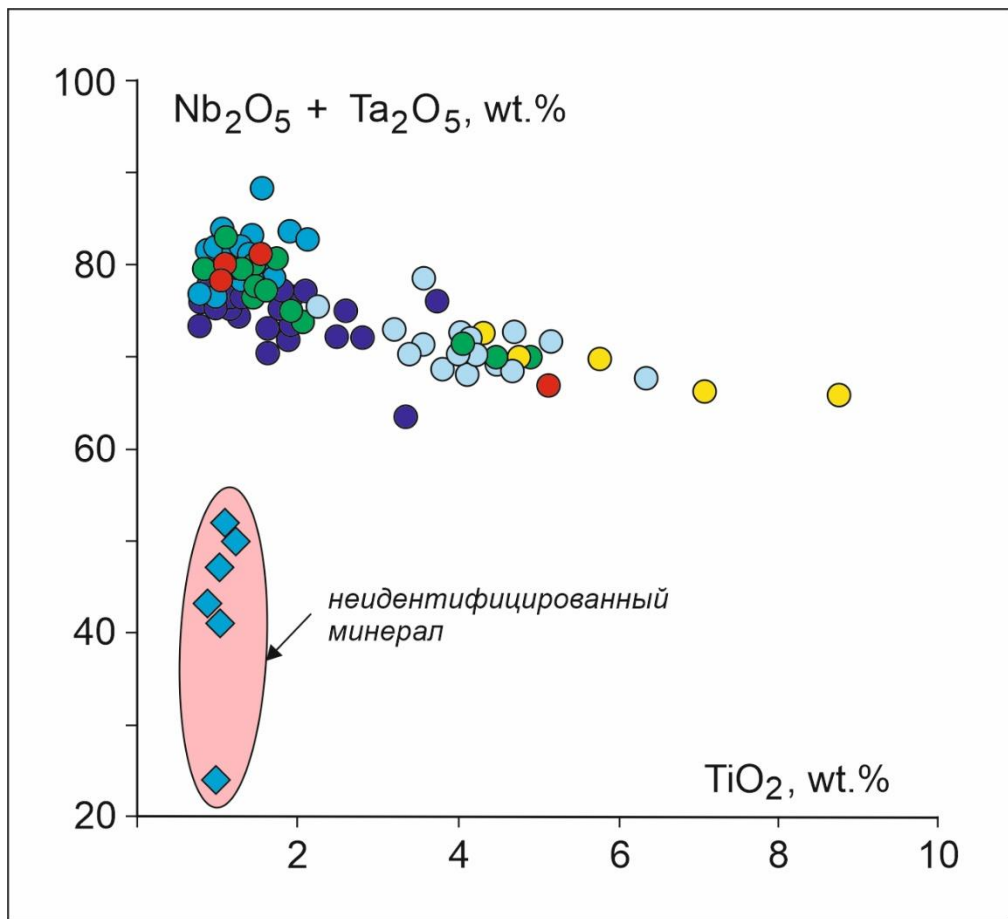


Рисунок 23 Диаграмма составов минерала тантала и ниобия.

4.4 Anatum

Кристаллы апатита присутствуют во всех пробах. По цвету они варьируют от практически бесцветного голубоватого в пробах из пегматитов «Линноваара», «Голубая дорога», «Тетрамяки» (включая слюдяную оторочку) и «Калуга» до голубого в пегматите «Железная Дорога» и серо-голубого в пегматите «Харитоновский». Кристаллы хорошо огранены, иногда с отдельностью по пинакоиду и содержат мелкие включения.

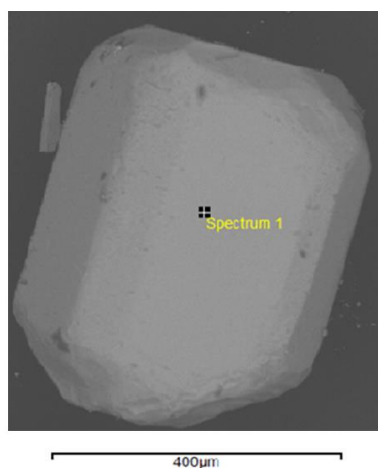


Рисунок 24 Кристалл апатита. Изображение получено с помощью электронного микроскопа ТМ3000

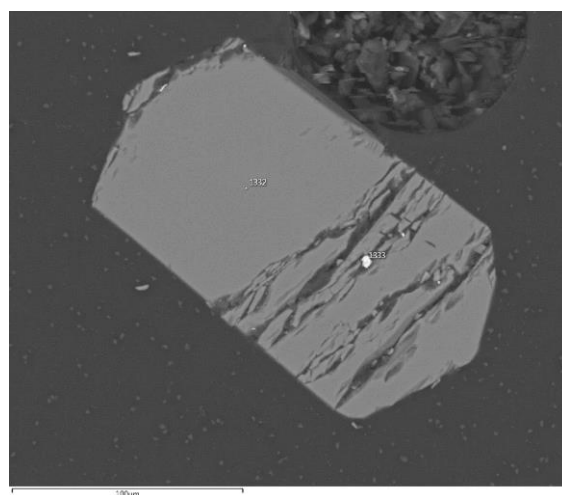


Рисунок 25 Кристалл апатита. Изображение в BSE

В основном состав минерала отвечает фтор-апатиту, но во всех пробах встречаются апатиты с некоторым количеством ОН в составе анионной группы, а в пегматите «Железная Дорога» ОН преобладает. Также в пегматитах «Калуга», «Железная Дорога», «Линноваара» и «Харитоновский» присутствует в незначительном количестве хлор. (рис. 24)

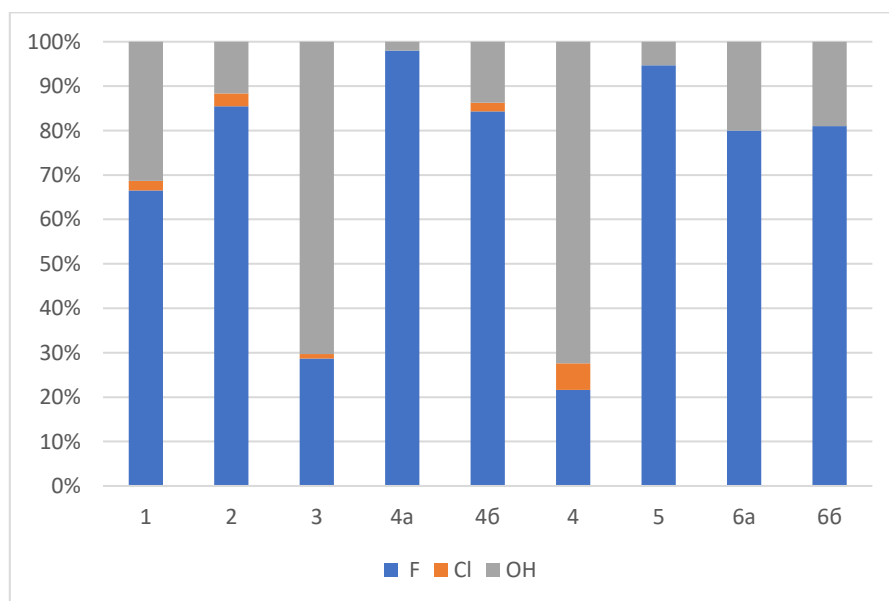


Рисунок 26 Соотношение анионов F, Cl и ОН в составе апатитов.

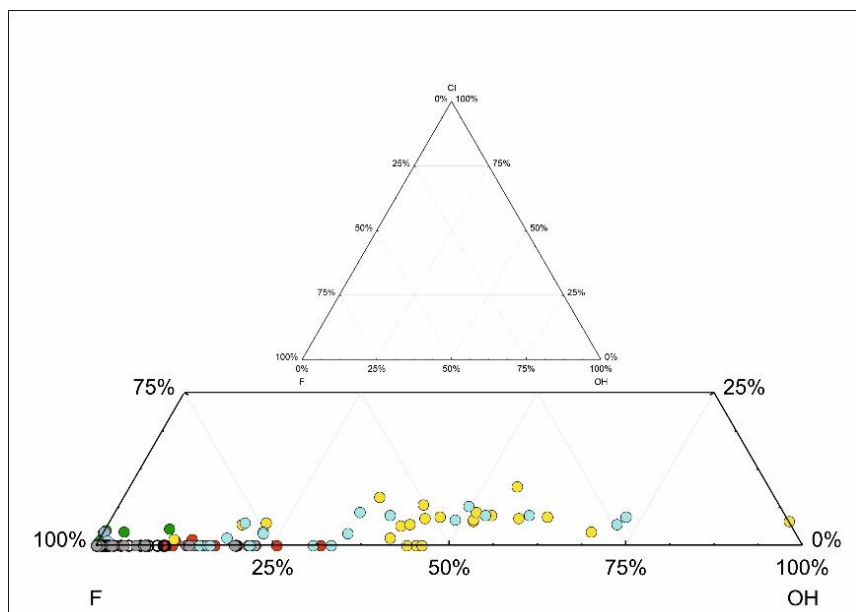


Рисунок 27 Соотношение анионов в апатитах из пегматитов Северного Приладожья.

В качестве примеси в апатитах постоянно присутствует марганец. Его наибольшие концентрации (до 2,9 масс. % MnO) отмечаются в апатитах из пегматита «Голубая дорога», В отдельных зернах отмечаются примеси железа и иттрия. Ниже представлена таблица средних составов апатитов.

Таблица 10 состава апатитов из пегматитов Северного Приладожья

	1	2	3	4a	4б
F	4.10±0.36	3.90±0.37	3.85±0.40	3.98±0.24	4.38±0.78
Cl					
SiO ₂	0.41 (1)				0.82 (1)
P ₂ O ₅	40.33±0.43	40.66±0.66	40.20±0.52	39.18±0.83	40.85±1.67
CaO	54.43±1.01	55.41±0.96	54.05±1.71	53.47±1.35	55.18±2.56
MnO	0.79±0.31	0.75±0.47	0.73±0.41	0.31 (1)	0.89±0.74 (3)
Y ₂ O ₃			5.86 (1)		
n	15	37	24	6	7
F	0.947-1.297	0.804-1.178	0.805-1.232	0.975-1.178	0.864-1.402
Cl					0-0.024
sum	0.947-1.297	0.804-1.178	0.805-1.232	0.975-1.178	0.888-1.402
Si	0-0.034				0-0.064
P	2.613-2.849	2.801-2.860	2.798-2.886	2.820-2.839	2.801-2.845
sum	2.647-2.849	2.801-2.860	2.798-2.886	2.820-2.839	2.865-2.845
Ca	4.456-4.931	4.684-5.045	4.430-4.922	4.873-4.929	4.669-4.911
Mn	0-0.108	0-0.124	0-0.111	0-0.022	0-0.118
Y			0-0.227		
sum	4.523-4.931	4.808-5.045	4.688-4.936	4.848-4.929	4.669-4.938
O	12	12	12	12	12

Таблица 11 состава апатитов из пегматитов Северного Приладожья

	4	5	6	6б
F	2.67±0.86	1.97±0.56	4.09±0.52	3.43±0.55
Cl	0.26±0.12 (14)	0.31±0.15 (19)	0.13±0.06 (8)	0.09±0.06 (3)
SiO ₂				0.54±0.12 (5)
P ₂ O ₅	40.15±0.61	40.35±0.67	40.10±0.94	40.34±1.43
CaO	53.87±1.45	53.63±1.15	53.76±1.14	55.57±1.20
MnO	1.37±1.13 (22)	2.12±0.78	0.95±0.39 (11)	0.26±0.08 (5)
FeO	0.59±0.27 (6)			0.43 (1)
n	28	21	14	18
F	0.228-1.170	0.289-0.884	0.882-1.306	0.684-1.115
Cl	0-0.064	0-0.097	0.01-0.03	0-0.022
sum	0.272-1.170	0.386-0.884	0.892-1.306	0.706-1.115
Si				0-0.055
P	2.811-2.912	2.784-2.906	2.788-2.853	2.787-2.894
sum	2.811-2.912	2.811-2.912	2.788-2.853	2.842-2.894
Ca	4.478-4.976	4.583-4.961	4.692-4.904	4.822-5.122
Mn	0-0.266	0-0.284	0.03-0.11	0-0.026
FeO	0-0.074			0-0.031
sum	4.818-5.023	4.867-5.061	4.714-4.914	4.822-5.122
O	12	12	12	12

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга: 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

4.5 Циркон.

Циркон в виде отдельных зерен и их обломков присутствует во всех пробах пегматитов. Наибольшее количество зерен циркона отмечается в пробе из пегматита Харитоновского участка. При подготовке препарата для исследования часть зерен была утрачена.

Циркон представлен непрозрачными или слабо-прозрачными хорошо ограниченными кристаллами (и обломками кристаллов) варьирующими по цвету от буро-коричневого до светло-желтого. Коэффициент удлинения отличается широкими вариациями – от 2,5 до 6, однако, кристаллы с различным удлинением встречаются во всех изученных пробах.

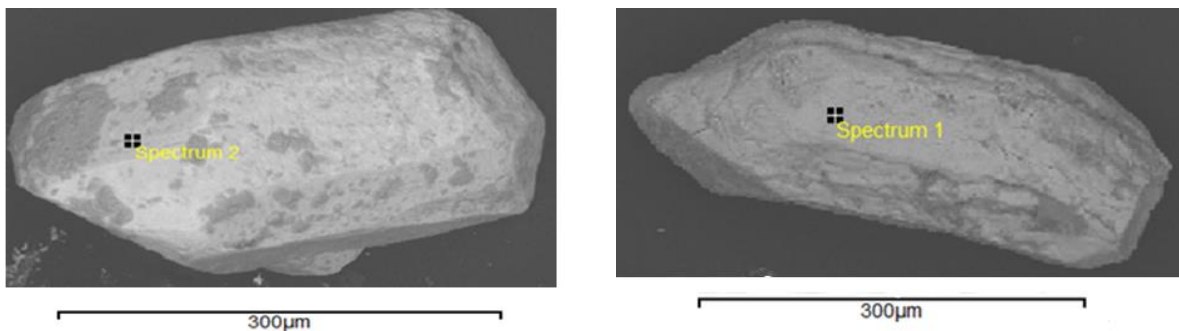


Рисунок 28. Фотографии зерен цирконов, сделанные на электронном микроскопе Hitachi -3000

Зерна циркона сильно трещиноваты, весьма неоднородны и, **иногда**, характеризуются наличием ростовой зональности.

А.

Б.

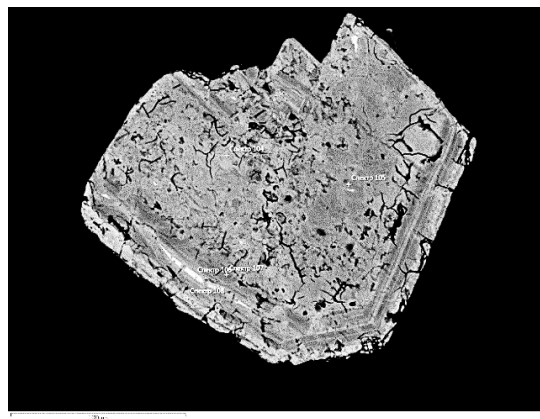
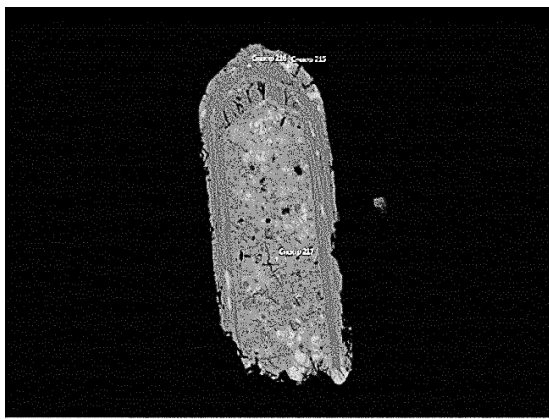


Рисунок 29 Ростова зональность в зернах циркона из пегматитов Северного Приладожья.

А - Харитоновский, Б – Калуга. Изображение в BSE.

В отраженных электронах хорошо различимо сложное внутреннее строение. Разные по интенсивности свечения участки отличаются по химическому составу и позволяют выявлять сложное внутреннее строение отдельных зерен.

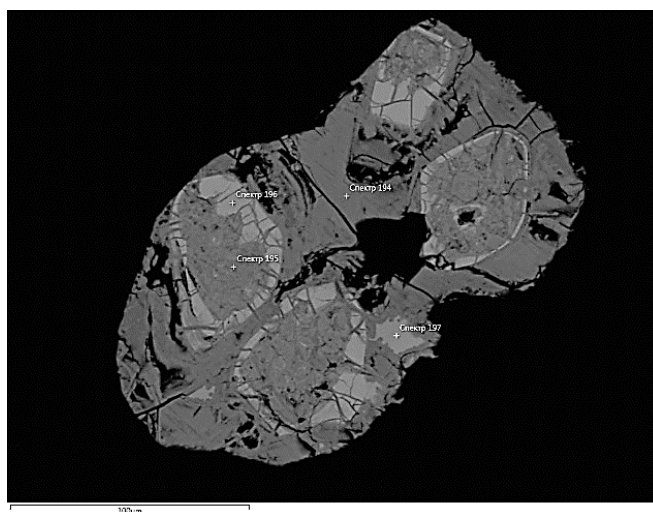


Рисунок 30 Сложное внутреннее строение зерна циркона из пегматита Харитоновского участка.Изображение в BSE.

В отдельных зернах видно, что замещение циркона происходит по трещинам с уменьшением суммы анализа, содержаний ZrO_2 , SiO_2 и HfO_2 , и, напротив появления в продуктах замещения FeO , MnO , Al_2O_3 , CaO , UO_2 .

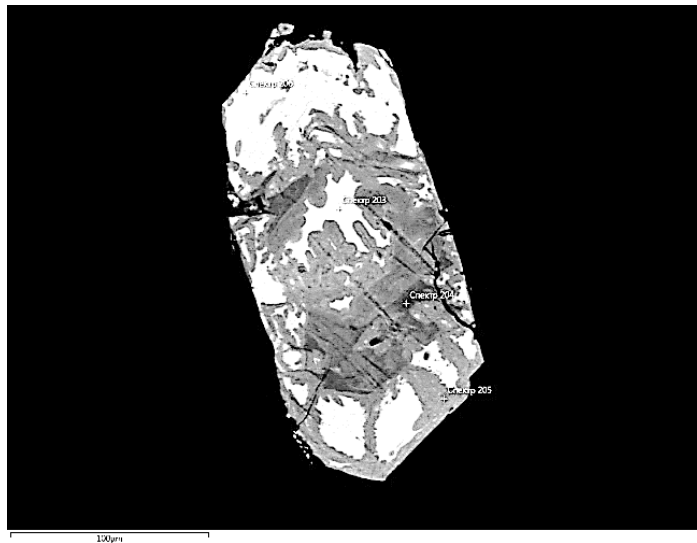


Рисунок 31 Изображение в BSE.

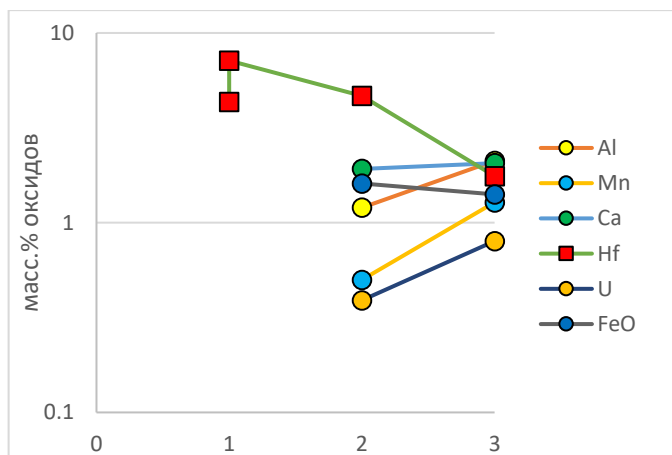
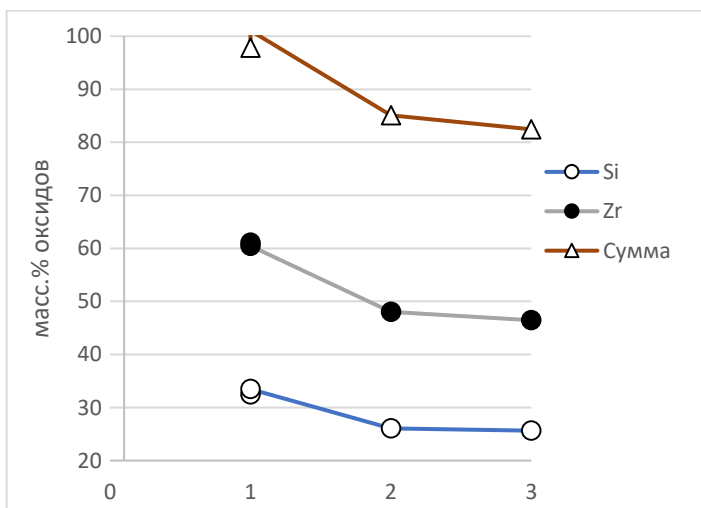


Рисунок 32 Изменение состава циркона в процессе замещения. Харитоновский участок, спектры 203-206.

При сопоставлении данных по составу отдельных зерен циркона было установлено, что подобный характер изменения состава наблюдается во всех изученных зернах. По характеру изменения интенсивности свечения и увеличения дефицита суммы анализа были выделены 5 зон, характеризующиеся определенными, достаточно устойчивыми характеристиками состава (Таблица 12).

Таблица 12 Состав зон изменения в зернах циркона из пегматитов Северного Приладожья.

	А	Б	В	Г	Д
SiO ₂	32,82±0,57	26,89±1,42	23,75±1,52	17,33±1,10	13,7
TiO ₂			0,71±0,15 (2)	0,55 (1)	
Al ₂ O ₃		1,50±0,54	1,53±0,56	2,58±1,44	1,81
FeO		1,73±0,87	2,63±1,82	2,03±1,68	12,7
MnO		0,44±0,23 (33)	0,48±0,23 (12)		
MgO		0,56 (1)			
CaO		1,78±0,45	1,57±0,48	1,10±0,44	0,34
Na ₂ O	0,56 (1)	0,60±0,20 (28)	0,46±0,04 (3)		
K ₂ O		0,35±0,12 (14)	0,33±0,10 (6)		
ZrO ₂	62,02±1,77	49,41±3,57	40,44±3,41	30,56±3,58	19,90
HfO ₂	4,77±1,89	3,54±1,87	2,53±1,13	1,71±0,66	1,18
Nb ₂ O ₅			2,15±1,20 (3)	4,77±2,02 (2)	5,87
Y ₂ O ₃		1,33±0,39 (11)	4,88±1,92	5,01±0,72	4,49
Ce ₂ O ₃		0,58±0,26 (23)	0,66±0,27 (15)	0,55±0,26 (2)	
Nd ₂ O ₃		0,64±0,47 (6)	0,49±0,13 (4)	0,68 (1)	
Sm ₂ O ₃			0,58±0,09 (3)	1,06 (1)	
Gd ₂ O ₃			0,84±0,15 (4)		
Dy ₂ O ₃			0,77 (1)		
Er ₂ O ₃			0,72±0,33 (3)		
Yb ₂ O ₃			1,09±0,22 (5)		
P ₂ O ₅				5,56±1,11	4,48
BaO			1,01±0,11 (2)		
ThO ₂	0,44±0,09 (3)	0,44±0,05 (3)	1,51±0,98 (6)	10,40±7,00	1,23
UO ₂	0,53±0,17 (16)	0,59±0,25 (40)	0,66±0,23 (21)	0,80±0,38	13,2
V ₂ O ₃					
Sc ₂ O ₃ **	0,67±0,14(5)	0,70±0,15 (8)	0,66±0,11 (8)	1,50±0,13 (5)	
sum	99,91±1,40	86,24±3,26	80,08±3,32	75,98±3,38	78,9
n	46	56	26	8	1

Примечание: **содержания Sc₂O₃ фиксируются только в зернах циркона из пегматита «Железная Дорога».

Как видно из таблицы, в процессе изменения циркона (зоны А-Г), сопровождающегося уменьшением содержания суммы анализа, а также видообразующих

ZrO₂, SiO₂ и HfO₂, происходит появление и увеличение в разной степени содержаний ThO₂, Y₂O₃, Al₂O₃, PЗЭ, Nb₂O₅, UO₂. Увеличение дефицита суммы анализа очевидно связано с увеличением количества воды – гидратацией циркона, однако возможности электронно-зондового микроанализа не позволяют этого определить. Если же дефицит суммы связан с разуплотнением, наблюдаемым для высокометамиктных цирконов, то содержания UO₂ в процессе изменения возрастают весьма незначительно. Выделение зоны «Д» весьма условно, зона выделена всего в одном зерне циркона из пегматита «Калуга» и характеризуется весьма специфическим составом: низкими содержаниями ZrO₂ и SiO₂ и высокими содержаниями FeO.

Наиболее соответствующие стехиометрической формуле, неизменные участки циркона сохранились в виде отдельных пятен. Их состав которых приводится в таблице , из которой видно, что в составах неизменных фрагментов зерен циркона отдельных пегматитовых тел наблюдаются различия. В цирконах из пегматита «Железная дорога» присутствует постоянная примесь скандия (до 0,84 масс.% Sc₂O₃), а примесь тория присутствует только в отдельных зернах цирконов из пегматита «Линноваара». Наиболее кремниевые и циркониевые составы циркона из пегматита «Голубая Дорога» характеризуются самыми низкими содержаниями гафния и, соответственно самым высоким Zr/Hf отношением. Самые высокие содержания гафния (до 9,06 масс.% HfO₂) и, соответственно, низкие (11-13) Zr/Hf отношения отмечаются для цирконов из пегматита «Тетрамяки». Интересно отметить, что в цирконах пегматитов с самыми высокими («Голубая дорога») и самыми низкими («Тетрамяки») Zr/Hf отношениями отсутствует примесь UO₂, возможно ее содержание ниже предела обнаружения.

Таблица 13 Составы неизменных цирконов из пегматитов Северного Приладожья

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	32,80±0,56	32,80	32,30±0,24	32,90±0,36	34,00±0,22	32,60±0,17
Na ₂ O	0,56 (1)					
ZrO ₂	61,90±1,42	60,4	63,00±1,29	61,83±0,32	65,50±0,23	58,60±0,17
HfO ₂	4,76±1,73	6,21	3,28±0,75	5,37±1,40	2,24±0,20	8,70±0,37
ThO ₂	0,44±0,09 (3)					
UO ₂	0,50±0,18 (10)	0,43	0,57±0,12	0,66±0,16 (2)		
Sc ₂ O ₃			0,67±0,14			
n	30	1	6	5	3	3
Zr/Hf	14-42	17	25-42	13-26	45-55	11-13

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки.

4.6 Гранат.

Гранат присутствует во всех изученных пробах и составляет до 90 % процентов парамагнитной фракции.

Зерна граната наблюдаются в виде хорошо ограненных кристаллов и их обломков. Размеры кристаллов в каждой пробе варьируют в широких пределах. Цвет преимущественно красно-розовый различных оттенков. Кристаллы граната незональные, но часто содержат включения кварца, слюды, полевого шпата, по трещинам развивается мусковит (рис. 35).

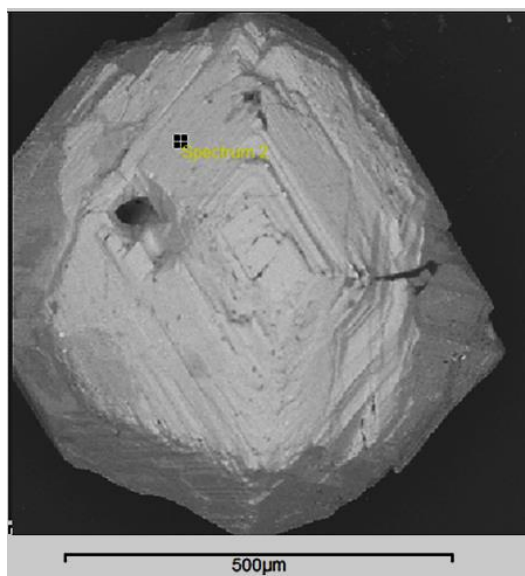


Рисунок 33 Кристалл граната Изображение получено с помощью электронного микроскопа ТМ3000

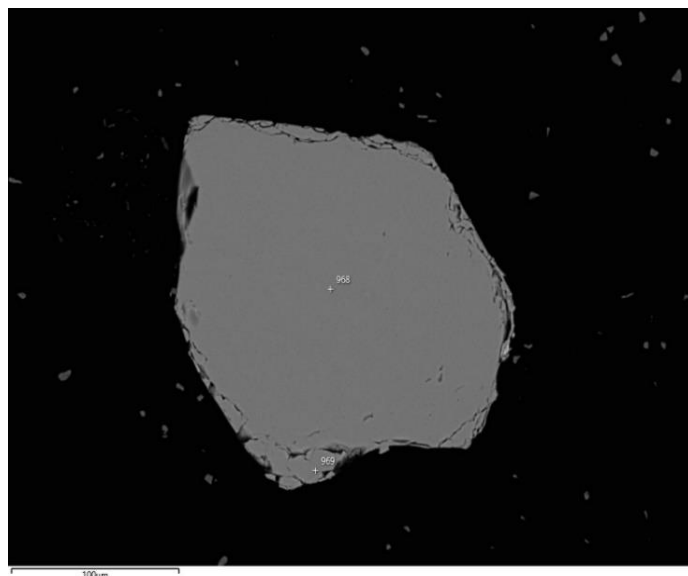


Рисунок 34 Незональный кристалл граната. Изображение в BSE.

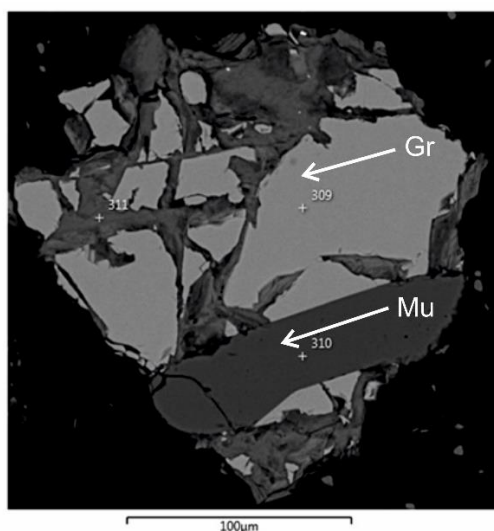


Рисунок 35 Кристалл граната разбитый трещинами по которым развивается мусковит. Изображение в BSE.

Средние составы гранатов отдельных пегматитовых тел и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах представлены в таблице.

Таблица 14 Средние составы гранатов из пегматитов Северного Приладожья

	1	2	3	4a	4б
SiO ₂	36.96±0.50	36.75±0.59	36.68±0.51	37.11±0.47	37.08±0.71
P ₂ O ₅		0.47±0.06			
Al ₂ O ₃	20.83±0.32	20.51±0.35	20.52±0.43	20.86±0.20	20.57±0.29
TiO ₂					
FeO	34.99±0.86	26.38±1.06	27.34±0.95	28.24±2.21	29.60±0.62
MnO	6.21±1.51	15.68±1.31	13.45±1.87	13.45±2.26	12.17±0.53
MgO	1.83±1.16	1.36±0.18	1.61±0.25	2.06±0.17	1.74±0.54
CaO	0.70±0.30	0.54±0.42	1.13±0.74	0.35±0.06	0.33±0.04
Nb ₂ O ₅					
n	5	9	8	5	12
FeO	2.185-2.318	1.492-1.726	1.623-1.836	1.528-1.916	1.735-1.940
Mn	0.292-0.534	0.847-1.131	0.652-0.954	0.733-1.037	0.718-0.825
Mg	0.101-0.433	0.124-0.187	0.140-0.226	0.205-0.248	0.129-0.360
Ca	0.039-0.103	0.028-0.132	0.032-0.165	0.021-0.036	0.024-0.032
sum	2,930-2,983	2,779-2,874	2,805-2,891	2,824-2,895	2,846-2,918
Al	1.877-1.943	1.778-1.823	1.784-1.864	1.775-1.870	1.810-1.55
Ti					
Cr					
sum	1.877-1.943	1.778-1.823	1.784-1.864	1.775-1.870	1.810-1.55
Si	2.836-2.914	2.704-2.785	2.733-2.845	2.744-2.808	2.759-2.843
P		0.027-0.032			
sum	2.836-2.914	2.736-2.813	2.733-2.845	2.744-2.808	2.759-2.843
O	12	12	12	12	12

Таблица 15 Средние составы гранатов из пегматитов Северного Приладожья

	4	5	6	6б
SiO ₂	36.75±1.44	36.87±4.65	37.48±0.74	37.94±0.38
P ₂ O ₅				
Al ₂ O ₃	20.38±0.97	20.70±2.38	20.90±0.51	20.81±0.14
TiO ₂	5.07			
FeO	26.39±2.01	25.96±1.96	34.67±1.91	23.72±1.17
MnO	14.14±1.50	17.13±2.40	7.94±1.85	16.72±2.21
MgO	1.92±0.24	0.70±0.17	1.10±0.37	1.68±0.46
CaO	0.81±0.52	0.20±0.07	0.53±0.12	1.94±0.46
Nb ₂ O ₅	2.23			
n	9	7	12	5
Fe	1.477-1.837	1.259-1.851	1.893-2.325	1.338-1.536
Mn	0.775-0.997	0.871-1.179	0.407-0.798	0.873-1.175
Mg	0.189-0.274	0.048-0.109	0.060-0.177	0.120-0.256
Ca	0.026-0.115	0.010-0.022	0.031-0.068	0.110-0.205
sum	2.793-2.934	2.352-2.914	2.799-2.950	2.772-2.835
Al	1.640-1.855	1.779-1.890	1.835-1.925	1.761-1.810
Ti	0-0.293			
sum	1.783-1.933	1.779-1.890	1.835-1.925	1.761-1.810
Si	2.576-2.845	2.657-2.897	2.825-2.908	2.772-2.835
P				
Nb	0-0.077			
sum	2.653-2.845	2.657-2.897	2.825-2.908	2.772-2.835
O	12	12	12	12

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга: 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

Средние составы гранатов отдельных пегматитовых тел и вариации кристаллохимических коэффициентов в формулах представлены в таблице. Из таблицы видно, что изученные гранаты наиболее контрастно различаются по содержанию магния и железа, в меньшей степени марганца и кальция. Самыми высокими содержаниями железа характеризуются гранаты из пегматитов «Харитоновский» (до 35,8 масс.% FeO) и «Тетрамяки» (до 36,5 масс.% FeO), а наибольшие содержания магния отмечаются в гранатах из пегматита «Калуга» (до 2,1 масс.% MgO). Содержания марганца варьируют в широких пределах – от 4,8 масс.% MnO в гранатах из пегматита «Харитоновский» до 19,5 масс.% MnO в гранатах из пегматита «Голубая дорога» которые также характеризуются

наименьшими содержаниями кальция – до 0,13 масс.% CaO. Изученные гранаты характеризуются преобладающей долей альмандиновой составляющей, что характерно гранатам из пегматитовых тел ⁵.

Среди примесей в единичных зернах отмечаются титан, фосфор и ниобий.

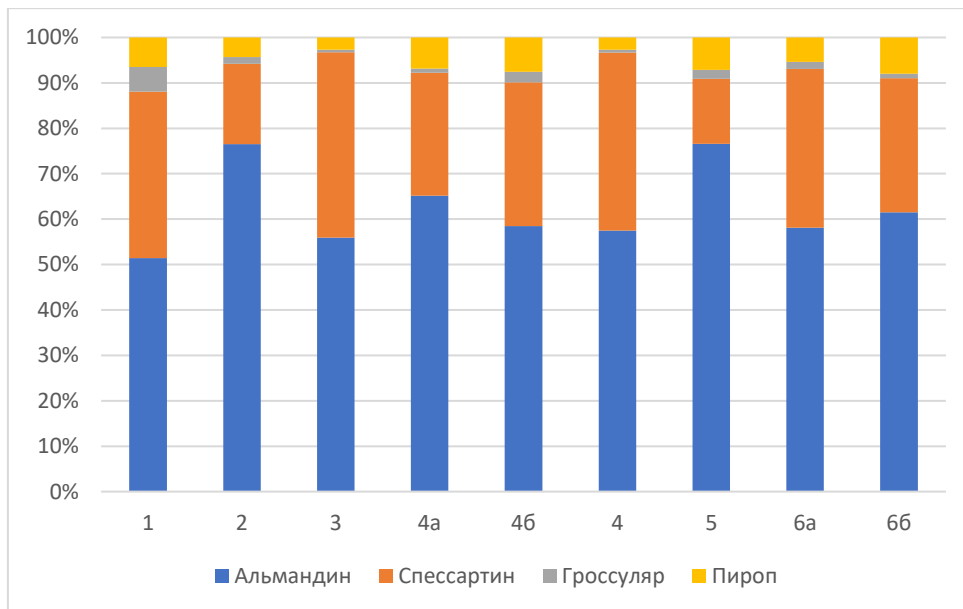


Рисунок 36 Процентное соотношение миналов в гранатах из пегматитов Северного Приладожья.

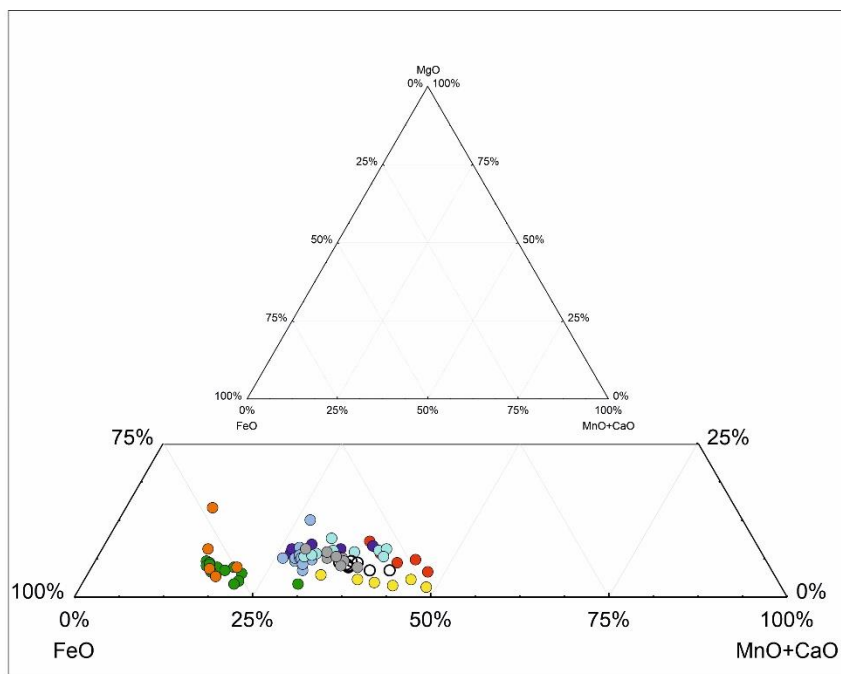


Рисунок 37 Соотношения миналов в гранатах из пегматитов Северного Приладожья.

4.7 Касситерит.

Касситерит обнаружен в двух пробах: пегматита «Железная дорога» и краевой зоны пегматита «Калуга». Минерал представлен мелкими (менее 0,1 мм) редкими изометричными зернами буро-коричневого цвета. По составу касситерит из пегматита «Железная дорога» отвечает чистому SnO₂, а касситерит из краевой зоны пегматита «Калуга» содержит незначительную примесь железа - до 0,89 масс.% FeO.

4.8 Минералы урана и тория.

В виде отдельных зерен минералы урана и тория, представленные уранинитом и торитом обнаружены в пегматитах «Голубая дорога», «Калуга» (уранинит) и «Тетрамяки» (торит). Они также часто присутствуют в виде включений в цирконах и монацитах во всех пробах пегматитов, однако из-за очень мелкого размера определить их состав в чистом виде в этом случае не представляется возможным.

Составы минералов урана и тория приведены в таблице.

Таблица 16 Составы минералов урана и тория из пегматитов Северного Приладожья

	1			4	5			
	уранинит			торит	уранинит			
	1174	1269	132	730	717	718	719	723
ThO ₂	5,84	6,38	2,16	85,82	3,43	2,6	3,06	2,59
UO ₂	78,62	69,97	69,86		77,71	72,1	59,56	59,27
PbO	22,27	19,91	18,34	8,25	11,66	17,31	13,91	14,07
FeO	1,18	1,02	2,27		1,67			0,65
SiO ₂					1,92			0,80
P ₂ O ₅							0,53	
Y ₂ O ₂					1,28	1,04		1,2
ZrO ₂							1,12	
BaO			1,25					
sum	107,91	97,28	93,88	94,07	97,66	93,06	78,19	78,58
Коэффициенты в кристаллохимической формуле, рассчитанной на 2 O								
Th	0,060	0,072	0,025	0,946	0,034	0,031	0,042	0,034
U	0,784	0,774	0,789	0,000	0,759	0,828	0,802	0,766
Pb	0,269	0,266	0,251	0,108	0,138	0,240	0,227	0,220
Fe	0,044	0,042	0,096		0,061			0,032
Si					0,084			
P							0,027	
Y					0,030	0,029		0,037
Zr							0,033	
Ba			0,025					
Sum	1,156	1,154	1,186	1,054	1,107	1,127	1,131	1,135
O	2	2	2	2	2	2	2	2

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 1 – Харитоновский участок; 4 – Калуга: 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 5 – Голубая дорога.

4.9 Турмалин.

Минерал в пробах представлен отдельными полупрозрачными зернами и обломками зерен, варьирующими по цвету от темно-зеленого то темно-коричневого, практически черного.

Турмалины из пегматитов Северного Приладожья характеризуются значительными вариациями состава, различаясь наиболее контрастно по уровню содержаний FeO, CaO и MgO (таблица 17).

Турмалины из пегматитата «Линнавара» характеризуются самыми высокими содержаниями железа, достигающего 15,98 масс. % FeO (табл. 17) и самыми низкими содержаниями магния. Самыми магниальными являются турмалины из пегматита «Калуга» - до 9,25 масс.% MgO. Наиболее высокие содержания TiO₂ и Cr₂O₃ отмечаются в турмалинах из пегматита Тетрамяки.

Расчет формул турмалина по результатам микронзондового анализа производился по катионам в позициях X, Y, Z (недостаток – 15 катионов), сумма которых и является общим делителем. В расчете формул не использовалось определение содержаний бора, т.к. применялось допущение, что этот элемент является стехиометрическим и входит в тригональную позицию B, занимаемую исключительно этим элементом. Таким образом, составе турмалина бор имеет постоянный коэффициент в формуле равный 3.

Так как при проведении микронзондового анализа отсутствует возможность разделить Fe на двухвалентное и трёхвалентное, в расчетах использовались только содержания двухвалентного железа. В отсутствие информации о занятости позиций Y и Z, эти позиции могут занимать одинаковые катионы (Al³⁺, Fe²⁺, Mg²⁺ и т.д.), при расчете формулы турмалина они объединены. Согласно ⁶ распределение ионов по позициям производилось по следующей схеме. Сначала Al³⁺ занимает позицию Z, вместе с Cr³⁺ и V³⁺ (при их наличии). Только после заполнения позиции Z до полного формульного значения (6) остаток алюминия переходит в позицию Y. Предполагается, что все двухвалентные катионы (Fe²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺ и др.) расположены в Y. ⁶.

Составы турмалинов изученных объектов на тройной диаграмме заполнения позиции Y занимают поля шерла-дравита, т.е. в позиции Y значительно преобладают катионы Fe²⁺ и Mg²⁺ (рис. 37). При этом турмалины из пегматита Линнавара являются исключительно шерлами, турмалины пегматита «Железная Дорога» располагаются также в поле шерлов, однако их составы смещены в сторону дравитового угла и, очень незначительно, к полю эльбаита. Состав турмалинов из пегматитов «Калуга» и «Тетрамяки» располагаются целиком в поле дравита у пограничной линии шерл-дравит. Однако поля состава турмалинов пегматита «Калуга» «Тетрамяки-слюдит» расположены дальше от этой линии

– ближе к дравитовому углу. При этом для поля турмалинов «Тетрамяки-слюдит» отмечается небольшой рост эльбаитовой составляющей. Интересно отметить, что поле состава турмалинов «Тетрамяки» сильно вытянуто по вертикали в сторону эльбаитового угла.

Согласно положению точек составов турмалинов, из пегматитов Северного Приладожья на диаграмме заполнения позиции X все турмалины относятся к щелочной группе (рис. 36) (табл.17), однако поля турмалинов из пегматита «Железная Дорога» и «Тетрамяки» отчетливо смещены в сторону угла вакантной позиции. Наименьшей долей вакантной позиции характеризуется турмалин из пегматита «Калуга» при незначительном возрастании доли кальция.

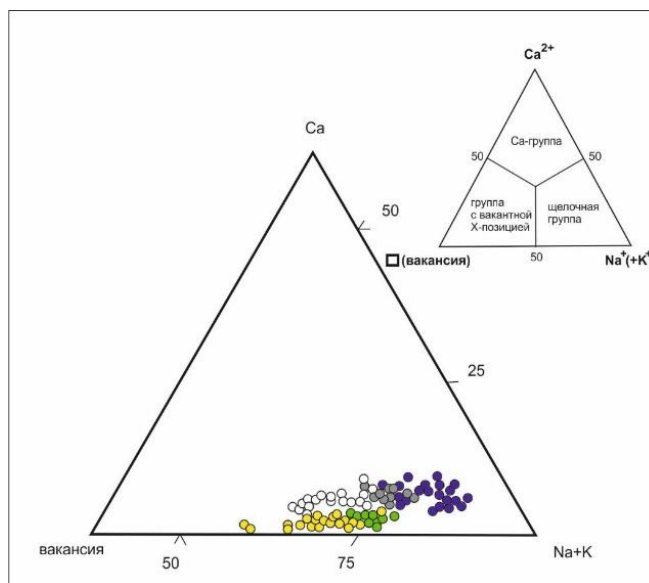


Рисунок 38 Положение точек составов турмалинов на диаграмме соотношения катионов в позиции Y.

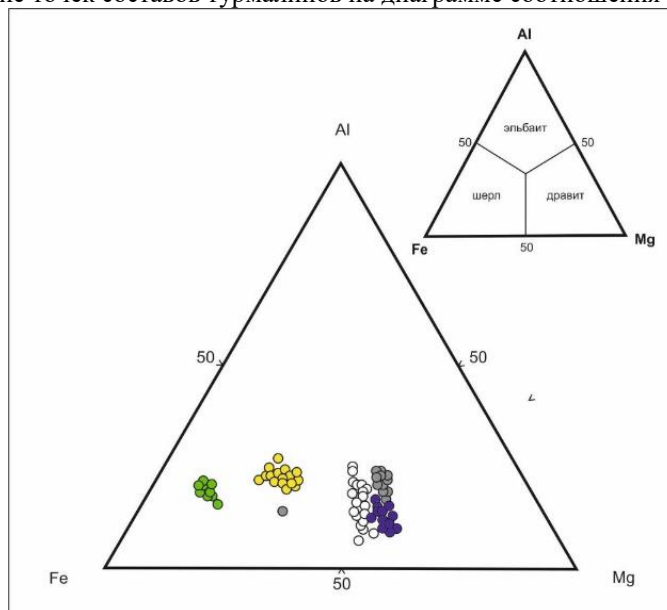


Рисунок 39 Положение точек составов турмалинов на тройной диаграмме соотношения катионов в позиции X.

Таблица 17 Средние химические составы турмалинов из пегматитов Северного Приладожья.

	2	3	4	6	6б
SiO ₂	34,80±0,58	34,47±0,58	35,37±0,71	35,26±1,34	35,55±0,98
TiO ₂	0,31±0,09	0,68±0,13	0,59±0,18	0,72±0,26	0,52±0,20
Al ₂ O ₃	33,15±0,76	33,37±0,61	31,82±0,74	32,87±1,96	33,29±1,05
FeO _(total)	14,39±0,45	10,44±0,41	6,97±0,64	8,45±1,05	6,59±0,24
MnO	Н.о.	0,45±0,00	Н.о.	Н.о.	Н.о.
MgO	1,41±0,20	3,05±0,33	6,28±0,77	4,90±0,85	5,46±0,22
CaO	0,16±0,06	0,11±0,05	0,42±0,19	0,30±0,09	0,23±0,05
K ₂ O	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Na ₂ O	2,25±0,09	2,10±0,15	2,48±0,14	2,13±0,20	1,96±0,14
ZnO	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Cr ₂ O ₃	0,10±0,03	0,09±0,03	0,10±0,01	0,11±0,03	0,09±0,03
n	15	19	22	13	9
Si	5,551-5,706	5,553-5,721	5,589-5,853	5,584-5,738	5,693-5,823
Al	0,294-0,449	0,346-0,414	0,147-0,411	0,262-0,416	0,177-0,307
Сумма Т	6	6	6	6	6
Ti	0,018-0,057	0,036-0,115	0,039-0,134	0,086-0,090	0,037-0,0117
Al	5,824-6,006	5,968-6,634	5,334-5,835	5,766-5,998	5,863-6,203
Cr	0,000-0,033	0,000-0,041	0,023-0,026	0,006-0,008	0,018-0,038
Mg	0,202-0,396	0,391-0,840	1,317-2,136	1,163-1,189	1,262-1,392
Mn		0,000-0,064			
Fe	1,839-2,188	1,326-1,637	0,558-1,052	1,129-1,148	0,834-0,927
Сумма Y+Z	8,226-8,326	8,587-8,807	8,098-8,232	8,149-8,432	8,359-8,414
Na	0,652-0,742	0,543-0,735	0,622-0,835	0,613-0,713	0,545-0,691
Ca	0,012-0,056	0,010-0,040	0,033-0,185	0,036-0,066	0,023-0,053
Вак.позиции X	0,226-0,326	0,2535-0,457	0,098-0,221	0,227-0,345	0,259-0,410
Сумма X	1	1	1	1	1

Примечание: n – число анализов; (1)*- количество анализов в которых присутствует компонент. Цифрами обозначены объекты: 2 – Линноваара; 3 – ЖД; 4 – Калуга: 4а – центральная зона, 4б – краевая зона; 4 – валовая проба; 6 – Тетрамяки: 6 – валовая проба, 6б – краевая зона (слюдит).

4.10 Минералы висмута.

Висмутовая минерализация не обнаружена в пегматитах, которые располагаются в пределах гранито-гнейсовых куполов - «Харитоновском» и «Голубая Дорога».

В пегматитах, локализованных на границе куполов («Линноваара») и в питкьярантской свите «Железная Дорога» висмутовая минерализация представлена весьма ограничено. В пробе из пегматита «Линновара» отмечены оксид и сульфид висмута, а в пегматите «Железная дорога» висмутовый минерал, рассчитанного состава Bi_2CaO_7 (табл. 18)

Таблица 18 Составы висмутовых минералов пегматитов «Линновара» (2) и «Железная Дорога» (3)

	2		3						
спектр	43	387	459	460	461	508	532	533	534
O		11,39	17,91	17,19	18,68	17,57	2,24	16,21	17
S	10,66	1,69							
Ca			5,89	6,46	6,44	6,34		6,2	5,83
Bi	87,19	69,52	64,3	68,52	71,46	67,4	95,22	65,25	63,63
Σ	97,85	82,63	88,1	92,17	96,57	91,31	97,46	87,67	86,46
Коэффициенты в кристаллохимической формуле*									
Bi	5.02	0.93		1,9239	2,1361	2,05	2,0557	6,5085	2,1571
Ca			0,9197	1,051	0,9642	1,0091		1,0697	0,9591
S	4	0.09							
O		2	7	7	7	7	2	7	7

Примечание: *расчет кристаллохимических формул проводился по S для бескислородных минералов и по O для кислородсодержащих.

В пегматитах «Тетрамяки» и «Калуга» висмутовая минерализация представлена, помимо самородного висмута, оксидами, сульфидами (тетрадимит), теллуридами (цумоит, хейдлейит) и сульфотеллуридами, а также фторидом висмута – заварицкитом.

Таблица 19 Составы некоторых висмутовых минералов в пегмате «Калуга»

спектр	1225*	1261*	1258*	1253**	1256**	1260***
O		1,16		5,59	6,05	1,76
F				8,58	7,74	0,76
S	17,28	17,33	16,18			
Fe	1,18	1,37	0,68			1,35
Bi	74,05	73,36	69,68	82,17	84,9	93,34
Сумма	92,51	93,21	86,54	96,34	98,69	97,21
Коэффициенты в кристаллохимической формуле						
O		0,402		1	1	1
F				1,293	1,077	0,364
S	3	3	3			0
Fe	0,118	0,136	0,072			0,22
Bi	1,972	1,948	1,982	1,125	1,074	4,06

Примечание: * - рассчитывается на формулу Bi_2S_3 ; **предположительно заварицит, расчет проводился на 1 O; *** - минерал не диагностирован,

Таблица 20 Составы некоторых висмутовых минералов в пегмате «Тетрамяки»

спектр	5				5б						
	753	798	799*	815	817* *	818	839* **	927	936	938	946
O	3,44	2,45	14,72	13,27		13,7		6,61		8,55	8,93
F								8,25		2,52	2,86
Al				0,42							
Si				0,5							
P						0,41					
S			0,77	0,63	2,86						
Ca			0,33	0,8		0,35					
Fe						0,67					
As			0,58								
Se					0,7						
Te			0,81		36,43		36,55		22,01		
Bi	94,43	99,76	77,21	66,55	55,74	69,09	63,68	86,57	78,18	89,19	88,93
Σ	97,87	102,2	94,43	82,17	95,73	84,23	100,2	101,4	100,2	100,3	100,7
Коэффициенты в кристаллохимической формуле											
O	1	1	2	2		2		2		4	4
F								2,102	0	0,993	1,09
Al				0,038							
Si				0,043							
P						0,031					
S			0,052	0,047	1						
Ca			0,018	0,048		0,02					
Fe						0,028					
As			0,017								
Se					0,099						
Te			0,014		3,201		1		1		
Bi	2,101	3,117	0,803	0,768	2,99	0,772	1,064	2,005	2,169	3,194	3,05

Примечание: * - предположительно тетраэдрит; ** - предположительно цумоит; *** - предположительно хейделиит

В сростании с минералами висмута обнаружен минерал золота – электрум, различающиеся по соотношению золота и серебра.

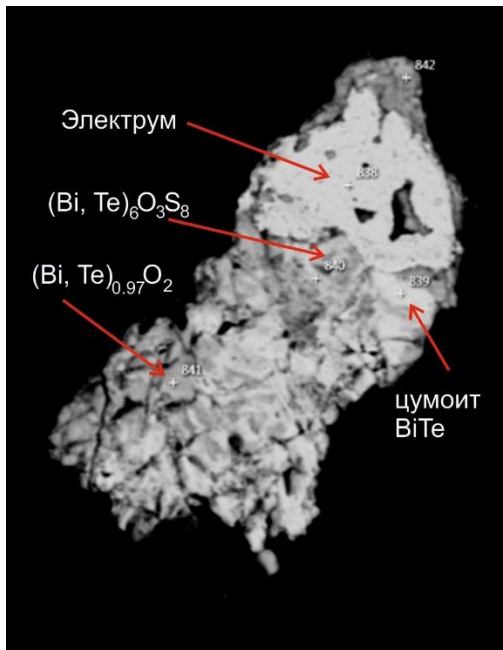


Рисунок 40. Срастание висмутотеллуридов с электрумом.

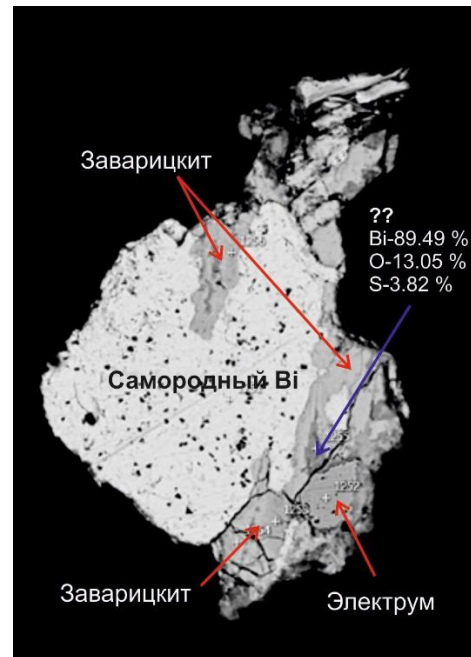


Рисунок 41. Срастание самородного висмута с заварицкитом (BiOF), электрумом и недиагностированной фазой Bi.

4.11 Минералы золота и серебра

Таблица 21 Состав минералов золота и серебра в пегматитах «Калуга» и «Тетрамяки»

	5		4	
	838	816	1252	1227
Ag	24,84	25,56	47,48	47,2
Au	74,7	75,84	48,27	49,36
Σ	99,54	101,4	95,75	96,55

4.12 Остальные акцессорные минералы.

В пробах «Железная дорога», «Калуга», «Голубая дорога» и «Тетрамяки пегматитовое тело» были обнаружены такие минералы как цинкит и минералы гидроксидов железа. Также во всех пегматитах, за исключение проб «Голубая дорога» и «Тетрамяки» были обнаружены сульфиды, в основном пирит В пегматите «Линаваара» разнообразие увеличивается и там было обнаружены сфалерит, халькопирит и галенит. В пегматите «Голубая дорога» были обнаружены единичные зерна флюорита.

Заключение

Наиболее распространенными акцессорными минералами в породе являются монацит, минералы титана, минералы тантала и ниобия, апатит, циркон, гранат и турмалин. Монацит отличается присутствием во всех пробах тория, содержание которого изменяется обратно пропорционально содержанию редких земель в образце. Этот факт можно рассматривать как косвенный показатель температур. Из остальных фосфатов был встречен только ксенотим и только в пегматите «Калуга». Минералы титана, которые не были встречены в пробах «Линноваара», «Харитоновский Участок» и пробе из слюдяной оторочки пегматита «Тетрамяки», имеют постоянную примесь железа, ниобия и ванадия. Также в пробе из пегматита «Голубая дорога», помимо широко распространенного рутила были обнаружены ильменит и стрюверит. Минералы тантала и ниобия представлены железистым колумбитом и минералом, который не удалось идентифицировать. Апатит представлен хорошо ограненными индивидами размером не более 0,5 мм. По данным химического состава, относится к фтор-апатиту, так как содержит до 5,2-5,6 масс. % фтора. Циркон характеризуется призматическими хорошо ограненными индивидами размером не более 1 мм по удлинению. В пробах наблюдается вторичные преобразования по кристаллам циркона, а также каймы нарастания. По данным микрозондового анализа, циркон характеризуется постоянными примесями гафния (HfO_2) и примесью скандия в пегматитах с 1 по 4. Кристаллы граната характеризуются преобладанием альмандинового минала, присутствием во всех пробах гроссулярового минала. Все турмалины принадлежат щелочной группе по соотношению катионов в позиции Y. По соотношению катионов в позиции X они разделяются на две группы: шерл, к которому относятся образцы из пегматитов «Линаваара» и «Железная дорога», и дравит, к которому относятся пробы из остальных пегматитов, где был встречен турмалин. Остальные акцессорные минералы имеют индивидуальный для каждого пегматита характер и встречаются максимум в трех пробах из девяти.

На основе изучения минералов тяжелой фракции пегматитов Северного Приладожья выявлены особенности их акцессорной минерализации, приведенные в таблице 22.

Характеристика акцессорной минерализации пегматитов Северного Приладожья.

Таблица 22

	1	2	3	4а	4б	4	5	6а	6б
	Харитоновский	Линноваара	ЖД	Калугацентр	Калугакрай	Калугавал	Голубая	Тетрамякицентр	
Монацит	ThO ₂ =6,19±1,54 ∑REE _{La-Gd} =63,13±2,77	ThO ₂ =13,54±2,38 ∑REE _{La-Gd} =48,89±4,95	ThO ₂ =13,54±2,38 ∑REE _{La-Gd} =51,58±11,29	ThO ₂ =7,80±2,65 ∑REE _{La-Gd} =58,20±5,50	ThO ₂ =6,19±1,54 ∑REE _{La-Gd} =53,81±8,59	ThO ₂ =14,75±4,24 ∑REE _{La-Gd} =53,28±6,40	ThO ₂ =9,93±2,77 ∑REE _{La-Gd} =54,41±5,21	ThO ₂ =4,46±1,26 ∑REE _{La-Gd} =63,43±4,10	ThO ₂ =3,25±1,12 ∑REE _{La-Gd} =63,26±1,51
Ксенотим*	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**	ThO ₂ =0.54±0.21 ∑REE _{La-Gd} =16.30±3.60	ThO ₂ =1.59±1.00 ∑REE _{La-Gd} =15.37 ±2.85	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**
Апатит	F-апатит	F-апатит	ОН-апатит	F-апатит	F-апатит	ОН-апатит	F-апатит	F-апатит	F-апатит
Гранат	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.857-0.917	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.929-0.973	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.945-0.966	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.867-0.903	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.828-0.936	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.860-0.907	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.834-0.958	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.902-0.927	Альмандин Fe/(Fe+Mn) = 0.890-0.921
Минералы титана	Н.о.**	Н.о.**	Nb-рутил Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 8,09-26,89	Nb-рутил Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 14,37-25,96	Nb-рутил Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 19,69-29,50	Nb-рутил Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 8,90-17,93	Рутил Nb ₂ O ₅ =0,78 Ильменит Стрюверит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 30,00-42,85	Н.о.**	Рутил Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 1,45-4,10
Минералы тантала и ниобия	Fe-колумбит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 67,20-81,41	Fe-колумбит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 70,19-83,34	Fe-колумбит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 67,20-81,41	Fe-колумбит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 65,76-73,05	Fe-колумбит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 67,65-79,00	Fe-колумбит Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 76,79-88,44 Неидентиф. Минерал Ta ₂ O ₅ +Nb ₂ O ₅ = 41,22-52,05 UO ₂ =7,55-25,06	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**
Минералы олова	Н.о.**	Н.о.**	касситерит	Н.о.**	Касситерит до 0,86 % FeO	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**
Минералы висмута	Н.о.**	Оксиды Bi (?)Bi ₅ S ₄	(?)Bi ₂ CaO ₇	Bi самородн. Оксиды Bi	Bi самородный Оксиды Bi Висмутин (Bi ₂ S ₃) Заварицкит (BiOF)	Н.о.**	Н.о.**	Bi самородн. Оксиды Bi Тетрадимит (Bi ₂ Te ₂ S) Цумоит (BiTe)	Bi самородн. Оксиды Bi Заварицкит (BiOF) Хейдлейит (Bi ₇ Te ₃)
Минералы урана и тория*	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**	уранинит	уранинит	Уранинит, Торит	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**
Циркон	Zr/Hf - 14-42	Zr/Hf - 17	Zr/Hf - 25-42	Zr/Hf - 13-26			Zr/Hf - 45-55	Zr/Hf - 11-13	

Минералы золота	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**	Н.о.**	Электрум Au ₅₀ Ag ₅₀	Н.о.**	Н.о.**		Электрум Au ₇₅ Ag ₂₅
Турмалин	Н.о.	шерл	шерл	дравит			-	дравит	
Сульфиды	пирит Со до 4,57 %	Пирит Сфалерит Халькопирит Галенит	Пирит пирротин	пирит			Н.о.**	Н.о.**	
Прочие минералы							Флюорит		

Примечание: * - в виде отдельных зерен; ** - н.о. – не обнаружено;

Список литературы

1. Балтыбаев Ш.К., Глебовицкий В.А. и др, Геология и петрология Свекофеннид Приладожья, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 2000 г.
2. Глебовицкий В.А. Ранний Докембрий Балтийского Щита.; 2005.
3. Годовиков А.А. Минералогия. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра. 1983.
4. Гордиенко В.В. Гранитные пегматиты; Издательский Центр «Академия», 1996
5. Никитин С. Н. Шуркин К.А., Генезис северо-ладожских пегматитов и их промышленная ценность, Известия Карело-Финской научно исследовательской базы академии наук СССР, 1948.
6. Соболев Н.В. Парагенетические типы гранатов. Академия наук СССР. 1964
7. Хазов Р. А. Геологические особенности оловянного оруденения Северного Приладожья. Л.: Наука, 1973.
8. Шаров Н. В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017
9. Шурилов А.В. Геолого-структурная позиция уранового месторождения карку (северо-восточное приладожье).2005.
10. Henry DJ, Dutrow BL. Tourmaline studies through time: Contributions to scientific advancements. J Geosci (Czech Republic). 2018
11. . Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P.,Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals, American Mineralogist, 2011