

Санкт-Петербургский государственный университет

Каримуллин Артур Ринатович

Выпускная квалификационная работа
ТИПОХИМИЗМ ТУРМАЛИНОВ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ РУДОНОСНОСТИ
ПЕГМАТИТОВ ПРИЛАДОЖЬЯ

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5018.2016

Научные руководители:
кафедра геологии месторождений полезных ископаемых СПбГУ,
к.г.-м.н., ст. преподаватель Шелухина Ю.С.

кафедра геохимии СПбГУ,
ст. преподаватель Волкова Е.В.

Рецензент:
ведущий научный сотрудник
Общество с ограниченной ответственностью
«Лаборатория изучения минерального сырья»
Тихонова Наталия Владимировна

Санкт-Петербург

2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1.....	Ошибка! Закладка не определена.
Геологическое строение района	5
1.1 Физико-географический очерк.....	5
1.2 Структурно-тектоническое районирование территории	Ошибка! Закладка не определена.
1.3 История геологического развития	10
Глава 2. Геологическая характеристика объектов исследования	Ошибка! Закладка не определена.
2.1 Пегматиты Приладожья	13
2.2 Геологическая характеристика объектов исследования.....	15
ГЛАВА 3. Типохимические особенности турмалина	23
3.1 Методы и объемы аналитических исследований	27
3.2 Видообразующий состав турмалинов	29
3.3 Минеральные включения в турмалинах	38
3.4 Выводы.....	40
Список литературы	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена изучению типохимических особенностей турмалина из пегматитов и пегматоидов Северного Приладожья.

Являясь распространенным минералом и главным носителем бора в Земной коре, турмалин образуется в широком интервале условий и, благодаря широким возможностям изоморфных замещений может быть использован в качестве показателя особенностей генезиса различных объектов.

Особенно важным и актуальным является выявление закономерностей между особенностями состава турмалина и ассоциацией микроэлементов-примесей в его составе и типом формаций и рудопроявлений, также выявление влияния на состав турмалинов вмещающих пород.

Основная задача исследования - изучения вариаций видообразующего состава турмалина и элементов-примесей в нем из тел пегматитов и пегматоидов, локализованных как в различных по составу вмещающих породах, так и различающихся полнотой дифференцированности, и, соответственно генезисом.

Как известно, минералы могут содержать некоторое количество других самостоятельных минеральных фаз в виде микровостков, которые, в силу особенностей своего состава могут оказывать влияние на содержания элементов-примесей в турмалинах, определенных методом валового анализа. Поэтому еще одной задачей работы являлось изучение зерен турмалина с использованием микронзондового анализа для определения наличия таких минеральных включений и установления, по-возможности, их состава.

Отдельной задачей исследования являлось сопоставление типохимических особенностей состава турмалинов из пород ладожской серии, где этот минерал присутствует в акцессорных количествах, пегматоидов участка Тетрамяки, образующихся, вероятно, путем переплавления вмещающих с сопутствующей перекристаллизацией «in situ» и, также локализованного в породах ладожской серии, но имеющего отчетливо иной генезис дифференцированного пегматита Юканкоски,

Фактический материал: Материал для данной работы был отобран в ходе прохождения Импилахтинской учебной геолого-геохимической практики, а также предоставлен Е.В. Волковой и С.В. Петровым. Материал включает ___ образцов, 4 шлиховые пробы.

Благодарности: Работа выполнена под руководством к.г.-м.н., ст. преподавателя кафедры ГМПШ Шелухиной Ю.С. и ст. преподавателя кафедры геохимии, Волковой Е.В., которых автор благодарит за неоценимую помощь и терпение на всех этапах работы. Автор

также благодарит к. г.-м. н., доцента кафедры ГМПИ С.В. Петрова за консультации на протяжении всего времени работы. Кроме того, автор выражает благодарность сотрудникам РЦ «Геомодель» за помощь в пробоподготовке и проведении лабораторных исследований. Особую благодарность выражает Д. Машкину за консультацию по вопросам о методиках исследования.

1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА

1.1 Физико-географический очерк

Район исследований расположен на территории Питкярантского района юго-западной части республики Карелия, на севере Ладожского озера.

Основным типом рельефа данного района можно определить как холмистую равнину. Пересеченность местности небольшая. (Отчет по учебной геологической практике Импилахти, 2018).

Ландшафт обусловлен расположением региона на выходах докембрийских пород Балтийского (Фенноскандинавского) щита, на котором, после серий оледенений четвертичного периода развились характерные формы рельефа – «бараньи лбы».

Кроме того, в результате водноледниковых рельефообразующих процессов на территории Северного Приладожья характерны такие аккумулятивные формы, как озы.

Водная система района очень богатая. Здесь наблюдается большое количество рек, озер и болот. Самое крупное озеро – Ладожское. Чаше встречаются озера ледникового происхождения. (Журнал о туризме «Диагональный мир»: [сайт] URL: <http://www.tag.spb.ru>)

Климат на данной территории мягкий, континентальный. Средняя температура января составляет -9.4°C , июля – $+16.1^{\circ}\text{C}$.

Климат Приладожья благоприятно сказывается на растительности. В основном здесь произрастают хвойные деревья, кроме того, встречаются лиственные, смешанные леса такие растения, как ива, ольха, а также поросшие буреломом участки.

1.2 Структурно-тектоническое районирование территории

Балтийский (или Фенноскандинавский) щит представляет собой выход фундамента древних горных пород на северо-западе Евразийского континента. В границах Российской Федерации образует выходы архейских и нижнепротерозойских пород; последний же этап формирования земной коры можно отнести к позднекарельскому времени (1.88-1.80 Ga) (Бискэ, 2018). Балтийский щит – это самая большая открытая область докембрийских пород в Европе. Он имеет много общего с древними щитами в Канаде, Австралии и Южной Африке, представляющие глобальное значение для решения вопросов геологии полезных ископаемых (Lahtinen et al. 2018).

Восточная часть Балтийского щита разделена на четыре провинции, разные по возрасту, а также образованные различными тектоническими, магматическими и метаморфическими процессами. Названия этих областей, с севера на юг: Кольский массив, Беломорский массив, Карельский массив и Свекофенский складчатый пояс (рис.1). Они простираются на запад, до Финляндии, Швеции, на юго-востоке перекрыты фанерозойскими отложениями Русской плиты. Эти блоки образуют две области, представляющие первую стадию роста континентальной литосферы Фенноскандинавии, с Кольскими и Беломорскими блоками, формирующими архейский домен, Карельским блоком и Свекофенидами, которые формируют архейско-раннепротерозойский домен. (Fedotova et al. 1998)

На Балтийском щите, как и в других районах выхода земной коры, сформированной в раннем докембрии, наблюдаются определенные типы геологического строения. В первую очередь это районы с развитием позднеархейского фундамента, гранитно-зеленокаменного состава, который перекрыт чехлом раннепротерозойских образований (Карельский блок, кольский и Мурманский массивы). Во-вторых, это гранулитно-гнейсовые пояса AR₂-PR₁ возраста (Беломорский пояс). И, наконец, выделяются области аккреционного типа раннепротерозойской континентальной земной коры (Свекофениды) (рис.1). Все породы данной области являются высокометаморфизованными (Бискэ, 2018).

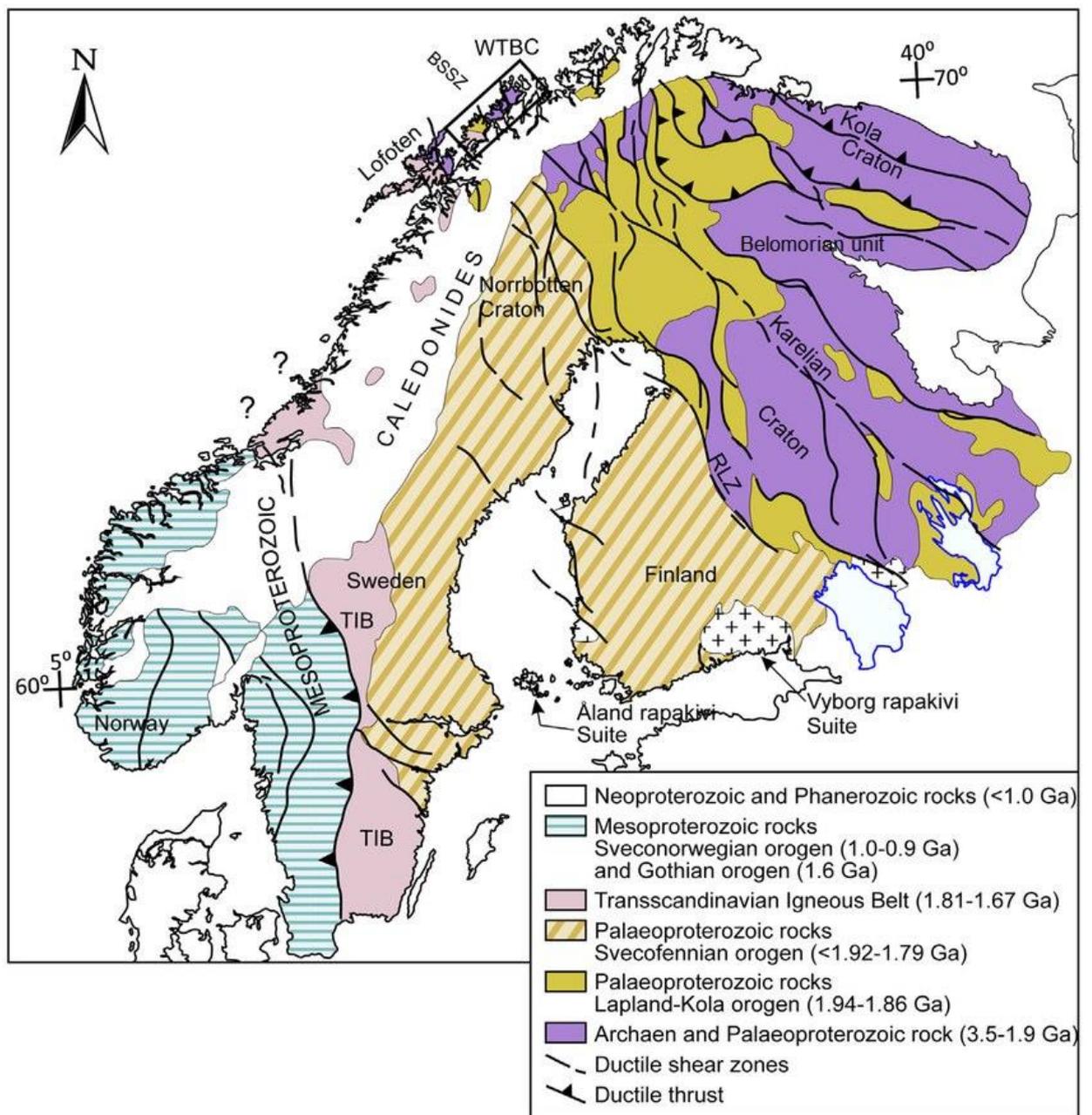


Рисунок 1. Обзорная геологическая карта Фенноскандинавского щита с изображением архейских микроконтинентальных блоков (Кольский, Карельский и Норботтенский кратоны), геохронология основных палеопротерозойских и мезопротерозойских тектонических событий (Лапландско-Кольский, Свекофенский и Готский орогены) (Koistinen et al., 2001). Сокращения: BSSZ: Ботническо-Сенджашерская зона, RLZ: Раахе-Ладожская сдвиговая зона, ТИВ: Трансскандинавский изверженный пояс, WTBC: Западный комплекс Тромса. (Bergha rt al. 2015)

Главной особенностью геолого-тектонического строения исследуемой территории Северного Приладожья, в восточной части Фенноскандинавского щита является приуроченность региона к зоне сочленения на юге и юго-западе докембрийского Карельского кратона с подвижным Свекофенским орогеном протерозойского возраста (рис. 2).

Карельский гранит-зеленокаменный массив сложен преимущественно древними нестратифицированными комплексами пород, т.е. интенсивно переработанными или интрузивными образованиями. В большей степени массив сложен древними породами тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации с возрастом до 3,5-3,7 Ga и гранитогнейсами, возраста 2,89–2,72 Ga. Самые же древние ТТГ гнейсы на территории России наблюдаются в районе Водлозера, датируемые примерно 3,24 Ga.

Кроме ЗКП Водлозерского блока также известны и другие места на Карельском массиве с развитием этих структур. Примечательно, что их возраст уменьшается на С-С-З от древнего Водлозерского массива, что говорит о постепенной аккреции к континенту древних островных дуг и микроконтинентов в конце архея, подобно MZ-KZ аккреции на северо-востоке России.

Внедрение гранитов нормального состава знаменует последнюю фазу формирования гранитогнейсовой коры Карельского блока 2,7-2,9 Ga.

Нижнепротерозойские (возраст по МСШ) или карельские (возраст по ОСШ) породы Карельского блока представлены в основном вулканическими и осадочными последовательностями, часто так же сильно деформированными. Эти отложения имеют возраст 2,5 (сумий) – 1,650 Ga (вепсий).

Карельский массив граничит на юго-западе со Свекофенским складчатым поясом вдоль Рахе-Ладожской сутурной зоны (рис.1), которая простирается в северо-западном направлении в районе Приладожья и далее в Финляндию, Швецию. Рахе-Ладожская зона имеющую переходный тип строения коры. Здесь получили широкое развитие окаймленные гранитогнейсовые купола, формирующие пояс, субпараллельный к юго-западному краю Карельского кратона. Породы купольного ядра образованы в результате ремобилизации архейского фундамента. Гранитогнейсовые купола формировались в несколько стадий. Первоначально это были угловатые жесткие глыбы, отколовшиеся от древнего (архейского) Карельского кратона. На коллизионном этапе в следствие разогрева происходило их плавление, размягчение и гранитизация. Это спровоцировало подъем (диапиризм) гранитизированного субстрата. Формировались купольные структуры, которые принимали обтекаемую, иногда веретенообразную форму. Эти процессы можно интерпретировать как высшую стадию гранитизации, когда породы становятся реоморфизованными (пластичными) с последующим остыванием, вновь преобразующим их в жесткие массы, которые выступают в рельефе (Воинов, Котова, 2012).

Окаймляют купола породы сартавальской серии (метабазиты, кварциты и доломиты). Выше залегают породы ладожской серии (1,91 Ga), в составе которой наблюдаются темные

сланцы кварц-биотитового состава (Импилахтинская свита), флишеидная толща кварцито-песчаников с включениями трахиандезитов (Хунукская свита), а также метатурбидитами метаморфизованными в сланцы (Вялимякская свита). Породы такого состава характеризуют зону развития пассивной окраины древнего Свекофенского океана, его остатки известны северо-западнее, в виде серпентинитов, базальтов и габбро (Бискэ, 2018). (рис. 1).

Л.П. Свириденко в своей работе утверждает, что в пределах Рахе-Ладожской зоне обладали тектонические движения в вертикальной плоскости. Чередование вулканических и осадочных осадков объясняется так же тектоникой земной коры: при ее погружении происходило преимущественно осадочные слои, а при поднятии извергались вулканы. К концу тектонического цикла территория испытала поднятие и внедрение гранитных расплавов, которые способствовали образованию куполов гранито-гнейсов. (Свириденко, 2019)

Свекофенский складчатый пояс (область, ороген) представляет собой структуру, прошедшую все стадии развития орогена: спрединг, субдукцию, коллизию и аккрецию (Балтыбаев и др., 2009). Пояс был образован на месте закрывшегося океана с типичным набором столкнувшихся с континентом формаций: островных дуг и окраинных морей. Тип континентальной коры здесь, таким образом, аккреционный, образованной в течение периода менее 100 Ма (Бискэ, 2018). Это территория Фенноскандинавского щита, которая сложена высокотемпературными метаморфическими породами палеопротерозойского возраста, преимущественно вулканно-плутоническими и осадочными, для которых характерно возрастание температуры метаморфизма до гранулитовой фации. (Отчет о прохождении учебной геологической практики по структурному и геохимическому картированию, 2019)

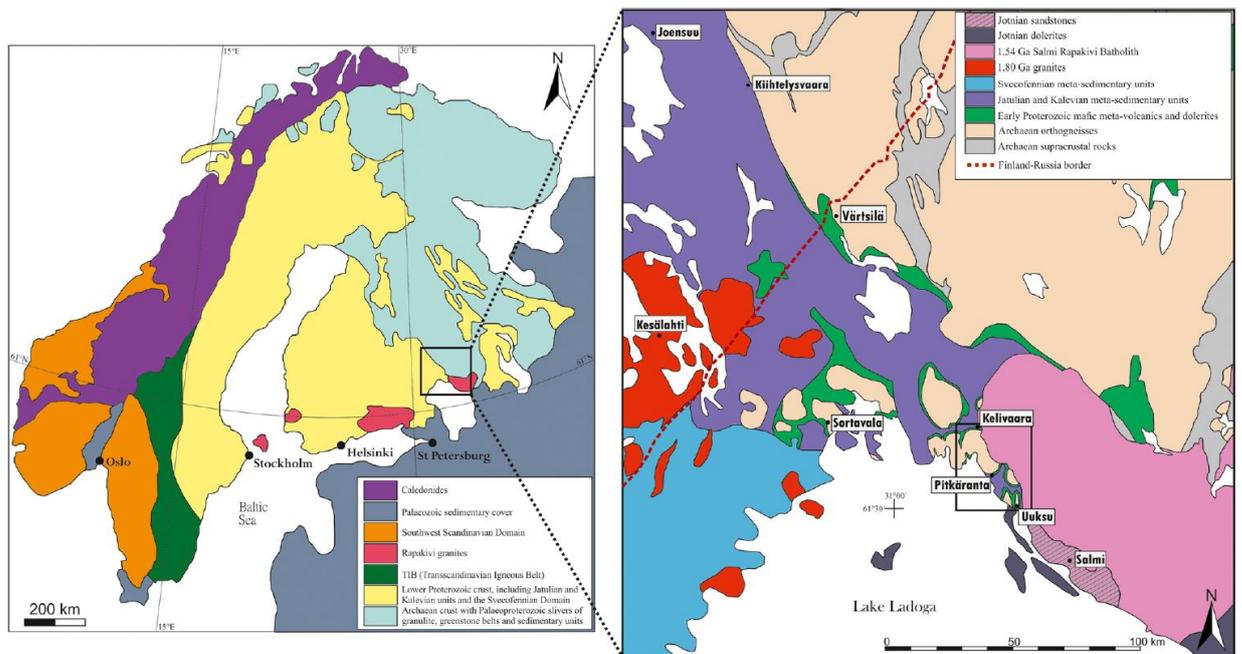


Рисунок 2. Расположение района Северного Приладожья на Фенноскандийском щите и геологическая карта Северного Приладожья (здесь район Рахе-Ладожский сутурной зоны обозначен как метаосадочные отложения ятулия и калевия) (Valkama et al. 2016).

1.3 История геологического развития

Историю геологического развития Балтийского щита можно разделить на три этапа: архейскую эволюцию и палеопротерозойский рифтогенный и орогенный этапы. (Lahtinen et al. 2018)

Самые древние породы на исследуемой территории представлены архейскими гранито-гнейсами (до 2,5 Ga), отдельные блоки карельского массива. Консолидация Карельского кратона происходила более 3 млрд. лет назад, наращивалась его континентальная кора (Глебовицкий и др., 2005).

Дальнейшие свидетельства геологических событий относятся к периоду раннего протерозоя (2,1 – 1,92 Ga.). Этот возрастной интервал представлен осадочными, вулканогенно-осадочными и вулканическими породами питкярантской свиты (скарноиды, мраморы, амфиболиты, биотитовые сланцы). Они маркируют раскрытие нового водного бассейна, сопровождавшееся карбонатным и терригенным осадконакоплением и рифтогенным вулканизмом. Причины развития процессов континентального рифтогенеза связана с подъёмом мантийного плюма

Карельский кратон отсоединяется от раскалывающегося суперконтинента. Это вызывает растягивающие напряжения с образованием грабенов. Плечи грабенов представлены

горными системами, которые при денудации поставляли терригенный материал в формирующийся грабенообразный прогиб. В южной части Карельского кратона начинается раскрытие Свекофенского океана с развитием срединно океанического хребта и образованием океанической коры. Терригенные и карбонатные породы слагают низы разреза питкьярантской свиты. Со временем в составе осадков повышается доля вулканогенного материала. В период наиболее интенсивного проявления вулканизма формируются мощные толщи, сложенные туфами и базальтовыми лавовыми покровами. Вулканогенные образования на исследуемой территории представлены амфиболитами средней толщи питкьярантской свиты. Верхняя часть питкьярантской свиты сложена сланцами и скарноидами – переработанными терригенными и карбонатными осадками древнего океана (Балтыбаев, 2000).

Следующий этап развития происходил в режиме континентальной окраины. В это время здесь в условиях континентального склона накапливаются флишевые отложения (преимущественно терригенного состава) преобразованные в биотитовые сланцы, метапесчаники. Таким образом, продолжается раскрытие Свекофенского океана (Балтыбаев, 2000).

В этот временной период формируются дифференцированные габбро-пироксенитовые тела основного состава (массив Вялимяки, 1,89 Ga.), которые соответствуют условиям островодужного магматизма. Эти породы относятся к древней надсубдукционной зоне. Таким образом, пассивная континентальная окраина преобразуется в активную – образуется субдукционная геодинамическая обстановка (Балтыбаев, 2000).

Все последующие преобразования пород, сформированных в людиковийское и калевийское время, связаны с аккрецией и коллизией. В результате к Карельскому массиву присоединяется островная дуга (дуги) с последующим полным закрытием Свекофенского океана. Коллизионные процессы обусловили развитие высокоградного метаморфизма. Вследствие этих процессов архейские породы утратили свои первичные характеристики и были преобразованы в гранитогнейсы. Осадочные, вулканогенно-осадочные и вулканические породы питкьярантской свиты и ладожской серии метаморфизованы: карбонатные осадки превращены в скарноиды, терригенные – в биотитовые сланцы, базальтовые покровы - в амфиболиты, подводные каналы вулканов – в амфиболитовые дайки. Наблюдаются кварцевые жилы, мигматиты и участки гранитизации. Всё это указывает на интенсивный региональный метаморфизм (Балтыбаев, 2000).

Раннепротерозойский этап является одним из ключевых моментов геологической истории Северного Приладожья, с развитием процессов спрединга. Наблюдаются многочисленные выходы на поверхность пород ремобилизованного архейского фундамента в виде гранитогнейсовых куполов. Купола формировались 1,885-1,870 Ga. (Балтыбаев, 2000)

После завершения коллизии достаточно продолжительного время на территории не обнаруживаются каких-либо геологических комплексов, позволяющих интерпретировать геологические события. На протяжении почти 200 млн. лет здесь существует денудационная обстановка.

Следующие геологические события регистрируются 1,645 – 1,545 Ga. В этот период происходит внедрение гранитов рапакиви. Формируется Салминский и Выборгский массивы гранитов-рапакиви. Их появление связано с начальным этапом нового рифтогенеза, который завершается на начальных этапах и не приводит к раскрытию нового океана. Внедрение гранитов-рапакиви проходит в три фазы. Эти процессы обеспечивают появление рудоносных флюидов. Под их воздействием в зоне контакта с гранитами рапакиви формируются рудоносные скарны и грейзены по карбонатным породам питкярантской свиты, появляются кварцевые и пегматоидные жилы. Салминский батолит гранитов-рапакиви относится к гранитам А-типа. Граниты-рапакиви известны по ряду докембрийских территорий по всему земному шару, включая Фенноскандинавский и Украинский щиты в Европе.

В четвертичный период на данной территории сохраняются континентальные условия. Геологические события настоящего времени проявлены в деятельности ледников (плейстоцен) и развитии речных систем, озёр и болот. Четвертичные отложения в Северном Приладожье широко представлены моренными отложениями – песками, глинами и эрратическими валунами. Движение ледников юго-восточного направления. Северное Приладожье было затронуто Донским (620-530 т. л.н.), Днепровским (250-170 т. л.н.), Валдайским (70 – 55 т.л.н.; 24 – 12 т.л.) оледенениями. Современные отложения представлены озерными осадками, коллювием, аллювием. Широко распространены лесные почвы и болота. (Войнов, Котова, 2012)

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Пегматиты Северного Приладожья

Пегматит - геологическое тело (линза, жила), которое, по большей части, состоит из пород, валовый минеральный состав которых отвечает граниту. Эти породы в теле пегматита сложены в определенную закономерность, образуя зональность. Такие тела называются полностью дифференцированными. Другими словами, на наиболее полной стадии развития пегматит можно разделить на: внешнюю часть (начальная зона по возрасту), сложенную графическим пегматитом (кварц, проросший в гигантозернистых кристаллах полевого шпата); промежуточную зону, блоковую, сложенную крупными кристаллами полевого шпата и кварцем; внутренняя зона – это позднеобразованное кварцевое ядро. Меньшие по размеру и не полностью развитые пегматитовые тела могут состоять из двух зон: периферийной – графической, и промежуточной – блоковой (с полевым шпатом и кварцем) или даже состоят из одной только краевой зоны (Бескин, Марин, 2017).

Таким образом, пегматит представляет собой зональное геологическое тело, как правило, имеющее кварцевое ядро в центральной части, структуру гигантозернистых блоковых агрегатов полевого шпата с кварцем, графическую кварц-полевошпатовую зону и аплитовую контактовую зону (Бескин, Марин, 2017).

Пегматоидные образования представляют собой тела, которые сложены гранитными, кварц-полевошпатовыми породами, с крупно- до мелкозернистой структурой без выраженной зональности. Однако они часто содержат блоковые агрегаты кварца и полевого шпата, как и пегматиты (Бескин, Марин, 2017).

Гранитные пегматиты встречаются по всей планете с вариацией возраста от архея до кайнозоя. Гранитные пегматиты являются главным и единственным источником листового мусковита и цезия и, кроме того, играют важную роль в добыче лития, тантала, бериллия, обеспечивают пьезооптику, ювелирную промышленность, предоставляют керамические ресурсы.

По классификации В.В. Гордиенко гранитные пегматиты делятся на шесть рудных формаций на основе различия в химическом составе породообразующих минералов. В районе Северного Приладожья чаще всего встречаются керамические пегматитовые тела, а также слюдоносные. Кроме того, исследователями регистрировались и изучались пегматиты редкометально-слюдоносно-керамической формации (Егоров А.В. 2018). Помимо перечисленных трёх формаций В.В. Гордиенко выделял редкометальную, редкометально-

редкоземельную и хрусталеносную формации гранитных пегматитов. Каждая из этих формаций характеризуется определенными условиями образования и минеральными парагенезисами, а также своим набором структурных и текстурных особенностей.

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 основе их возраста: доладожские и постладожские.

Широкое распространение доладожских пегматитов наблюдается в гранитогнейсовых куполах (Никитин, Шуркин, 1948).

Постладожские пегматиты распространяются в гранито-гнейсах, в зоне контакта гранито-гнейсовых куполов с питкьярантской свитой и в породах ладожской серии.

Кроме того, внутри каждой из двух групп наблюдаются несколько периодов пегматитообразования (Никитин, Шуркин, 1948).

Крупными скоплениями жильных тел пегматитов формируются пегматитовые поля, одним из которых является Питкьярантское пегматитовое поле на востоке Северного Приладожья. Проявления пегматитовых тел этого поля приурочены к четырём гранито-гнейсовым куполам таким, как Питкьярантский, Мурсульский, Импилахтинский и Коккасельский.

Гранито-гнейсы купольных ядер, окаймляющие купола породы питкьярантской свиты и породы ладожской серии являются вмещающими для пегматитовых тел.

К.И. Розанов (Розанов и др. 1978) разделил жильные пегматитовые тела Северного Приладожья так же по возрасту и минеральному составу на ранние пегматиты (возраст определён К-Аг методом как 1750-1875 млн. лет) и более поздние пегматоидные граниты (пегматоиды) (1690-1710 млн лет, К-Аг метод).

К первой группе относятся небольшие пегматитовые тела (первые метры – десятки метров), получившие развитие в пределах разломных зон. В эту же группу входят крупные системы линз, площадь которых достигает сотен квадратных метров. Характерной особенностью ранних пегматитов является зональное строение. Сложены такими породообразующими минералами, как кварц, микроклин и мусковит. В качестве второстепенных минералов встречаются апатит, циркон, рутил, мусковит, гранат, берилл, турмалин, тантало-ниобаты и др.

Вторая группа пегматитовых тел, недифференцированные пегматоидные граниты, имеют штокообразную, линзовидную формы. Это секущие либо субсогласные жильные тела. Структура: пегматоидная, крупнозернистая до гигантозернистой. Породообразующие минералы: кварц, альбит, мусковит. Второстепенными являются минералы такие, как турмалин, касситерит, титанит, пирит, апатит, гранат и др. (Розанов и др. 1978)

Формации керамических пегматитов и пегматоиднов с турмалином исследуемых объектов (гл. 2.2) распространены в ареале гранито-гнейсовых куполов. Тела, образованные этими геологическими образованиями, имеют протяженность до 200 м и мощность до 20 м, но также распространены поля мелких тел. Пегматитовые тела чаще С-3, реже субмеридианального и широтного простирания.

2.2 Геологическая характеристика объектов исследования

В данной работе исследовались образцы акцессорного турмалина из метаосадочных пород ладожской серии (район Кительского алмандинового месторождения), турмалины из пегматоидов района Тетрамяки и пегматитов Юканкоски в сланцах ладожской серии, турмалин из пегматитов на контакте пород питкярантской свиты и гранито-гнейсового купола (пегматиты карьера Линнаваара, пегматиты Калуга) и турмалины из пегматита в амфиболитах питкярантской свиты (пегматит ЖД) (рис.3).

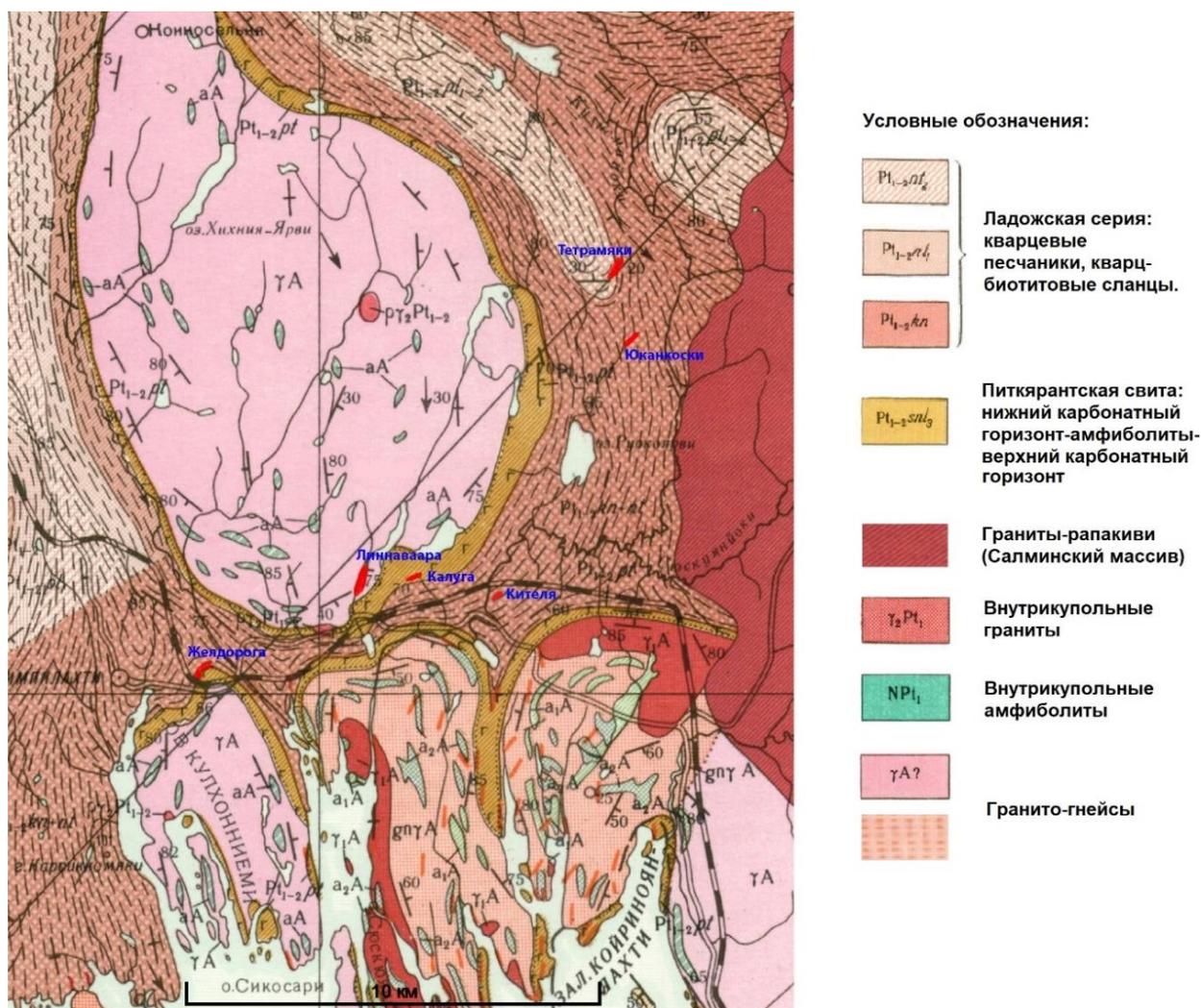


Рисунок 3. Схема расположения объектов исследования. (Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000)

1. Метаморфизованные осадочные породы (сланцевые сланцы, метапесчаники) ладожской серии обнаруживают в своем составе турмалин в качестве акцессорного минерала. Образование турмалина в них может объясняться наличием достаточного количества бора в составе первичных осадочных пород, или привнесением флюидами необходимых веществ в процессе метаморфизма (Акцессорные минералы [ссылка] URL:<http://spb-sovtrans.ru>). Шлиховое опробование было проведено в районе Кительского месторождения гранатов-альмандинов. Месторождение расположено в 100 м от железнодорожной линии Янисъярви — Лодейное Поле, на левом берегу реки Сюскюяййоки.

2. Жильные тела *пегматоидов Тетрамяки* расположены в 5 км на север от озера Руокоярви, около горы Тетрамяки, между выходами пород купольных ядер гранито-гнейсов – Коккасельского купола на северо-западе и Салминского массива гранитов рапакиви на юго-востоке. Пегматоидные тела относятся к постладожским пегматитовым образованиям.

3. Участок сложен породами ладожской серии: метапесчаниками и биотитовыми сланцами. Выделяется (Отчет по геологической практике студентов 3 курса, 2018) несколько пачек ладожской серии: две пачки метапесчаников, две пачки биотитовых сланцев и одна пачка, представляющая собой переслаивание этих двух пород. В целом простирание сланцеватости северо-западное. Углы падения варьируются в пределах от 45° до 90°. Иногда отмечается мелкая складчатая структура.

На данном участке наблюдаются крупные пегматоидные тела. Также отмечены небольшие тела, располагающиеся в центре участка. Они состоят из кварца, калиевого полевого шпата. В южной части жилы имеют северо-западное, западное простирание. Подобное распространение тел приурочено к разным пачкам пород ладожской серии: небольшие жилы находятся в пачке переслаивания метапесчаников и сланцев. Вмещающая пачка более крупных тел сложена биотитовыми сланцами. Контакт пегматитовых тел и биотитовых сланцев субсогласный.

В пегматоидных телах наблюдаются фрагменты «непереваренных» пород ладожской свиты, являющиеся ксенолитами и теньвыми ксенолитами (рис. 4).

Пегматоид характеризуется среднезернистой гранитной структурой, лейкократовым составом. Пегматитовой зональности не прослеживается (Отчет по геологической практике студентов 3 курса, 2018).

В пегматоидах объекта встречаются выделения турмалина в виде поперечных сечений отдельных кристаллов (рис. 6). Также турмалин выделяется в виде вытянутых призматических кристаллов (рис. 5).

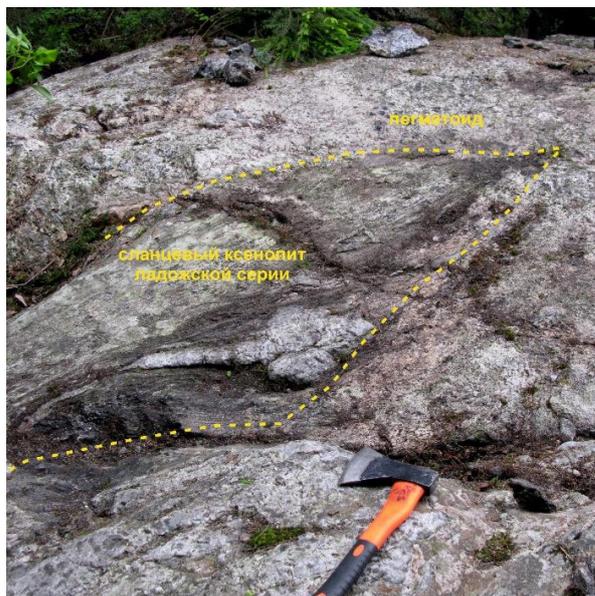


Рисунок 4. Фрагмент сильно переработанных в результате переплавления сланцев и метаосадочных пород ладожской серии (ксенолит), внедрившийся в тело пегматоидной жилы, т.н. 1 (Фото Е.В. Волковой).



Рисунок 5. Различная форма выделения черного турмалина: А – изометричные поперечные сечения кристаллов окаймленные кварцевой «рубашкой»; В – вытянутые в различных направлениях кристаллы, т.н. 1 (Фото Е.В. Волковой).

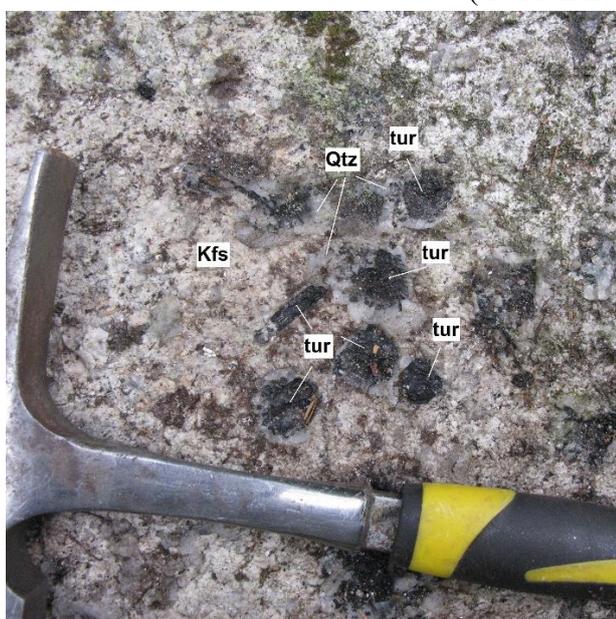


Рисунок 6. Турмалин, окаймленный кварцем в пегматоиде. Условные обозначения: Kfs – калиевый полевой шпат, Qtz – кварц, tur – турмалин (Фото Е.В. Волковой).

4. Месторождение Линнаваара расположено 1,2 км от села Леппясилта в Питкярантском районе, в 25 км к северо-северо-западу от г. Питкяранта. Вблизи проходит автодорога Петразаводск-Сортовала-Санкт-Петербург. Месторождение находится в юго-восточной оконечности Коккасельского гранитогнейсового купола купола, на контакте с породами питкярантской серии.

Автор работы лично ознакомился с месторождением *керамических пегматитов Линнаваара* во время учебной практики в д. Импилахти в июне 2019 года. Были отобраны образцы турмалиносодержащих керамических пегматитов. Месторождение приурочено к западному крылу субмеридиональной синклинальной структуры, сложенной комплексом пород, представленных биотитовыми сланцами и рассланцованными амфиболитами, так же находящиеся в зоне влияния Коккасельского гранито-гнейсового купола.

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 асимметричной 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° . В составе пегматита существенно выделяется плагиоклаз.

Северная жила приурочена к самой высокой части восточного склона гряды Линнаваара. Жила простирается в почти меридианальном направлении.; падение на восток, юго-восток под углом $45-60^\circ$. Выявляются зоны с меньшим углом падения контактов, до $10-15^\circ$. Ось жилы ундулирует с общим погружением под теми же углами на север-северо-восток. Тектонические нарушения, а также эрозия срезают южную оконечность жилы. Из этого очевидно, что истинная мощность жилы увеличивается от юга к северо-востоку с 4-5 м до 70-75 м, достигая, по-видимому, мощности 110 м. Общая длина этой жилы составляет около 650-700 м.

Плоскость западного контакта жилы волнообразная, часто под острыми углами срезаёт сланцеватость вмещающих сланцев. Наблюдается обогащение тантало-ниобатами, а иногда и гранатом в амфиболитовых сланцев экзаконтакта.

В целом, пегматиты северной жилы дифференцированы.

Пегматиты инъецированы в амфиболиты, происхождение которых точно не доказано. Это могут быть как внутрикупольные амфиболиты, так и часть питкярантской свиты. Питкярантская свита состоит из амфиболитов и сланцев.

Породообразующие минералы жилы являются микроклин, кварц и мусковит. Редкие минералы - берилл, колумбит и танталит. Второстепенными минералами могут быть гранат (альмандин), турмалин и др.

Турмалинсодержащий пегматит (Л-1) отобран из блоковой зоны пегматита, предположительно, северной жилы (рис. 7).



Рисунок 7. Турмалинсодержащий пегматит из пегматитовой жилы карьера Линнаваара с микроклином (50-55%), кварцем (25-30%), мусковитом (5-10%) и гранатом (0-5%). Турмалин (10-20%) от темно-коричневого до черного цвета. Представлен как отдельными изометричными кристаллами, так и в сростках друг с другом.

Размер кристаллов от нескольких миллиметров до 2 см в сростках.

5. *Пегматитовое тело Калуга* расположено в амфиболитах питкярантской свиты. Размеры тела: видимая мощность 3-4 м, прослеживается по простиранию (на запад) на 50-80 метров. Падение крутое, вертикальное, согласное с контактами пород. Пегматит слабо дифференцированный, кварц-микроклиновый с редкими кристаллами биотита и мусковита, аксессуарные - гранат, апатит, турмалин. Зернистость пегматита несколько увеличивается к центру жилы (микроклин до 3-5 см), наблюдаются небольшие сегрегации дымчатого кварца (до 20 см). Турмалин аксессуарный от темно-коричневого до черного цвета образует небольшие изометричные выделения.

б. Объект «Железная дорога» расположен на восточном въезде в посёлок Импилахти, вблизи с ответвлением на станцию Импилахти от основной дороги. На участке выходит пегматитовая жила с простиранием на северо-запад (рис. 8). Мощность пегматитового тела составляет 7 м, простирается на длину, равную 30-50 м. (Романов, 2008)

Вмещающей породой пегматитового тела является брекчированный амфиболит переslaивающийся с тонкими слоями карбонатов (в среднем 1 см). Амфиболит приконтактовой зоны светлее вмещающего.

Пегматитовое тело характеризуется зональностью, где выделяется графическая – внешняя – зона, часто с турмалиновой графикой (кристаллы до 6 см в диаметре), зона блокового полевого шпата и кварца (кристаллы, диаметром до 10 см) и зона развития кварцевого ядра. Однако, наблюдается довольно нехарактерная структура, нарушающая привычную зональность пегматитового тела: зоны, сменяются резко.

Первая, краевая зона пегматита, отличается окраской, более темной, чем окраска центральной части пегматита. Пегматит краевой зоны серого цвета, мелкозернистый с включениями блокового полевого шпата. Следующая зона – пегматит розового цвета с блоковыми кристаллами калиевого полевого шпата и кварца. В этой зоне проявлена пиритизация. Далее вновь проявление графической зоны, в том числе и с турмалиновой графикой. Из этой зоны был взят образец пегматита (ЖД-1) с турмалином в ассоциации альбита, кварца в сростаниях с крупнозернистым полевым шпатом. Турмалин представлен в виде вытянутых, столбчатых кристаллов. Размеры отдельных кристаллов достигают 5-6 см. Кристаллы распределены равномерно и не образуют скоплений. В составе пегматита краевой зоны встречаются гранат и сульфидные минералы. Пегматит с западной стороны жилы так же контактирует с амфиболит-карбонатной брекчией.

Кристаллы турмалинов изометричной, чаще вытянутой формы. Кроме того, проявлена турмалиновая графика (кристаллизация минералов турмалина одновременно с полевым шпатом и кварцем).

Обычно встречается черный турмалин в крупных, хорошо образованных кристаллах, а также турмалин, который развивается в турмалиновую графику в блоковой зоне пегматита (рис. 9)

Проба ЮК-9 – из образца пегматита блоковой зоны, остальные из графической (ЮК-10, Юк-13) (рис. 10) и краевой зоны (ЮК-7).



Рисунок 9. Черный турмалин слагает турмалиновую графику (турмалин-кварцевый агрегат графической структуры), а также крупный единственный кристалл турмалина до 6 см в блоковой зоне крупнокристаллического пегматита.



Рисунок 10. Образец ЮК-10 графической зоны пегматита Юканкоски с вытянутыми в одном направлении столбчатыми кристаллами чёрного турмалина (25-30%) в ассоциации с мусковитом (10-15%), полевым шпатом (35-40%), кварцем (20-25%).

3. ТИПОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРМАЛИНА

3.1 Общие сведения о турмалине

В структуру кристаллической решетки минералов супергруппы турмалина (рис. 11) входят такие анионные радикалы, как $(\text{BO}_3)^{3-}$ и $(\text{SiO}_4)^{4-}$. На основе этого признака турмалины относятся к борато-силикатам (или силикато-боратам). (Булах, 2014)

Образование турмалина происходит в условиях высокоактивного бора, который способен накапливаться в стадию развития постмагматических процессов. На этой стадии возникают такие наложенные процессы, которые воздействуют на ранее закристаллизовавшуюся магму гранитного состава кристаллизация турмалина возможна в образованиях, так или иначе связанных с внедрением вторичных флюидов таких, как гранитные пегматиты, скарны, грейзены, вторичные кварциты (Акцессорные минералы [ссылка]: spb-sovtrans.ru). Также турмалин способен кристаллизоваться как акцессорный в породах, которые находятся в зоне влияния интрузива гранитоидов.

Таким образом, минералы турмалина формируются в большом интервале P-T условий, при различных свойствах влияющих флюидов и кислотности среды. Такое разнообразие в условиях образования минерала отражается в большом потенциале его кристаллической решетки. В неё может входить достаточно широкий спектр ионов с разными химическими свойствами (зарядом, ионным радиусом и др.) (Прибавкин, Замятин, 2016).

Общая формула турмалина может быть записана как $\text{XY}_3\text{Z}_6\text{T}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3\text{V}_3\text{W}$, где X = Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , □ (вакансия); Y = Al^{3+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Li^+ , Ti^{4+} ; Z = Al^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, Mg^{2+} ; T = Si^{4+} , Al^{3+} , B^{3+} ; В = B^{3+} , V = $(\text{OH})^-$, O^{2-} ; W = $(\text{OH})^-$, F^- , O^{2-} . (Bosi F, 2018).

В качестве изоморфной примеси в турмалинах обнаруживают широкий спектр элементов в различных позициях. Во-первых, в турмалинах распространён простейший двухатомный изовалентный изоморфизм. Примером таких замещений могут быть изоморфные ряды, основанные на замещениях двухвалентных катионов позиции Y и трехвалентных катионов в позиции Z. Такие изоморфные замещения отражаются в изоморфных рядах, со следующими характерными схемами: шерл-дравит (изовалентный изоморфизм в нескольких структурных позициях) ${}^Y\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow {}^Y\text{Mg}^{2+}$, ${}^Z\text{Al}^{3+} \leftrightarrow {}^Z\text{Fe}^{3+}$; шерл-цилаизит ${}^Y\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow {}^Y\text{Mn}^{2+}$ и др.; дравит-хромовый дравит ${}^Z\text{Al}^{3+} \leftrightarrow {}^Z\text{Cr}^{3+}$.

Во-вторых, в турмалинах широко проявлен гетеровалентный изоморфизм. Характерное гетеровалентное замещение в одной позиции – Y – в турмалине демонстрирует следующее уравнение изоморфизма ряда шерл-эльбаит: $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Li}^+ + \text{Al}^{3+}$ (или $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow$

$0,5\text{Li}^{1+}+0,5\text{Al}^{3+}$), здесь объединенные катионы ($\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{1,5}$) можно рассматривать в качестве одного компонента, имеющего степень окисления $2+$ (Булах, 2009).

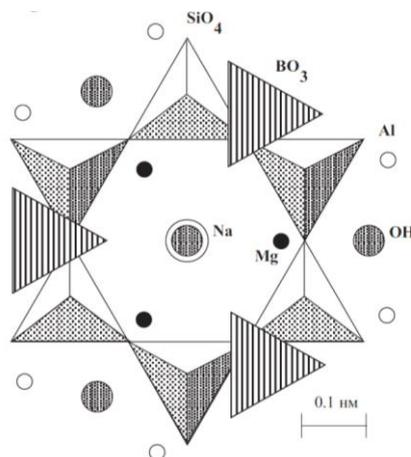


Рисунок 11. Кристаллическая структура турмалина (дравита) (Булах и др. 2014).

В качестве примесей в турмалин могут входить различные элементы. Крупные катионы, такие как Pb^{2+} , Ag^+ и др., вероятно, входят в позицию X (Henry D.J., et al. 2011). В позицию Y могут входить 3d – элементы: Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} (Верещагин, 2014). Катионы Ge^{4+} , As^{5+} , V^{5+} , Se^{6+} могут изоморфно замещать Al в позиции T. (Shannon, 1976)

Согласно современной классификации IMA основными критериями для классификации является доминирование определенного катиона или аниона, наличие вакансии, группы атомов с одинаковым валентным состоянием, а также различные взаимные комбинации этих критериев.

Первично выделяют группы турмалинов, основанные на заполнении позиции X: щелочные (позицию X занимают Na^+ , K^+), кальциевые (позицию X занимает Ca^{2+}) или X-вакантная группа (позиция X с вакансией). Поскольку каждая из этих групп включает катионы (или вакансию) с разным зарядом, связанные замены необходимы для соотношения составов групп (Henry D.J., et al. 2011).

Наиболее распространенной группой турмалинов считается щелочная. В ней выделяются основные минеральные виды с Na^+ в позиции X такие, как шерл $\text{NaFe}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{O},\text{OH},\text{F})_4$, дравит $\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{O},\text{OH},\text{F})_4$, эльбаит $\text{Na}(\text{Al},\text{Li})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH},\text{F})_4$. Отображение состава турмалинов этой группы может быть представлен в виде тройной диаграммы состава с точки зрения заполнения ионами позиции Y (рис. 12) (Henry D.J., et al. 2011).

Кроме того, для классификации турмалинов используется диаграмма соотношения количеств ионов $\text{Na}^+(\text{K}^+)$, Ca^{2+} и вакансии, отражающая заполнение позиции X. (рис. 13)

Кальциевые аналоги шерла, дравита и эльбаита называются соответственно ферувит ($\text{CaFe}_3(\text{MgAl}_5)(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{O},\text{OH},\text{F})_4$), увит ($\text{CaMg}_3(\text{MgAl}_5)(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{O},\text{OH},\text{F})_4$) и лиддиковит ($\text{Ca}(\text{Al},\text{Li})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH},\text{F})_4$). Аналоги с вакансией в позиции X называются фойтит, магниофойтит и розманит. Тогда, с учетом всех возможных заполнений позиции X, треугольную диаграмму заполнения позиции Y можно представить следующим образом по (рис. 14) (Grew, E.S. et al. 2015)

Кроме того, существует классификация турмалинов по заполненности W позиции ионами OH^- , O^{2-} и F^- (рис. 15).

Как было сказано выше, генезис турмалинов связан прежде всего с пегматитами и, намного реже, с другими парагенетическими видами такими, как граниты, гнейсы, сланцы, известняки, скарны, метабазиты. В данной работе исследовались турмалины из пегматитов, пегматоидных тел и акцессорный турмалин из метаосадочных пород.

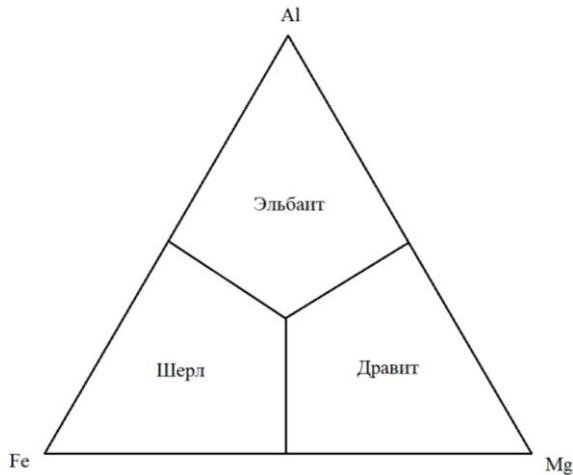


Рисунок 12. Классификационная диаграмма состава турмалина на основе заполнения катионами Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} позиции Y (Henry D.J., et al. 2011).

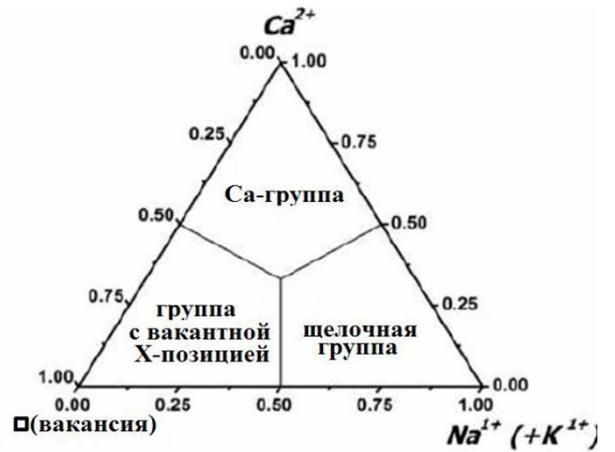


Рисунок 13. Классификационная диаграмма состава турмалина на основе заполнения катионами Na^+ , Ca^{2+} , вакансии позиции X (Henry D.J., et al. 2011).

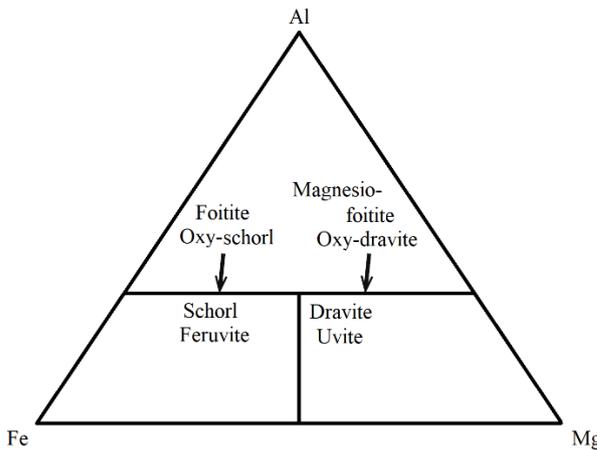


Рисунок 14. Классификационная диаграмма состава турмалина на основе заполнения катионами Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} позиции Y с учетом заполненности компонентами (Na^+ , Ca^{2+} , вакансии) позиции X (Henry D.J., et al. 2011).

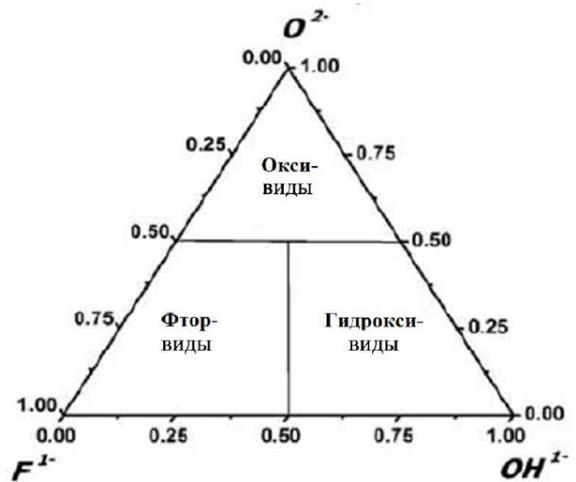


Рисунок 15. Классификационная диаграмма состава турмалина на основе заполнения катионами F^- , O^{2-} , OH^- позиции W (Henry D.J., et al. 2011).

3.1 Методы и объемы аналитических исследований

Отбор проб турмалина для аналитического изучения проводился из образцов пегматитов и пегматоидов различных объектов Северного Приладожья (табл 1).

Таблица 1 Характеристика объектов исследования.

Объект отбора исследуемых образцов	№ пробы	Количество зёрен	Краткая характеристика	Вмещающие породы
Пегматиты Юканко-ски	Юк-9 (1)	6	Пегматиты наиболее развиты среди изучаемых объектов, с полной дифференциацией. Проявлена турмалиновая графика. Часты изометричные кристаллы турмалинов. Проба ЮК-9 – из образца пегматита блоковой зоны, остальные из графической и краевой зоны.	Сланцы и метапесчаники ладожской свиты.
	Юк-9 (2)	4		
	Юк-10	13		
	Юк-7	13		
	Юк-13	5		
Пегматиты Калуга	К-1	9	Пегматит слабо дифференцированный. Турмалин акцессорный от темно-коричневого до черного цвета образует небольшие изометричные выделения.	Амфиболиты питкьярантской свиты
Пегматиты ЖД	ЖД-1	14	Чёрные зёрна турмалина (в диаметре 5-6 см) развиты в блоковой зоне пегматитового тела	Породы питкьярантской свиты
Пегматиты Линнавары	Л-1	11	Пегматиты дифференцированы. Турмалин из блоковой зоны пегматита, предположительно, северной жилы	Зона контакта гранито-гнейсового купола и амфиболитов питкьярантской свиты.

Таблица 1 (продолжение)

Объект отбора исследуемых образцов	№ пробы	Количество зёрен	Краткая характеристика	Вмещающие породы	
Пегматоид Тетрамяки	T001	10	Турмалин в виде кристаллов до 10 см, часто с кварцевой оторочкой. Образование турмалина – в результате кристаллизации пегматоида <i>in situ</i> из пород ладожской серии	Метаосадочные породы ладожской серии.	Контакт пегматоида с биотитовым сланцами (дислоцированными).
	T006	20			Центральная часть пре-плавленной зоны.
	T011	7			Зона между контактом со сланцами и жильным телом (пегматоидом).
	T015	6			
Акцессорный турмалин из пород ладожской свиты	Ки-1	86	Шлиховое опробование проводилось в районе альмандинового месторождения Кителя. Турмалин как акцессорный минерал в метаосадочных породах ладожской серии	Метаосадочные породы ладожской серии (сланцы, метапесчаники).	

Для проведения микрозондового анализа было изготовлено 6 шайб с зёрнами турмалина в них с последующим углеродным напылением. Всего было изучено 204 зёрна. И получено 263 микрозондовых анализов турмалинов.

Видообразующий состав турмалина 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 разрушения образцов. 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. %. А также невозможно точно, или в принципе, определять некоторые очень легкие элементы такие, как, например, литий или бор.

Микрозондовый анализ основан на изучении состава вещества с помощью рентгеновского излучения, возбуждаемого сфокусированным электронным пучком. Пучок падает на образец, электроны многократно взаимодействуют с атомами образца, возбуждая их. В результате выделяется энергия в виде характерного для определенного атома рентгеновского излучения.

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

Однако, при проведении микрозондового анализа отсутствует возможность разделить Fe на двухвалентное и трёхвалентное. В расчетах использовались только определенные содержания двухвалентного железа. В отсутствие информации о занятости позиций Y и Z, эти позиции могут занимать одинаковые катионы (Al^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} и т.д.), при расчете формулы турмалина они объединены. Согласно (Henry et al., 2013) распределение ионов по позициям производилось по следующей схеме. Сначала Al^{3+} занимает позицию Z, вместе с Cr^{3+} и V^{3+} при их наличии. Только после заполнения позиции Z до полного формульного значения (6) остаток алюминия переходит в позицию Y. Предполагается, что все двухвалентные катионы (Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} и др.) расположены в Y. (Henry et al, 2013).

Также микронзондовые исследования позволили выявить вариации состава турмалина различных объектов, оценить наличие зональности в зернах турмалина и выявить наличие минеральных включений, и определить их состав.

Для анализа содержаний элементов-примесей в турмалинах был использован метод ICP-MS. Пробы для анализа были отбираны на основе результатов микронзондовых исследований. После дробления образцов, материал был расситован на фракции, и для отбора монофракции турмалина использовалась фракция размерностью 0,16-0,25. В зависимости от минерального состава фракции использовались в различных сочетаниях метод электромагнитной сепарации (часто неоднократный, с подбором индивидуального режима для каждой пробы), удаление слоистых силикатов (слюд) методом «откатки», ручная дочистка пробы под бинокулярной лупой, истирание в яшмовой ступке. Всего было подготовлено для аналитических исследований 10 проб турмалина.

3.2 Видообразующий состав турмалинов

Выборочные составы турмалинов и их кристаллохимические формулы приведены в табл. 4-8.

Исследуемые турмалины характеризуются рядом типохимических особенностей. Турмалины всех объектов высокой железистостью, которая варьирует от 50% в турмалинах из пород ладожской серии до 91% в турмалинах (шерлах) из пегматитов Линнаваары (табл. 2). Высокая железистость может служить индикатором оловорудного месторождения либо отражать высокотемпературные условия образования (Гореликова, 1988).

В целом в турмалинах всех объектов содержание Mg в среднем меньше, чем Fe и достигает 4,16 масс. % MgO (табл. 2).

Содержание алюминия в турмалинах варьирует в широких пределах от 29,35 масс. % в турмалине из пегматоида Тетрамяки (табл. 7) из центральной части переплавленной зоны (Т006) до 52,54 масс. % в акцессорном турмалине ладожской свиты (Ки-1).

Повышенным содержанием кальция, достигающего 0,54 масс. % Ca₂O обладают урмалины из пегматита Калуга (табл. 4), образованного непосредственно в зоне влияния гранито-гнейсового куполва. Однако в целом больше кальция в среднем содержится в акцессорных турмалинах пород ладожской серии (0,63 масс. % CaO) (табл. 2)

В исследуемых турмалинах количество натрия в составе значительно преобладает над кальцием и калием. Больше всего натрия обнаруживается в пегматите Калуга со средним содержанием 2,48 масс. % Na₂O, а также в турмалине пегматитового тела карьера Линнаваара – 2,25 масс. % Na₂O.

В отдельных зернах турмалина фиксируются содержания Ti и Cr, при этом наиболее высокие концентрации этого элемента отмечаются в турмалинах из пегматитоидов Тетрамяки (Т006), со средним содержанием 0,72 % TiO (табл. 2). Максимального количества оксида титана достигает турмалин из того же образца центральной части переплавленной зоны пегматоида, равного 1,54 масс. % TiO (табл. 7). Кроме того, титан содержится в акцессорном турмалине ладожской серии, где его оксид достигает содержания 0,96 масс. % (Ки-1).

Незначительные содержания Cr фиксируются (табл. 7) в пегматоидах Тетрамяки, достигая значений 0,17 масс. % Cr₂O₃ в составе турмалина из образца Т006, а также в пегматитах месторождения Линнаваара с максимальным значением – 0,09 масс. % Cr₂O₃). В целом же самое высокое среднее содержание хрома прослеживается в турмалинах пород ладожской серии (Ки-1) – 0,13 масс. % Cr₂O₃ (табл. 2).

Таблица 2. Вариации химического состава ($X \pm \delta_x$, масс. %) турмалинов из пегматитов и пегматоидов Северного Приладожья.

Объект Компонент	Л-1	ЖД-1	Калуга	Ки-1	Т001	Т-015	Т-006	Т011
Na ₂ O	2,25 ±0,09	2,10 ±0,15	2,48 ±0,14	2,02 ±0,31	1,96 ±0,14	1,95 ±0,12	2,13 ±0,20	2,14 ±0,15
MgO	1,41 ±0,20	3,05 ±0,33	6,28 ±0,77	6,26 ±0,71	5,46 ±0,22	5,14 ±0,27	4,90 ±0,85	5,35 ±0,25
Al ₂ O ₃	33,15 ±0,76	33,37 ±0,61	31,82 ±0,74	33,34 ±2,93	33,29 ±1,05	32,71 ±1,10	32,87 ±1,96	32,62 ±0,78
SiO ₂	34,80 ±0,58	34,47 ±0,58	35,37 ±0,71	35,12 ±1,88	35,55 ±0,98	35,50 ±1,07	35,26 ±1,84	35,58 ±0,79
CaO	0,16 ±0,06	0,11 ±0,05	0,42 ±0,19	0,63 ±0,15	0,23 ±0,05	0,27 ±0,09	0,30 ±0,09	0,30 ±0,06
TiO ₂	0,31 ±0,09	0,68 ±0,13	0,59 ±0,18	0,78 ±0,10	0,52 ±0,20	0,70 ±0,26	0,72 ±0,26	0,76 ±0,28
Cr ₂ O ₃	0,10 ±0,03	0,09 ±0,03	0,10 ±0,01	0,13 ±0,06	0,09 ±0,03	0,11 ±0,03	0,11 ±0,03	0,00 ±0,00
FeO	14,39 ±0,45	10,44 ±0,41	6,97 ±0,64	6,29 ±1,15	6,59 ±0,24	7,60 ±0,27	8,45 ±1,05	7,80 ±0,32
$\frac{FeO}{FeO + MgO}$	0,91	0,77	0,53	0,50	0,55	0,60	0,63	0,59

Таблица 2 (продолжение)

Компонент \ Объект	Юк-9	Юк-10	Юк - кристалл	Юк-7	Юк-13
Na ₂ O	2,05±0,32	2,01±0,09	1,93±0,22	1,86±0,18	1,98±0,16
MgO	2,97±0,51	3,34±0,80	3,36±0,90	3,60±0,22	3,01±0,19
Al ₂ O ₃	32,59±4,80	32,68±0,70	33,89±0,96	34,92±0,84	34,44±0,72
SiO ₂	33,68±4,96	34,34±0,71	35,30±0,65	36,18±0,85	35,75±0,69
CaO	0,11±0,05	0,17±0,08	0,17±0,09	0,21±0,08	0,20±0,02
TiO ₂	0,65±0,15	0,56±0,09	0,46±0,22	0,29±0,16	0,40±0,05
Cr ₂ O ₃	0,09±0,03	0,09±0,02	0,11±0,03	0,12±0,02	0,10±0,01
FeO	10,23±1,52	10,02±1,02	10,20±0,98	9,84±0,34	11,27±0,30
$\frac{\text{FeO}}{\text{FeO} + \text{MgO}}$	0,78	0,75	0,75	0,73	0,79

В целом, образцы турмалина показывают значительные вариации в содержаниях Al₂O₃ (29,35–52,54 масс. %), SiO₂ (26,59–32,29 масс. %), FeO (5,45–14,65 масс. %), MgO (1,16–6,63 масс. %) и Na₂O (0,00–2,66 масс. %). Меньшие изменения наблюдаются для TiO₂ (0,00–1,54 масс. %), CaO (0,00–0,86 масс. %) и Cr₂O₃ (0,00–0,25 масс. %).

Турмалины из пегматитовой жилы объекта ЖД, секущей амфиболит-карбонатную брекчию, характеризуются повышенным содержанием железа (до 10,92 масс. % FeO) (табл. 3), при этом поле составов турмалинов консолидировано относительно близких по составу турмалинов Юканкоски (рис. 18).

Аксессуарный турмалин из пород ладожской свиты из шлиха отобранного на гранатовом месторождении Кителя (табл. 5). Турмалин характеризуется повышенным содержанием алюминия (от 31,1 масс. % до 35,04 масс. % Al₂O₃) и наибольшим содержанием магния (среднее содержание оксида магния 6,26 масс. %) по сравнению с турмалинами из пегматоидов Тетрамяки. В составе турмалинов из пегматоидов оксид алюминия имеет значение от 29,35 масс. % до 34,86 масс. %, а количество оксида магния в среднем составляет 4,83 масс. %. Напротив, в составе турмалинов Тетрамяки больше железа (среднее значение содержания - 6,59 до 7,60 масс. % FeO) (табл. 2), чем в аксессуарных турмалинах ладожской серии. (6,29 масс. % FeO)

Турмалины из пегматоидов Тетрамяки в породах верхов ладожской серии имеют значительные вариации состава (табл. 7). Поля состав турмалинов проявляют наиболее выраженную вытянутость полей к алюминию.

Турмалины пегматитов Калуга, инъецированных в породы питкьярантской свиты в своем составе имеют большое количество магния (до 6,49 масс. % MgO) (табл. 6). Одновременно с этим турмалины из пегматита Калуга обладают повышенным содержанием кальция достигающее 0,54 масс. % Ca₂O (табл. 6).

Были выявлены различия в составе турмалинов из различных зон пегматита Юканкоски. Наиболее железистые турмалины ЮК-13 –79 % (табл. 2). По этому показателю они схожи с турмалинами ЮК-9 с коэффициентом 78%. Турмалины ЮК-10 содержат больше всего титана (до 0,8 масс. % TiO) и в то же время меньше Ca (в среднем 0,19 масс. % CaO) и алюминия (в среднем 33,38 масс. % Al₂O₃) (табл. 4). В составе турмалинов ЮК-7 содержится меньше всего Na (среднее значение 1,86 масс. % Na₂O), больше всего в турмалинах ЮК-9 (среднее значение 2,05 масс. % Na₂O). Однако турмалины ЮК-7 выделяются по количеству алюминия в составе, достигающего 36,19 масс % Al₂O₃.

Помимо исследования вариаций составов турмалинов из пегматитов различных объектов, были изучен микрозондовый профиль зерна турмалина из пегматитов Юканкоски размером 200 мкм для выявления возможной зональности.

По результатам анализа была выявлена цветовая зональность зерна турмалина и на основе этого зональность, выраженная в некотором изменении состава турмалина. Согласно ориентировке на рисунке 7 правая часть турмалина отличается от левой более светлого цвета.

Так в составе более темной, правой, части зерна выявлено повышенное содержание Mg, Ti и Ca (табл. 8), по сравнению с левой. На графике изменения содержания оксидов очевидно наблюдается резко увеличение содержания Mg, Ti, а также Na по мере удаления от периферии к ядру кристалла. При этом FeO уменьшается с увеличением содержания MgO, TiO и Na₂O. На основе полученных данных, можно предположить, что при образовании этого кристалла турмалина происходил понижение температуры от ядра к краям. (Гореликова, 1988)

Кроме того, в левой части зерна был сделан анализ прожилка (рис. 16). В результате полученный спектр №320 (табл. 8) по элементному составу схож с зоной В зерна с большим содержанием Mg.

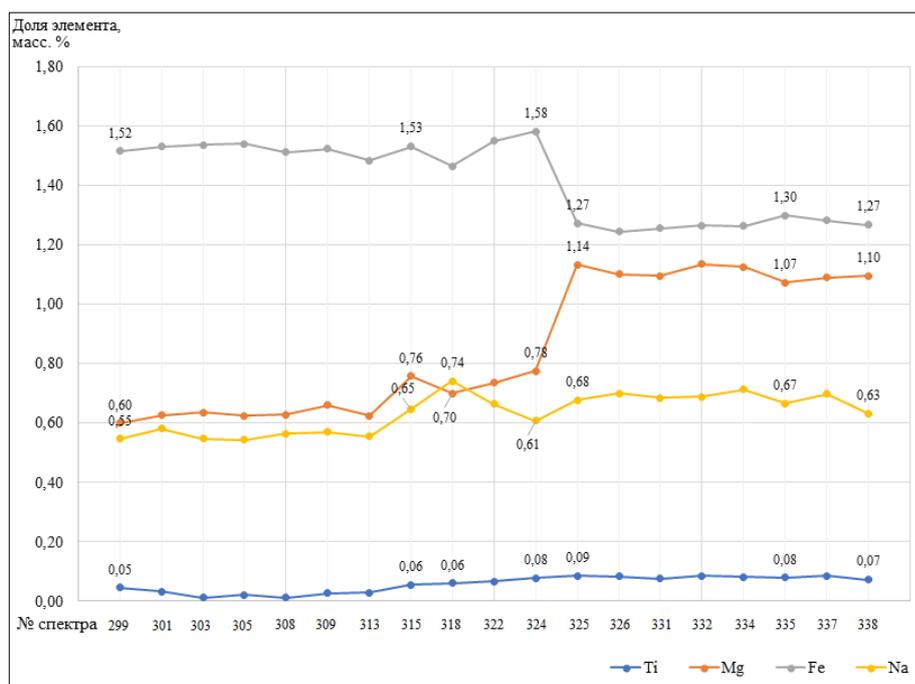
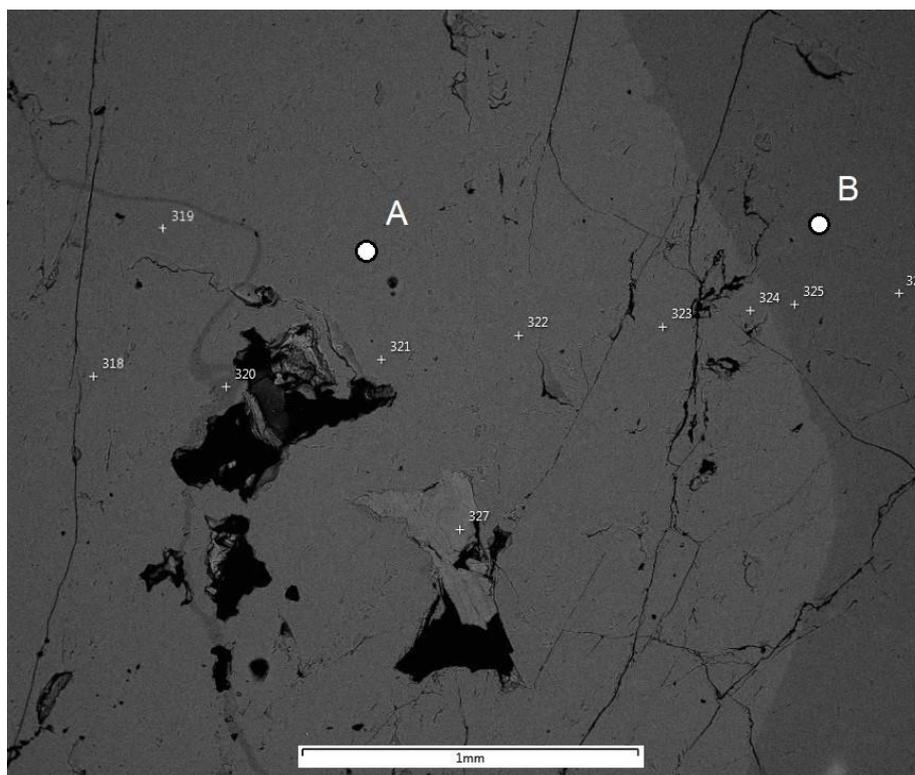


Рисунок 16. Микрофотография зерна зонального турмалина, разделенное на светлую (А) и более темную (В) зоны и график изменения содержания оксидов Ti, Mg, Fe, Na с удалением от периферии к ядру кристалла.

На треугольной диаграмме заполнения позиции Y катионами Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} (рис. 17) построенной на основе анализа исследуемого зерна четко видно два поля составов турмалина, отражающих две зоны, из которых состоит зерно, причем все анализы попадают в

поле шерла-граница с дравитом, за исключением одного, чуть перешедшего границу в поле дравита, точки анализа №320 прожилка в левой зоне кристалла (рис. 16).

Поля составов зонального турмалина почти полностью соответствуют полям турмалинов из образца ЮК-10. Эти турмалины входят в состав наиболее развитой зоне пегматита среди отобранных образцов. Точки их составов на диаграмме AFM образуют два поля: поле зоны А характеризуется большим содержанием железа, поле зоны В большим содержанием Mg. В промежутке между полями турмалинов ЮК-10 и зонального турмалина располагаются поля составов турмалинов ЮК-7 и ЮК-9 из графической зоны пегматита, их состав очень близок к границе составов шерл-дравит. Также поля составов турмалинов вытянуты в сторону алюминия.

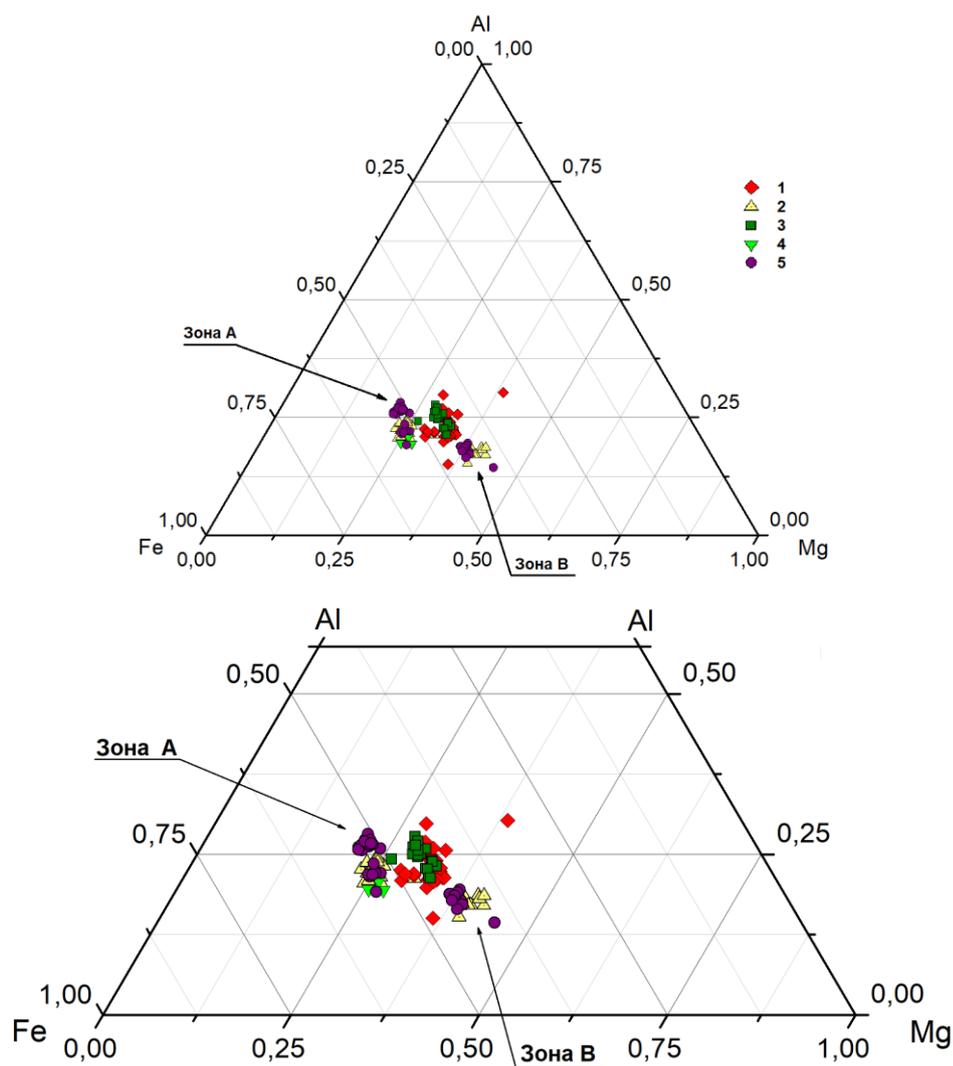


Рисунок 17. Положение точек составов зонального турмалина из пегматита Юканкоски на тройной диаграмме соотношения катионов в позиции Y.

Цифрами обозначены турмалины: 1 – ЮК-9; 2 – ЮК-10; 3 – ЮК-7; 4 – ЮК-13; 5 – зональный кристалл турмалина Юканкоски.

На диаграммах Al - Fe - Mg заполнения позиции Y, наблюдается значительный разброс полей составов по содержанию Fe-Mg, по составу все исследуемые турмалины относятся к изоморфному ряду шерл-дравит, ближе к шерлу т.е. в позиции Y значительно преобладают катионы Fe²⁺ и Mg²⁺ (рис. 18). При этом наиболее железистые турмалины из пегматита Линновары контрастно выделяются высокими содержаниями Fe по сравнению с турмалинами остальных объектов.

Турмалины пегматитов ЖД и Юканкоски по составу ближе к шерлу, чем к дравиту. Составы турмалинов из пегматоидов Тетрамяки, пегматита Калуги и из пород ладожской свиты, напротив, более тяготеют к полю дравита

Следует отметить, что поля составов турмалинов нескольких объектов вытянуты по вертикали, т.е. испытывают довольно значительные вариации в содержаниях алюминия (6,00 ф.к. < Al < 6,54 ф.к) причем турмалины всех объектов являются относительно бедными по содержанию Al в позиции Y. Характерное обособление получило поле составов турмалинов из образца T001 из пегматоидов Тетрамяки относительно полей других образцов из этого объекта. Турмалины T001 более магниальные и содержание Al³⁺ в них больше, чем в турмалинах из образцов T006, T011 и T015.

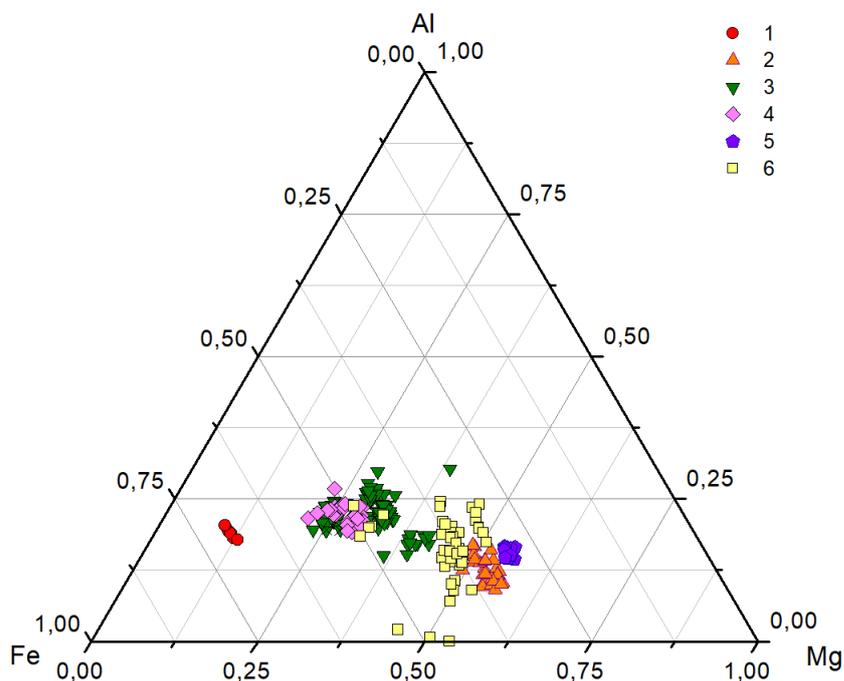


Рисунок 18. Положение точек составов турмалинов на диаграмме соотношения катионов в позиции Y.

Цифрами обозначены: 1 – месторождение Линновара; 2 – Калуга; 3 – Юканкоски; 4 – ЖД; 5 – аксессуарный турмалин из пород ладожской свиты; 6 – Тетрамяки.

По отношению Fe/Mg составы всех исследуемых турмалинов находятся в диапазоне между шерлом и дравитом (рис. 19).

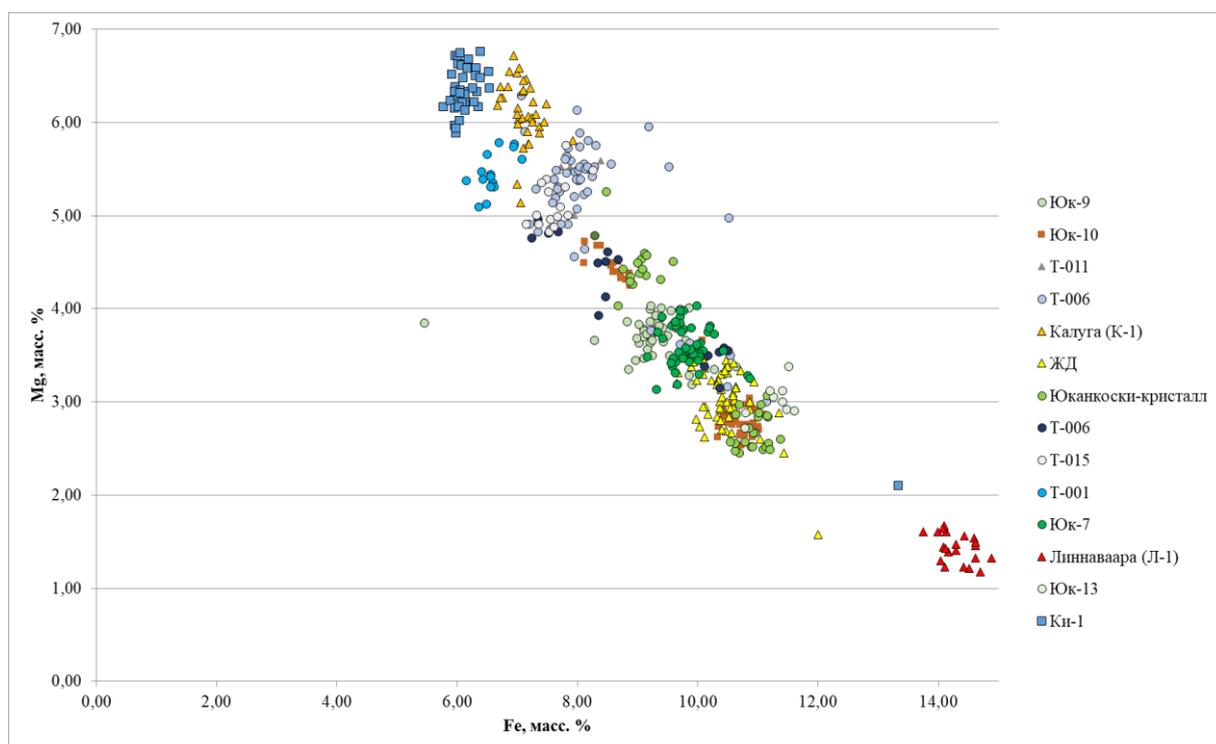


Рисунок 19. Диаграмма составов турмалинов из пегматитов и пегматоидов Северного Приладожья в координатах Mg – Fe.

Согласно положению точек составов на диаграмме заполнения позиции X все турмалины относятся к щелочной группе (рис. 20) (табл. 4-6)

На диаграмме четко прослеживается вытянутость полей составов турмалинов в сторону угла вакантной позиции.

Как отмечалось выше турмалины из пегматитов Калуга питкьярантской свиты выделяются по наибольшему содержанию кальция в позиции X, поле составов которых находится выше относительно полей составов других объектов (рис. 20), а вытянутость поля в сторону вакансии не проявлена.

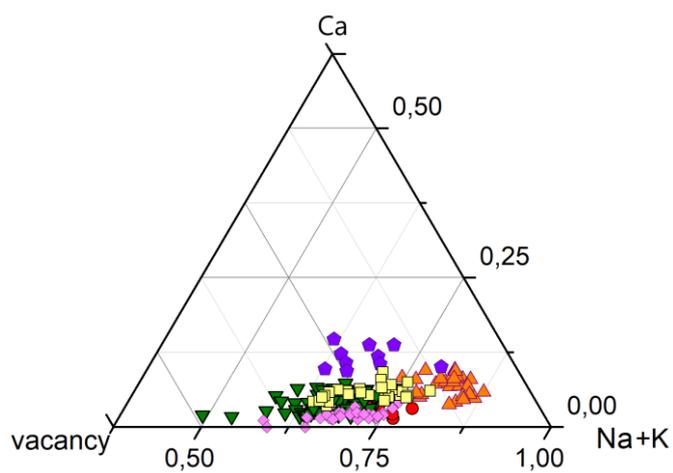
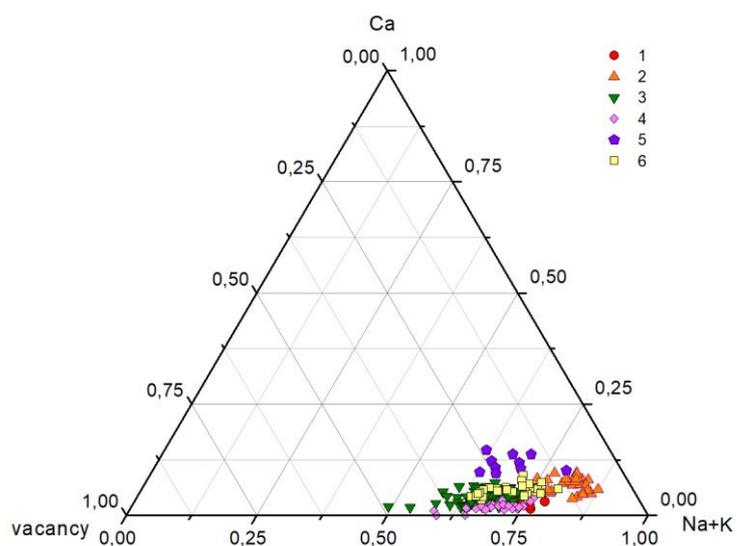


Рисунок 20. Положение точек составов турмалинов на тройной диаграмме соотношения катионов в позиции X.

Цифрами обозначены: 1 – месторождение Линнавара; 2 – Калуга; 3 – Юканкоски; 4 – акцессорный турмалин из пород ладожской свиты 5 – ЖД; 6 – Тетрамяки.

3.3 Минеральные включения в турмалинах

В результате микрозондового исследования зерен турмалина в них были выявлены в качестве включений и диагностированы 11 минералов (табл. 3).

Таблица 3. Минеральные включения исследуемых турмалинов.

Объект	Минеральные включения										
	Кварц	Апатит	Циркон	Титанит	Монацит	Танталит/колумбит	Микроклин	Альбит	Ильменит	Биотит	Ставролит
ЮК-7	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЮК-9	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-
ЮК-10	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T001	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-
T006	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-
T011	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
T015	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-
К-1	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-
ЖД-1	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-
Ки-1	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+

Наиболее распространены в виде минеральных включений циркон (табл. 7) и апатит (рис. 21). Включения этих минералов присутствуют в турмалинах всех изученных объектов.

Наибольшее разнообразие включений было выявлено в аксессуарных турмалинах ладожской свиты (Ки1). Самые примечательные из них – это включения титанита, ставролита, ильменита и монацита (табл. 9). А вот включений кварца в аксессуарном турмалине ладожской свите не обнаружено.

Примечательны турмалины из пегматитов Калуги. В одном зерне было обнаружено включение минерала тантало-ниобата (табл. 8).

Интересно отметить, что включения монацита присутствуют только в аксессуарном турмалине из пород ладожской свиты и турмалине из пегматоида Тетрамяки, при этом в последнем наибольшее количество включений монацита зафиксировано в образце Т-015–отобранном непосредственно на контакте (рис. 21).

Самыми «бедными» на включения оказались турмалины дифференцированных пегматитов Юканкоски. В качестве включений здесь обнаружены: кварц, апатит, циркон, микроклин и биотит.

В турмалинах из пегматита Линновара минеральные включения не обнаружены, хотя в самом пегматите известна тантал-ниобиевая минерализация.

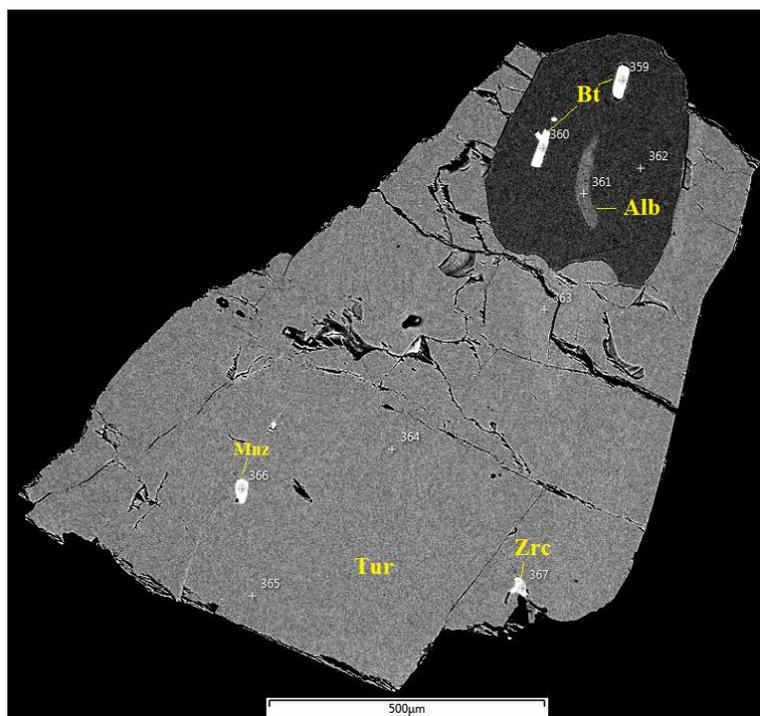


Рисунок 21. Электронное изображение включений монацита, циркона и апатита в турмалине из пегматоида Тетрамяки (обр. Т-015).
Условные обозначения (Alb – альбит, Bt – биотит, Mnz – монацит, Tur – турмалин, Zrc – циркон.)

Таблица 7. Химический состав циркона (обр. Т-015)

Компонент	Содержание, масс %
O	33,61
Mg	0,06
Si	14,86
Zr	46,82
Hf	1,26
Сумма	96,61

Таблица 8. Химический состав тантал-ниобата (Л-1)

Название спектра	Спектр 200
O	23,59
Si	6,08
Ca	3,17
Ti	1,81
Fe	2,18
Y	1,74
Nb	13,72
Ce	2,14
Nd	0,78
Ta	17,27
Th	1,52
U	4,73

Таблица 9. Химический состав монацита (обр. Т-015)

Компонент	Содержание, масс %
Na	0,37
P	29,5
Ca	1,06
La	13,78
Ce	26,96
Pr	2,26
Nd	10,9
Sm	1
Th	5,05
Сумма	90,87

3.4 Особенности примесного состава турмалинов на основе анализа ICP-MS

Пробы, подготовленные для проведения аналитических исследований с целью определения элементов-примесей в турмалинах, были переданы в аналитическую лабораторию в середине марта, однако в связи с введением режима «самоизоляции», лаборатория остановила свою работу и на сегодняшний день – 18 мая 2020г. – мы все еще ожидаем результатов. Если данные аналитических исследований будут предоставлены нам в ближайшее время, материалы по этому разделу работы будут включены в доклад-презентацию.

3.5 Выводы

1. Изученные турмалины из пегматитов и пегматоидов Северного Приладожья принадлежат к минералам ряда шерл-дравит и принадлежат к натровой группе с незначительным количеством Са в позиции X. Среди видообразующих элементов наибольшие вариации прослеживаются в содержаниях Fe, Mg, Ti, в меньшей степени Al и Ca.

2. Турмалины из пегматоидов Тетрамяки, образованным в результате плавления *in situ* пород ладожской серии, характеризуются по сравнению с турмалинами исходных пород снижением (от краев пегматоида к его центральной части) содержаниями Mg, и, в меньшей степени Al, увеличением содержаний Fe. Содержание Са резко пониженное в турмалинах краевой части пегматоида по сравнению с турмалинами из пород ладожской свиты, по мере удаления от контакта, стабильно возрастает, хотя и незначительно. Такая же картина наблюдается и для титана. Содержания Na варьируют незначительно.

3. По сравнению с турмалином пегматоида Тетрамяки турмалин из пегматита Юканкоски, вмещающими породами для которого служат те же самые породы ладожской серии еще более железистый и менее магниальный, содержания Ti в турмалинах уменьшается в направлении от контакта к центральной части пегматита, при стабильном возрастании концентраций Al и Fe. Содержания Na практически не варьируют и сопоставимы с таковыми в турмалинах пегматоида Тетрамяки.

4. Состав турмалинов зависит от условия образования и литологического состава вмещающих пород (Гореликова, 1988). Для изученных турмалинов влияние состава, вмещающих отражается, в первую очередь, на соотношении в их составе Fe и Mg. Для турмалинов из пегматитовых тел, локализованных в толще питрярантской свиты среди амфиболитов характерны более высокие содержания Mg, чем для турмалинов, локализованных в породах ладожской серии. Интересно отметить, что турмалин из пегматита Линнаваара,

располагающегося на контакте пород гранито-гнейсового купола и питкьярантской свиты характеризуется самыми высокими содержаниями Fe и самыми низкими Mg, Ti и Ca, а вот содержания Al в нем сопоставимы с содержанием этого элемента в турмалине из пород ладожской серии локализованных в ней пегматоидов и пегматитов.

5. Согласно существующим представлениям на содержание Na в турмалинах влияют химические свойства флюида, а именно его кислотность и активность Na в них (Прибавкин, Замятин, 2016). Исходя из таких представлений, пегматиты Калуга во вмещающих породах питкьярантской свиты испытали., наибольшее влияние водных растворов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В силу форс-мажорных обстоятельств, связанных с режимом «самоизоляции» на настоящий момент, не удалось выполнить важную часть исследования – изучить состав элементов-примесей в турмалинах из пегматитов и пегматоидов Северного Приладожья. Тем не менее, полученные на основе изучения турмалина методом микрозондового анализа результаты позволили сделать ряд выводов и скорректировать направление дальнейших исследований. Так, представляется необходимым дополнить материал образцами акцессорных турмалинов из пород территории Северного Приладожья, в частности, гранито-гнейсовых куполов и Салминского массива гранитов-рапакиви, а также пород ладожской серии, поскольку в работе они представляют только часть разреза. Также возможно провести сравнение изученных турмалинов с турмалинами других объектов сходного генезиса, в том числе с различной рудной специализацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балтыбаев Ш.К.. Геология и петрология свекофеннид Приладожья. / Ш.К. Балтыбаев, В.А. Глебовицкий, И.В. Козырева и др. – СПб.: Изд-во СПб ун-та 2000. – 198 с.
2. Бескин С.М., Марин Ю.Б. О классификации гранитных пегматитов и пегматитоносных гранитовых систем // ЗМРО. 2017. Ч. CXLVI, №6
3. Бискэ Г.С. Геология России. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2019. – с. 178-187
4. Булах А. Г. Изоморфизм и выбор названия минерала // Записки РМО. 2009. №3. С. 108–111.
5. Булах А. Г., Золотарёв А. А., Кривовичев В. Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералогия. — СПб. Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2014. 133 с.
6. Верещагин О.С. Кристаллохимия природных и синтетических турмалинов, содержащих 3d элементы: диссертация на соискание учёной степени к. г.-м. н. по специальности минералогия, кристаллография. Санкт-Петербургский гос. ун-т, Санкт-Петербург, 2015.
7. Воинов А.С., Котова И.К. Геология и геологические экскурсии в районе Импилахтинского учебного полигона: учеб. -метод. руководство по студенческой геологической практике / А.С. Воинов, И.К. Котова. – СПб.: С.-Петербур. гос. ун-т, 2012. – 40 с.
8. Гордиенко В.В. Гранитные пегматиты (рудные формации, минералого-геохимические особенности, происхождение, поисково-оценочные критерии). СПб.: Изд-во СПбГУ. 1996. – 272 с.
9. Гореликова Н.В. Парагенезисы микроэлементов турмалина оловорудных формаций. / Н.В. Гореликова. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. 128 с.
10. Гусев А. И. Геохимия турмалина грейзенов и пегматитов Горного Алтая / А. И. Гусев. – Томск: Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2018. Т. 329. №6. С 31-42.
11. Егоров А.В. Геологическая позиция и вещественный состав редкометалльных пегматитов месторождения Пюттюмяки (Северное Приладожье, Карелия): магистерская диссертация по направлению «Геология» С.-Петербург. гос. университет, Санкт-Петербург, 2018.
12. Прибавкин С.В., Замятин Д.С. Химический состав турмалина Березовского месорождения: ИГГ УрО РАН, 2016. С. 141-142.
13. Розанов К.И., Смирнова Н.В., Вороновский С.Н. Радиологический возраст докембрийских гранитоидных формаций и оловянно-полиметаллического оруденения в Северном Приладожье (по данным К-Ar метода) // Геохронология Восточно-Европейской

- платформы и сочленения Кавказско-Карпатской системы / АН СССР. – М.: Изд. АН СССР, 1978. – С. 114-134.
14. Свириденко Л. П. Ладожская вулкано-тектоническая структура (геология, вулканоплутанизм, тектоника) / Л. П. Свириденко.- Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. - 82-93 с.
 15. Lahtinen R., Hölttä, P., Kontinen, A., Niiranen, T., Nironen, M., Saalman, K., Sorjonen-Ward, P. Tectonic and metallogenic evolution of the Fennoscandian Shield: Key questions with emphasis on Finland (Review) // Episodes. 2008. Vol. 31, No. 1. P. 13-19
 16. Fedotova M. A., Khramov A. N., Pisakin B. N. and Priyatkin A. A.. Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield // Geophys. J. 1999. Vol. 137, P. 691–712
 17. Bergha S.G., Corfub F., Nadezhda Priyatkinaa, Kulleruda K., Myhr P.I. Multiple post-Svecofennian 1750–1560 Ma pegmatite dykes in Archaean-Palaeoproterozoic rocks of the West Troms Basement Complex, North Norway: Geological significance and regional implications // Precambrian Research. 2015. Vol. 266, P. 425–439, DOI: 10.1016/j.precamres.2015.05.035
 18. Valkama M., Sundblad K., Cook N. J., Ivashchenko V. I. Geochemistry and petrology of the indium-bearing polymetallic skarn ores at Pitkäranta, Ladoga Karelia, Russia // Miner Deposita. 2016. Article. 17 p. DOI 10.1007/s00126-016-0641-4
 19. Водопады Северного Приладожья [Электронный ресурс]. // tag.spb.ru: «Диагональный мир»: журнал о туризме. URL: <http://www.tag.spb.ru/tourism/falls/waterfall.html> (дата обращения: 23.01.2020)
 20. Grew, E.S., Krivovichev, S.V., Hazen, R.M., and Hystad, G. Evolution of structural complexity in boron minerals. // Canadian Mineralogist. 2016. Vol. 54, P. 125–143.
 21. Bosi F. Tourmaline crystal chemistry. // American Mineralogist, 2018, Vol. 103, P. 298-306.
 22. 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, Vol. 96, P. 895–913
 23. Henry D. J., Nova'k M., Hawthorne F. C., Ertl A., Dutrow B. L., Uher P. and Pezzotta F. Erratum: nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist, 2013, Vol. 98, 524 p.

24. Shannon, R. D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides // Acta Crystallographica Section A, V. 32, № 5, 1976, P. 751–767.
25. Yang, S.-Y., Jiang, S.-Y., Zhao, K.-D., Dai, B.-Z., & Yang, T. (2015). Tourmaline as a recorder of magmatic–hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China. Contributions to Mineralogy and Petrology, 170(5-6).
26. Отчет по учебной геологической практики студентов 3 курса, СПбГУ, ИНОЗ, Импилахти, 2018, 106 с.
27. Отчет о прохождении учебной геологической практики по структурному и геохимическому картированию студентов 3 курса, СПбГУ, ИНОЗ, Импилахти, 2019, 111 с.
28. Л. Н. Потрубович, О.Н. Анищенко. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Лист Р-36-XX, ВСЕГЕИ, 1958.
29. Акцессорные минералы [Электронный ресурс]: Информационный некоммерческий ресурс. 2019. URL: <http://spb-sovtrans.ru/petrografiya/276-akcessornye-mineraly.html> (дата обращения: 01.02.2020)

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 4. Представительные валовые составы (масс. %) и подсчитанные формулы турмалинов из пегматитов Юканкоски.

Номер спектра	4	18	33	50	57	67	69	421	426	480	482	487
Название образца	ЮК-9(1)	ЮК-9(1)	ЮК-9(2)	ЮК-9(2)	ЮК-9(2)	ЮК-9	ЮК-9	ЮК-7	ЮК-7	ЮК-13	ЮК-13	ЮК-13
B*	11,17	14,4	11,63	14,49	14,74	12,89	13,97	0	0	8,48	0	12,91
Na ₂ O	2,07	1,77	2,01	2,14	2	2,04	2,07	1,69	1,83	2,14	2,15	2,05
MgO	3,47	4,04	4,02	3,87	3,31	4,36	4,53	3,75	3,57	3,36	2,97	3,12
Al ₂ O ₃	32,93	33,77	34,95	33,36	32,63	32,4	32,07	35,75	36,19	34,58	33,25	34,01
SiO ₂	33,9	34,87	36,68	34,4	33,92	34,62	33,72	37,86	38,12	36,63	34,98	35,56
CaO	0,24	0,29	0,38	0,28	0,14	0,27	0,29	0,17	0,22	0,15	0,22	0,2
TiO ₂	0,45	0,35	0,49	0,47	0,39	0,8	0,61	0	0,19	0,42	0,48	0,33
Cr ₂ O ₃	0,09	0,0	0	0	0,09	0	0	0	0	0,08	0	0
FeO	8,98	9,23	9,73	9,38	9,87	8,73	8,12	10,17	10,02	11,51	11,38	11,21
Сумма	93,29	98,71	99,9	98,39	97,09	96,1	95,38	89,39	90,14	97,34	85,43	99,4
Формульные коэффициенты нормализованные на T+Y+Z=15												
B*	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Si	5,93	5,90	5,96	5,88	5,92	5,95	5,91	6,04	6,04	5,95	5,93	5,93
^[iv] Al	0,07	0,10	0,04	0,12	0,08	0,05	0,09	0	0	0,05	0,07	0,07
Общее T	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,04	6,04	6,00	6,00	6,00
Ti	0,06	0,04	0,06	0,06	0,05	0,10	0,08	0,00	0,02	0,05	0,06	0,04
^[vi] Al	6,71	6,63	6,65	6,61	6,63	6,52	6,54	6,71	6,77	6,56	6,58	6,62
Cr	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Mg	0,90	1,02	0,97	0,99	0,86	1,12	1,18	0,89	0,84	0,81	0,75	0,78
Fe*	1,31	1,31	1,32	1,34	1,44	1,26	1,19	1,36	1,33	1,56	1,61	1,56
Сумма Y+Z	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,96	8,96	9,00	9,00	9,00
Na	0,70	0,58	0,63	0,71	0,68	0,68	0,70	0,52	0,56	0,67	0,71	0,66
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,04	0,05	0,07	0,05	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04
Вакансия позиции X	0,25	0,37	0,30	0,24	0,30	0,27	0,24	0,45	0,40	0,30	0,25	0,30
Сумма X	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Примечание: Структурные формулы рассчитаны на основе 15 катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях (T+Z+Y) кристаллической решетки турмалина.

Таблица 5. Представительные валовые составы (масс. %) и подсчитанные формулы турмалинов из пегматитов ЖД.

Номер спектра	243	249	255	265	292	295
Название образца	GD1	GD1	GD1	GD1	GD1	GD1
B*	10,9	12,15	12,0	0	15,35	11,92
Na ₂ O	2,1	2	2,0	2,26	1,76	1,63
MgO	2,8	2,99	2,8	3,36	2,95	2,66
Al ₂ O ₃	32,5	34,24	32,4	32,33	33,19	35,14
SiO ₂	33,6	35,21	33,6	34,62	33,9	35,58
CaO	0,1	0	0,1	0,17	0	0,08
TiO ₂	0,8	0,67	0,8	0,94	0,43	0,25
Cr ₂ O ₃	0,1	0	0,0	0	0	0
FeO	10,3	10,87	10,0	9,89	10,09	10,92
Сумма	93,2	98,12	93,6	83,58	97,67	98,19
Формульные коэффициенты нормализованные на T+Y+Z=15						
B*	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Si	5,91	5,89	5,94	5,99	5,90	5,91
^[iv] Al	0,09	0,11	0,06	0,01	0,10	0,09
Общее T	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Ti	0,10	0,08	0,11	0,12	0,06	0,03
^[vi] Al	6,63	6,65	6,68	6,58	6,71	6,79
Cr	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,74	0,75	0,74	0,87	0,77	0,66
Fe*	1,51	1,52	1,47	1,43	1,47	1,52
Сумма Y+Z	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Na	0,71	0,65	0,67	0,76	0,59	0,53
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,02	0,00	0,02	0,03	0,00	0,01
Вакансия позиции X	0,26	0,35	0,31	0,21	0,41	0,46
Сумма X	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Примечание: Структурные формулы рассчитаны на основе 15 катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях (T+Z+Y) кристаллической решетки турмалина.

Таблица 6. Представительные валовые составы (масс. %) турмалинов из пегматитов Калуги и карьера Линнаваара.

Компонент	Номер спектра									
	189	201	213	224	225	462	464	466	467	468
	Пегматиты Калуга					Карьер Линнаваара				
B*	12,11	15,0	12,61	7,88	9,9	13,0	14,1	8,27	0	9,98
Na ₂ O	2,5	2,6	2,57	2,5	2,6	2,4	2,2	2,34	2,33	2,25
MgO	6,1	6,3	6,01	6,49	5,7	1,4	1,3	1,33	1,16	1,54
Al ₂ O ₃	32,15	31,9	32,28	31,74	32,7	33,0	32,4	33,2	33,35	33,36
SiO ₂	35,48	35,3	35,23	35,2	35,5	34,4	33,9	35,12	35,38	35,85
CaO	0,4	0,4	0,23	0,45	0,2	0,2	0,2	0,08	0,12	0,19
TiO ₂	0,64	0,6	0,41	0,77	0,4	0,5	0,4	0,28	0,28	0,43
Cr ₂ O ₃	0	0,1	0,1	0	0,0	0,0	0,0	0,09	0	0
FeO	7,18	6,8	7,26	6,86	7,2	14,3	14,1	14,61	14,65	14,61
Сумма	96,55	99,0	96,69	91,88	94,1	99,1	98,5	95,33	87,28	98,22
Формульные коэффициенты нормализованные на T+Y+Z=15										
B*	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Si	5,98	5,98	5,96	5,96	5,99	5,89	5,91	5,99	5,94	5,97
^[iv] Al	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01	0,11	0,09	0,01	0,06	0,03
Общее T	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Ti	0,08	0,08	0,05	0,10	0,05	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04
^[vi] Al	6,37	6,36	6,39	6,29	6,50	6,53	6,56	6,58	6,55	6,61
Cr	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Mg	1,53	1,59	1,51	1,64	1,44	0,36	0,34	0,32	0,34	0,29
Fe*	1,01	0,96	1,03	0,97	1,01	2,05	2,05	2,07	2,07	2,07
Сумма Y+Z	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Na	0,82	0,85	0,84	0,82	0,84	0,79	0,74	0,70	0,77	0,76
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,07	0,08	0,04	0,08	0,04	0,03	0,04	0,03	0,01	0,02
Вакансия позиции X	0,11	0,07	0,12	0,10	0,13	0,18	0,23	0,28	0,22	0,22
Сумма X	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Примечание: Структурные формулы рассчитаны на основе 15 катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях (T+Z+Y) кристаллической решетки турмалина.

Таблица 7. Представительные валовые составы (масс. %) турмалинов из пегматитов Тетрамяки и аксессуарных турмалинов ладожской свиты.

Объект	Турмалины Тетрамяки										Аксессуарный турмалин из пород ладожской свиты											
	№ спектра	390	393	394	404	147	148	163	177	125	363	494	496	501	507	508	519	530	537	538	539	
Образец	Т-001					Т-006					Т-011	Т-015	Ки-1									
В*	11,97	17,11	10,78	12,01	13,58	14,28	13,09	10,29	13,12	13,09	8,96	9,8	15,35	9,37	0	0	10,44	14,7	10,13	17,61		
Na ₂ O	1,95	1,91	1,85	2,25	2,34	2,22	2,13	2,39	2,04	1,97	2,2	1,9	1,93	1,96	0,55	2,06	2,13	2,1	2,02	1,82		
MgO	5,75	5,53	5,42	5,74	5,56	5,44	5,24	5,5	5,5	5,29	6,6	6,2	6,44	6,59	1,78	6,39	6,48	6,1	6,32	6,01		
Al ₂ O ₃	35,04	33,13	32,25	32,54	32,3	30,42	33,75	29,35	32,8	32,97	34,12	33,3	32,43	33,98	52,54	33,55	33,97	31,9	32,53	31,1		
SiO ₂	36,92	34,45	34,19	35,13	35,43	34,46	36,04	35,24	35,67	35,65	36,51	35,3	34,54	37,01	26,59	36,41	36,69	34,5	35,15	33,06		
CaO	0,21	0,23	0,22	0,28	0,3	0,34	0,31	0,33	0,35	0,32	0,68	0,8	0,67	0,68	0	0,57	0,79	0,6	0,52	0,51		
TiO ₂	0,41	0,45	0,53	0,91	1,46	1,52	0,65	1,54	0,55	1,03	0,86	0,9	0,68	0,86	0,62	0,79	0,67	0,7	0,96	0,63		
Cr ₂ O ₃	0,08	0,08	0	0,12	0,17	0	0,1	0,09	0	0,14	0	0,1	0	0	0,2	0	0	0	0,2	0,1		
FeO	6,94	6,57	6,44	6,51	8,1	8,24	7,71	9,52	7,66	7,53	6	6,1	5,98	6,07	14,15	6,28	6,38	6,1	6,04	5,99		
Сумма	99,28	99,46	91,68	95,49	99,23	96,93	99,02	94,26	97,68	97,97	95,93	94,4	98,01	96,53	96,42	86,06	97,55	96,7	93,87	96,83		
В*	3	3	3	3	3	3	3	3,00	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
Si	5,96	5,9	5,96	5,97	5,92	5,98	5,96	6,06	5,99	5,97	5,94	5,9	5,9	5,99	3,85	5,98	5,97	5,96	5,93	5,89		
^[iv] Al	0,04	0,1	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04	0	0,01	0,03	0,06	0,1	0,1	0,01	2,15	0,02	0,03	0,04	0,07	0,11		
Общее Т	6	6	6	6	6	6	6	6,06	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Ti	0,05	0,06	0,07	0,12	0,18	0,2	0,08	0,20	0,07	0,13	0,11	0,11	0,09	0,1	0,07	0,1	0,08	0,09	0,12	0,08		
^[vi] Al	6,62	6,58	6,58	6,49	6,28	6,2	6,55	5,55	6,48	6,48	6,48	6,47	6,42	6,48	6,81	6,48	6,48	6,47	6,41	6,41		
Cr	0,01	0,01	0	0,02	0,02	0	0,01	0,01	0	0,02	0	0,01	0	0	0,02	0	0	0	0,03	0,01		
Mg	1,38	1,41	1,41	1,45	1,38	1,41	1,29	1,41	1,38	1,32	1,6	1,55	1,64	1,59	0,38	1,56	1,57	1,56	1,59	1,59		
Fe*	0,94	0,94	0,94	0,93	1,13	1,2	1,07	1,37	1,08	1,05	0,82	0,86	0,85	0,82	1,71	0,86	0,87	0,87	0,85	0,89		
Сумма Y+Z	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,94	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00		
Na	0,61	0,63	0,63	0,74	0,76	0,75	0,68	0,80	0,66	0,64	0,69	0,62	0,64	0,62	0,15	0,66	0,67	0,7	0,66	0,63		
K	0	0	0	0	0	0	0	0,80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ca	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,12	0,15	0,12	0,12	0	0,1	0,14	0,11	0,09	0,1		
Вакансия позиции X	0,35	0,32	0,33	0,21	0,19	0,19	0,26	0,14	0,27	0,3	0,19	0,24	0,24	0,27	0,85	0,24	0,19	0,19	0,24	0,27		
Сумма X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		

Примечание: Структурные формулы рассчитаны на основе 15 катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях (Т+Z+Y) кристаллической решетки турмалина.

Таблица 8. Представительные валовые составы (масс. %) и формулы зонального турмалина из пегматита Юканкоски (шайба №6).

Компонент	Номер спектра								
	299	301	303	305	308	313	315	318	320
Зона А									
B*	0	15,84	13,39	8,24	11,68	0	13,84	10,19	12,13
Na ₂ O	1,72	1,75	1,67	1,7	1,71	1,71	1,95	2,32	2,23
MgO	2,45	2,46	2,53	2,54	2,48	2,5	2,97	2,85	5,25
Al ₂ O ₃	34,86	33,81	34,52	34,72	34,04	34,25	33,38	34,72	32,81
SiO ₂	37,01	34,92	35,13	36,55	35,24	36,3	34,47	36,36	35,58
CaO	0,08	0,06	0	0	0	0,08	0,15	0,11	0,36
TiO ₂	0,37	0,26	0,1	0,17	0,1	0,23	0,43	0,49	0,7
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	11,04	10,7	10,89	11,16	10,62	10,59	10,7	10,62	8,48
Сумма	87,54	99,8	98,24	95,06	95,87	85,65	97,88	97,66	97,54
Формульные коэффициенты нормализованные на T+Y+Z=15									
B	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Si	6,08	5,98	5,94	6,04	6,01	6,09	5,91	6,01	5,95
Al	0	0,02	0,06	0	0	0	0,09	0	0,05
Sum T	6,08	6,00	6,00	6,04	6,01	6,09	6,00	6,01	6,00
Ti	0,05	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,06	0,06	0,09
Al	6,76	6,81	6,81	6,77	6,83	6,77	6,65	6,76	6,42
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,60	0,63	0,64	0,63	0,63	0,62	0,76	0,70	1,31
Fe	1,52	1,53	1,54	1,54	1,51	1,49	1,53	1,47	1,19
Sum Y+Z	8,92	9,00	9,00	8,97	8,99	8,91	9,00	8,99	9,00
Na	0,55	0,58	0,55	0,54	0,57	0,56	0,65	0,74	0,72
Ca	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,02	0,06
X-vac	0,44	0,41	0,45	0,46	0,43	0,43	0,32	0,24	0,21
Sum X	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 8 (продолжение)

Компонент	Номер спектра								
	322	324	325	326	331	332	334	335	337
	Зона А			Зона В					
В*	7,81	14,69	13,45	0	13,87	11,84	13,79	8,62	11,77
Na ₂ O	2,04	1,85	2,08	2,12	2,09	2,14	2,19	1,92	2,09
MgO	2,94	3,07	4,53	4,34	4,35	4,59	4,5	4,02	4,25
Al ₂ O ₃	33,57	33,2	33,18	32,55	33,31	33,56	33,12	31,01	32,48
SiO ₂	35,63	34,86	35,24	35,3	35	35,72	35,45	33,4	34,44
CaO	0,12	0,12	0,21	0,22	0,16	0,28	0,29	0,24	0,27
TiO ₂	0,53	0,61	0,68	0,65	0,6	0,68	0,65	0,59	0,66
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0,09	0	0	0	0
FeO	11,03	11,16	9,06	8,73	8,89	9,11	9	8,67	8,91
Сумма	93,68	99,55	98,43	83,9	98,38	97,91	98,99	88,47	94,86
Формульные коэффициенты нормализованные на T+Y+Z=15									
B	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Si	5,99	5,92	5,93	6,02	5,92	5,94	5,96	5,99	5,94
Al	0,01	0,08	0,07	0	0,08	0,06	0,04	0,01	0,06
Сумма T	6,00	6,00	6,00	6,02	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Ti	0,07	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
Al	6,65	6,56	6,50	6,55	6,56	6,51	6,52	6,55	6,54
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,74	0,78	1,14	1,10	1,10	1,14	1,13	1,07	1,09
Fe	1,55	1,58	1,27	1,25	1,26	1,27	1,27	1,30	1,28
Сумма Y+Z	9,00	9,00	9,00	8,98	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Na	0,67	0,61	0,68	0,70	0,69	0,69	0,71	0,67	0,70
Ca	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
Вакансия позиции X	0,31	0,37	0,28	0,26	0,29	0,26	0,23	0,29	0,25
Сумма X	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Примечание: Структурные формулы рассчитаны на основе 15 катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях (T+Z+Y) кристаллической решетки турмалина.