

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*



ДОКУЧИЦ Эмилия Юрьевна

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД  
ЧАРОИТОВОГО КОМПЛЕКСА МУРУНСКОГО МАССИВА**

25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков  
полезных ископаемых

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
доктор геолого-минералогических наук  
Владыкин Н.В.

Иркутск

2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МУРУНСКОГО МАССИВА</b> .....	9
1.1 История открытия чароита .....	10
1.2 Геологическое положение Мурунского массива .....	11
1.3 Геологическое положение чароитовых пород .....	16
<b>ГЛАВА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД</b> .....	21
2.1 Породы Мурунского массива .....	21
2.2 Особенности химического состава чароитовых пород .....	22
<b>ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ПЕТРО- ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД</b> .....	31
3.1 Общая характеристика чароитовых пород .....	31
3.2 Парагенезисы минералов чароитовых пород .....	32
3.3 Составы минералов чароитовых пород.....	35
3.4 Редкие и уникальные минералы .....	66
3.4 Пеотрохимические особенности минералов чароитовых пород.....	72
<b>ГЛАВА 4. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД И ИХ МИНЕРАЛОВ</b> .....	76
4.1 Геохимические особенности чароитовых пород .....	76
4.2 Геохимические особенности минералов чароитовых пород.....	86
<b>ГЛАВА 5. ГЕНЕЗИС, ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВОЗРАСТ И МАНТИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ, ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД</b> .....	106
5.1 Генезис чароитовых пород.....	106
5.2 Термобарогеохимические исследования.....	111
5.3 Мантийные источники магматизма массива.....	124
<b>ВЫВОДЫ</b> .....	126
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	127

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность исследований.**

Мурунский массив является уникальным представителем ультракалиевых щелочных пород. Это крупнейший массив с калиевой агпаитностью, с чем и связаны необычные породы и руды в этом массиве. Одним из наиболее интересных полезных ископаемых Мурунского массива является чароит.

Чароит давно используется как поделочный камень и вызывает интерес исследователей, благодаря большому разнообразию текстурно-структурных характеристик, однако, он изучен недостаточно. В литературе мало анализов чароитовых пород и минералов чароитовых пород. Чароитовые породы известны уже более сорока лет, однако еще нигде в мире больше чароит не найден. Это связано также с уникальностью химизма самого массива и произошедших процессов образования пород. В настоящее время все еще существуют различные точки зрения на генезис этого минерала. Ранее исследователи считали чароит минералом метасоматического происхождения по кварцевым песчаникам вмещающих пород. Однако в чароитовых породах не выражена метасоматическая зональность, и чтобы они образовались по кварциту (95% SiO<sub>2</sub>), все компоненты необходимо привнести. В настоящее время наиболее достоверно говорить о генезисе чароитовых пород можно, используя и термобарогеохимические методы. Первые данные о расплавных включениях в чароитовых и родственных им карбонатитовых образованиях, показали высокие начальные температуры их кристаллизации, от 750°C [Владыкин и др., 1994; Воробьев и др., 1983].

Специалистом по термобарогеохимии из Новосибирска А.А. Боровиковым на нашем материале были продолжены исследования, подтвердившие наличие как расплавных, так и первичных флюидных включений, что говорит об интенсивных процессах расслоения в этих породах на несколько расплавных и флюидных жидкостей [Borovikov et al., 2016].

В настоящее время во многих минералах сложного состава исследованы физические и физико-химические свойства, которые используются в современной технике (например, адсорбционные и др.). Для этого необходимы детальные исследования минералов чароитовых пород. Чароит с его сложной структурой и разнообразием потенциально обменных катионов в этом отношении тоже перспективный объект.

Кроме того, чароитовые породы образовались совместно с карбонатитами и содержат много полезных редкометалльных компонентов ( $TR_2O_3 > 0.5\%$ ). В этом аспекте геохимия чароитовых пород совсем не изучалась.

### **Цель и задачи исследований:**

Детальные исследования химического состава и геохимических особенностей чароитовых пород и вопросы их происхождения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение вариаций составов чароитовых пород и слагающих их минералов;
2. Выявление петрохимических особенностей чароитовых пород и минералов чароитовых пород с помощью диаграмм парных и тройных корреляций породообразующих элементов в процессе дифференциации этих пород;
3. Геохимические особенности поведения редких элементов и их накопление в конечных продуктах при дифференциации пород;
4. Решение генетической проблемы образования чароитовых пород с помощью изучения их особенностей образования и темобарогеохимических исследований;

**Объект исследования** - чароитовые породы Мурунского ультракалиевого щелочного массива Алданского щита юго-восточной части Сибирской платформы.

**Методы исследования.** Для анализов использовались, как образцы чароитовых пород, так и образцы самого чароита, а также образцы различных

минералов чароитовых пород, - уникальных (тинаксит, франкаменит, К-арфведсонит), редких (агреллит, юкспорит, токкоит) и др.

Для исследований использовались аналитические ресурсы института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ICP-MS, РФА, спектральные методы анализа, рентгеноструктурный анализ и др.)

Пробоподготовка проводилась по известной геохимической методике обработки проб (дробление, квартование, истирание, промывка больших проб до 20 кг на концентрационном столе для получения шлиховых концентратов). Полученные шлихи разделялись в тяжелых жидкостях (бромформ, клеричи) и на электромагнитных сеператорах СИМ-1 и Ролик.

*Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, inductively coupled plasma mass-spectrometry) определялось содержание редких и рассеянных элементов. ICP-MS - это метод определения малых (мкг/кг) и сверхмалых (нг/кг и менее) концентраций элементов, а также их изотопного состава в различных объектах. Метод позволяет проводить определение почти всех элементов периодической системы в одной пробе.*

*Методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) определялся химический состав пород чароитового комплекса.*

*Химическим силикатным анализом определялись содержания породообразующих элементов в минералах: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, MnO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, SrO, BaO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>.*

Температура выделения воды определялась *термическим методом* на дериватографе.

**Фактический материал.** Для выполнения исследования автором использовались каменные материалы музея щелочных пород, собранные научным руководителем диссертационной работы д.г.-м.н. Н.В. Владыкиным в ходе полевых работ в 1980-2015 годах.

В исследованиях было задействовано более 200 проб чароитовых пород, из которых извлекались слагающие их минералы. Просмотрено более 200 шлифов.

Выполнено более 300 химических анализов пород и минералов, определены концентрации редких элементов в породах и минералах.

**Научная новизна.** Впервые получен большой объем надежных аналитических данных по уникальным чароитовым породам и слагающим их минералам. Выполнено 49 силикатных анализов чароитовых пород, 63 анализа различных чароитов и редких минералов, впервые были получены данные по редким элементам в чароитах и редких минералах чароитовых пород (38 образцов). Впервые получены данные по физическим свойствам этих минералов (термограммы).

На основе парных и тройных корреляционных диаграмм выявлены особенности кристаллизации этих пород в процессе дифференциации. Построены треугольные диаграммы парагенезисов минералов в чароитовых породах. Совместно с А.А. Боровиковым проводились термобарогеохимические исследования минералов чароитовых пород, на основе которых был обоснован их магматический генезис.

Данная работа представляет собой комплексное исследование минералов чароитовых пород.

**Практическое значение.** Получены новые данные по составу и геохимии пород и минералов и их генезисе, на основе которых возможно обоснование критериев поисков этого ценного камнесамоцветного сырья. В чароитовых породах выявлены высокие, близкие к рудным, содержания редкоземельных элементов.

#### **Основные защищаемые положения**

1. Чароитовые породы по химическому составу аналогичны сиенитам с высокими (до 20%) содержаниями СаО и повышенными (первые проценты) Ва и Sr. Из-за различных P-T условий их кристаллизации, в разных участках месторождения наблюдаются вариации их составов, а средний состав приближается к составу закаленных (микрозернистых) чароитовых пород. Тренды

составов петрогенных элементов чароитовых пород свидетельствуют об их кристаллизации из единого расплав-флюида.

2. Поведение редких элементов в чароитовых породах аналогично поведению этих элементов в карбонатитах и силикатных породах Мурунского массива, что подтверждает их единое генетическое происхождение. Вариации содержания редких элементов в чароитовых породах различного минерального состава, образовавшихся в разных P-T условиях, незначительны, а их средние содержания отвечают закаленным чароитовым породам.

3. Чароитовые породы образовались из силикатно-карбонатного расплав-флюида, остаточного от кристаллизации пород массива, при его расслоении на силикатную составляющую (микроклиниты и микроклин-пироксеновые породы) и карбонатно-силикатную. Последняя разделяется снова на силикатную-чароитовую и карбонатную-карбонатитовую составляющие.

#### **Публикации и апробация работы**

Результаты диссертационной работы были опубликованы в 3 журнальных статьях: Borovikov A.A., Vladykin N.V., Borisenko A.S., **Dokuchits E.Yu.** «Genesis of Charoite Rocks of the Murunsky Massif (melt and fluid inclusion studies)». *Mineralogy and Petrology*, 2016 (в печати); **Докучиц Э.Ю.**, Владыкин Н.В. Вариации составов чароита и парагенных с ним минералов из чароитовых пород // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2016. № 2 (55). С. 51–60. DOI 10.21285/0301-108X-2016-55-2-51-60; **Докучиц Э.Ю.** Особенности минералогического и химического состава чароитовых пород Мурунского массива. «Вестник Иркутского государственного технического университета» №1(84), 2014. и 7 тезисах докладов конференций.

Отдельные разделы диссертации докладывались на Российских и международных научных конференциях. Среди них: 30<sup>th</sup> International Conference on “Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism” 29 sept. – 02 oct. 2014 г., Antalya, Turkey, (устный доклад); XXXI Конференция «Рудный

потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма», 7 октября 2014 г., Москва, (устный доклад); XXXII Международная конференция "Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов" 7-14 августа 2015 г., г. Апатиты, (устный доклад); Конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии-2013», 23-28 сентября 2013 г., (устный доклад) Доклад выбран для печати в журнале «Вестник ИрГТУ»; Конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии-2015» 21-26 сентября, (устный доклад); Всероссийская научно-техническая конференция «Геонауки-60». Актуальные проблемы геологии, планетологии и геоэкологии». ИрГТУ, институт недропользования. Иркутск, 2012, (устный доклад); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Геонауки-2013: актуальные проблемы изучения недр». НИИрГТУ, институт недропользования. Иркутск, 9-12 апреля, 2013 г., (устный доклад).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем - 134 страницы, включая 84 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 77 наименований.

### **Благодарности**

Работа выполнена в лаборатории геохимии щелочных пород Института геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН под руководством д. г-м. н. Н.В. Владыкина, которому автор выражает глубокую признательность за руководство работой и полезные комментарии во время написания диссертации, а также возможность работать с образцами, привезенными им во время полевых работ. Отдельную благодарность за выполненные анализы автор выражает аналитикам Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, и отдельно Митрофановой А.Ю., Зарубиной О.В., Ожогойной Т.В. и Погудиной Г.А. В процессе написания работа неоднократно обсуждалась с сотрудниками лаборатории 18.3.

## ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МУРУНСКОГО МАССИВА

Мурунский массив является уникальным представителем ультракалиевых щелочных пород. Это единственный в мире крупный массив с калиевой агпаитностью, с чем и связаны необычные породы и руды в этом массиве. По набору слагающих его пород, минералов и выявленных в последние годы типов месторождений и рудопроявлений (в том числе и минерала чароита), массив уникален. На массиве известен целый ряд месторождений и рудопроявлений (U, Au, Ti, сынныритов, апатитов, рихтерит-асбеста и др.). Одним из полезных ископаемых массива являются Ba-Sr «бенстонитовые» карбонатиты и чароитовые породы. С этими карбонатитами связаны барий-стронциевые руды в карбонатной форме, которые представляют экономический интерес и в настоящее время добываются. Выяснение условий образования уникального минерала чароита имеет большое научное и практическое значение [Владыкин, Царук, 2003].

Мурунский щелочной массив ультракалиевых псевдолейцитовых сиенитов расположен в северо-западной части Алданского щита (граница Иркутской области и Якутской АССР) и входит в группу мезозойских щелочных массивов Алданской щелочной провинции [Владыкин и др., 1983]. Породы мурунского щелочного комплекса сложены многочисленными (около 200) минералами, большинство из которых силикаты, кроме них встречаются карбонаты, оксиды и сульфиды. Остальные классы минералов представлены незначительно [Конев и др., 1996].

Особый интерес на Мурунском массиве представляет группа щелочных кальциевых силикатов, среди которых много новых и редких типов. Щелочные кальциевые силикаты - это группа сходных между собой не по структуре, а по составу силикатов. Среди минералов этой группы есть новые виды - чароит, токкоит, франкаменит и весьма редкие - агреллит, федорит, и более обычные - мизерит, пектолит и апофиллит. В пределах Мурунского массива большинство

этих минералов развито в значительных количествах и нередко они являются главной составляющей частью чароитсодержащих пород.

Чароитовые породы Мурунского массива известны уже более сорока лет, и нигде в мире больше чароит не найден. Это связано с уникальностью химизма самого массива и произошедших процессов образования пород. Чароит давно используется как поделочный камень, но изучен он еще недостаточно.

### **1.1 История открытия чароита**

Мурунский массив был открыт в 1948-1949 годах геологом ВСЕГЕИ В.Г. Дитмаром. Он определил чароитовые породы, как куммингтонитовые сланцы. С 1958 по 1964 г. на Мурунском массиве разведку U месторождения проводили ВСЕГЕИ и Сосновская экспедиция. В последние годы этих работ геолог Ю.Г. Рогов отобрал образец чароитовых пород и передал его на изучение минералогу Сосновской экспедиции В.П. Роговой. В этом образце она обнаружила новый Ti-силикат, который назвала тинакситом [Рогов и др., 1965], а чароит был определен как канасит. Красивым образцом заинтересовались в Байкалкварцсамоцветах, и Ю.Г. Рогов отправился на Мурунский массив с Ю.А. Алексеевым, и показал ему место взятия образца. Минерал «канасит» стали продавать за границу. В.П. Рогова продолжала изучать образец и доказала, что «канасит» является новым минералом, который она назвала чароитом (название было дано по р. Чара, протекающей недалеко от Мурунского массива) и подала заявку на открытие минерала в комиссию ВМО. Из комиссии ей вернули статью на доработку, а основные параметры нового минерала послали в международную комиссию. Пока В.П. Рогова в течение нескольких лет дорабатывала материал, в комиссию по новым минералам ВМО пришел бюллетень для голосования от американских исследователей по новому минералу, открытому в издании Байкалкварцсамоцветов. Так как данные по чароиту были уже ранее отправлены в международную комиссию, ВМО потребовала отменить голосование по американской заявке. В.П. Рогова срочно завершила статью и повторно подала ее в международную комиссию по новым минералам. За это время сменился

президент ИМА, им стал японец Като, к которому и попала новая заявка. Он обнаружил, что в первой заявке название минерала было указано как «чароит», а во второй – «чараит», и стал доказывать, что американские исследователи открыли минерал раньше В.П. Роговой. В данной ситуации ей пришлось согласиться на название «чароит».

Минерал под названием «чароит» был утвержден КНМ ММА в 1977 г. В период с 1974 по 1977 г. Чарской партией экспедиции №123 под руководством Ю.А. Алексеева было открыто несколько участков месторождения чароита. [Владыкин и др., 1983].

Месторождение чароита находится по обе стороны границы Иркутской области и Якутии, поэтому кроме компании «Байкалкварцсамоцветы» на Якутской территории начались работы по исследованию и добыче компанией «Востоккварцсамоцветы», которые также открыли несколько участков проявления чароита на территории Якутии. В период с 1979 года на месторождении работали исследователи следующих научных организаций: Институт геохимии СО РАН (Воробьев Е.И., Владыкин Н.В.), Институт земной коры СО РАН (Конев А.А.), Институт геологии СО РАН (Лазебник К.А.), ЛГУ (Булах А.Г., Евдокимов М.Д.), ВСЕГЕИ (Орлова М.П., Борисов Б.А.), ВНИИСИМС г. Александра (Смирнов А.А., Бухтиярова В.В.) и др.

## **1.2 Геологическое положение массива**

Мурунский массив расположен в северо-восточной части Иркутской области и является крупнейшим щелочным массивом Западно-Алданской провинции. Массив впервые обнаружен геологом ВСЕГЕИ В.Г. Дитмаром в 1948 году. В 1958–1964 годах на массиве проводились детальные работы ПГО «Сосновгеология» и ВСЕГЕИ, в ходе этих работ определена геологическая позиция Мурунского вулcano-плутона.

На космических снимках (рис. 1.1) на площади Мурунского массива выделяется кольцевая структура. Комплекс состоит из двух выходов массива – Большемурунский и Маломурунский (некоторыми авторами в пределах

Большемурунского выхода выделяется отдельно Дагалдынский массив), разделенных небольшой перемычкой вмещающих пород, и нескольких небольших выходов трахитов в Северном, Западном и Южном экзоконтакте массивов. Внедрение комплекса приурочено к пересечению двух региональных разломов докембрийского возраста (торгойского и кеме-кебектинского) и происходило во время мезозойской активизации Алнанского щита. Площадь массива занимает примерно 150 км<sup>2</sup>. Западная часть комплекса представлена К-На нефелиновыми, щелочными и кварцевыми сиенитами Большемурунского массива, восточная часть – ультракалийевыми породами Маломурунского массива.



Рис. 1.1 Космический снимок Мурунского щелочного массива с Google Earth

красным выделена кольцевая структура массива

В настоящей работе изучались породы Маломурунского выхода Мурунского массива. Геологическая схема его строения приведена на рис. 1.2.

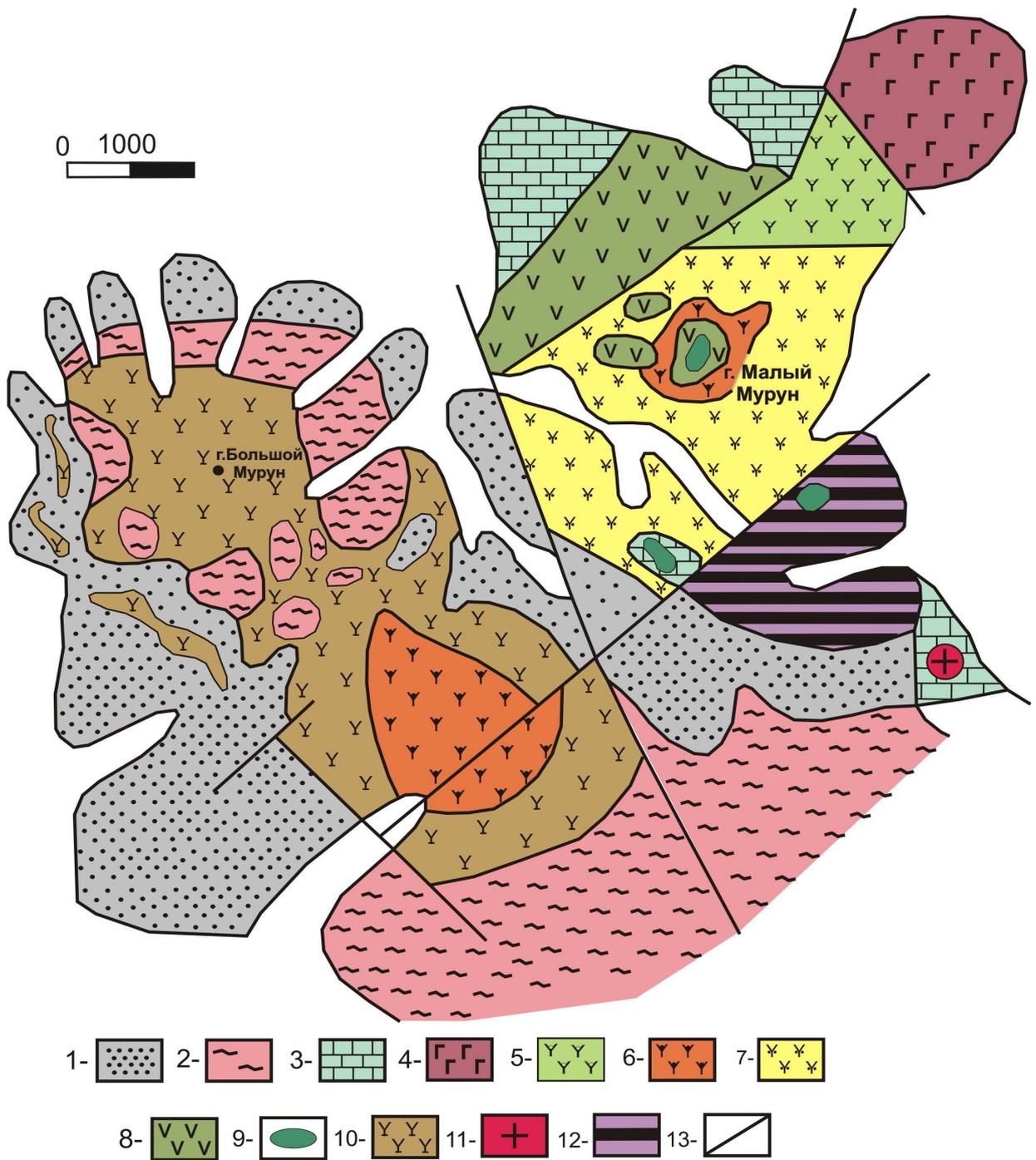


Рис.1.2 Геологическая схема Мурунского массива [Владыкин, 2009]

Вмещающие породы (1-3) 1 - протерозойские кварцевые песчаники, 2 -архейские гранитогнейсы, 3 - доломиты. Интрузивные породы (4-12): 4 - расслоенный комплекс биотит-пироксенитов, 5 - псевдолейцитовые сиениты, 6 - нефелиновые сиениты, 7 - щелочные сиениты, 8 - эффузивный комплекс лейцитовых фонолитов, лейцитовых лампроитов, 9 - эгириниты, 10 - щелочные и кварцевые сиениты, 11 - щелочные граниты, 12 - породы чароитового комплекса, 13 - разрывные нарушения.

Так как коренных выходов пород на Маломурунском массиве мало, учитывая значительные гидротермальные изменения по многочисленным тектоническим зонам, поверхностное выветривание пород и интенсивную горизонтальную расслоенность пород, на геологической карте довольно сложно достоверно отразить строение массива.

В ходе детального изучения Н.В. Владыкиным большого количества скважин (более 100), им была предложена следующая схема магматизма Маломурунского массива [Владыкин и др., 1983; Владыкин, 2001; Владыкин, 2005]:

**Ранней фазой** сложена северо-восточная часть массива, так называемая Мартовская геофизическая аномалия, которая представлена следующими породами:

1) кумулятная часть – выделения оливин-шпинелевых пород с зонами оливин-пироксен-флогопит-монтichelлитовых пород с мелилитом, встречающиеся в виде ксенолитов в биотитовых пироксенитах. По данным термобарогеохимических исследований, кристаллизация этих пород происходила при температуре 1500-1200°C. [Панина, 1985].

2) расслоенный комплекс ультракалийевых пород, состоящий из Vt-пироксенитов (Ap+Vt+Py), оливиновых лампроитов (Ol+Vt+Py+Плц+Fsp), К-ийолитов (Gr+Vt+Py+Ks), лейцитовых фергуситов (Плц+Vt+Py) и шонкинитов (Fsp+Vt+Py) (сокращения: Ap – апатит, Vt – слюда, Py – пироксен, Ol – оливин, Плц – псевдолейцит, Fsp-К – полевой шпат, Gr – гранат, Ks – кальсилит).

**Главная фаза** занимает центральную часть массива. Она сложена горизонтально расслоенным комплексом различных псевдолейцитовых, Fsp-кальсилитовых, Vt-Py калишпатовых сиенитов, кристаллизация которых заканчивается кварцевыми сиенитами, дайками и штоками щелочных гранитов.

**Вулканической фазой** сложена часть центра и северная части массива. Это расслоенный поток лейцитовых мелафонолитов, лейцититов, лейцитовых лампроитов, с участками туфолав и туфобрекчий. Дайковый комплекс этой фазы

представлен лейцитовыми тингуаитами, рихтерит-санидиновыми лампроитами, трахит-порфирами, сиенит-порфирами и эвдиалитовыми луявритами. Возможно, что вулканическая излившаяся фаза представляет собой верхнюю часть вулканоплутонического комплекса, блок которого опущен по разломам на гипсометрический уровень главной фазы, кристаллизация которой происходила в камере. На это указывает близость петрохимических характеристик пород вулканической и интрузивной фаз.

**Поздняя фаза** кристаллизовалась из остаточного расплав-флюида, она занимает юго-восточную часть массива площадью 10 км<sup>2</sup>. Эта фаза представлена полосчатым расслоенным комплексом калиевых силикатно-карбонатных пород, состоящих из полос размером от 1 до 20–30 м следующего состава:

1) микрокалишпатиты – белые микрозернистые породы, состоящие из калиевого полевого шпата, с незначительными примесями пироксена и тинаксита;

2) кварц-кальцит-пироксен-микрклиновые породы, содержание кальцита в которых варьируется от 5 до 20%;

3) пироксен-калишпатовые породы с варьирующим в широких пределах содержанием обоих компонентов. Текстура и структура пород этой части очень разнообразны: полосчатые, сферолитовые (для пироксена), равномернозернистые, мелко- и крупнозернистые и т.д.;

4) существенно пироксеновые породы, которые, вероятно, являются частным случаем полос третьего типа, обогащенных пироксеном.

В этом расслоенном полосчатом субстрате развиты тела карбонатитов (карбонатных), и чароитовых (силикатных) пород. Они представлены жильными телами – дайками, жилами, силлоподобными образованиями (горизонтальные дайки) и шпировыми телами, не имеющими резких контактов с силикатно-карбонатными породами. Блок силикатно-карбонатных пород по отношению к породам главной фазы является опущенным по оперяющим разломам.

Все описанные выше породы, по многочисленным тектоническим зонам и трещинам, подвержены интенсивному воздействию гидротермальной стадии

формирования массива, которая проявлена в сульфидизации и окварцевании пород массива. С гидротермальными процессами связаны проявления Cu, Pb, Zn, Au, Ag, U, Th, Mo, Nb, Ti [Владыкин, Царук, 2000].

Таким образом, схема магматизма массива следующая: ранняя фаза внедрения представлена ультраосновными породами (большой частью Вт-пироксенитами), главная фаза сложена лейцитовыми и щелочными сиенитами, вулканическая – лавами и туфобрекчиями лейцитовых фонолитов, а поздняя фаза представляет собой расслоенный комплекс силикатно-карбонатных пород (включая чароитовые породы), которая представляет собой остаточный дифференциат от кристаллизации пород массива.

С каждой фазой массива связаны свои полезные ископаемые. Так, с ранней фазой связано апатитовое месторождение в биотитовых пироксенитах. Одна из фаций главной фазы - псевдолейцитовые сиениты (сынныриты), которые являются рудой на K-Al-Si сырье, и образуют третье в мире подобное месторождение. Лейкократовые ультракалиевые псевдолейцитовые эффузивы могут быть использованы в керамической промышленности. С силикатно-карбонатной фазой связаны Ba-Sr сырье (в карбонатитах), самоцвет чароит (в чароитовых породах) и К-рихтерит-асбест (приконтактные скарны по доломитам).

### **1.3 Геологическое положение чароитовых пород**

Породы чароитового комплекса развиты в юго-западной части маломурунского массива на площади 10км<sup>2</sup>. На этой площади обнаружено около 20 участков с выходом чароитовых пород (Старый, Южный, Иркутский, Грозовой, Ажимовский, Девичий, Якутский, Новый, Коренной, Гольцовый, Восточный, Таборный, Магистральный, Приречный и др.).

Участок «Старый» (рис. 1.3) находится на левом борту истока ручья Дитмаровский на водоразделе. Вмещающими породами чароитовых жил являются кварцевые песчаники (в западной части) и пироксен-полевошпатовые породы в восточной части. В настоящее время этот участок разрабатывается

карьерным способом. Чароитовые породы состоят на 70-80% из чароита различного качества. Из других минералов присутствуют микроклин, пироксен, тинаксит. В одном из выходов пород были обнаружены крупные фенокристы К-арфведсонита размером до 2-3 см. Также местами встречаются обособления сульфидных минералов (особенно галенита). Контакт с кварцитами резкий (рис. 1.4), контактовое взаимодействие порядка не более 3-5 см. выражается в появлении в кварците иголок пироксена и иногда чароита. От температурного воздействия кварцит, возможно, перекристаллизовывается.



Рис. 1.3 Карьер участка «Старый»

Участок «Южный» находится на правом борту истоков речки Инаригда. Участок сложен микроклинитами с небольшими зонами, обогащенными пироксеном. В этом участке имеется тело бенстонитовых карбонатитов мощностью около 40 м. и протяженностью около 1 км., которое вскрыто трехъярусным карьером. Бенстонитовые карбонатиты в некоторых местах секутся небольшими жилами чароитовых пород до 3-5 см. Чароитовые жилы состоят в основном из чароита низкого качества с небольшим количеством микроклина.

Участок «Грозовой» находится в 500 м. к югу от участка Старый. Участок

был вскрыт канавами и скважинами. Чароитовые жилы мощностью 1-2 м. залегают в микроклиновых и микроклин-пироксеновых породах чароитового комплекса. Жилы представлены трахитоидными породами чароитового комплекса со структурами течения, в которых вкрапленники микроклина, реже кварца и сферолитов пироксена и тинаксита, обтекаются чароитовой массой. Чароит имеет густой сиренево-синий цвет, хорошего качества, но трещиноватый по плоскостям течения.



Рис. 1.4 Мурунский массив, участок «Старый».

**Ксенолиты кварцитов с резким контактом.** Примечания: кв - кварц; ча - чароит

Участок «Ажимовский» находится в 50 метрах севернее участка «Грозовой». Вмещающие породы такие же, как в участке «Грозовой». Чароитовые тела мощностью до нескольких метров. Чароит представлен сферолитовыми агрегатами размером от 1 до 4 см. в сростаниях с пироксеном и реже - тинакситом. Качество чароита среднее.

Участок «Таборный» находится на правом борту ручья Дитмаровский у поселка Дитмаровский. Был представлен тремя крупными делювиальными глыбами размером 2х3 м., которые в настоящее время выработаны. Чароитовая порода этого участка трахитоидная, со структурами течения, сиреневого цвета, сложена чароитом на 80%, а также полевым шпатом и тинакситом. В породе много выделений эканита (до 1-2%) в виде желтых удлиненных кристаллов

размером до 1 см. в длину. Из-за высокого содержания Th-содержащего минерала эканита, глыбы радиоактивны.

Участок «Девичий» находится на вершине горы в самой юго-западной части месторождения. Участок небольшого размера (2x3 м.). Во вмещающих ярко-белых микроклинитах проявлен интенсивно окрашенный сиреневый чароит хорошего декоративного качества. Размер чароитовых выделений от 20 до 50 см. Участок выработан.

Участок «Студенческий» представлен небольшими развалами делювиальных глыб чароитовых пород размером 0,5 x 1 м. Находится на левом борту реки Дитмаровской, на дороге в аэропорт. Участок выработан.

Участок «Приречный» находится на левом борту р. Даван в 100 м. от поселка Веслополовка. Участок небольшой, вскрыт канавой по делювиальным отложениям. Чароит участка «Приречный» обычно светло-розового и розово-синего цвета с вкрапленниками полевого шпата микроклина, пироксена и в небольшом количестве федорита. Второй выход делювиальных глыб этого участка находится в 50 м. выше по борту, рядом с дорогой. В этой части наблюдались некоторые глыбы, состоящие наполовину из чароитовой породы, наполовину – из кальцитового карбонатита со сферолитами пироксена и крупными выделениями зерен чароита до 5 см. в длину и 0,5 см. в ширину. Переход между чароитовыми породами и карбонатитами постепенный, без резкого контакта. Участок выработан.

Участок «Гольцовый» находится в самой южной части площади на склоне горы, сложенной щелочным сиенитом, вершина которой сложена кварцитом около 5 м. мощностью. Чароитовая жила в коренном залегании прорывает щелочные сиениты. Мощность жилы 0,5 м. и протяженность около 5 м. Сложена чароитом низкого качества. Состоит из чароита, пироксена и участков, обогащенных кальцитом.

Участок «Иркутский» находится в центральной части чароитовой площади. Участок сложен кальцитовыми, К-рихтерит-тетраферрифлогопитовыми

полосчатыми породами. Проявление представлено несколькими глыбами чароитовых пород во вмещающих рихтеритовых породах; размер чароитовых глыб от 1 до 5 м. На этом участке была обнаружена самая красивая глыба чароитовых пород качества «экстра» с иризирующими кристаллами чароита с размером кристаллов 5х2 см. насыщенного сиреневого цвета. Участок выработан.

Участок «Новый-2» (рис. 1.5) располагается в 500 м. от коренного обнажения на левом борту истоков р. Даван. Чароитовые породы в этом участке представлены несколькими разновидностями: 1. Делювиальная глыба чароита паркетовидной текстуры качества «экстра» весом 120 т. (выработана); 2. Крупная жила чароитовых пород, вскрытая новым карьером. Сложена сливным закаленным чароитом с участками крупнозернистого паркетного чароита и вкрапленниками других минералов. Мощность зоны 10 м. 3. Жильное образование чароитовых пород с крупными выделениями кристалла федорита (до 2-3 см.). Далее на востоке эти породы контактируют с крупным коренным выходом графических кварц-карбонатных карбонатитов размером 3х10 м.



Рис. 1.5 Участок «Новый-2»

В настоящее время добыча чароита происходит на участке «Старый» (ООО Байкалкварцсамоцветы) и участке «Новый» (район бывшей глыбы «Экстра») (ООО Чароит, г. Нерюнгри).

## ГЛАВА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД

### 2.1 Породы Мурунского массива

Мурунский щелочной массив с калиевой агпаитностью по набору слагающих пород и минералов, а также типов месторождений и рудопроявлений, уникален [Vladykin, Tsaruk, 2003].

Петрохимические диаграммы двойных и тройных корреляций петрогенных элементов (рис. 2.1 и 2.2) показывают близкие тренды составов для всех пород комплекса [Владыкин, 2009; Владыкин, Царук, 2000]. Как видно из графиков парных и тройных корреляций петрогенных элементов для всех пород массива наблюдается единый тренд составов, что свидетельствует о гомодромности пород комплекса.

В породах К-серии впервые был обнаружен полный ряд дифференциатов от щелочных-ультраосновных через основные и средние к кислым составам (щелочным гранитам) [Владыкин и др., 1983]. Причиной образования такого полного ряда пород являются процессы дифференциации и магматического расслоения, широко проявленные во всех породах комплекса. Кристаллизация К-силикатных пород от ранней фазы к поздней проходила при температурах от 1500°C до 700°C, в то время как кристаллизация силикатно-карбонатных пород - при температурах 750–400°C [Panina et al., 1994]. Большой температурный интервал способствовал интенсивной дифференциации. Изучение состава расплавных включений в ранних породах комплекса [Панина и др., 1985] показало, что первичные магмы, из которых кристаллизовались породы, по составу отвечают щелочным базальтоидам и близки к лампроитовым. Кроме того в этих же включениях наблюдается расслоение магмы на лампроитовые и карбонатитовые части. Геохимия изотопов Sr, Nd, O, C, Pb свидетельствует о глубинном мантийном источнике вещества для образования магмы, которая дала начало комплексу пород Мурунского массива [Владыкин, 2005].

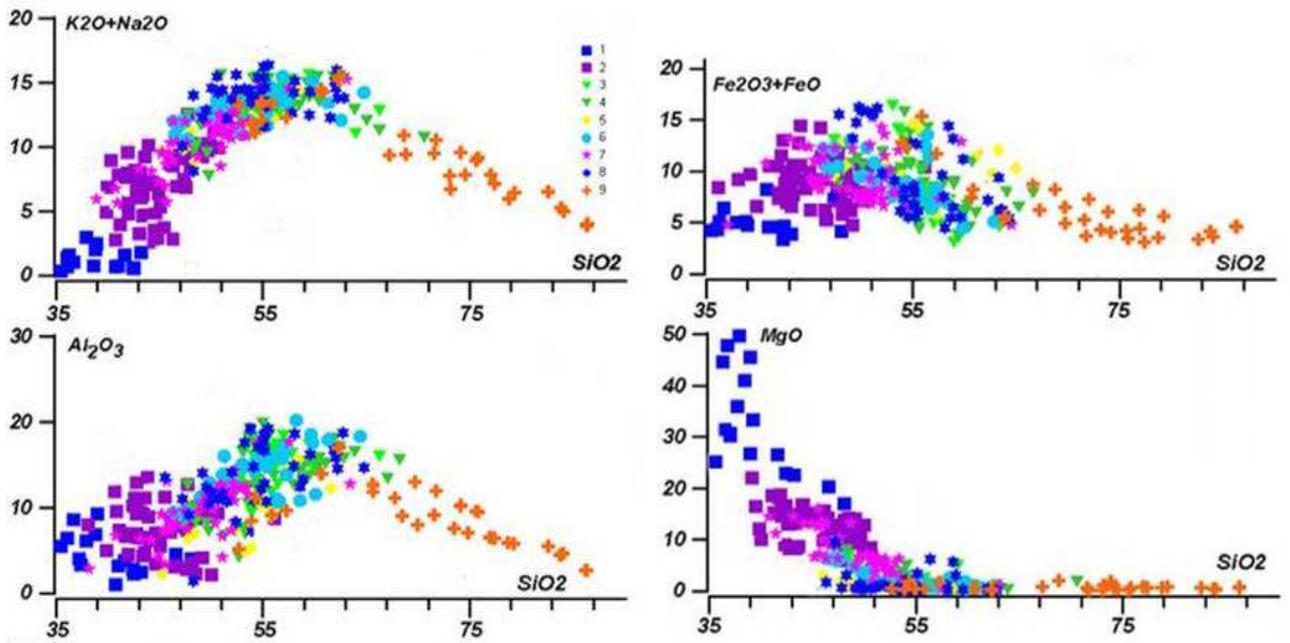


Рис. 2.1. Графики парных корреляций оксидов петрогенных элементов пород Мурунского массива (в вес. %)

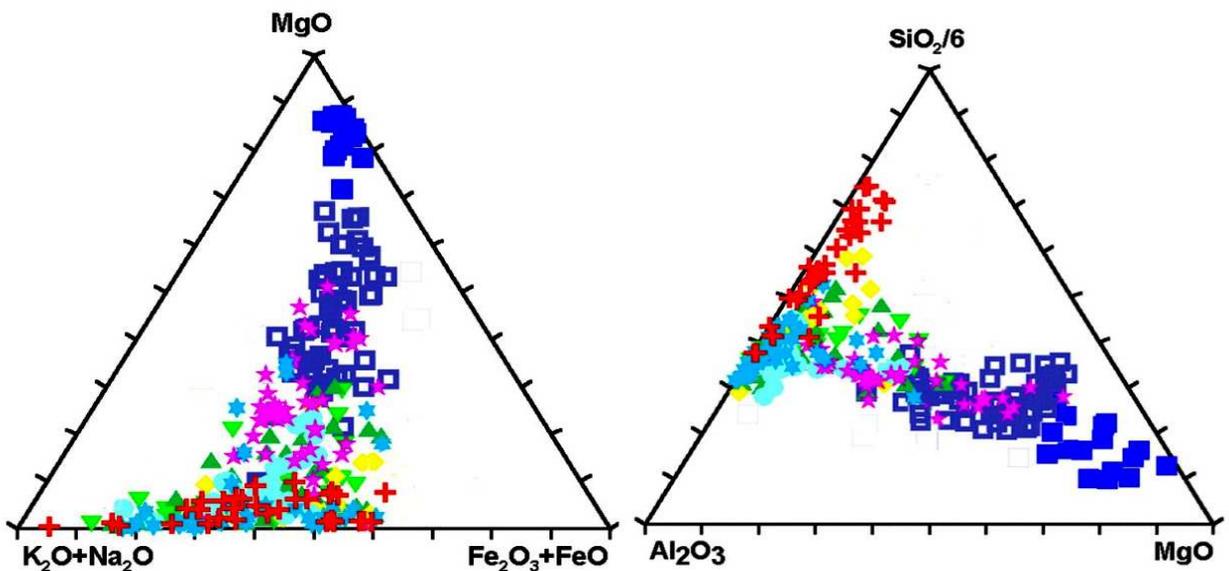


Рис. 2.2 Графики тройных корреляций оксидов петрогенных элементов различных пород Мурунского массива.

## 2.2 Особенности химического состава чароитовых пород

Происхождение чароитовых пород связано с расслоением силикатно-карбонатного расплав-флюида, остаточного от кристаллизации К-щелочных пород Мурунского массива. Это расслоение остаточного расплав-флюида происходит при понижении температуры в процессе кристаллизации пород. При

расслоении этого остаточного продукта, первой отделяется K-Al часть в виде микроклинов. Из-за агпаитового характера расплава, при недостатке Al в микроклине входит Fe (до 4%). Следующим при расслоении образуются пироксен-калишпатовые породы с разными соотношениями калишпата и пироксена (от 10 до 90%). Обе эти составляющие не содержат таких компонентов, как Ba, Sr, Ti и вода, которые резко накапливаются в следующих продуктах расслоения. Далее происходит расслоение еще на две фракции: силикатную-чароитовую (содержащую воду) и почти лишенную воды карбонатную часть, обогащенную Ba и Sr. Эта карбонатная часть частично содержит и силикатную составляющую (до 10%). Она, в свою очередь, при дальнейшей кристаллизации, также разделяется на три жидкости: первая дает начало Ba-Sr бенстонитовым карбонатитам, вторая – кальцитовым карбонатитам, третья – кварц-кальцитовым карбонатитам с графическими структурами между кварцем и кальцитом. В этой общей карбонатной составляющей, при кристаллизации всех трех продуктов, так же происходит разделение в виде полос или капель силикатной составляющей, дающей начало продуктам расслоения, представленным микроклином, пироксеном и тинакситом.

В связи с тем, что остаточный чароит-карбонатный расплав-флюид имел высокие концентрации Ca и в силикатных чароитовых породах, и в карбонатных-карбонатитовых, кристаллизуется пироксен близкого состава, содержащий всего 50% эгиринового компонента, 25% - диопсидового и 25 - геденбергитового.

Из-за разных P-T условий, при внедрении остаточного расплав-флюида по трещинам в приконтактной части Мурунского массива, и благодаря столь сложному процессу многократного расслоения, можно объяснить значительные вариации минерального состава чароитовых пород в разных участках их образования. Несмотря на высокое содержание щелочей в чароитовой и карбонатитовой частях, они почти не реагируют с вмещающими кварцевыми песчаниками, но при наличии контрастных к их составу ксенолитов лампроитов с высокими содержаниями Mg, эти ксенолиты подвергаются реакционным

замещениям, которые одинаковы как в чароитовых породах, так и в карбонатитовых. Сначала по лампроитам образуется зона, сложенная Крихтеритом и пироксеном, а заканчивается реакция зоной существенно микроклиновых пород.

В связи с тем, что минеральный состав чароитовых пород довольно разнообразный, наблюдаются вариации и химического состава пород. Химический состав чароитовых пород приведен в табл. 1.2. Нами проанализировано 49 образцов чароитовых пород из разных участков их проявления. Основными химическими элементами чароитовых пород являются Si, Ca, K, Na, Al, Fe и вода. В меньших количествах имеются Ti, Mn, Ba, Sr, F. Наблюдаются следующие вариации составов чароитовых пород:  $\text{SiO}_2$  – 53-68 %,  $\text{TiO}_2$  – 0,1-2,4 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,1-4,5 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$  – 0,3-12,9 %,  $\text{MnO}$  – 0,1-0,8 %,  $\text{MgO}$  – 0,1-0,6 %,  $\text{CaO}$  – 7,2-30,5 %,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 1,7-3,7 %,  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,7-11,2 %,  $\text{H}_2\text{O}$  – 1,5-6,5 %.

Образование чароитовых пород по времени идет раньше гидротермального процесса. Наблюдается неоднократное пересечение пород чароитового комплекса гидротермальными прожилками (рис. 5.3). В редких случаях чароитовая порода полностью замещается гидротермальным кварцем (табл. 2.1, образец №49) с сохранением общего рисунка текстуры породы. Это в очередной раз доказывает то, что гидротермальный процесс произошел после образования чароитовых пород.

Как видно из классификационной диаграммы  $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  (рис. 2.3), по химическому составу чароитовые породы близки к щелочным сиенитам, но отличаются от них намного более высокими содержаниями Ca, Ba, Sr и  $\text{H}_2\text{O}$ . Составы исследованных чароитовых пород укладываются в границы магматических пород среднего состава. Все породы располагаются в поле типично щелочных и субщелочных образований. В зависимости от состава расплав-флюида в различных участках месторождения наблюдаются широкие вариации присутствия различных минералов. Содержание чароита в этих участках – от 95 до 20%.

Таблица 2.1

## Химический состав чароитовых пород (в вес. %)

Проба	111/2	111/5	112	113	119/8	120	120P	121	122	128	138	147	148
Окисл/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO <sub>2</sub>	58,4	60,9	54,9	57,8	58,5	61,0	60,8	58,2	55,5	60,9	57,3	56,4	59,0
TiO <sub>2</sub>	0,2	0,2	0,4	0,5	0,2	0,7	0,6	0,4	0,1	0,1	0,3	2,4	0,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	1,9	1,8	3,6	3,8	4,3	4,1	1,6	4,5	0,5	2,1	1,6	4,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	0,7	1,4	11,7	0,9	6,8	6,1	4,2	1,6	1,2	0,6	11,7	3,4
FeO	0,1	0,1	0,5	1,2	0,1	0,5	0,8	0,4	0,3	0,4	0,1	1,0	0,1
MnO	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2
MgO	0,1	0,1	9,7	2,9	0,1	0,6	0,9	0,8	0,1	0,2	0,6	2,3	0,9
CaO	18,4	18,9	14,1	7,2	16,9	10,2	10,4	15,9	15,6	19,3	19,0	9,0	12,0
Na <sub>2</sub> O	2,3	2,9	3,0	5,4	2,3	4,8	4,5	3,7	2,5	3,2	2,4	6,3	2,8
K <sub>2</sub> O	9,7	7,3	6,3	5,5	9,8	6,9	6,6	7,0	9,2	5,8	8,5	5,6	8,7
H <sub>2</sub> O	5,1	4,3	4,6	2,6	3,7	2,8	3,5	4,1	7,4	7,5	6,0	1,5	3,5
CO <sub>2</sub>	0,4	0,7	0,0	0,0	1,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SrO	0,8	0,8	0,6	0,3	1,3	0,3	0,4	1,2	0,9	0,6	1,0	0,5	1,2
BaO	0,6	0,7	1,3	0,8	1,1	0,3	0,3	1,5	1,3	0,3	2,1	0,4	1,8
F	0,3	0,3	0,4	0,1	0,5	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2
Сумма	100,2	100,2	99,9	99,7	100,3	100,5	99,9	99,9	99,7	100,9	100,7	99,7	100,0

Таблица 2.1 (продолжение)

Проба	182	7/26	8/26	9/29	109	13/15А	108/15	С13/15	Я-34/28	Я-4В	Я-7/30	Я-9/25	Я-9В
Окисл/№	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
SiO <sub>2</sub>	55,4	60,3	56,5	59,8	58,1	59,9	56,9	57,6	56,3	56,4	54,6	55,7	57,2
TiO <sub>2</sub>	0,5	0,1	0,3	0,1	1,4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,7	0,1	0,2	0,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9	2,3	2,6	1,4	1,7	5,1	0,5	0,5	1,1	3,2	0,6	2,5	2,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	1,8	5,6	0,8	0,5	1,1	0,3	1,1	1,3	5,6	0,2	1,5	4,5
FeO	0,5	0,5	1,2	0,2	0,1	0,5	0,1	0,3	0,3	1,0	0,1	0,5	0,8
MnO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
MgO	6,6	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,5	0,1	0,6	0,3
CaO	16,5	17,4	15,4	18,9	17,2	15,2	19,3	20,5	21,8	11,7	25,4	20,5	16,7
Na <sub>2</sub> O	3,6	2,1	3,2	2,2	2,5	2,1	2,5	2,2	2,3	3,2	3,1	2,7	3,6
K <sub>2</sub> O	6,4	8,3	7,4	7,6	10,6	11,2	9,3	8,4	7,9	8,3	5,2	5,9	6,8
H <sub>2</sub> O	5,7	4,9	5,3	6,2	4,2	4,0	5,3	6,5	5,0	6,3	6,3	5,8	4,1
CO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SrO	0,7	0,9	0,9	1,0	0,7	0,5	1,8	0,8	1,8	0,8	1,8	1,0	1,0
BaO	1,3	0,7	0,6	0,9	2,8	0,5	2,9	0,7	1,1	1,7	1,7	1,6	2,0
F	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Сумма	99,9	99,6	99,7	99,3	100,1	100,4	99,6	99,2	99,6	99,5	99,3	98,6	99,9

Таблица 2.1 (продолжение)

Проба	ЯК-10В	3/2	23/7	23/8	21/9	24/10	24/12	24/16	24/17	24/30	24/33	24/34	24/35
Окисл/№	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
SiO <sub>2</sub>	56,3	53,1	54,9	64,1	67,8	58,1	58,1	63,9	65,3	62,4	60,1	59,1	58,6
TiO <sub>2</sub>	0,9	0,2	1,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8	1,4	1,4	1,8	1,3	1,1	1,7	0,7	0,5	1,7	2,9	1,2	0,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	2,4	2,3	1,9	0,5	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6	0,9	2,0	0,4
FeO	0,9	н/о*	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
MnO	0,4	0,1	0,8	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,0	0,3	0,1	0,1	0,3
MgO	0,5	0,6	1,2	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	0,8	0,2	0,2
CaO	14,5	14,1	19,7	16,6	16,0	18,8	18,4	16,7	19,8	15,6	16,3	19,4	21,0
Na <sub>2</sub> O	4,3	1,9	1,7	3,6	1,8	3,1	2,4	2,1	2,4	1,7	2,1	2,4	2,4
K <sub>2</sub> O	8,3	2,7	9,9	4,5	6,3	7,9	9,1	5,6	2,7	7,8	7,2	8,6	9,1
H <sub>2</sub> O	3,0	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
CO <sub>2</sub>	1,1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
SrO	0,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
BaO	2,1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
F	0,1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Сумма	100,0	99,9	99,8	100,0	100,0	99,9	99,8	100,0	100,1	99,9	97,6	99,9	100,0

Таблица 2.1 (продолжение)

Проба	24/37	24/38	24/39	24/41	24/42	24/43	24/44	24/45	184	24/13	вариации**	среднее**
Окисл/№	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49		
SiO <sub>2</sub>	57,9	61,8	58,9	58,5	65,2	59,7	42,2	58,5	51,2	96,6	42,2 - 67,8	58,3
TiO <sub>2</sub>	0,2	1,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0 - 2,4	0,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	2,5	3,1	0,2	0,8	0,4	0,8	0,1	1,8	0,6	0,1 - 4,5	1,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9	5,6	1,3	0,2	0,4	0,9	0,9	1,4	2,8	0,5	0,2 - 11,7	2,3
FeO	н/о	н/о	н/о	0,1 - 1,2	0,3							
MnO	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1 - 0,8	0,2
MgO	0,4	0,6	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,1	0,1 - 0,6	0,8
CaO	18,6	11,5	17,3	20,1	16,3	20,9	30,5	20,2	23,4	0,0	7,2 - 30,5	17,3
Na <sub>2</sub> O	3,7	3,7	2,1	2,5	2,4	1,6	1,6	3,0	3,3	0,1	1,7 - 3,7	2,9
K <sub>2</sub> O	8,0	7,4	9,0	9,1	8,0	3,0	4,8	9,3	4,3	0,7	2,7 - 11,2	7,3
H <sub>2</sub> O	н/о	н/о	0,2	1,5 - 6,5	2,7							
CO <sub>2</sub>	н/о	н/о	0,3	0 - 1,1	0,1							
SrO	н/о	н/о	0,0	0,3 - 1,8	0,5							
BaO	н/о	н/о	0,0	0,3 - 2,9	0,7							
F	н/о	н/о	0,0	0 - 0,5	0,1							
Сумма	99,8	99,7	99,8	99,7	99,7	99,8	99,6	99,9	99,8	99,5		

Примечания: 1-49 - чароитовые породы различного минерального состава. Аналитик - Погудина Г.А., Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, анализы 2012-2014 гг.

н/о\* - не обнаружен. \*\*Вариации составов пород и средние значения приведены без учета окварцованной чароитовой породы (образец №49)

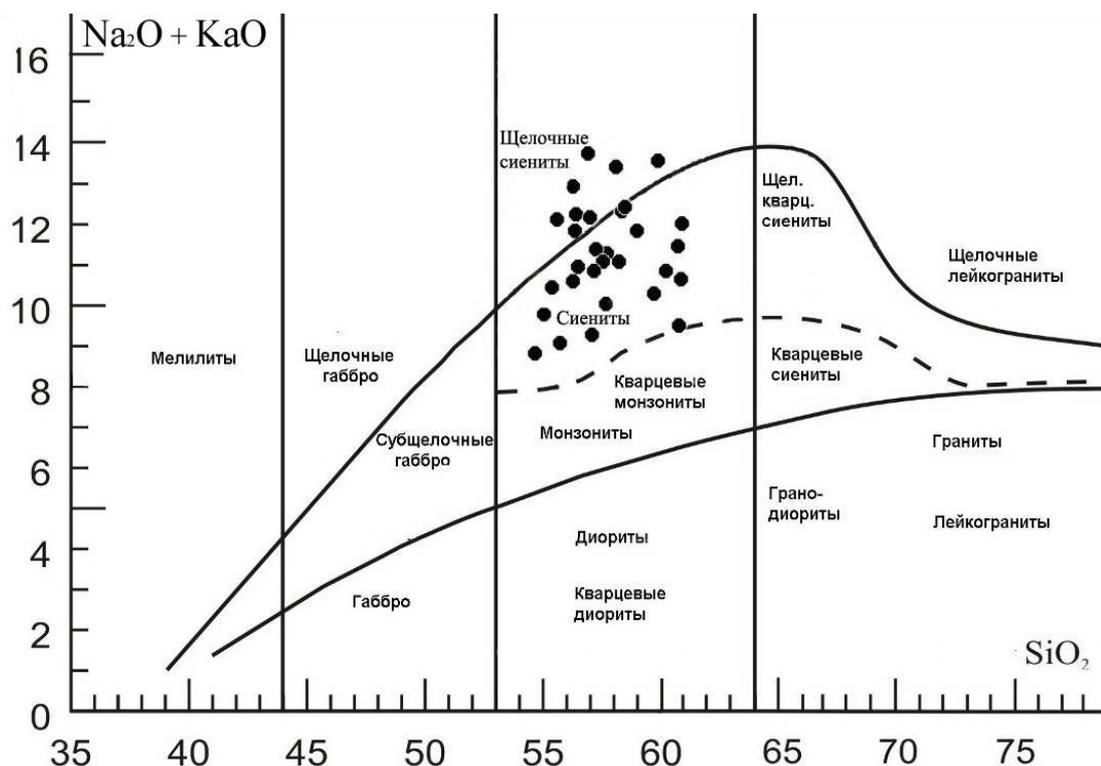


Рис. 2.3 Классификационная диаграмма  $\text{SiO}_2$ - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  для чароитовых пород

На рис. 2.4 представлены графики парных корреляций петрогенных и редких элементов чароитовых пород. Наблюдаются прямые корреляции между  $\text{TiO}_2$  и  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{Fe}_{\text{сум}}$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ ),  $\text{SrO}$  и  $\text{BaO}$ ,  $\text{SrO}$  и  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}$  и  $\text{Rb}$  и обратные корреляции между  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ . Эти корреляции свидетельствуют о кристаллизации различных типов чароитовых пород из единого расплав-флюида. Некоторый разброс точек на графиках связан с вариациями содержаний различных слагающих чароитовые породы минералов. Необычным отличием чароитовых пород от других пород комплекса является содержание в них  $\text{SrO}$ , достигающее до 2 % и  $\text{BaO}$ , достигающее до 3%. Эти элементы реализуются в чароите, который является основным минералом чароитовых пород.

Значительные вариации  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$  в чароитовых породах, связаны с дисперсией этих элементов в различных участках. Присутствие воды в составе чароитовых пород реализуется, главным образом, в самом чароите, и в меньшей степени - во франкамените и федорите. Вариации содержания  $\text{Ti}$  в породе связаны с различными содержаниями в них тинаксита.

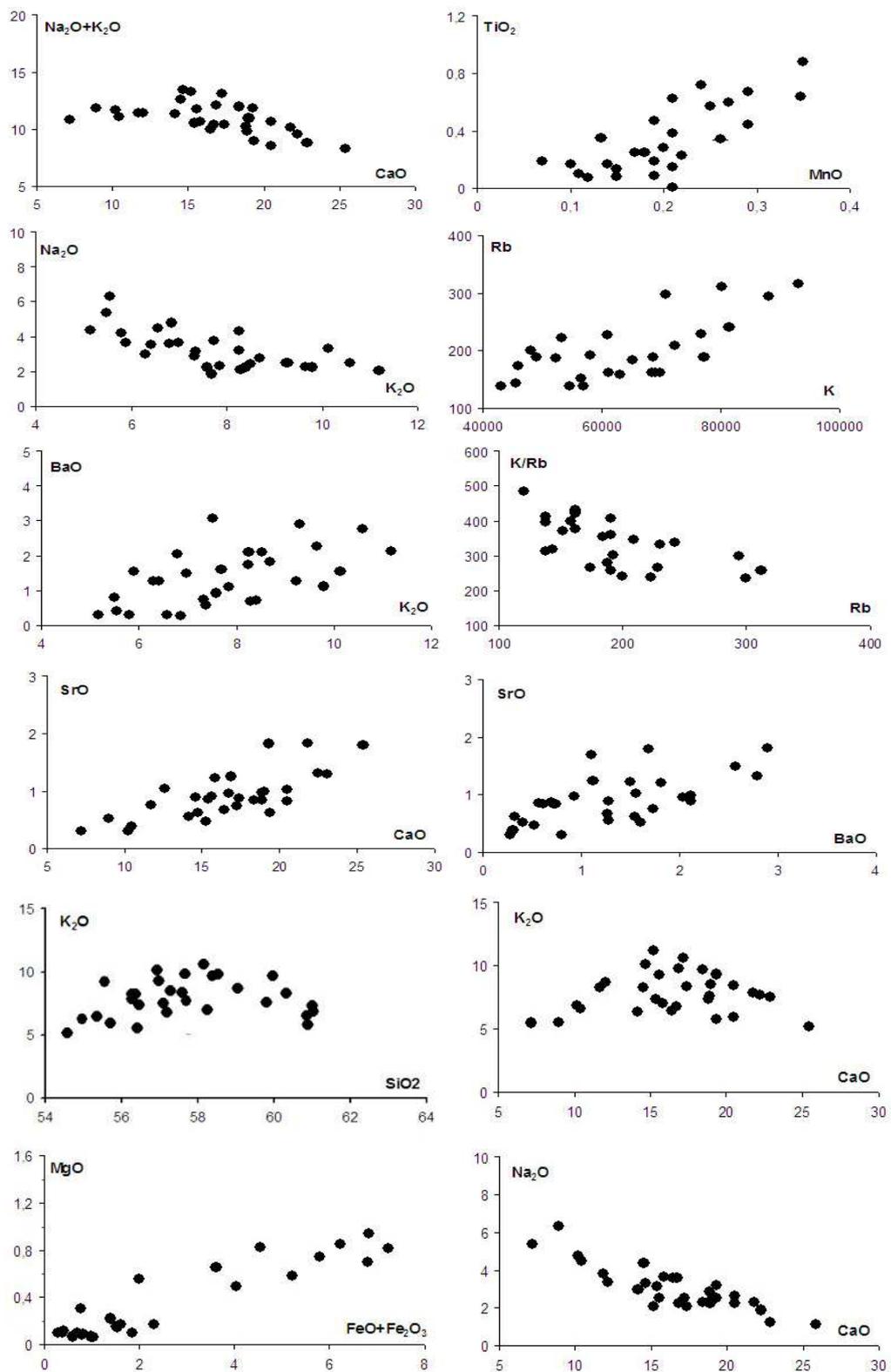


Рис. 2.4 Графики парных корреляций петрогенных и редких элементов чароитовых пород

Одной из главных особенностей чароитовых пород, в отличие от других, является очень высокий коэффициент агпаитности, с чем связана кристаллизация большого количества минеральных фаз.

### ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД МУРУНСКОГО МАССИВА

#### 3.1 Общая характеристика чароитовых пород

Минеральный состав чароитовых пород невыдержанный, с переменным количеством породообразующих минералов, главными из которых являются чароит (20–90%), полевые шпаты, пироксен, кварц, тинаксит, кальцит. Из-за быстрой кристаллизации пироксен и тинаксит часто образуют солнцевидные сферолитовые обособления (рис. 3.1). Кроме этих минералов в чароитовых породах встречаются и довольно экзотические минералы К, Na, Ca, Si и воды, которые могут быть как породообразующими (часто ранние вкрапленники), так и второстепенными. Это пектолит, К-арфведсонит, франкаменит, апофиллит, федорит, мизерит, агреллит. В числе аксессуарных установлены эканит, апатит, группа сульфидных минералов (галенит, халькопирит, сфалерит, пирротин, халькозин), К-титанаты (джерфишерит и др.) и самородные элементы и интерметаллиды [Владыкин и др., 1983; Докучиц, 2014; Добровольская и др., 1981, 1982, 1985].

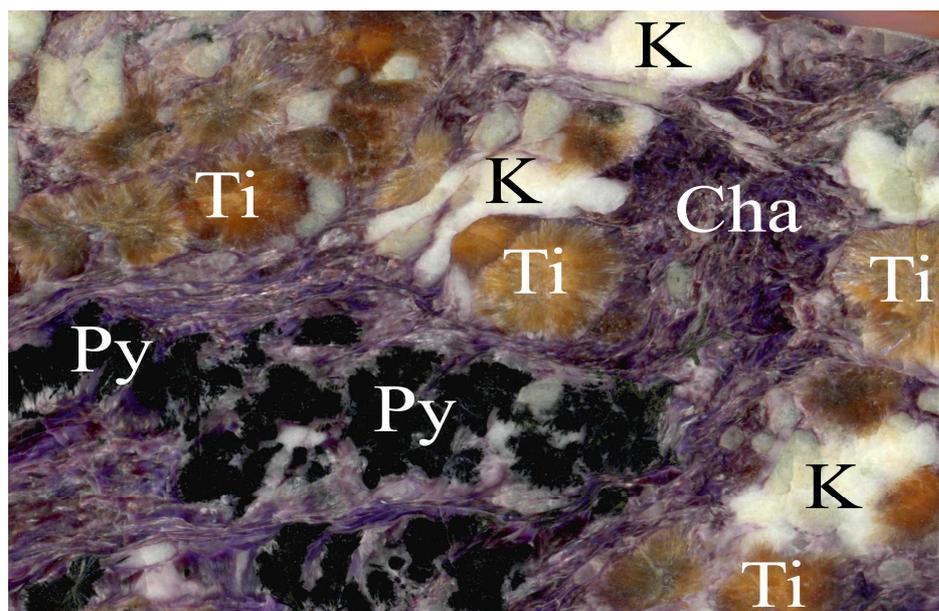


Рис. 3.1 Сферолитовые выделения тинаксита и пироксена

Py - пироксен; Ti - тинаксит; К - кальцит; Cha - чароит

Все породообразующие минералы чароитовых пород имеют довольно разнообразные соотношения главных элементов: К, Na, Ca, Si и H<sub>2</sub>O.

### **3.2 Парагенезисы минералов чароитовых пород**

Соотношение главных породообразующих элементов в различных минералах чароитовых пород показано на рис. 3.2, а соотношение теоретических составов этих минералов с различными кремнекислородными радикалами показано на рис. 3.3.

Различные парагенезисы этих минералов в разных участках проявления чароитовых пород, вероятно, связаны с некоторыми разными P-T условиями их кристаллизации. В зависимости от состава отделившейся чароитсодержащей жидкости ее кристаллизация в разных участках начинается с разных минералов. Наиболее простой парагенезис ранних минералов состоит из кварца, микроклина и эгирин-диопсида, которые обтекаются чароитовой массой [Докучиц, Владыкин, 2015].

Парагенезисы минералов чароитовых пород показаны на рис. 3.4. Выделено три минеральных парагенезиса чароитовых пород. По времени кристаллизации в начале образуется парагенезис «А» или «Б», которые как основная масса обтекаются парагенезисом «В». В парагенезисе «А» совместно кристаллизуются федорит, пектолит и апофиллит. Следующий парагенезис ранних минералов «Б» представлен крупными выделениями К-арфведсонита, франкаменита и крупными кристаллами раннего тинаксита. Далее происходит спонтанная быстрая кристаллизация основной массы - позднего парагенезиса «В», состоящего главным образом из чароита с кальцитом, а также из тинаксита и эгирин-диопсида, притом последние часто отщепляются в виде капель, при раскристаллизации давая сферолитовые образования [Докучиц, Владыкин, 2015].

Кристаллизация некоторых других минералов – мизерита, токкоита, волластонита и агреллита, наблюдается только в некоторых редких телах чароитовых пород, природа которых пока не совсем ясна.

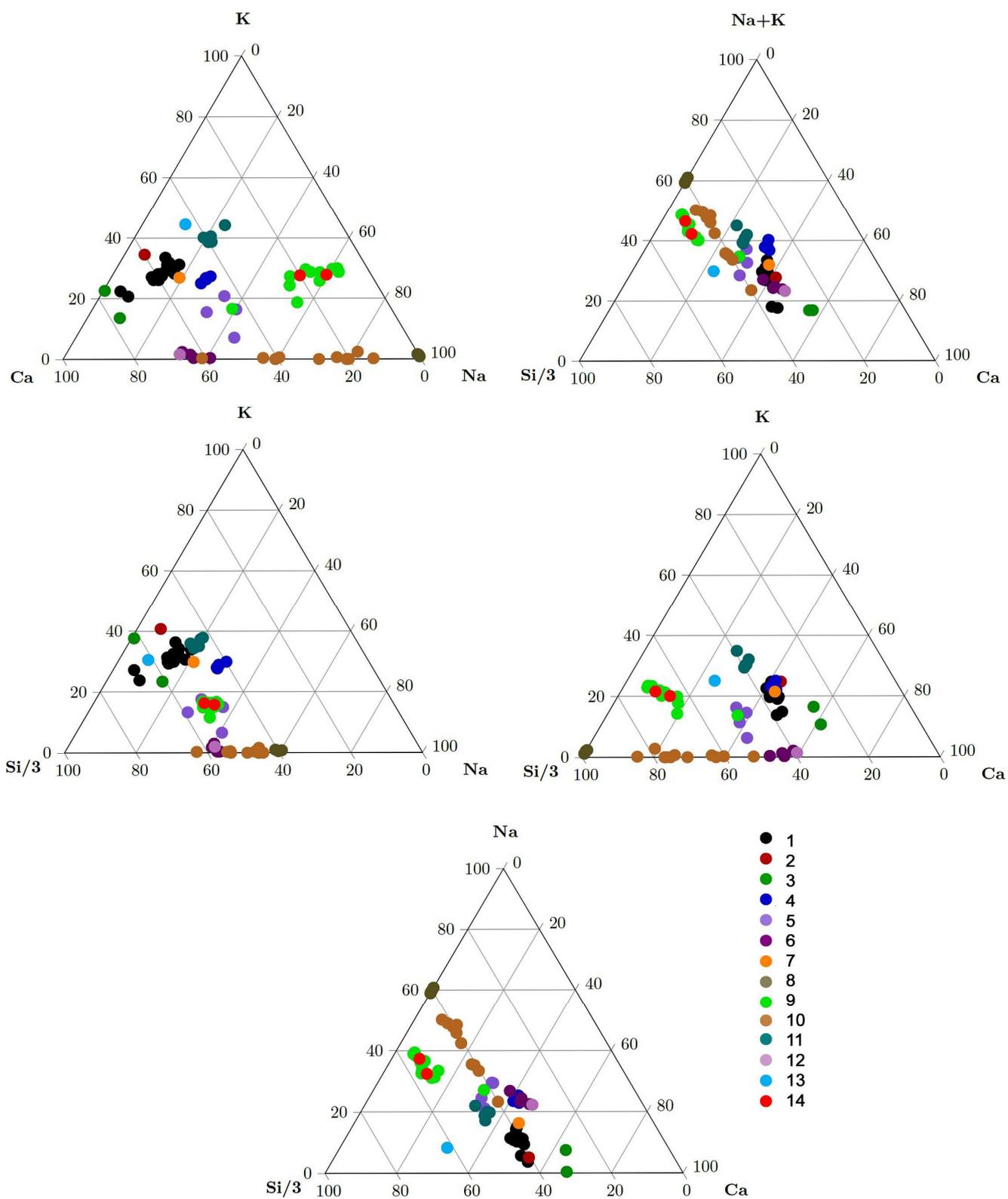


Рис. 3.2 Распределение минералов чароитовых пород на диаграммах тройных корреляций.

1 - чароит; 2 - токкоит; 3 - мизерит; 4 - франкаменит; 5 – федорит; 6 - агреллит; 7 - юкспорит; 8 - нарсарсуцит; 9 - амфибол; 10 - пироксен; 11 - тинаксит; 12 - пектолит; 13 - эканит; 14 - арфведсонит

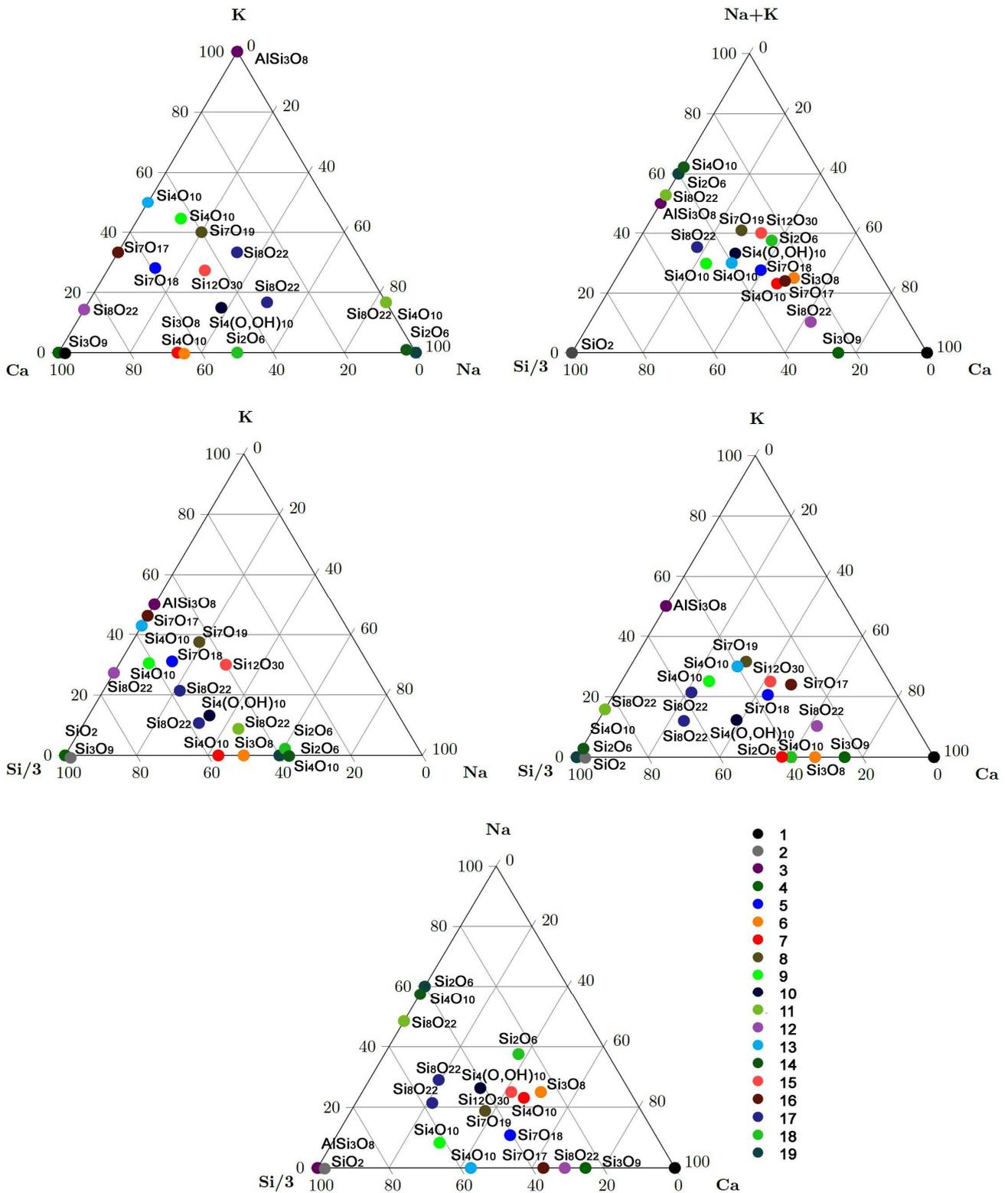


Рис. 3.3 Распределение минералов чароитовых пород на диаграммах тройных корреляций.

1 - кальцит; 2 - кварц; 3 - микроклин; 4 - волластонит; 5 - чароит; 6 - пектолит; 7 - агреллит; 8 - тинаксит; 9 - эканит; 10 - федорит; 11 - К-арфведсонит; 12 - мизерит; 13 - апофиллит; 14 - нарсарсуцит; 15 - франкаменит; 16 - токкоит; 17 - К-рихтерит; 18 - Na-диопсид; 19 - эгирин;

(теоретические данные)

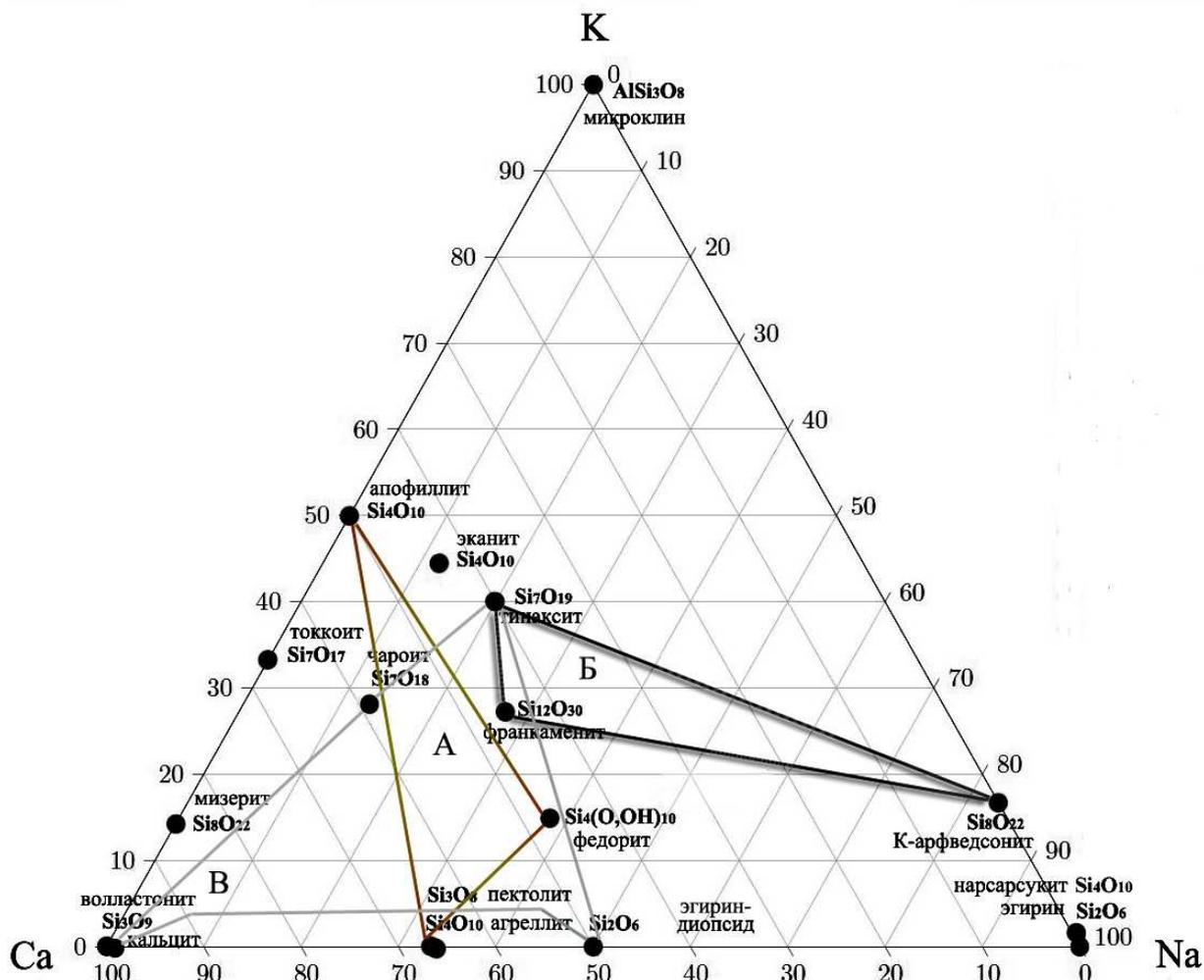


Рис. 3.4 Треугольная диаграмма составов минералов чароитовых пород

### 3.3 Составы минералов чароитовых пород

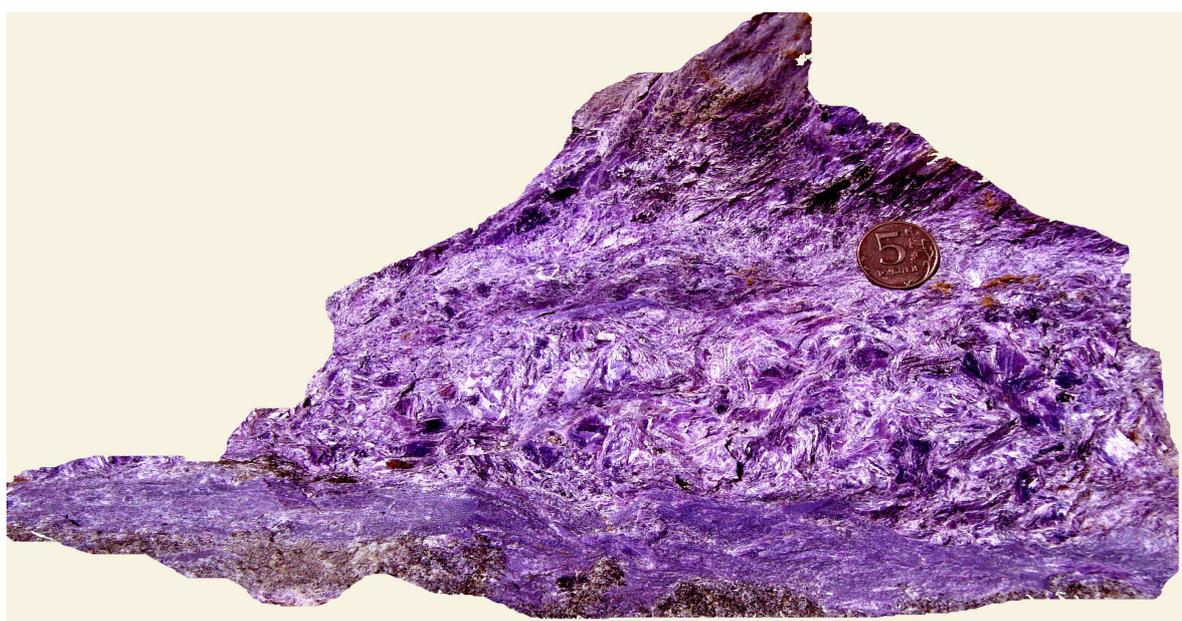
Формулы некоторых породообразующих и акцессорных минералов чароитовых пород показаны в таблице 3.1.

Чароит - один из наиболее интересных минералов, обнаруженных в Мурунском массиве (рис. 3.5 а-в). Это водный силикат Ca, K, Na, Ba и Sr [Рогова и др., 1978]. Он установлен в виде отдельных жильных и шпировых тел до нескольких метров мощностью и более десятка метров в длину. В целом имеется уникальное месторождение чароитовых пород с крупными запасами. В чароитовых породах, помимо самого чароита, открыто множество других уникальных минералов – тинаксит, франкаменит и др., некоторые из них образуют крупные выделения, что придает породе особые декоративные свойства. Кроме того, многие минералы чароитовых пород очень редки.

## Формулы минералов чароитовых пород

Минерал	Формула
<b>Силикаты:</b>	
Чароит	$(K, Sr, Ba, Mn)_{15-16}(Ca, Na)_{32}[(Si_{70}(O, OH)_{180})$ $(OH, F)_{4.0} \times nH_2O$
Тинаксит	$NaK_2Ca_2TiSiO_{19}(OH)$
Токкоит	$K_2Ca_4Si_7O_{17}(O, OH, F)_4$
Федорит	$Ca(Na, K)(Si, Al)_4O_9OH * 1,5H_2O$
Мизерит	$KCa_6(Si_8O_{22})(OH, F)_2$
К-арфведсонит	$(Na, K, Ca)_3(Mg, Fe, Mn, Ti, Al)_5[Si_9O_{22}](OH, F, O)_2$
Франкаменит	$K_2Na_4Ca_5[Si_{12}O_{30}]F_3(F, OH)_4$
Пироксен	$(Na, K, Ca)(Fe, Mg, Ti, Mn)[Si_2O_6]$
Пектолит	$NaCa_2Si_3O_8OH$
Агреллит	$NaCa_2Si_4O_{10}F$
Эканит	$K, Na, Ca, Th[Si_4O_{10}]_2$
Апофиллит	$KCa_4Si_8O_{20}(OH, F) * 8H_2O$
Волластонит	$CaSi_3O_9$
Мг силикат	$K(Ca, Mg)_6[Si_{11}O_{28}](OH, F) * 10H_2O$
Делиит	$K_2ZrSi_6O_{15}$
Нарсарсукиит	$Na_2TiOSi_4O_{10}$
<b>Карбонаты</b>	
Кальцит	$CaCO_3$
Ансилит	$SrCe(CO_3)_2(OH) * H_2O$
Бербанкит	$(Na, Ca)_3(Sr, Ba, Ce)_3(CO_3)_5$
Паралстонит	$Ba(Ca, Sr)(CO_3)_2$
Олекминскит	$Sr(Sr, Ca, Ba)(CO_3)_2$
<b>Сульфиды:</b>	
Талкусит	$Tl_2Cu_3FeS_4$
Мурунскит	$K_2Cu_3FeS_4$
Джерфишерит	$K_6(Fe, Cu, Ni)_{25}S_{26}Cl$
Идаит	$CuFeS_6$
Паркерит	$Ni_3Bi_2S_2$
<b>Самородные элементы и интерметаллиды:</b>	
Золото	Au
Серебро	Ag
Медь	Cu
Сперрилит	$PtAs_2$
Соболевскит	$PdBi$
Садбериит	$PdSb$
Фрудит	$PdBi_2$

Химический состав чароитов приведен в табл. 3.2. В связи с тем, что чароит не образует монокристаллов, и полисинтетически сдвойникован, долгое время не удавалось расшифровать его структуру. Поэтому формула чароита с момента открытия разными авторами описывалась по-разному (табл. 3.3). Различия наблюдаются главным образом в пропорциях основных (K, Na, Ca, Si, H<sub>2</sub>O) и второстепенных элементов (Ba, Sr, Mn). Также в чароите в малых количествах присутствуют Fe, Mg, Al, Ti, Zr и Th [Dokuchits, Vladykin, 2014].



а



б



в

Рис. 3.5 **Чароитовые породы** (здесь и далее) из коллекции музея щелочных пород лаборатории геохимии щелочных пород ИГХ СО РАН, (зав. лаб. д.г.-м.н. Н.В.Владыкин)

а - чароит со структурой течения; б - крупнозернистый чароит «экстра», сиреневый и коричневый; в - чароит с вкраплениями кварца

Таблица 3.2

## Химический состав чароитов (в мас. %)

Проба	24/12	24/17	24/31	24/34	24/43	24/51	24/52	25/1	128д	2-4	1007
Окисл/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	57,0	65,5	57,8	57,5	58,1	56,3	57,7	57,8	51,8	57,5	58,8
TiO <sub>2</sub>	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	н/о*	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,9	0,5	0,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,2	0,6	0,6	н/о	0,3
FeO	н/о	н/о	н/о	0,5	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
MnO	0,2	0,0	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3
MgO	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
CaO	20,9	18,7	21,0	21,7	22,1	21,1	21,4	19,9	22,1	20,5	19,8
Na <sub>2</sub> O	2,9	2,2	3,6	2,9	1,4	3,6	3,7	1,4	0,3	2,9	2,7
K <sub>2</sub> O	9,3	5,8	9,1	8,6	5,4	9,4	9,2	5,1	5,1	10,1	9,4
SrO	0,9	0,5	1,1	0,8	0,4	1,1	1,1	0,6	0,6	1,0	0,8
BaO	3,0	0,0	0,4	0,8	2,0	0,5	0,4	0,8	0,0	3,0	2,6
H <sub>2</sub> O	3,9	5,3	5,7	5,4	6,5	4,4	4,4	3,7	12,5	4,1	3,7
CO <sub>2</sub>	0,4	1,2	0,4	0,2	2,4	0,2	0,5	0,5	0,7	н/о	н/о
F	0,5	0,3	0,2	0,5	0,7	0,3	0,2	0,3	1,5	0,6	0,5
Сумма	99,6	100,5	100,5	99,7	99,9	97,9	99,1	91,0	96,6	100,3	99,6

Таблица 3.2 (продолжение)

Проба	106-5	128	128а	162/36	лит.*	лит.	лит.	лит.	лит.	лит.	
Окисл/№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	среднее
SiO <sub>2</sub>	57,3	56,3	59,9	56,7	56,4	56,9	59,1	58,3	57,7	57,5	57,7
TiO <sub>2</sub>	н/о	н/о	0,1	0,0	н/о	н/о	н/о	0,1	н/о	н/о	0,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	1,9	0,3	0,3	1,1	н/о	н/о	н/о	н/о	0,5	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	н/о	0,3 (общ.)	0,4 (общ.)	н/о	0,1	0,1	0,2	0,2	н/о	0,2
FeO	н/о	н/о			н/о	н/о	н/о	н/о	0,1	н/о	н/о
MnO	0,2	н/о	0,1	0,3	н/о	н/о	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2
MgO	0,0	н/о	0,1	0,1	н/о	н/о	н/о	0,3	н/о	0,0	0,1
CaO	22,4	20,4	21,0	23,3	20,7	21,0	21,3	23,0	23,0	20,5	21,2
Na <sub>2</sub> O	2,5	2,5	2,7	0,9	2,4	3,8	3,2	2,9	2,3	2,9	2,5
K <sub>2</sub> O	8,0	10,5	8,6	6,0	8,3	10,4	9,4	8,4	8,5	10,1	8,3
SrO	1,4	0,9	1,1	0,7	2,2	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8
BaO	3,5	3,3	0,9	2,8	3,1	2,5	2,2	1,8	1,9	2,4	1,8
H <sub>2</sub> O	3,7	3,8	н/о	н/о	5,1	4,4	4,7	5,2	6,4	4,1	4,6
CO <sub>2</sub>	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,3
F	0,4	н.о.	0,2	0,4	0,8	1,0	0,5	0,4	0,5	0,7	0,5
Сумма	99,7	99,5	100,0	98,5	99,8	100,4	99,5	99,6	99,5	99,9	

Примечания: 1-21 – чароиты. Аналитик Погодина Г.А., Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, анализы 2012-2014 гг.

н/о\* - не обнаружен. Лит.\*\* - анализы, взятые из литературных источников

1 - 15 - данные автора; 16-17, - Рогова и др., 1978; 18-21 - Лазебник и др., 1977

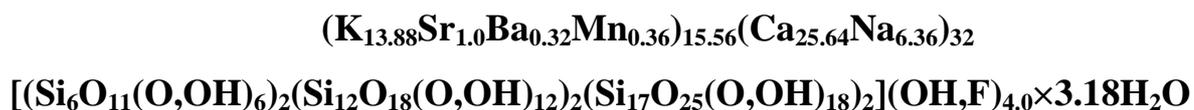
## Формулы чароита из различных источников

Формула	Ссылка
$(K,Na)_5(Ca,Ba,Sr)_8(Si_6O_{15})_2(Si_2O_7)(Si_4O_9)(OH,F)*nH_2O$	Никишова Л.В. и др. (1985)
1) $(K,Ba,Ca,Sr,Na,Mn,Fe,Al)_{5,0}[Si_7(O, OH, F)_{19}] * nH_2O$ 2) $(K,Ba)_{4,5}(Ca,Sr)_{4,5}Na_{8-10}Si_{12}O_{30}(OH,F)_{1-2}*nH_2O$	Владыкин Н.В. и др. (1983)
$K_3Ca_{10}Si_{10}O_{25}(OH,F)*nH_2O$	Воробьев Е.И. и др. (1983)
$(Ca_{1,0}Na_{0,4})_2(K_{0,8}Sr,Ba_{0,2})_{1,0}(Si_{3,9}Al_{0,1})(O_{9,7}OH_{0,3})_{10}*nH_2O$	Борнеман-Старынкевич И.Д. (1982)
$(Ca,Na,K,Ba,Sr)_6Si_9O_{22}(OH,F)_2*nH_2O$	Краефф А. и др. (1980)
$(Ca_{1,57}Na_{0,51}K_{0,93}Ba_{0,07})_{3,11}Si_4O_{10}(OH_{0,58}F_{0,20})_{0,78}*0.72H_2O$	Рогова В.П. и др. (1978)
$(K,Na)_3(Ca,Ba,Mn)_4Si_{10}O_{25}(OH,F)*nH_2O$	Лазебник К.А. и др. (1977)
$(Ca,K,Na)Si_4O_{10}(OH,F)*H_2O$	Никольская Л.В. и др. (1976)

Наконец, в 2010 году с использованием новейшей техники была расшифрована структура чароита [Рождественская и др. 2010] с общей формулой:



Эмпирическая химическая формула чароита выглядит так:



Так как по химическому составу чароит близок к канаситу, некоторое время минерал диагностировали как сиреневый канасит. Далее В.П. Роговой было доказано, что чароит является новым минералом [Рогова и др., 1978]. Позже в чароитовых породах был обнаружен еще один минерал, близкий к канаситу [Владыкин, 1983]. Дальнейшее структурное исследование этого минерала показало, что он является новым минералом, который был назван франкаменитом [Рождественская и др., 1988; Никишова и др., 1992; Никишова и др., 1996; Евдокимов и Регир, 1994].

Чароит отличается от канасита преобладанием К над Na; в чароите наблюдается высокие содержания Ba и Sr, которых нет во франкамените. Кроме

того, чароит кристаллизуется в кварцсодержащих парагенезисах, а канасит - в нефелинсодержащих (Хибинский массив).

Плотность чароита 2,54 г/см<sup>3</sup>; твердость 412 кг/мм, по шкале Мооса - 5. Макроскопически в штуфах окрашен в различные сиреневые тона, иногда коричневатый, бесцветный; в шлифах серый, с шелковистым отливом и низким двупреломлением; двуосный положительный;  $N_g = 1,559$ ,  $N_m = 1,553$ ,  $N_p = 1,550$  [Конев и др. 1996].

Цвет чароита может быть весьма разнообразным (рис. 3.6 а-д).



Рис. 3.6 а Сиренево-розовый чароит



Рис. 3.6 б Чароит сине-фиолетового цвета



**Рис. 3.6 в Красновато-сиреневый чароит**



**Рис. 3.6 г Коричневый чароит**



Рис. 3.6 д **Белый чароит**

Наиболее распространен сиреневый цвет с переходами к фиолетовому. Игольчатые солнцевидные агрегаты чаще сиреневато-светло-коричневого до коричневого. Коричневый цвет проявляется при выветривании сиреневых шестоватых кристаллов чароита. Асбестовидные агрегаты чаще имеют белый цвет [Владыкин и др. 1983].

Интересно отметить, что в агрегатах крупных шестоватых кристаллов интенсивность цвета чароита по различным кристаллографическим направлениям разная. Так, по плоскостям призматической спайности, совпадающим с удлинением кристаллов, цвет светло-сиреневый с шелковистым отливом, а перпендикулярно, на плоскости (001) - цвет темно-сиреневый со стеклянным блеском. Так как кристаллы чароита представляют собой полисинтетически сдвойникованные и более сложные агрегаты, то явления изменения интенсивности окраски и блеска можно объяснить погасанием света в «пилообразных» двойниках типа «ласточкин хвост», как это описано для армстронгита [Владыкин и др. 1983].

Чароит образует очень сложные агрегаты в шлифе (рис. 3.7) совместно с другими минералами со слабым серым двупреломлением.

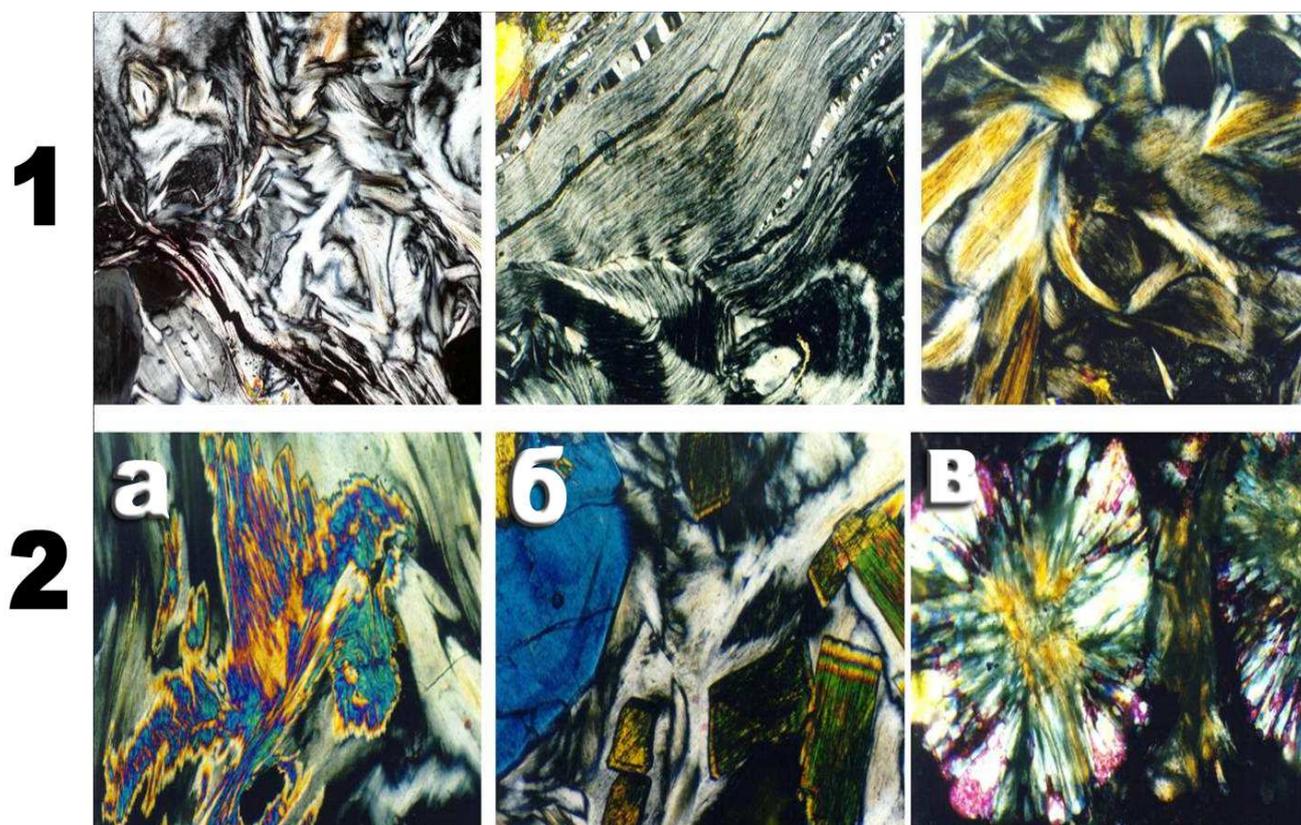


Рис. 3.7 Микрофотография шлифов чароитовых пород при «скрещенных николях»

1 - Чароиты; 2 - Минералы чароитовых пород: а - редкоземельный силикат; б - синий anomalно окрашенный кристалл полевого шпата, в - сферолиты полевого шпата

Л.В. Никольская впервые попыталась объяснить природу окраски чароита. Были исследованы оптические характеристики минерала в ультрафиолетовой и видимой областях по спектрам отражения, влияние на них отжига в различных средах и  $\gamma$ -облучения, а также спектры электронного парамагнитного резонанса. Кроме того, были получены спектры инфракрасного поглощения и термолюминесценции [Никольская и др., 1976].

По данным полуколичественного спектрального анализа тщательно обработанных монофракций, в минерале из элементов-хромофоров присутствуют Mn (0,0 n) и Fe (0,00 n). На основании физических параметров минерала было определено, что Mn находится в структуре чароита в двух валентных формах  $Mn^{2+}$  и  $Mn^{3+}$ .

Исследование фото- и рентгенолюминесценции различных разновидностей чароита, проведенное Н.П. Яровым и Д.Д. Ракшаевым, позволили установить, что

в обычных типах чароита имеется два отдельных излучательных центра с длиной волны 410 нм и 600 нм [Яровой, Ракшаев, 1992]. В структуру первого входят ионы  $\text{Eu}^{+2}$ , второго -  $\text{Mn}^{+2}$ . Свечение белого чароит-асбеста существенно отличается и имеет контур полосы люминесценции, в котором выделяются максимумы с 525 и 575 нм. Природа центров с длиной волны 525 нм проблематична, а за второе ответственны ионы  $\text{Mn}^{+2}$ . Эти данные хорошо подтверждают результаты исследований Л.В. Никольской о природе окраски чароита [Никольская и др., 1976]. Во всяком случае, Mn-центры в чароите ответственны за его люминесценцию и являются главными компонентами хромофорного комплекса [Конев и др., 1996].

В настоящее время проводятся уточнения физических параметров, определяющих окраску чароита. На наших образцах в Институте физики твердого тела РАН (г. Черноголовка) д.ф-м.н. Ионовым А.М. получены данные, подтверждающие главную причину окраски чароита разновалентными ионами Mn. Исследования продолжаются.

Интенсивность сиреневой окраски чароитовой породы зависит от ряда факторов: содержания в ней чароита и характера его волокнистых агрегатов, наличия сопутствующих минералов, степени выветрелости породы.

Дериватограмма чароита представлена на рис. 3.8. При нагревании идет выделение  $\text{H}_2\text{O}$  с пиком в  $200^\circ\text{C}$ . Выделение F и OH происходит при  $t = 350^\circ\text{C}$ . Плавление минерала начинается при  $t = 900^\circ\text{C}$ .

Химический состав минералов чароитовых пород представлен в табл. 3.4.

Полевые шпаты – распространенные минералы чароитовых пород. Образуют как крупные ограненные кристаллы, так и округлые выделения размером 1–2 см. Цвет белый, зеленоватый, водяно-прозрачный. По составу полевые шпаты отвечают микроклину, в котором содержится до 3–4% Fe при недостатке Al [Владыкин и др. 1983]. Подобные составы с содержанием Fe в полевых шпатах встречаются в агпаитовых лампроитах.

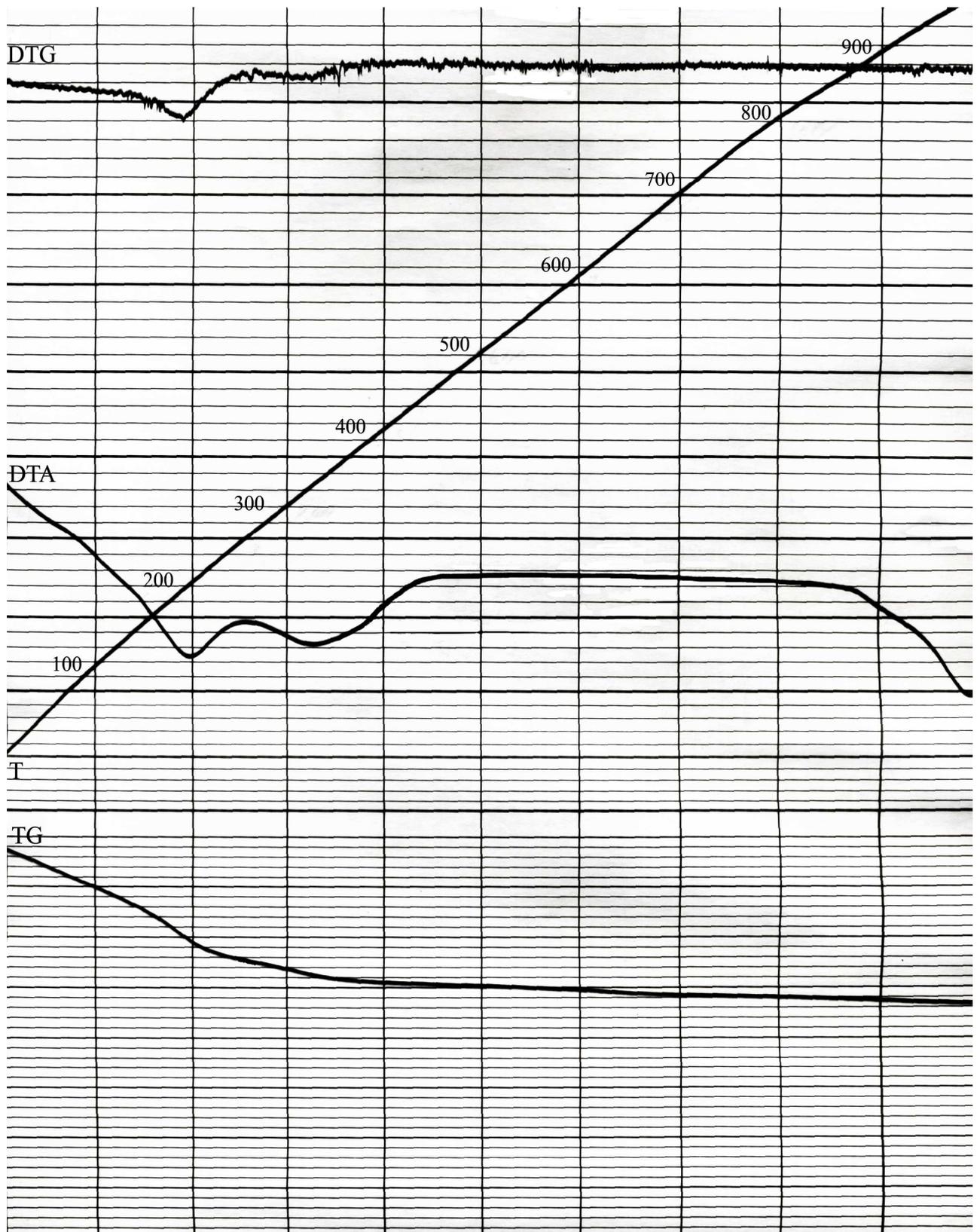


Рис. 3.8 Дериватограмма чароита (Ч-1001)

Условия съемки: TG - 400\*100; DTG - 1/5; DTA - 1/5

Таблица 3.4

## Химический состав минералов чароитовых пород (в мас. %)

Проба	24	248	2/4	лит.*	лит.	лит.	24/53a	24/53	248	24/55	24/10
Окисл/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	56,1	47,1	57,0	53,5	56,4	55,8	57,4	62,3	57,9	55,5	55,5
TiO <sub>2</sub>	9,7	0,3	9,2	10,4	9,9	10,1	2,3	2,2	9,1	1,6	0,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,7	0,1	0,8	1,0	н/о**	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9	0,6	1,3	0,7	0,4	0,9	1,5	1,4	1,4	1,5	0,4
FeO	0,5	н/о	0,2	н/о	1,0	0,9	0,2	0,1	0,2	0,2	н/о
MnO	0,7	0,4	0,9	4,7	1,2	0,4	0,7	0,5	1,0	0,8	0,3
MgO	0,4	0,1	0,4	н/о	0,2	0,0	0,9	0,5	0,4	1,3	0,2
CaO	13,8	33,9	13,5	11,0	13,6	14,2	20,7	16,6	12,8	23,1	21,6
Na <sub>2</sub> O	4,3	4,9	4,0	4,3	3,6	4,3	1,4	1,4	3,7	1,2	6,4
K <sub>2</sub> O	11,4	1,9	11,0	12,5	11,3	12,6	10,8	6,9	11,2	11,2	9,3
SrO	0,1	0,3	0,1	н/о	н/о	н/о	0,1	0,2	0,1	0,1	0,4
BaO	0,0	0,0	0,5	н/о	н/о	н/о	0,0	0,4	0,6	0,0	0,0
H <sub>2</sub> O	0,7	2,7	1,3	1,9	1,1	1,3	1,5	4,0	1,1	0,6	1,3
CO <sub>2</sub>	0,3	6,6	0,7	н/о	н/о	н/о	0,7	2,7	0,6	0,3	0,4
F	0,1	0,2	0,1	н/о	0,1	н/о	1,3	0,9	0,1	1,6	4,1
Сумма	99,1	99,6	100,3	100,5	99,9	100,5	100,1	100,5	100,3	99,1	99,9

Таблица 3.4 (продолжение)

Проба	40	45	117/4	лит.	23/4	111/5	120	128в	117/3	лит.	124
Окисл/№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO <sub>2</sub>	57,1	55,9	56,3	54,2	64,0	66,5	64,2	68,2	55,6	55,6	51,8
TiO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	н/о	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	1,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	н/о	н/о	н/о	н/о	0,1	0,7	0,1	0,2	н/о	0,0	0,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,2	0,1	н/о	0,6	0,3	0,1	0,25	6,6	6,0	20,9
FeO	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	5,6	5,6	2,7	5,2
MnO	0,5	0,4	0,5	н/о	0,1	0,1	0,3	0,1	0,4	0,2	0,5
MgO	0,1	0,2	0,1	н/о	0,1	0,1	0,1	0,1	15,8	17,2	2,3
CaO	20,4	20,7	21,1	20,9	16,8	14,8	16,5	16,1	2,5	3,9	6,2
Na <sub>2</sub> O	6,5	6,5	6,6	7,1	8,5	6,4	8,4	5,5	6,5	5,6	9,6
K <sub>2</sub> O	9,6	10,0	10,0	10,6	2,1	5,8	5,2	4,0	4,6	4,5	0,1
SrO	0,4	0,7	0,5	0,6	1,1	0,1	0,2	0,0	0,2	н/о	0,1
BaO	н/о	н/о	н/о	н/о	0,0	0,1	0,1	0,2	н/о	н/о	0,3
H <sub>2</sub> O	2,1	2,1	2,4	4,6	1,8	3,5	3,5	3,8	0,3	1,9	1,0
CO <sub>2</sub>	н/о	н/о	н/о	н/о	0,9	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
F	5,5	5,8	5,0	3,7	2,1	1,5	1,9	1,5	2,6	2,3	н/о
Сумма	99,9	100,0	100,5	100,2	98,3	99,6	99,9	100,1	99,8	100,0	99,7

Таблица 3.4 (продолжение)

Проба	135	161/7	1/234	34	145а	1286	201	лит.	134а	93/47
Окисл/№	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
SiO <sub>2</sub>	51,7	52,0	47,2	52,4	54,7	59,9	55,2	59,5	41,0	56,7
TiO <sub>2</sub>	0,8	0,7	0,7	1,1	0,3	0,1	0,1	0,1	10,9	9,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,1	0,5	6,8	н/о	0,6	0,3	0,9	0,4	2,4	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,8	21,0	3,1	18,4	0,3	0,25	0,7	0,3	1,3	0,8
FeO	8,8	3,1	0,9	6,3	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,2
MnO	0,7	0,2	0,0	0,4	0,7	0,6	0,6	0,6	0,3	0,7
MgO	3,5	4,2	15,5	3,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
CaO	11,6	6,8	24,8	9,2	32,6	28,1	31,3	27,9	18,5	12,6
Na <sub>2</sub> O	6,0	9,3	0,1	7,8	8,0	7,4	7,4	7,4	3,2	3,4
K <sub>2</sub> O	0,1	0,2	0,4	0,1	0,7	0,6	1,3	0,6	6,8	6,6
SrO	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	4,3	0,2
BaO	н/о	0,3	н/о	н/о	н/о	0,2	н/о	0,2	6,9	н/о
H <sub>2</sub> O	н/о	н/о	0,5	0,1	2,2	2,3	2,3	2,4	1,9	0,6
CO <sub>2</sub>	н/о	н/о	0,3	н/о	н/о	н/о	0,4	н/о	н/о	7,9
F	н/о	0,0	0,1	н.о.	0,2	н/о	0,1	н/о	3,3	0,2
Сумма	99,2	99,6	100,4	99,5	100,6	99,9	100,4	99,4	100,9	100,3

Таблица 3.4 (продолжение)

Проба	70	24/47	112/5	135/7	115/10	139	24/46	Аг-1	24/48	лит.
Окисл/№	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
SiO <sub>2</sub>	58,7	42,0	55,6	56,0	56,4	56,9	50,4	58,3	63,4	46,8
TiO <sub>2</sub>	0,3	9,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	15,1	н/о
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4	3,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,4	2,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	1,0	3,2	н/о	н/о	4,2	0,6	0,3	3,6	0,1
FeO	н/о	0,2	4,0	7,4	3,4	3,8	н/о	н/о	0,5	н/о
MnO	0,6	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	1,1	0,2	0,1	н/о
MgO	11,4	0,2	19,2	19,9	21,6	19,7	0,2	0,1	0,2	н/о
CaO	9,1	16,0	3,4	4,5	5,7	4,9	34,4	26,3	0,1	7,1
Na <sub>2</sub> O	0,1	3,1	5,8	5,1	4,7	5,4	2,2	7,1	15,7	1,1
K <sub>2</sub> O	2,3	6,7	3,8	4,3	4,7	1,2	5,1	0,8	0,4	6,1
SrO	0,3	4,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	2,6	0,0	0,3
BaO	н/о	8,1	1,9	0,3	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	1,8
H <sub>2</sub> O	8,7	0,9	0,8	1,0	0,9	1,8	1,2	0,4	0,1	11,5
CO <sub>2</sub>	5,2	0,5	н/о	н/о	н/о	н/о	2,1	0,3	н/о	н/о
F	0,3	2,7	1,4	2,1	1,4	1,6	3,4	4,0	1,0	н/о
Сумма	99,8	98,3	99,9	101,6	99,9	100,6	101,5	100,8	100,6	99,9

Примечание: 1-6 - тинаксит; 7-10 - токкоит; 11-15 - франкаменит; 16-19 - федорит; 20-21 - К-арфведсонит; 22-26 - пироксен; 27-30 - пектолит; 31-34 - юкспорит; 35-37 - рихтерит; 38 - амфибол-асбест; 39 - мизерит; 40 - агреллит; 41 – нарсарсукиит.

Аналитики: Ожогина Т.В, Погодина Г.А., 2013-2015гг.

Лит.\* - литературные данные. н/о\*\* - не обнаружен. 1-3, 7-14, 16-20, 22 - 29, 31-41 - авторские анализы; 4 - Соколова и др., 1975; 5, 30 - Владыкин и др., 1983; 6 - Рогов и др., 1965; 15 - Рогова и др., 1977; 21 - Лазебник и др., 1977; 42 - Лазебник и др., 1979.

Пироксены - наиболее распространенные минералы во всех породах чароитового комплекса. Они образуют отдельные столбчатые и игольчатые кристаллы, но чаще всего солнцевидные сферолитовые агрегаты различных размеров. Часто встречаются скопления этих агрегатов.

Цвет пироксенов варьирует от темно-зеленого до черного. По химическому составу (табл. 3.2) пироксены чароитовых пород являются эгирин-диопсид-геденбергитами и содержат 50% эгиринового, 20% диопсидового и 29% геденбергитового минералов [Владыкин и др. 1983]. Довольно редко в некоторых разновидностях чароитовых пород встречаются более эгириновые разновидности пироксенов, что связано, вероятно, с их более высоким коэффициентом алкаитности.

Амфиболы встречаются в чароитовых породах. Выделяются амфиболы, образующие ранние вкрапленники, и амфиболы основной массы породы. Для вкрапленников характерны крупные призматические монокристалльные выделения почти черного цвета, в тонких сколах – зеленовато-синие. По химическому составу (табл. 3.2) эти амфиболы являются К-арфведсонитами [Владыкин и др. 1983]. В мелкозернистой основной массе породы встречаются мелкоигольчатые выделения светло-зеленого К-рихтерита.

Кварц - распространенный минерал в чароитовых породах, наблюдается в виде округлых выделений. Это ранний минерал-вкрапленник, образующий скопления, которые обтекаются чароитовой массой (рис. 3.5 в) [Владыкин и др. 1983]. Иногда встречаются ксенолиты кварцевых песчаников из вмещающих пород.

Кальцит - распространенный минерал, но встречается обычно в небольших количествах в основной массе чароитовых пород. По составу отвечает чисто кальциевой разновидности. Образование кальцита связано с расслоением первичного силикатно-карбонатного расплава на силикатную составляющую и карбонатитовую. При этом расслоении часть карбоната (до 10%) остается в силикатной матрице, а часть силикатов – в карбонатной. Карбонаты чароитовых

пород и карбонатитов детально изучались Е.И.Воробьевым [Воробьев и др. 1984, Конев и др., 1996].

Тинаксит открыт на Мурунском массиве (рис. 3.9 а-б). Встречается в чароитовых породах, калишпатах (микросиенитах), кальцитовых и бенстотитовых карбонатитах. Образует хорошо ограненные призматические кристаллы толщиной от 1 до 10 мм, длиной до 10 см, лучистые, радиально-лучистые и сферолитовые агрегаты. Минерал окрашен в коричневато-желтый цвет, также может быть прозрачным. Крупнозернистый тинаксит кристаллизуется в виде вкрапленников раньше чароита. В основной массе чароитовых пород тинаксит отделяется в виде капель, которые раскристаллизовываются в сферолиты, подобно сферолитам пироксена (рис. 3.9 б) [Владыкин и др.1983, Рогов и др., 1965].



Рис. 3.9 а Желтовато-оранжевые включения тинаксита в чароите

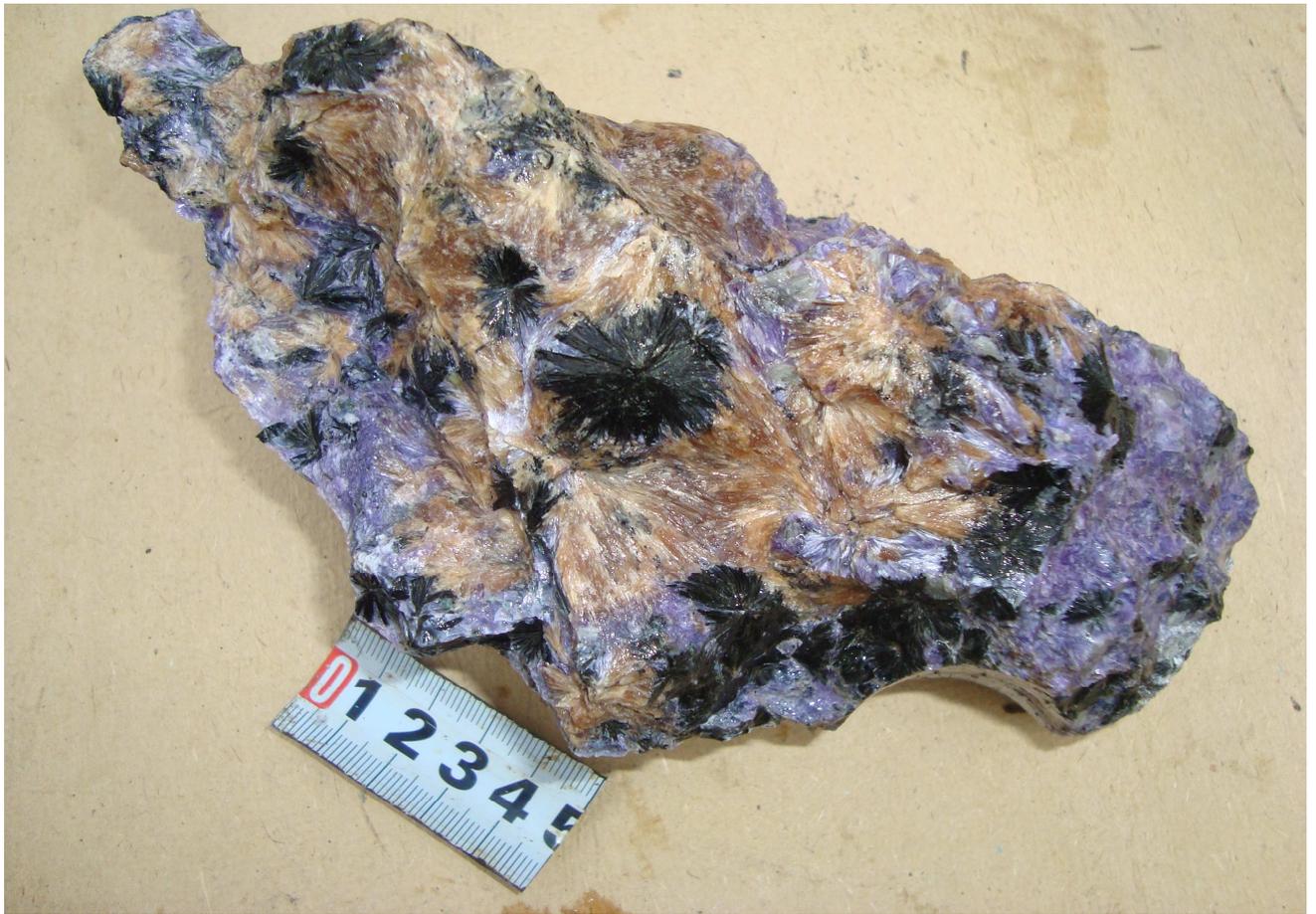


Рис. 3.9 б Сферолитовые проявления тинаксита (золотисто-оранжевый) и пироксена (черный) в чароитовой породе (фото: Владыкин Н.В.)

Варианты формулы тинаксита представлены в табл. 3.5. Структура тинаксита [Kaneva, 2014], построенная по плоскости (001) и по плоскости (010), показана на рис. 3.10 а и б соответственно.

Таблица 3.5

Формула тинаксита из различных источников

Формула	Ссылка
$\text{NaK}_2\text{Ca}_2\text{TiSi}_7\text{O}_{19}(\text{OH})$	Рогов и др., 1965
$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{NaTi}[\text{Si}_7\text{O}_{18}(\text{OH})]\text{O}$	Rozhdestvenskaya et al., 2010
<b>1)</b> $(\text{K}_{0.99}\text{Ba}_{0.01})\text{K}(\text{Na}_{0.80}\text{Ca}_{0.20})\text{Ca}(\text{Ca}_{0.83}\text{Na}_{0.06}\text{Mg}_{0.08}\text{Mn}_{0.02}\text{Zr}_{0.01}\text{REE}^{3+}_{0.02})$ $(\text{Ti}_{0.80}\text{Fe}^{3+}_{0.02}\text{Fe}^{2+}_{0.12}\text{Mn}_{0.06})(\text{O}_{0.80}(\text{OH})_{0.20})[\text{Si}_7\text{O}_{18}(\text{OH})]$ <b>2)</b> $(\text{K}_{0.96}\text{Sr}_{0.01}\text{Ba}_{0.01})\text{K}(\text{Na}_{0.94}\text{Ca}_{0.06})\text{Ca}(\text{Ca}_{0.64}\text{Na}_{0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{Mn}_{0.12}$ $\text{Fe}^{2+}_{0.06}\text{REE}^{3+}_{0.02}\text{Hf}_{0.02})(\text{Ti}_{0.94}\text{Fe}^{3+}_{0.01}\text{Fe}^{2+}_{0.05})(\text{O}_{0.94}(\text{OH})_{0.06})[\text{Si}_7\text{O}_{18}(\text{OH})]$	Kaneva, 2014

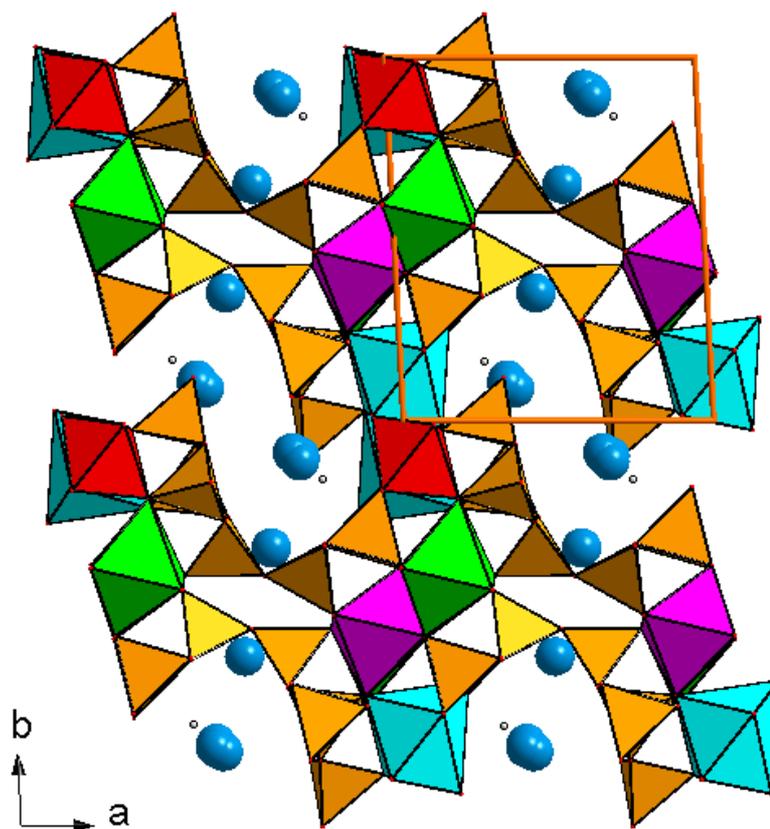


Рис. 3.10 а Кристаллическая структура тинаксита,  
построенная по плоскости (001). [Kaneva, 2014]

Примечания: Тетраэдры Si показаны оранжевым цветом, октаэдры M1 - красным, полиэдры M2 - бирюзовым, октаэдры M3 -зеленым и M4 - розовым, атомы К показаны как голубые круги, атомы Н показаны как маленькие белые круги.

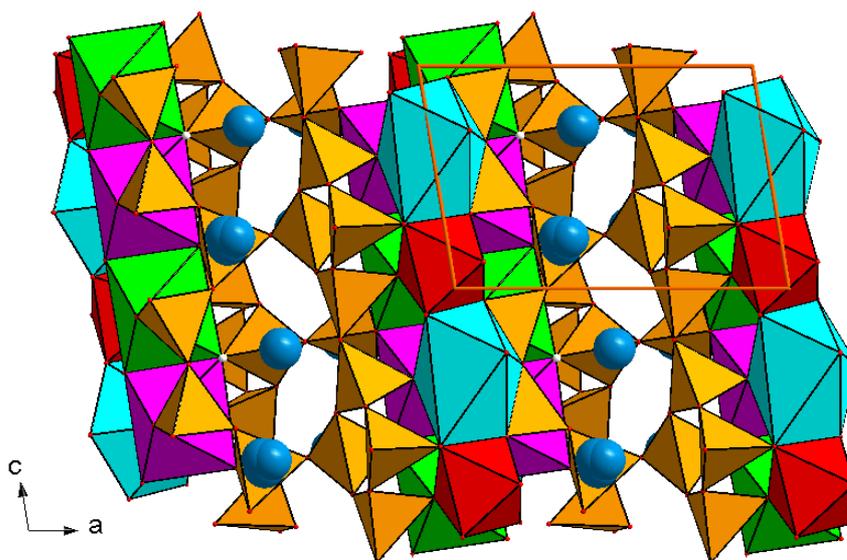


Рис. 3.10 б Кристаллическая структура тинаксита, построенная по плоскости (010).

[Kaneva, 2014] Примечания как в рис. 3.10 а

Дериватограмма тинаксита (рис 3.11) показывает, что при нагревании минерала выделение ОН начинается при  $t = 850^{\circ}\text{C}$  при пике в  $880^{\circ}\text{C}$ , и заканчивается при  $t = 900^{\circ}\text{C}$ . Плавление тинаксита начинается при  $t = 1000^{\circ}\text{C}$ .

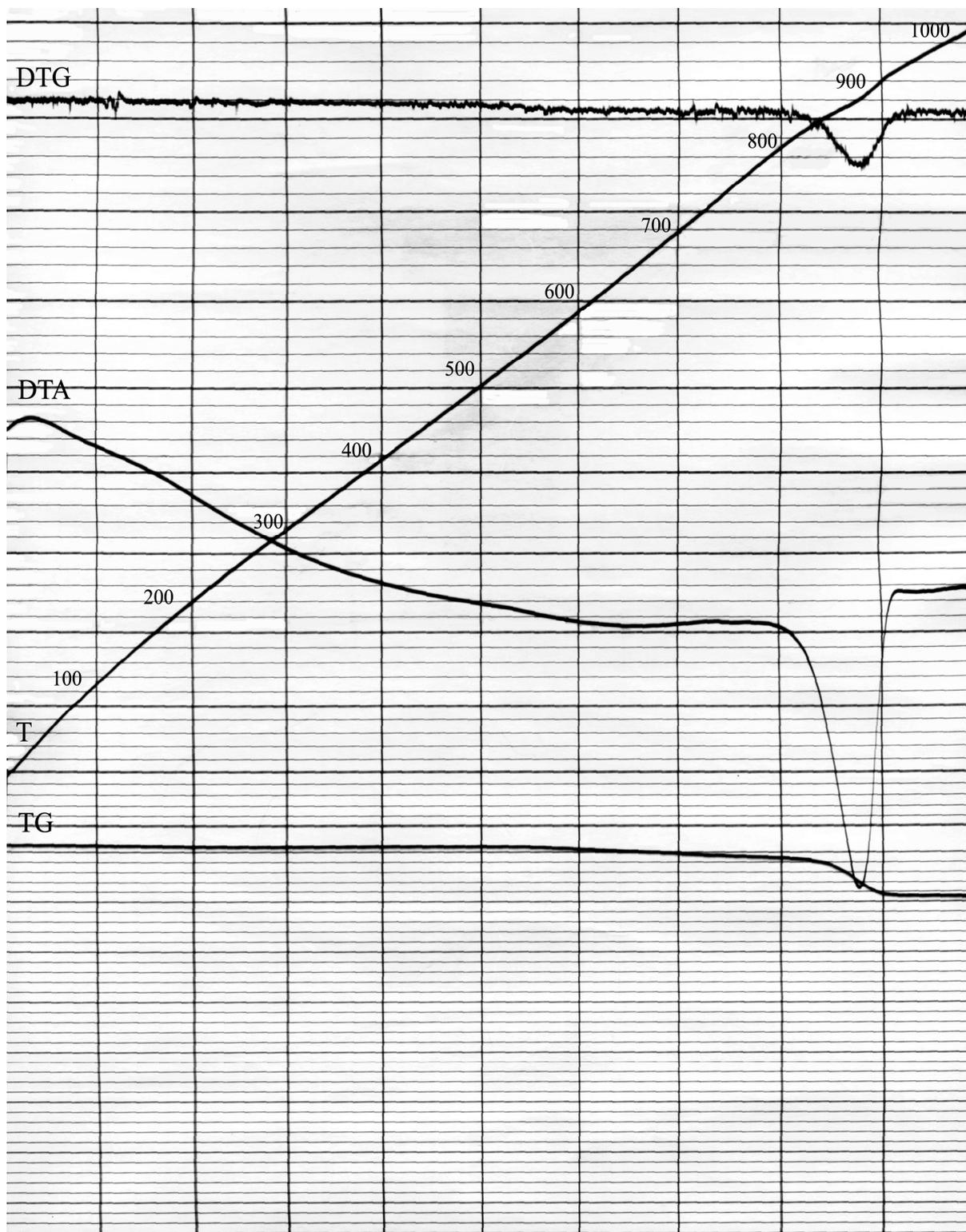


Рис. 3.11 Дериватограмма тинаксита (Ча-105/5)

Условия съемки: TG - 400\*100; DTG - 1/5; DTA - 1/5

Пектолит. Формула пектолита  $\text{Ca}_2\text{NaHSi}_3\text{O}_9$  была расшифрована Бюргером [1956]. Этот минерал редко образует хорошо сформированные однородные кристаллы, и чаще встречается в виде бесформенных выделений в основной массе [Prewitt, 1967].

Пектолит – распространенный минерал в чароитовых породах, в некоторых образцах составляет до 30% объема породы. Кроме чароитовых пород он распространен и в других породах чароитового комплекса. Образует отдельные кристаллы и сростки зеленоватых, салатно-зеленых, белых и желтых оттенков. В некоторых участках обнаружены кристаллы пектолита в виде солнцевидных агрегатов размером до 5 см. Пектолит обладает стекляннным блеском и совершенной спайностью по {100} и {001}. Так как в породах малого Мурунского массива не образуются плагиоклазы, а пектолит имеет формулу плагиоклаза, но с группой OH, то можно считать, что он кристаллизуется в K-агпаитовых условиях вместо плагиоклаза [Владыкин и др. 1983].

Эканит. Название минерала было предложено Андерсоном и др. в честь исследователя и геммолога Ф. Эканайяка [Anderson et al., 1961], для зеленоватого, прозрачного или просвечивающего Th-Ca силиката из Шри-Ланки. Формула минерала  $\text{ThCa}_2\text{Si}_8\text{O}_{20}$ .

В чароитовых породах эканит (рис. 3.12) встречается в виде полупрозрачных вытянутых мелких кристаллов желтоватого цвета. В состав эканита входит Th, поэтому минерал радиоактивен. В последнее время распространилось мнение, что чароит – радиоактивный минерал. Это абсолютно неверно. Чароит состоит из K, Ca, Na, Si, (Ba, Sr) и  $\text{H}_2\text{O}$ , и не содержит радиоактивных элементов. Чароитовые породы имеют незначительную радиоактивность, когда в них встречается эканит, что бывает довольно редко.

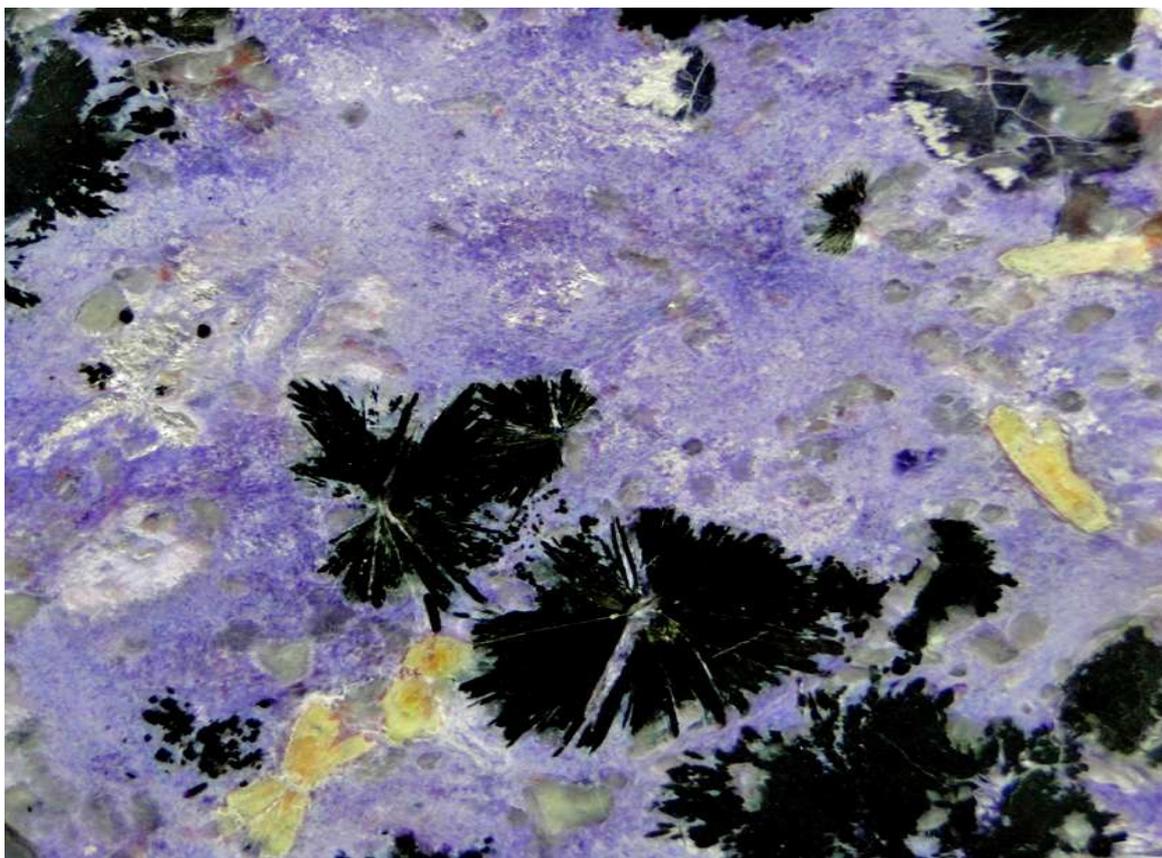


Рис. 3.12 Эканит в чароитовой породе (желтоватые включения)

Франкаменит – хорошо известный на Муруне «канасит» [Рождественская и др., 1988], который после структурных исследований вначале был описан как триклинный канасит [Никишова и др., 1992], а затем как новый минерал – франкаменит [Никишова и др., 1996]. Минерал (рис. 3.13 а, б) достаточно распространен в чароитовых породах. Он образует вкрапленники размером до 5 см, внешне похожие на микроклин. Цвет его зеленовато-серый, синевато-серый, иногда зеленый [Владыкин и др. 1983]. Варианты формулы франкаменита представлены в табл. 3.6.

Табл. 3.6

Формула франкаменита из различных источников

Формула	Ссылка
$K_{2,93}(Na_{2,94}Ca_{4,93}Mg_{0,04}Mn_{0,01}Fe_{0,02})_{8,03}Si_{12}O_{30}(O_{0,04}(OH)_{1,14}F_{2,82})_4$	Рождественская и др., 1988
$K_{2,93}Na_{2,93}(Ca_{5,05}Mn_{0,07})_{5,12}(Si_{12}O_{30})F_{2,83}(OH)_{1,35}O_{,79}H_2O$	Никишова и др., 1996

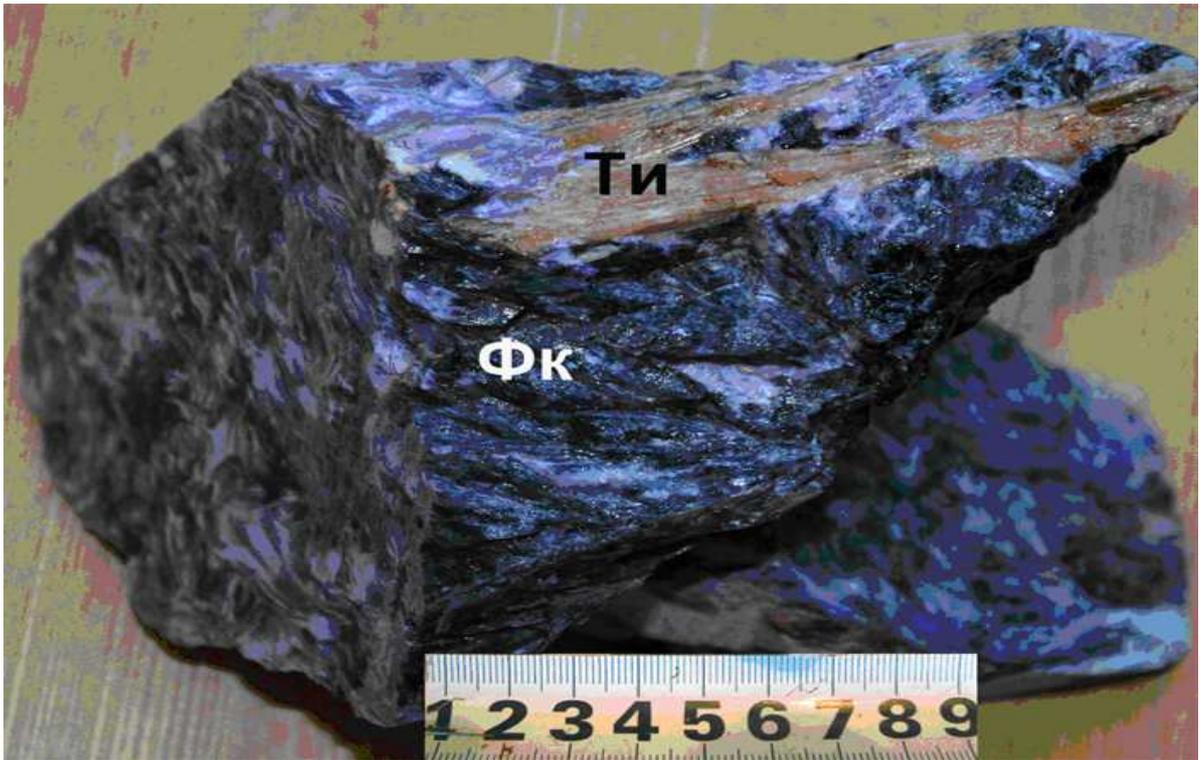


Рис. 3.13 а Франкаменит с тинакситом

фк - франкаменит; ти - тинаксит

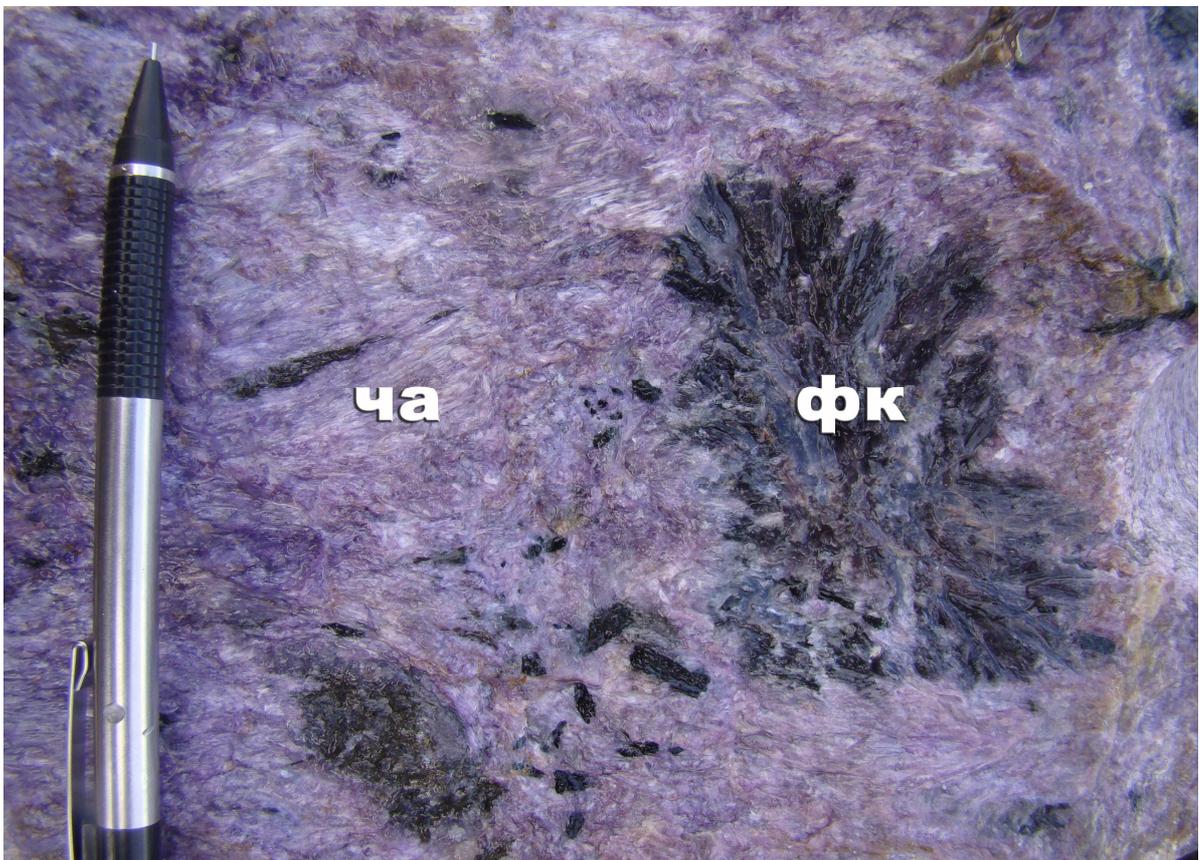


Рис. 3.13 б Сферолиты франкаменита в чароитовой породе

фк - франкаменит; ча - чароит

Дериватограмма франкаменита показана на рис 3.14. При нагревании минерала идет выделение  $H_2O$  при  $t = 250^\circ C$  при пике в  $300^\circ C$ , и заканчивается при  $t = 350^\circ C$ . Далее, при  $t = 650^\circ C$  с пиком в  $700^\circ C$  происходит выделение  $OH$ . Плавление франкаменита начинается при  $t = 950^\circ C$ .

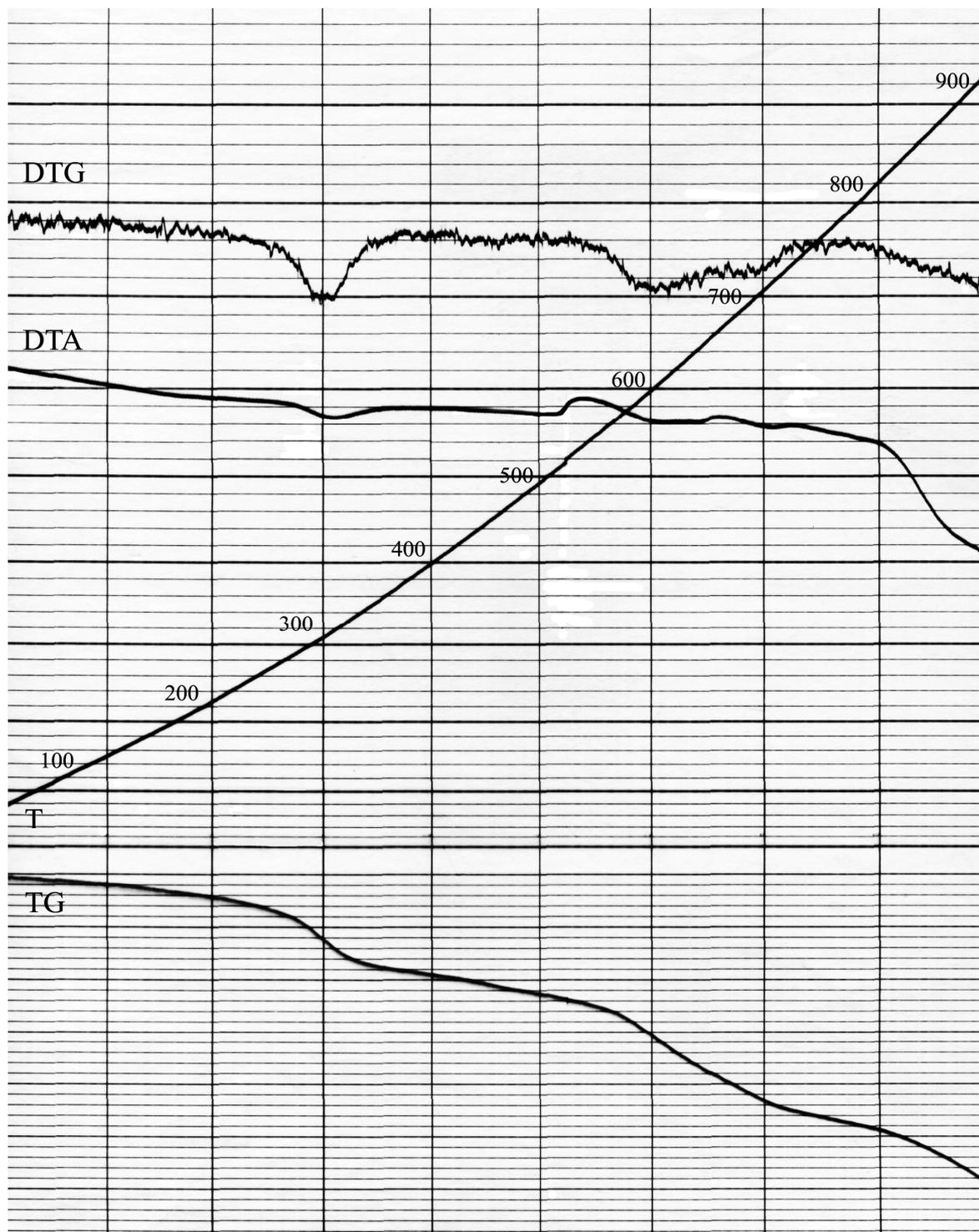


Рис. 3.14 Дериватограмма франкаменита (Ча 117/4)

Условия съемки: TG 500.50; DTG - 1/5; DTA - 1/15 - 1/5

Апофиллит, как первичный минерал, встречается в федорит-пектолит-чароитовых породах левого борта реки Даван. Вторичный развивается по чароиту, и по всем щелочно-кальциевым силикатам при поверхностном выветривании, вследствие чего глыбы чароититов покрыты сплошной сероватой коркой этого минерала. Апофиллит образует ксеноморфные агрегаты кристаллов белого и розового цветов, совместно с пектолитом и федоритом. Блеск стеклянный, тусклый. В шлифах аномально-серый. [Владыкин и др., 1983, Воробьев, 2008].

Федорит впервые был найден в фенитизированных породах в щелочном комплексе Турий Мыс на Кольском полуострове, Россия [Khukarenko et al. 1965]. Вторая находка была отмечена в чароитовых породах маломурунского массива [Владыкин и др., 1983; Mitchell and Burns, 2001, Конев и др. 1996].

Ранний минерал-вкрапленник федорит - редкий К-Са-Na силикат с переменными количествами воды и F, в чароитовых породах (рис. 3.15) образует вкрапленники размером до 5 см белого и розового цвета. В поверхностных условиях со временем розовый федорит теряет цвет и становится белым. На участке «Подснежник» Мурунского массива встречена жила чароитовых пород (мощностью 1 м), состоящая на 90% из федорита. На участке «Шток Кедровый» встречена жила, состоящая из крупных выделений агреллита и федорита. Минерал образует прозрачные, слюдоподобные выделения и кристаллы неправильной формы. Иногда федорит реагирует с основной чароитовой массой, превращаясь в агрегат коричневого цвета (рис. 3.15). Варианты формулы федорита представлены в табл. 3.7.

Дериватограмма федорита представлена на рис 3.16. При нагревании минерала идет выделение  $H_2O$  при  $t = 250^{\circ}C$  Выделение OH происходит при  $t = 450^{\circ}C-600^{\circ}C$ . Следующий пик в  $750^{\circ}C$ , вероятно, связан с выделением F, а при  $t = 980^{\circ}C$  идет плавление минерала.

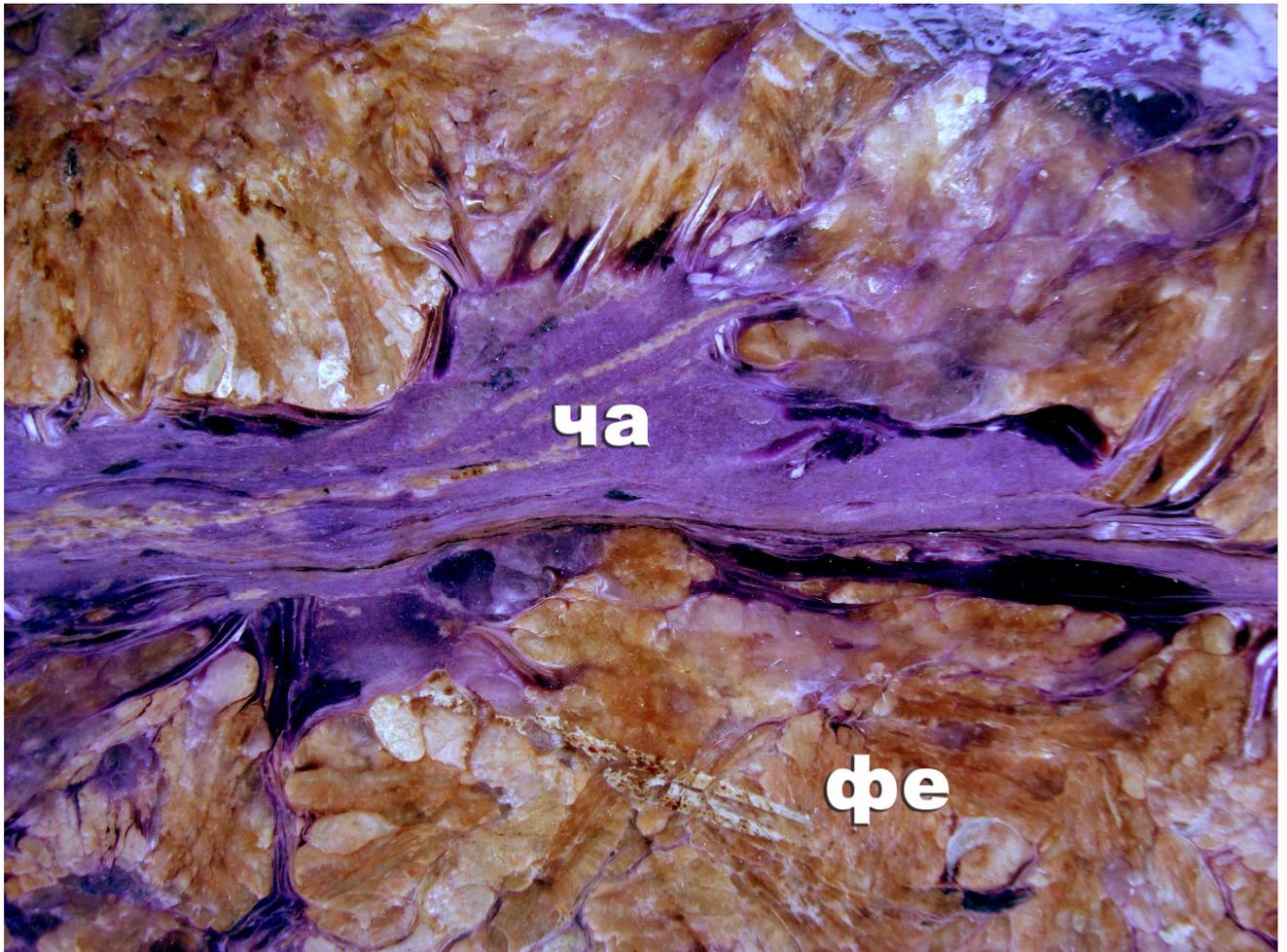


Рис. 3.15 Коричневый измененный федорит со сливным чароитом

фе - федорит; ча - чароит

Табл. 3.7

Формула федорита из различных источников

Формула	Ссылка
$(K_{1.65}Na_{0.83})(Ca_{4.52}Na_{2.48})Si_{16}O_{38}(OH,F)*H_2O$	Sokolova et al., 1983
$(K_{0.82}Na_{1.95})(Ca_{4.35}Na_{2.34}Al_{0.31})(Si_{15.35}Al_{0.65})O_{38}(OH,F)*H_2O$	Joswig et al., 1988
$K_2(Ca_5Na_2)Si_{16}O_{38}(OH,F)_2*H_2O$	Merlino, 1988
$KNa_4Ca_4(Si, Al)_{16}O_{36}(OH)_4*6H_2O$	Blackburn and Dennen, 1997
1) $(Na_{1.29}K_{0.79})_{2.08}(Ca_{4.48}Na_{2.52})_{7.0}(Si,Al)_{16}O_{38}F_2*3.47H_2O$ 2) $(Na_{1.68}K_{0.48})_{2.16}(Ca_{4.41}Na_{2.54}Mn_{0.04}Fe_{0.04}Ti_{0.002})_{7.0}(Si_{15.96},Al_{0.03})_{15.98}O_{38}(F,Cl)_{2.47}$	Mitchell and Burns, 2001

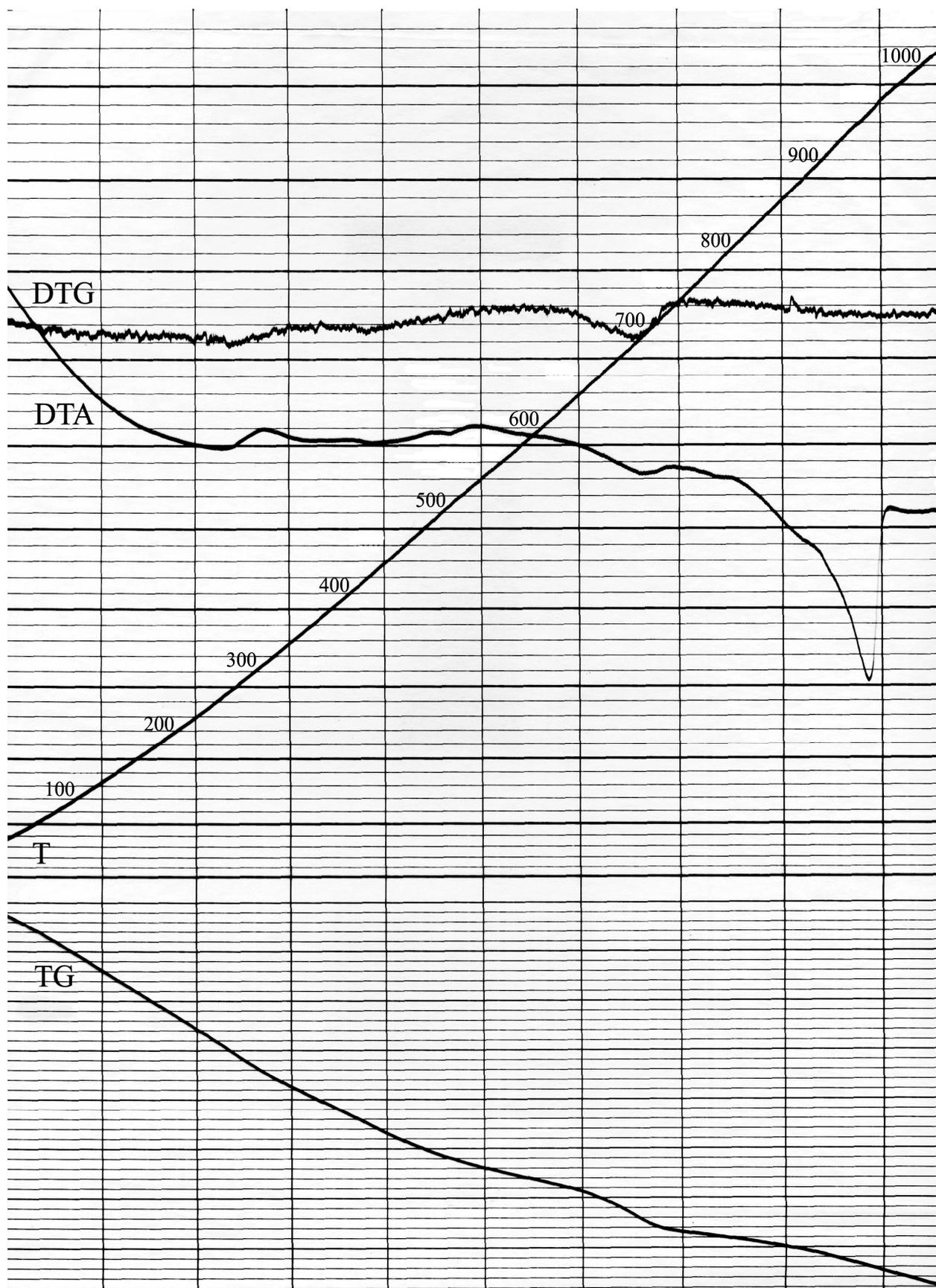


Рис. 3.16 Дериватограмма федорита (Ча/20)

Условия съемки: TG 400.50; DTG - 1/5; DTA - 1/5

Агреллит - весьма редкий минерал, на Мурунском массиве это третья находка агреллита в мире. Встречен в большом количестве в жилах штока «Кедровый» совместно с федоритом. Минерал образует удлиненные белые кристаллы размером до 5 см. В самих чароитсодержащих породах встречается редко.

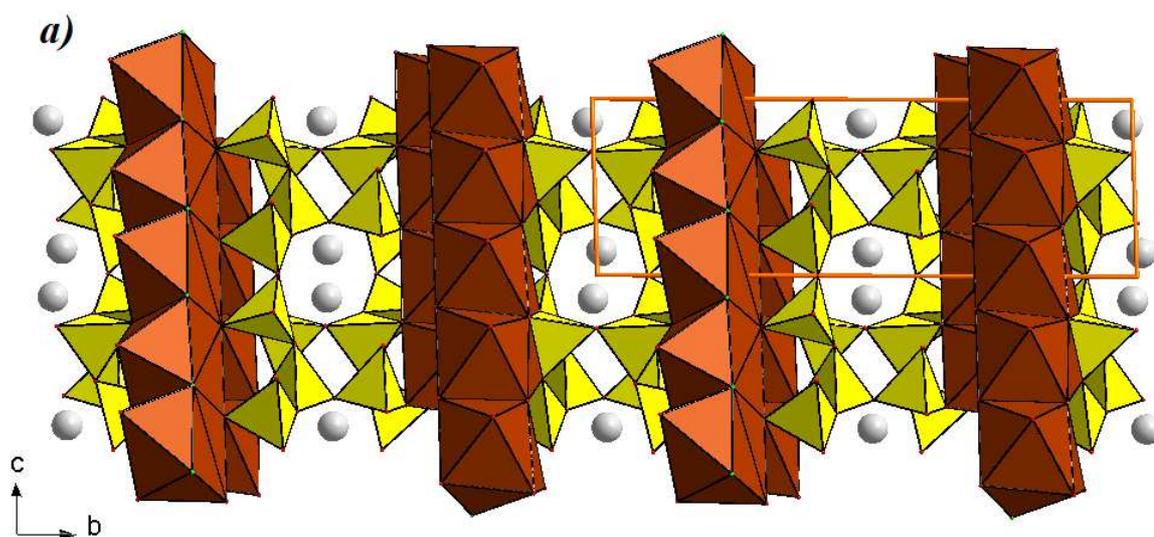
Варианты формулы агреллита, собранные из разных источников, представлены в табл. 3.8.

Табл. 3.8

Формула агреллита из различных источников

Формула	Ссылка
$(\text{Na}_{0.94}\text{K}_{0.03})(\text{Ca}_{1.75}\text{Sr}_{0.16})[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{F}_{0.78}(\text{O},\text{OH})_{0.22}) \cdot 0.24\text{H}_2\text{O}$ Упрощенная: $\text{Na}(\text{Ca}_{1.75}\text{Sr}_{0.16})[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{F},(\text{OH})$	Rozhdestvenskaya et al., 1998
1) $(\text{Na}_{0.95}\text{K}_{0.04})(\text{Ca}_{1.81}\text{Sr}_{0.04}\text{Na}_{0.04}\text{Mn}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})[\text{Si}_4(\text{O}_{9.77}\text{OH}_{0.23})](\text{F}_{0.87}\text{OH}_{0.13})$ 2) $(\text{Na}_{0.99}\text{K}_{0.01})(\text{Ca}_{1.95}\text{Sr}_{0.04}\text{Mn}_{0.01})[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{F}$ Упрощенная: $\text{NaCa}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{F}$	Канева, 2014
1) $(\text{Na}_{1.00}\text{K}_{0.01})(\text{Ca}_{1.75}\text{Sr}_{0.18}\text{Mn}_{0.02})[\text{Si}_{4.03}\text{O}_{10}](\text{F}_{0.58}(\text{OH})_{0.42}) \times 0.2\text{H}_2\text{O}$ 2) $(\text{Na}_{1.02}\text{K}_{0.01})(\text{Ca}_{1.59}\text{Sr}_{0.33}\text{Ce}_{0.01}\text{La}_{0.01})[\text{Si}_{4.03}\text{O}_{10}](\text{F}_{0.62}(\text{OH})_{0.38})$ 3) $(\text{Na}_{1.03}\text{K}_{0.01})(\text{Ca}_{1.47}\text{Sr}_{0.46}\text{Ce}_{0.01}\text{La}_{0.01})[\text{Si}_{4.02}\text{O}_{10}](\text{F}_{0.73}(\text{OH})_{0.27})$ Упрощенная: $\text{Na}(\text{Ca}_{1.75}\text{Sr}_{0.18})[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{F},(\text{OH}))$	Конев и др. 1996
$(\text{Na}_{1.01}\text{K}_{0.02})(\text{Ca}_{1.82}\text{REE}_{0.12}\text{M}_{0.04})\text{Si}_{3.90}\text{Al}_{0.01}\text{O}_{9.92}(\text{F}_{0.93}(\text{OH})_{0.18})$ Упрощенная: $\text{Na}(\text{Ca}_{1.82}\text{REE}_{0.12})[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{F},(\text{OH}))$	Gittins et al, 1976

Кристаллическая структура агреллита, уточненная Каневой Е. по нашим каменным материалам [Канева, 2014], показана на рис. 3.17



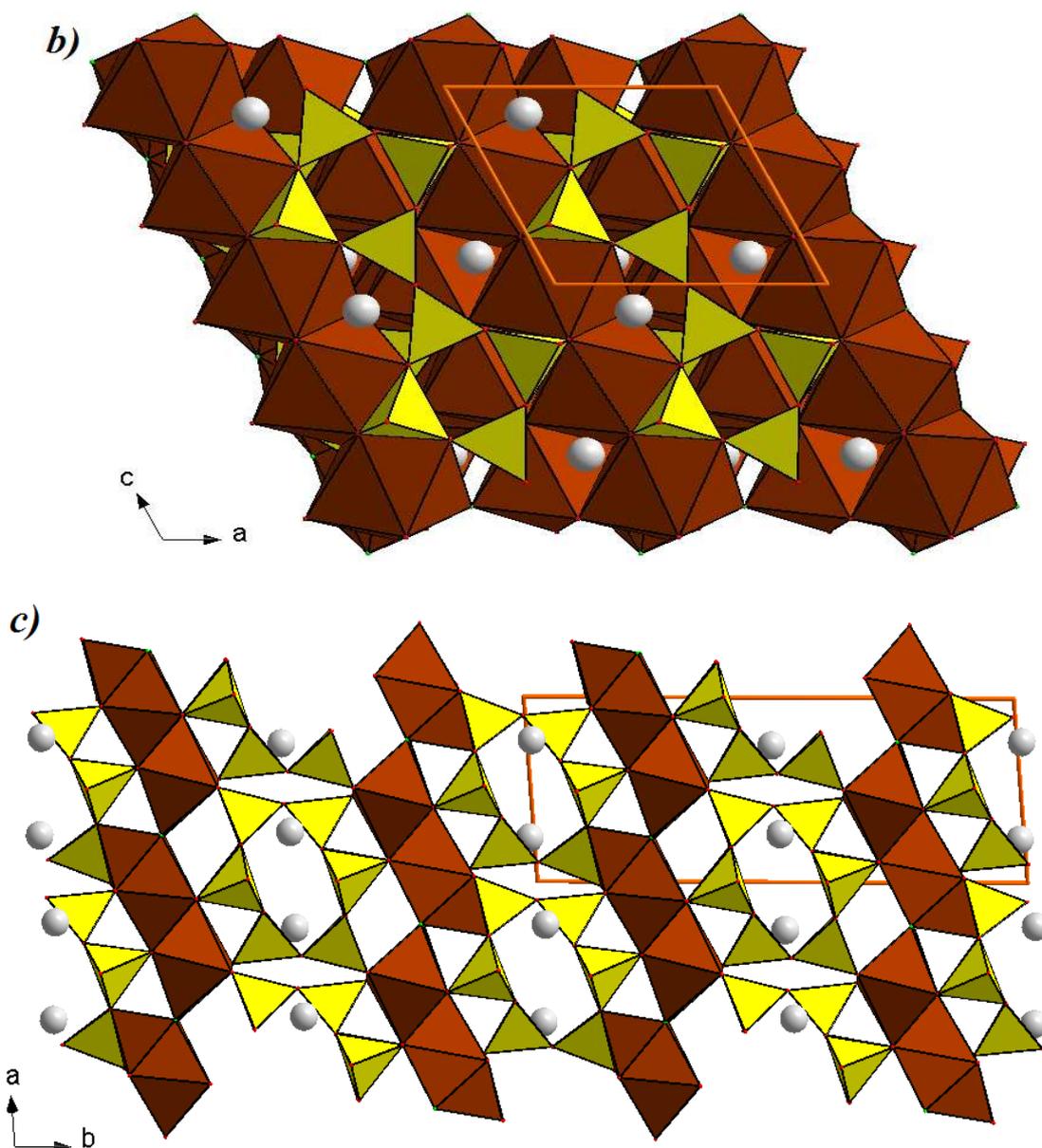


Рис. 3.17 Структура агреллита, построенная по трем осям [Kaneva, 2014]

Примечания: Тетраэдры ( $\text{SiO}_4$ ) показаны желтым цветом; октаэдры Ca показаны коричневым цветом; атомы К - серебристым.

Нарсарсуки́т  $\text{Na}_2\text{TiOSi}_4\text{O}_{10}$  - редкий силикат, впервые описанный в 1899 году в нарсарсукском пегматите из месторождения Нарсарсук, Гренландия [Flink, 1899; Reacor and Buerger, 1962]. Встречается в чароитовых породах Мурунского массива. Он образует мелкие кристаллы желтого цвета, размером до 3 мм. Кроме того нарсарсуки́т встречен в дайке лампрофира совместно с таусонитом [Конев и др., 1996]. Варианты формулы нарсарсуки́та из разных литературных источников представлены в табл. 3.9.

Формула нарсарсукиита из различных источников

Формула	Ссылка
$\text{Na}_{2.04}\text{Mn}_{0.03}\text{Mg}_{0.02}(\text{Ti}_{0.69}\text{Fe}_{0.31})\text{Si}_{3.96}\text{Al}_{0.02}(\text{O},\text{F})_{11}$	Flink, 1899
$\text{Na}_2(\text{Ti},\text{Fe})\text{Si}_4\text{O}_{11}$	Warren and Amberg, 1934
<b>1)</b> $\text{Na}_{2.07}\text{K}_{0.01}(\text{Ti}_{0.73}\text{Fe}_{0.22}\text{V}_{0.01}\text{Mg}_{0.01}\text{Zr}_{0.01})[\text{Si}_{3.98}\text{Al}_{0.01}(\text{O}_{10.72}\text{F}_{0.22}\text{OH}_{0.06})]$ <b>2)</b> $\text{Na}_{1.99}\text{K}_{0.02}(\text{Ti}_{0.74}\text{Fe}_{0.21}\text{V}_{0.01}\text{Mg}_{0.01}\text{Zr}_{0.01})[\text{Si}_{3.99}\text{Al}_{0.01}(\text{O}_{10.78}\text{F}_{0.23}\text{OH}_{0.07})]$ <b>3)</b> $\text{Na}_{2.04}\text{K}_{0.02}(\text{Ti}_{0.77}\text{Fe}_{0.19}\text{V}_{0.01}\text{Mg}_{0.01}\text{Zr}_{0.01})[\text{Si}_{3.98}\text{Al}_{0.01}(\text{O}_{10.77}\text{F}_{0.19}\text{OH}_{0.04})]$ <b>4)</b> $\text{Na}_{2.03}\text{K}_{0.01}(\text{Ti}_{0.75}\text{Fe}_{0.22}\text{V}_{0.02}\text{Mg}_{0.01})[\text{Si}_{3.97}\text{Al}_{0.02}(\text{O}_{10.72}\text{F}_{0.23}\text{OH}_{0.05})]$	Kaneva, 2014

Кристаллическая структура нарсарсукиита [Kaneva, 2014], уточненная по нашим каменным материалам, показана на рис. 3.18

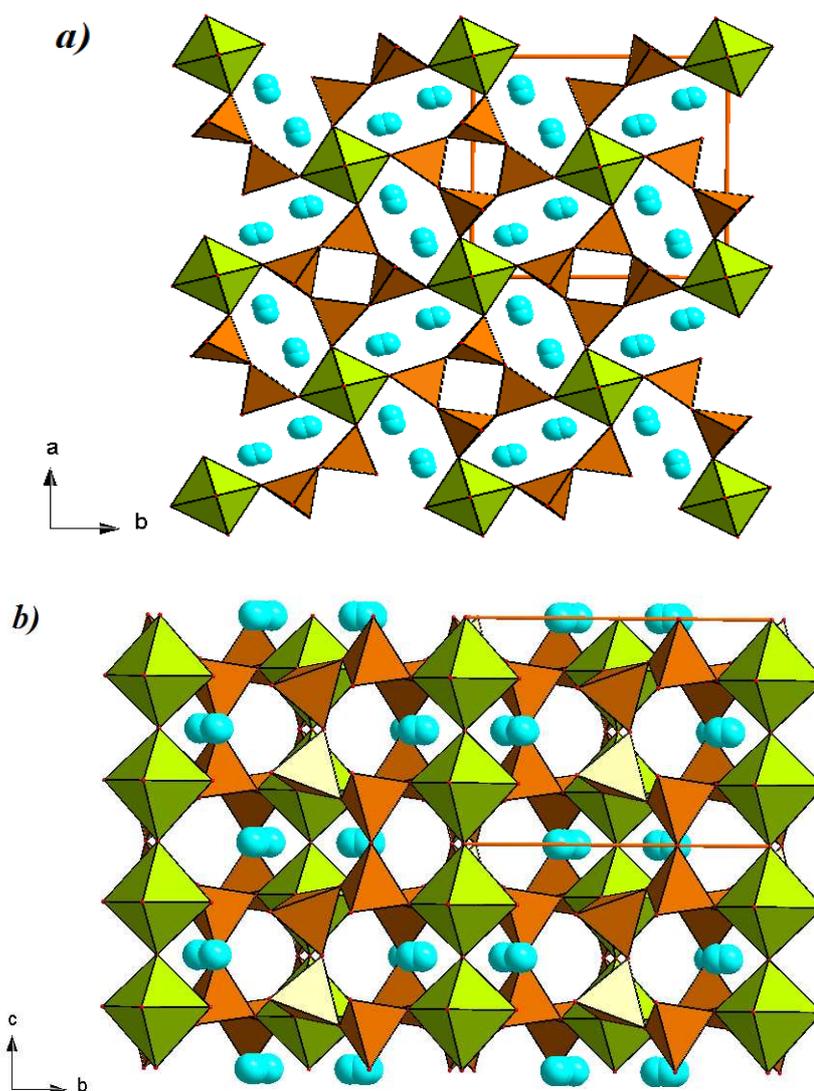


Рис. 3.18 Структура нарсарсукиита, построенная по двум осям [Kaneva, 2014]

Примечания: Тетраэдры ( $\text{SiO}_4$ ) показаны оранжевым цветом, октаэдры  $[(\text{Ti},\text{Fe})\text{O}_6]$  показаны зеленым цветом, атомы Na - голубым

### 3.3 Редкие и уникальные минералы

Формулы редких минералов чароитовых пород приведены в табл. 3.1.

Токкоит открыт в одном из проявлений чароитовых пород. По внешнему виду (рис. 3.19) и составу очень похож на тинаксит, но не содержит Ti. Цвет минерала в сплошных массах светло-коричневый, в отдельных кристаллах – бледно-желтый, коричневатый. Блеск стеклянный, излом занозистый, поскольку он образует радиально-лучистые или шестоватые агрегаты. Иногда токкоит тонковолокнистый, как и чароит, и так же хорошо полируется. Минерал относится к группе щелочно-кальциевых силикатов, содержащих гидроксильную группу и фтор. Он слагает почти мономинеральные жилоподобные зоны мощностью до 20-50 см и протяженностью до 10 м. Формула токкоита из различных источников представлена в табл. 3.10. Структура токкоита, уточненная Каневой Е. [Kaneva, 2014] и построенная по плоскостям (001) и (010) представлена на рис. 3.20 и 3.21 соответственно.

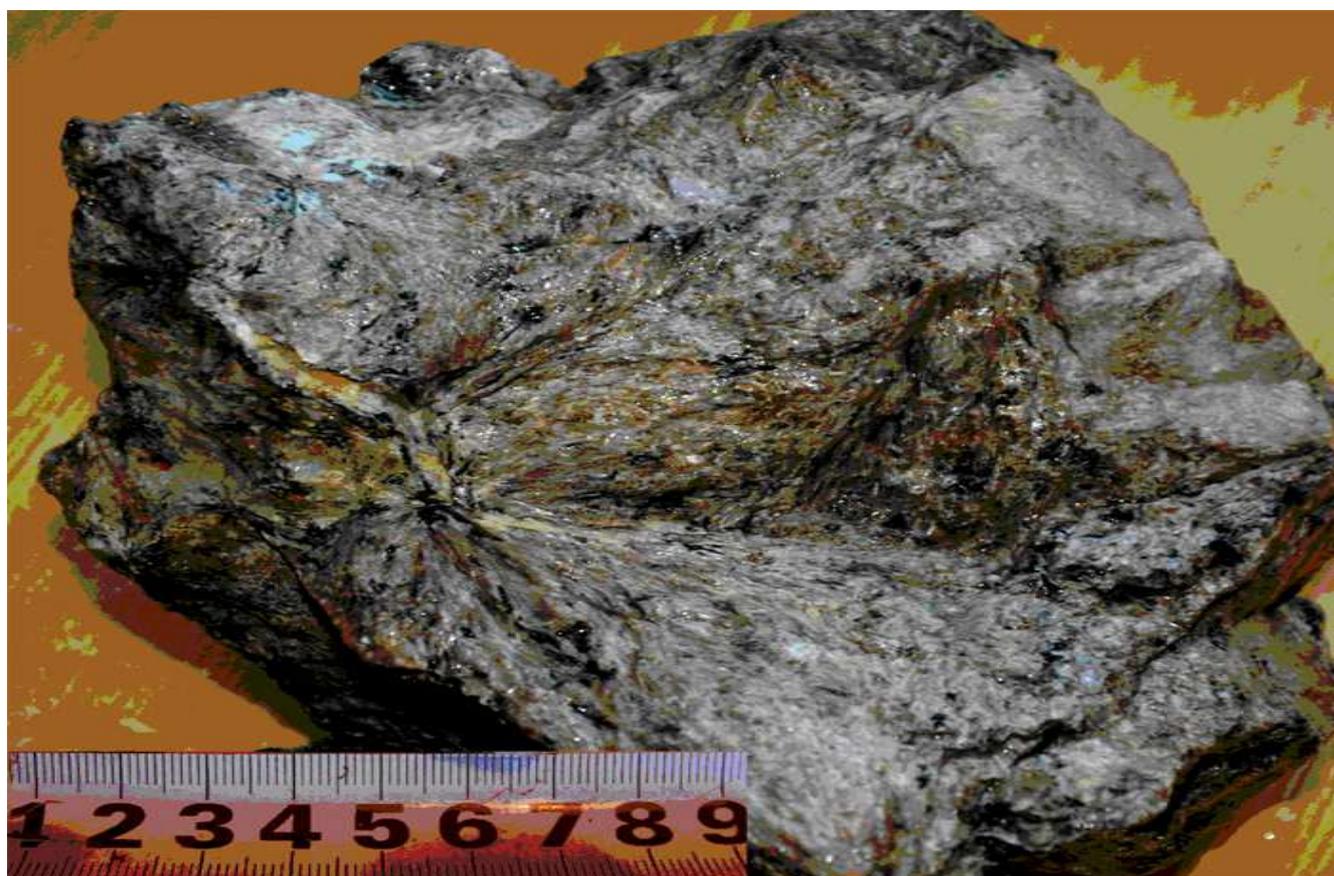


Рис. 3.19 Сферолитоподобный агрегат коричневого токкоита

Формула токкоита из различных источников

Формула	Ссылка
$K_{1.85}(Ca_{0.87}Ti_{0.13})(Ca_{0.85}Na_{0.15})(Ca_{1.71}Fe_{0.15}Mn_{0.08}Mg_{0.06})Si_7O_{18}(OH)(F_{0.61}OH_{0.39})$	Рождественская, 1989
<p>1) <math>K_{1.95}(Ca_{0.53}Ti_{0.18}Fe^{3+}_{0.09}Fe^{2+}_{0.08}Mn_{0.05}Na_{0.05}Cu_{0.01})(Ca_{0.88}Na_{0.12})(Ca_{0.94}Mg_{0.06})(Ca_{0.82}Mg_{0.10}Fe^{2+}_{0.05}Sr_{0.01}REE_{0.01})(F_{0.76}(OH)_{0.24})[Si_{6.93}Al_{0.01}O_{17.89}(OH)_{1.11}]</math></p> <p>2) <math>K_{1.92}(Ca_{0.43}Ti_{0.21}Fe^{3+}_{0.10}Fe^{2+}_{0.09}Na_{0.07}Mn_{0.06}V_{0.01}Ge_{0.01})(Ca_{0.85}Na_{0.15})(Ca_{0.93}Mg_{0.07})(Ca_{0.82}Mg_{0.09}Sr_{0.02}Fe^{2+}_{0.06}REE_{0.01})(F_{0.66}(OH)_{0.34})[Si_{6.93}Al_{0.01}O_{17.83}(OH)_{1.17}]</math></p> <p>3) <math>K_{1.92}(Ca_{0.41}Ti_{0.22}Na_{0.11}Fe^{3+}_{0.10}Fe^{2+}_{0.09}Mn_{0.06}V_{0.01}Ge_{0.01})(Ca_{0.88}Na_{0.12})(Ca_{0.93}Mg_{0.06}REE_{0.01})(Ca_{0.81}Mg_{0.11}Sr_{0.01}Fe^{2+}_{0.06}REE_{0.01})(F_{0.71}(OH)_{0.29})[Si_{6.92}Al_{0.01}O_{17.91}(OH)_{1.09}]</math></p>	Канева, 2014

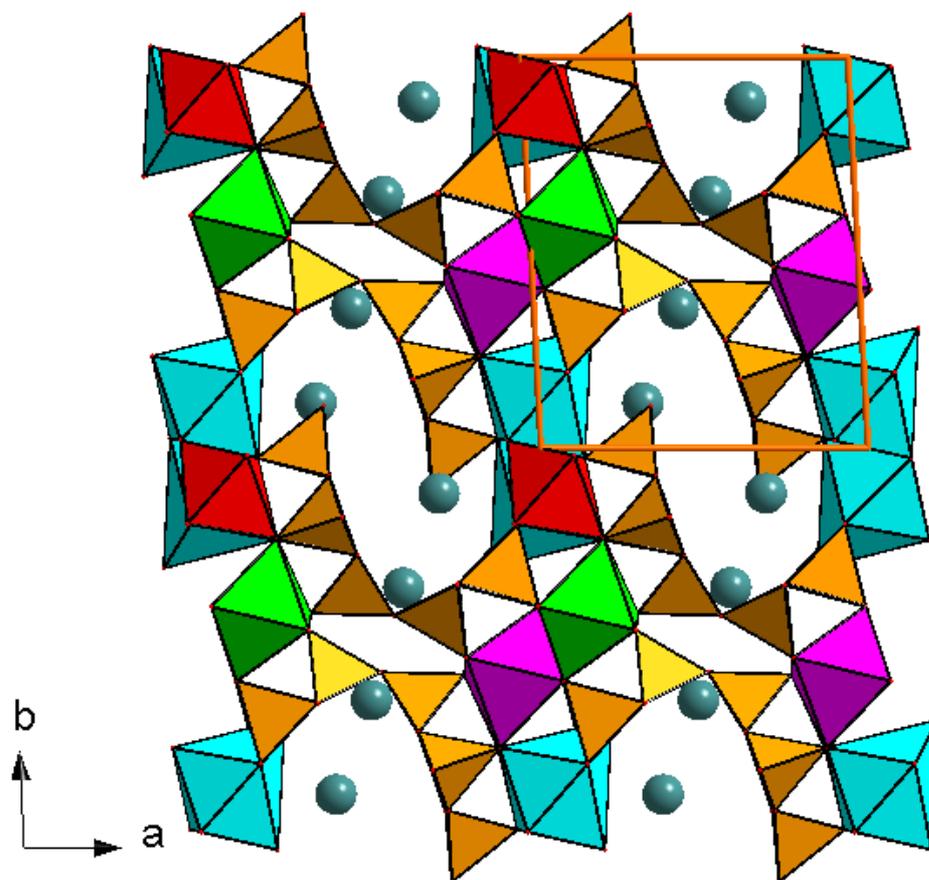


Рис. 3.20 Кристаллическая структура токкоита построенная по оси (001)

Примечания: тетраэдры Si - оранжевые, октаэдры M1 - красные, полиэдры M2 - бирюзовые, октаэдры M3 - зеленые и M4 - розовые, атомы K показаны как голубые сферы. [Канева, 2014]

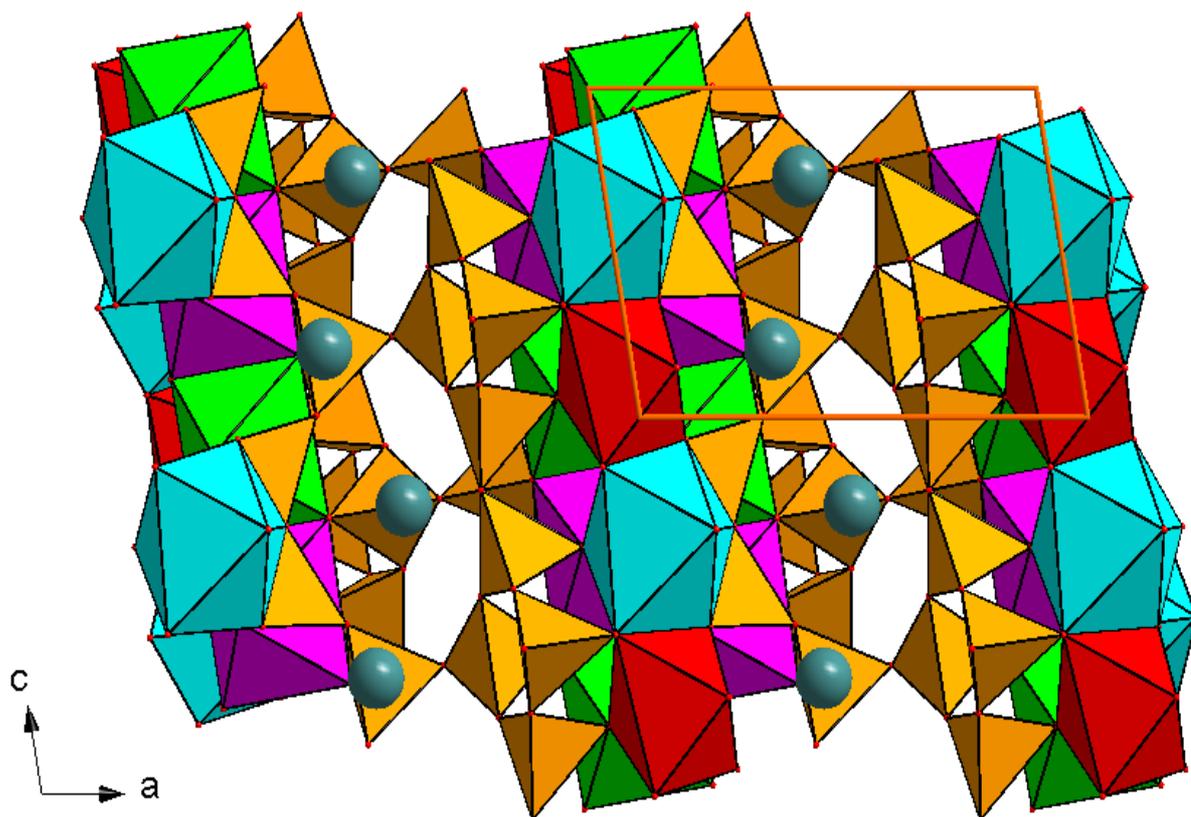


Рис. 3.21 Кристаллическая структура токкоита, построенная по плоскости (010)

Примечания как для рис. 3.20. [Kaneva, 2014]

Мизерит это редкий силикат, в чароитовых породах встречен на участке Якутской территории. Образует мелкозернистые массы коричневого цвета (рис. 3.22) совместно с пектолитом. В большом количестве мизерит известен на массиве Дарай-Пиоз в Таджикистане, и встречается в ряде щелочных пород магматического и метасоматического происхождения [Kaneva et al., 2014; Reguir et al. 1999; Rozhdestvenskaya and Nikishova, 2002]. Обычно мизерит образует радиально-лучистые, асбестовидные и волокнистые агрегаты. Цвет мизерита - от белого, синеватого до розового и малиново-красного [Докучиц, 2014; Владыкин, 1983].

В мизерите среди всех щелочных силикатов наиболее высокое содержание легких лантаноидов, которые входят в его структуру. Формула мизерита из разных источников представлена в табл. 3.11.

## Формула мизерита из различных источников

Формула	Ссылка
$K_3Ca_{10}(Ca, M^{3+})_2[Si_{12}O_{30}][Si_2O_7]2(O, F, OH)_2 \cdot H_2O$	Rozhdestvenskaya et al., 2010.
<b>1.</b> $K_{1.24}Na_{0.02}Ca_{5.49}Mg_{0.02}Mn_{0.03}Y_{0.375}REE^{3+}_{0.064}(Si_8(O, OH)_{22})(OH, F)_2$ <b>2.</b> $K_{1.33}Ca_{5.59}Mn_{0.03}Fe_{0.01}Ti_{0.01}Y_{0.13}REE^{3+}_{0.21}[Si_8(O, OH)_{22}](OH, F)_2$ <b>3.</b> $K_{1.33}Ca_{5.53}Mg_{0.02}Mn_{0.03}Fe_{0.04}Ti_{0.01}Y_{0.18}REE^{3+}_{0.18}[(Si_{7.99}Al_{0.01})(O, OH)_{22}](OH, F)_2$ <b>4.</b> $K_{1.31}Ca_{5.55}Mg_{0.04}Mn_{0.03}Fe_{0.03}Ti_{0.03}Y_{0.08}REE^{3+}_{0.21}[(Si_{7.99}Al_{0.01})(O, OH)_{22}](OH, F)_2$	Reguir et al. 1999
<b>1.</b> $(K_{1.37}Na_{0.05}Ca_{0.26}Sr_{0.04})(Ca_{5.69}Mn_{0.18}Fe^{2+}_{0.03}Mg_{0.01}Zn_{0.01}Zr_{0.01}REE_{0.05}Hf_{0.02})[Si_8O_{22}](F_{1.83}OH_{0.04}O_{0.13}) \times 0.10 H_2O$ <b>2.</b> $(K_{1.26}Na_{0.05}Ca_{0.02}Sr_{0.05})(Ca_{5.67}Mn_{0.17}Fe^{2+}_{0.04}Mg_{0.01}Zr_{0.02}Ti_{0.03}REE_{0.05}Hf_{0.01})[Si_{7.99}Al_{0.01}O_{21.61}(OH)_{0.39}](F_{1.66}OH_{0.34}) \times 0.10 H_2O$ <b>3.</b> $(K_{1.11}Na_{0.18}Ca_{0.28}Sr_{0.06})(Ca_{5.70}Mn_{0.18}Fe^{2+}_{0.04}Mg_{0.01}Zn_{0.01}REE_{0.05}Hf_{0.01})[Si_{7.99}Al_{0.01}O_{22}](F_{1.85}OH_{0.12}O_{0.03}) \times 0.10 H_2O$	Kaneva E., 2014



Рис. 3.22 Коричневый мизерит с белым пектолитом

ми - мизерит: пе - пектолит

Кристаллическая структура мизерита, уточненная Каневой Е. по нашим каменным материалам, показана на рис. 3.23 и 3.24 [Канева, 2014].

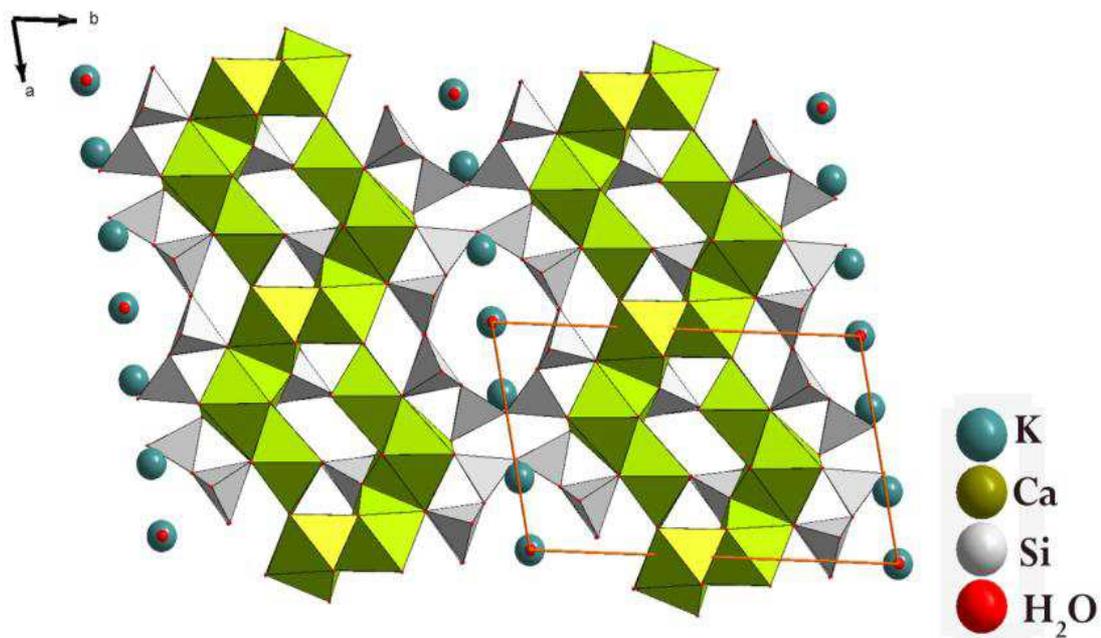


Рис. 3.23 Структура мизерита, показанная со стороны оси *c* [Kaneva, 2014]

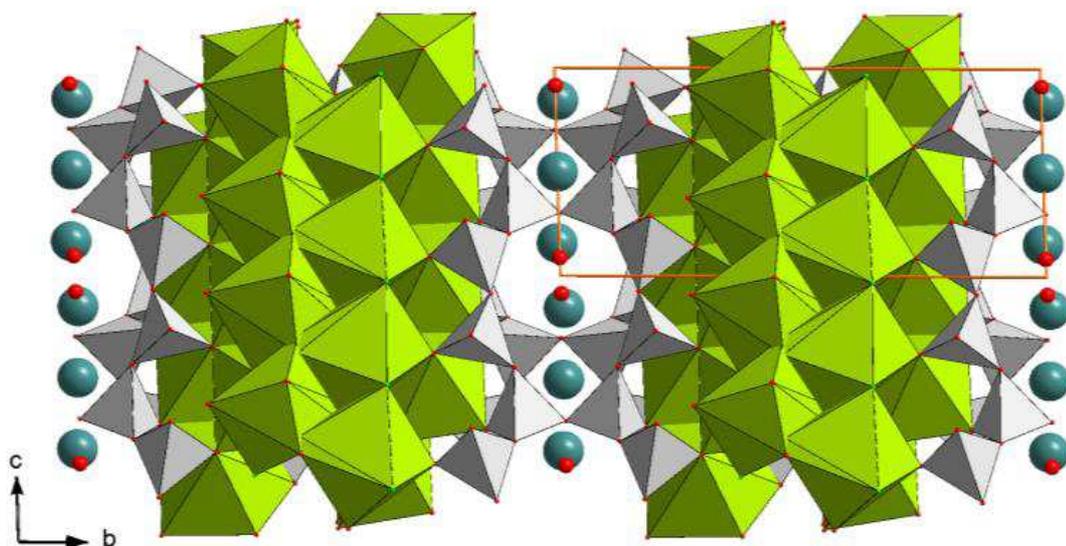


Рис. 3.24 Структура мизерита, показанная со стороны оси *a* [Kaneva, 2014]

Волластонит довольно редко встречается на мурунском массиве. На участке «Магистральный» образует жильное тело, состоящее из сферолитоподобных агрегатов волластонита и пироксена (рис. 3.25). Цвет минерала белый с шелковистым отливом. Игольчатые агрегаты размером до 2 см.

Талкусит - очень редкий сульфид таллия, обнаружен и исследован в чароитовых породах совместно с мурунскитом и другими сульфидами. [Добровольская и др., 1982].

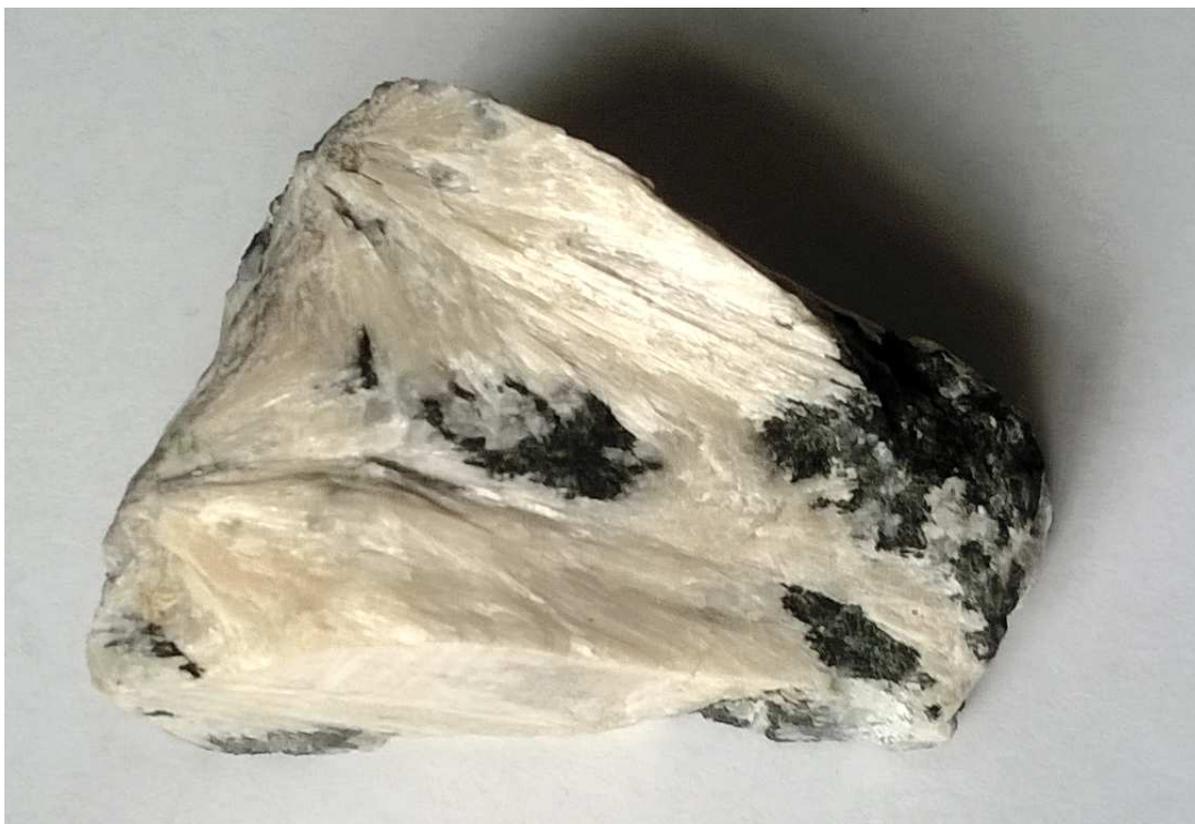


Рис. 3.25 Волластонит

Мурунскит образует очень мелкие зерна и их агрегаты размером в доли миллиметра. Образует пластинчатые сростания с идаитом, халькопиритом, часто на контакте их с калиевыми силикатами - чароитом, тинакситом, полевым шпатом, калиевым рихтеритом [Добровольская и др., 1981].

Mg-силикат - кальций-магниевый водный силикат бирюзового цвета, образует землистые массы. Встречен в чароитовых породах, возможно вторичный по чароиту. Рентгеноаморфен.

Джерфишерит – распространенный минерал Мурунского массива, в чароитовых породах встречен в виде мелких зерен [Добровольская и др., 1981]

Паркерит встречается в чароитовых породах в виде мелких зерен вместе с другими сульфидами и самородными минералами [Добровольская и др., 1981; Добровольская и др., 1982].

#### Самородные элементы и интерметаллиды

Добровольская отметила мелкие зерна и дендриты золота вместе с серебром и медью, а также минералами платины и палладия [Добровольская и др., 1985]

Серебро в чароититах отмечено в виде мельчайших зерен и дендритов вместе с золотом [Добровольская и др., 1985]

Медь широко распространена в чароитовых породах и представлена мелкими рассеянными зернами, образуется в виде мелких зерен в кварце чароитовых пород.

Четыре минерала Pt-Pd группы обнаружены Добровольской при микронзондовых исследованиях сульфидных минералов чароитовых пород [Добровольская и др., 1985]:

1. Сперрилит развит в чароититах вместе с Pd-содержащими минералами.
2. Соболевскит встречается в сложных полиминеральных агрегатах платиновых и палладиевых минералов и сульфидов в чароитовых породах.
3. Садбериит - минерал, образующий сростки с соболевскитом.
4. Фрудит встречен в виде вытянутых кристаллов небольших размеров. Часто образует сростания с другими палладийсодержащими минералами и со сперрилитом.

### **3.4 Петрохимические особенности минералов чароитовых пород**

На рис. 3.26, где представлены диаграммы парных корреляций породообразующих и некоторых редких элементов, видны довольно сложные корреляционные зависимости в составе чароитов. Прямые корреляции наблюдаются в основном между K и Na, K и Ca, Ca и Sr, Ba и Sr, что, вероятно, связано с явлением изоморфизма этих элементов в чароитах. Петрохимические особенности составов минералов чароитовых пород и чароита представлены на рис. 3.27 а-б. В связи с большим разнообразием парагенных ассоциаций при кристаллизации чароитовых пород в различных их участках наблюдаются довольно разнообразные корреляционные зависимости составов этих минералов. Имеются как прямые корреляции ( $K_2O-Na_2O$ ,  $CaO-Na_2O$ ,  $Na_2O+R_2O-Ca$ ), так и два корреляционных тренда составов между  $Rb_2O-Li_2O$ ,  $Cs_2O-Rb_2O$ , - отдельно для чароита и других минералов. Эти закономерности связаны с изоморфным замещением элементов в структуре минералов [Докучиц, Владыкин, 2016].

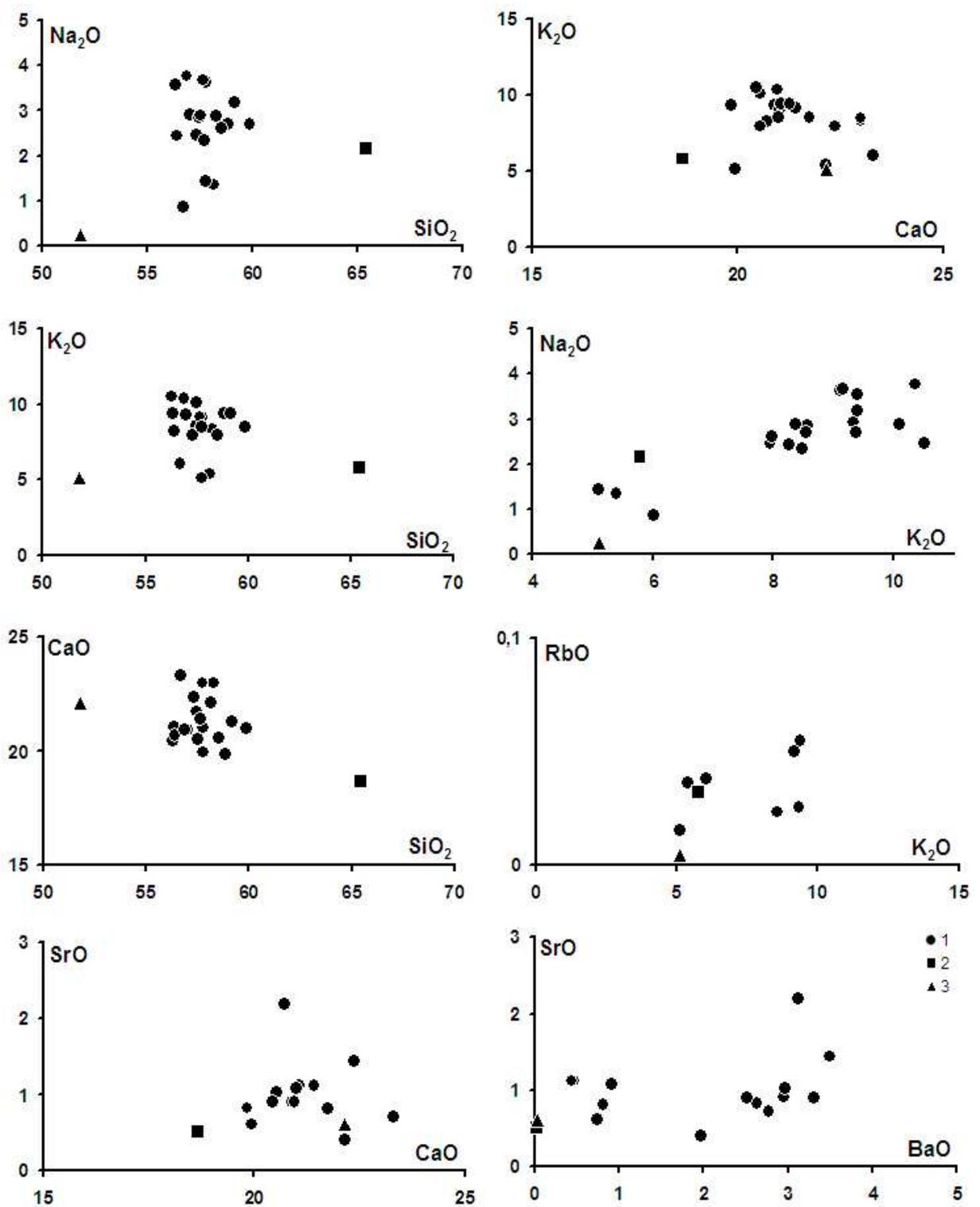


Рис. 3.26. Диаграммы парных корреляций петрогенных и редких элементов чароитов (в мас.%)

1 - чароит; 2 - чароит с повышенным содержанием кальция; 3 - чароит-асбест

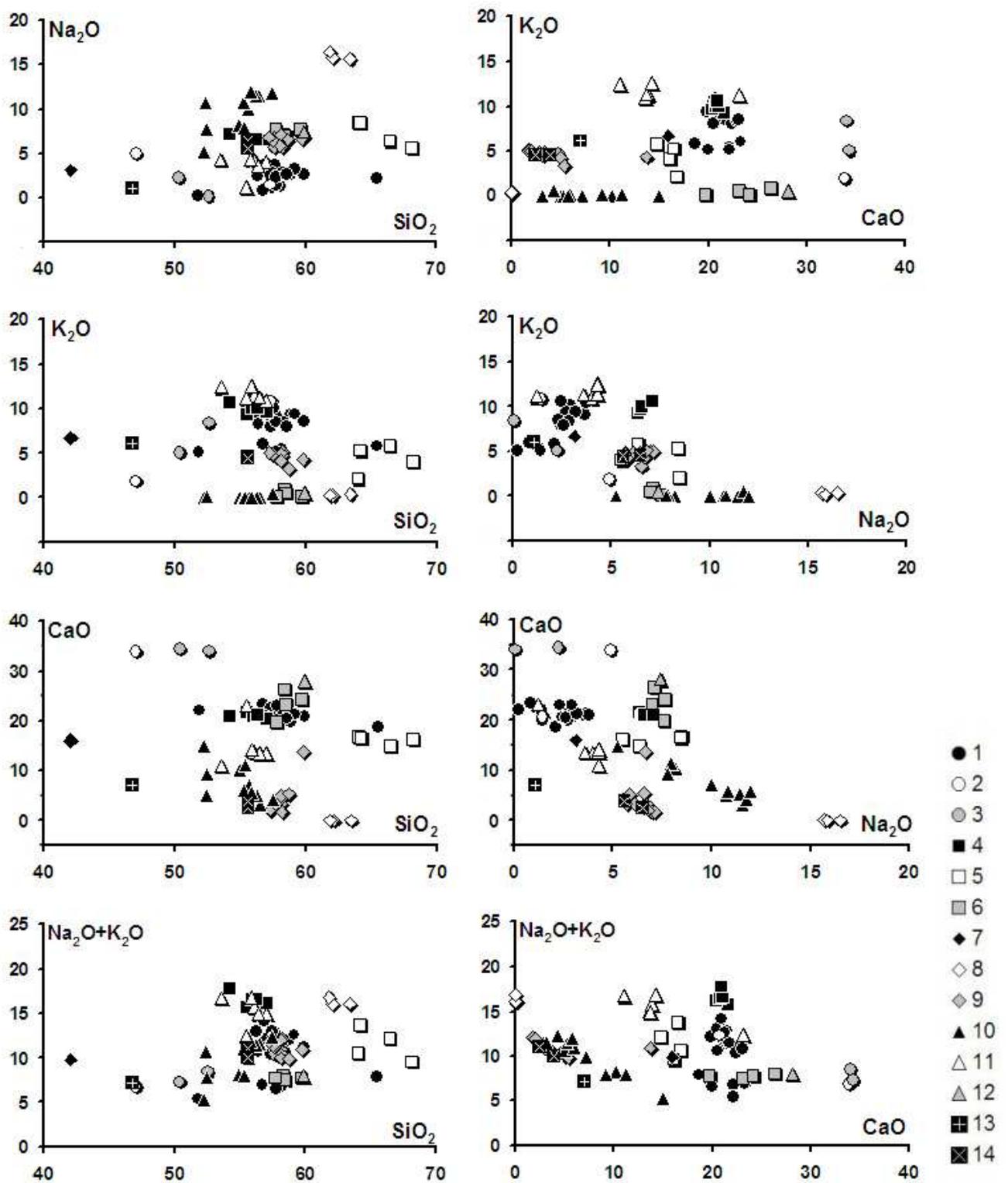


Рис. 3.27 а Диаграммы парных корреляций петрогенных и редких элементов минералов чароитовых пород (в мас.%)

Примечания: 1 - чароит; 2 - токкоит; 3 - мизерит; 4 - франкаменит; 5 - федорит; 6 - агреллит; 7 - юкспорит; 8 - нарсарсуцит; 9 - амфибол; 10 - пироксен; 11 - тинаксит; 12 - пектолит; 13 - эканит; 14 - К-арфведсонит

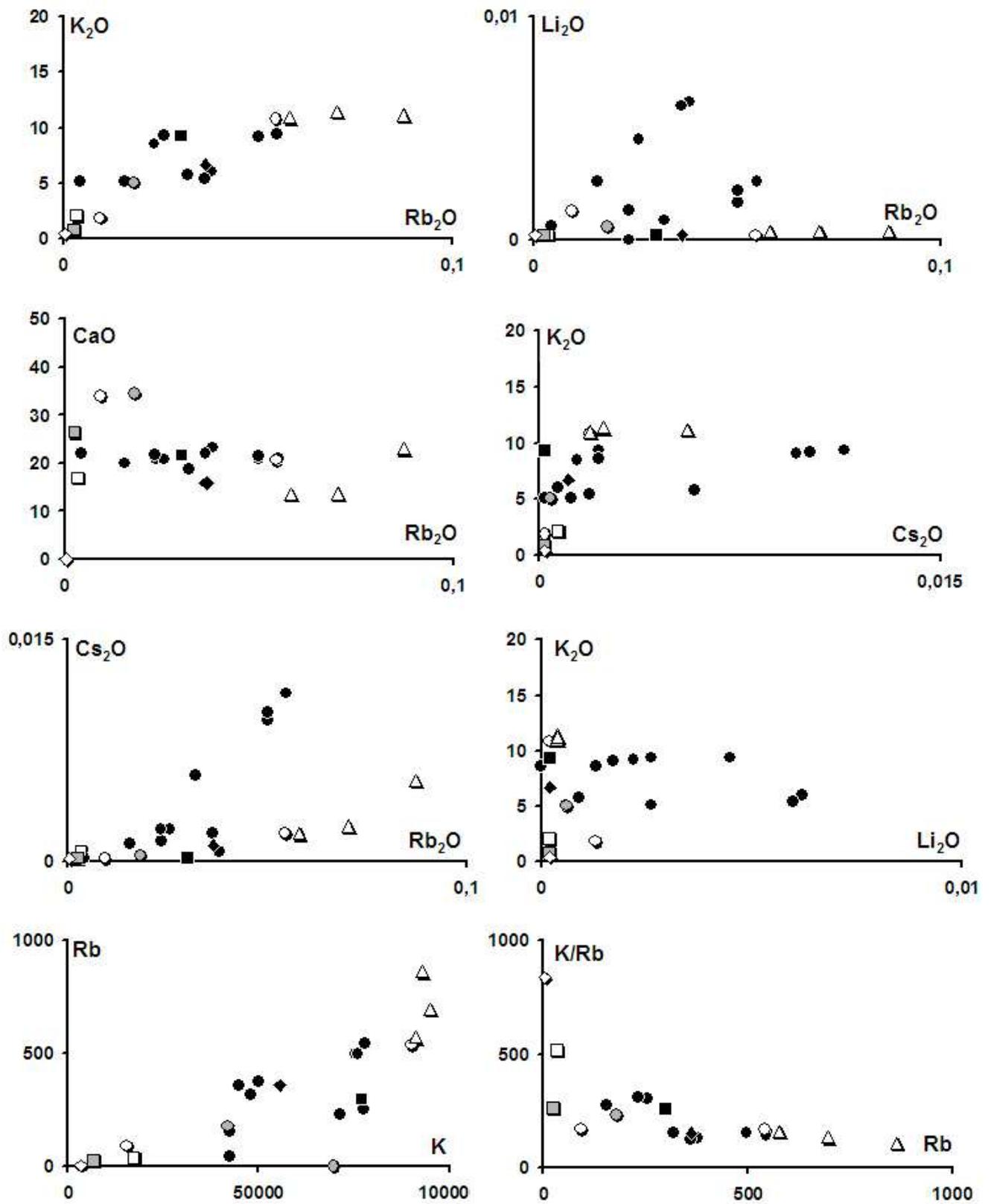


Рис. 3.27 б Диаграммы парных корреляций петрогенных и редких элементов минералов чароитовых пород (в мас.%)

Примечания такие же, как для рис. 3.27 а

## ГЛАВА 4. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД И ИХ МИНЕРАЛОВ

### 4.1 Геохимические особенности чароитовых пород

Чароитовые породы – уникальные образования природы, встречаются только на Мурунском массиве и известны уже более сорока лет. Однако геохимические особенности пород совершенно не изучены. Нами впервые были получены анализы редких элементов в 46 пробах чароитовых пород разного минерального состава и из различных участков месторождения, и проведен анализ поведения этих элементов. Полный список анализов редких элементов чароитовых пород, приведен в табл. 4.1.

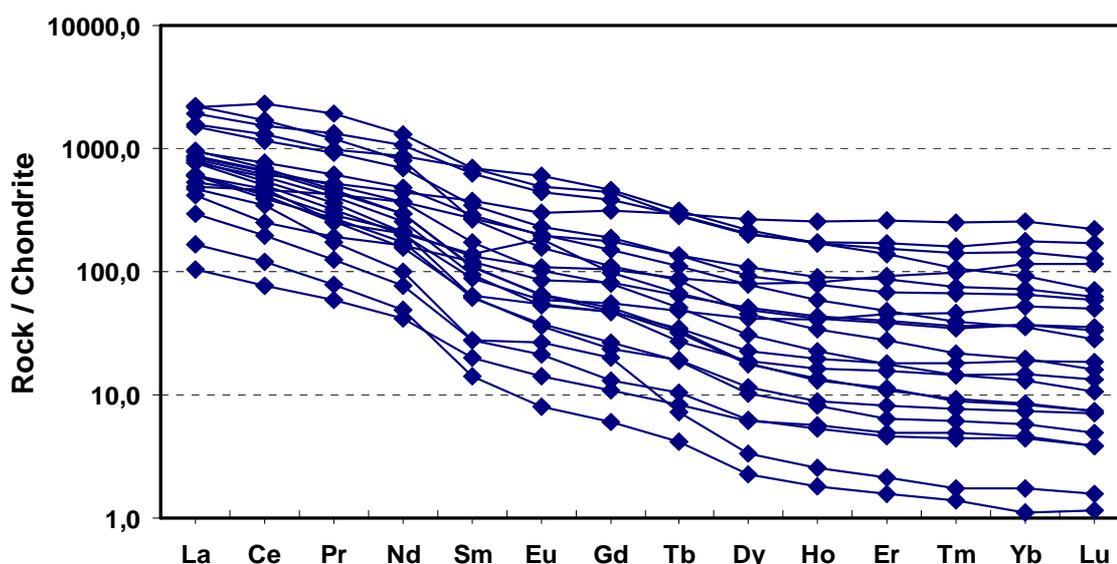


Рис. 4.1 Спектры РЗЭ чароитовых пород

Графики спектров редкоземельных элементов в чароитовых породах показаны на рис. 4.1. Кривые спектров довольно однообразны для чароитовых пород разного минерального состава, и отличаются в основном общими содержаниями элементов. По конфигурации кривых поведение элементов в спектрах пород с чароитом разного цвета почти не отличаются, а разнятся только общими содержаниями этих элементов. Наклоны спектров TR довольно незначительны, начиная с Tb, имеют почти хондритовое распределение.

Фракционирование Eu не наблюдается, что можно объяснить отсутствием плагиоклазовой фазы в чароитовых и более ранних породах, хотя вариации содержаний редкоземельных элементов в чароитовых породах довольно значительны, и связаны с различным количеством минералов-концентраторов [Dokuchits, Vladykin, 2015].

Диаграммы парных корреляций редкоземельных и редких элементов представлены на рис. 4.2. Наблюдаются прямые корреляции между концентрациями La и другими элементами (Ce, Nd, Eu и др.) и Ce (Eu, Nd, Gd). Эти закономерности в чароитовых породах различного минерального состава свидетельствует о закономерности процесса кристаллизации пород, и их закономерного распределения среди минеральных фаз, что, в конечном счете, говорит об их едином генезисе.

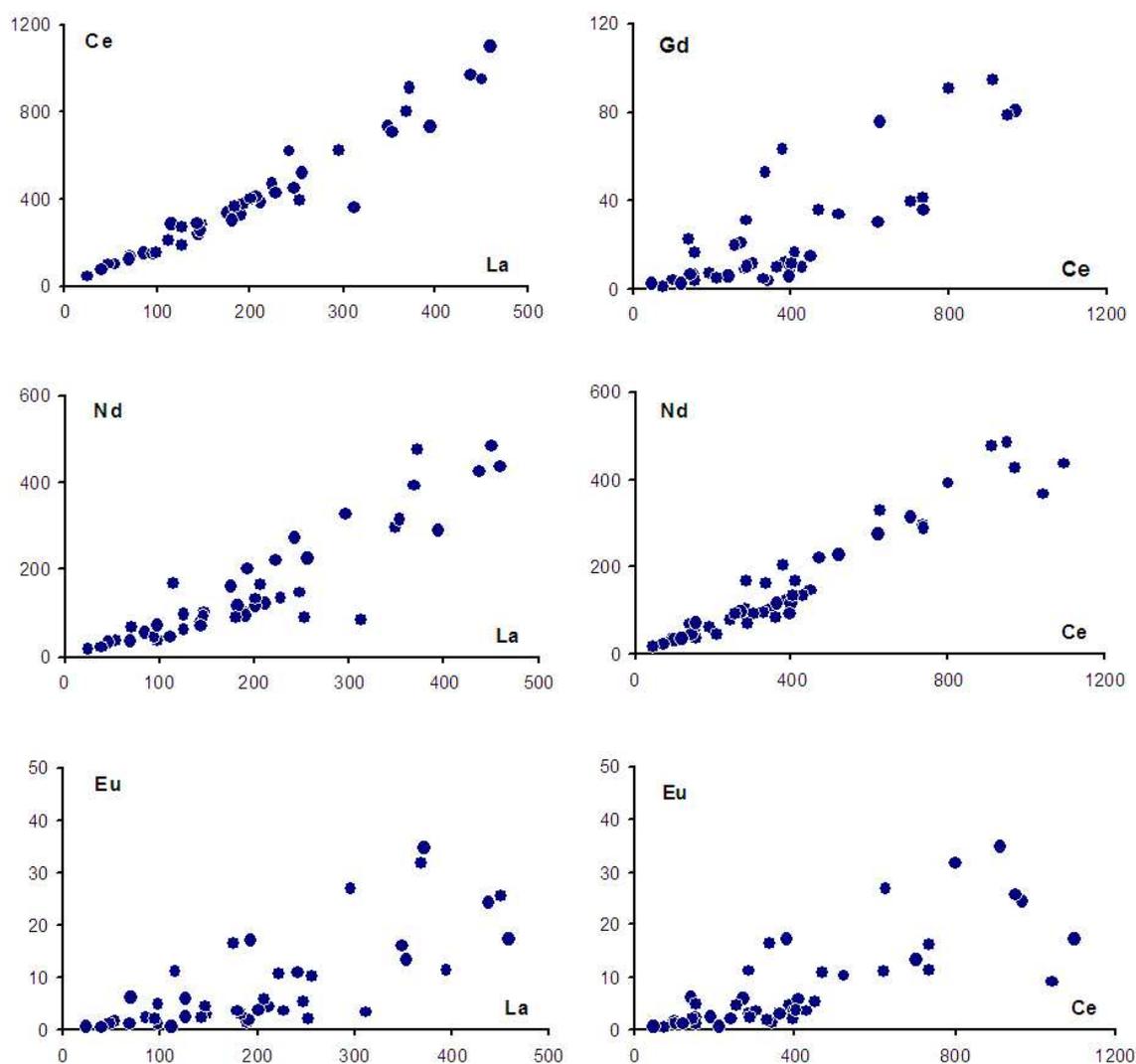


Рис. 4.2 Графики парных корреляций РЗЭ чароитовых пород

Таблица 4.1

## Содержания редких элементов (в ppm) в чароитовых породах

Проба	2/7	19/4	21/9	24/10	24/12	24/16	24/17	24/33
№	1	2	3	4	5	6	7	8
Li	10,8	11,9	8,6	18,6	16,0	2,3	2,3	9,1
Be	24,8	17,5	13,0	10,4	7,4	15,7	3,0	41,3
Sc	4,3	6,8	0,1	1,3	1,8	0,1	0,1	0,6
Ti	85,8	667	54,8	297	87,2	86,0	49,0	214
V	10,9	277	7,2	21,0	7,8	33,4	11,5	107
Cr	3,5	4,9	10,2	3,5	14,6	1,2	1,6	52,5
Mn	253	1036	1107	1971	964	1187	195	903
Co	0,5	2,4	1,1	2,7	0,9	0,9	0,3	1,5
Ni	1,1	2,4	11,4	3,7	4,6	0,8	2,5	4,5
Cu	50,8	17,5	35,9	699	261	121	7,6	1614
Zn	26,1	38,9	142	287	71,4	80,1	9,6	31,4
Ga	14,2	10,4	5,5	4,5	6,6	7,5	2,3	23,2
Ge	0,3	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
Rb	228	111	169	204	187	84,0	107	164
Sr	10457	1182	6512	11883	9024	4157	3946	10641
Y	62,3	88,4	8,3	35,4	135	2,7	8,4	64,8
Zr	62,0	238	45,7	136	82,4	48,6	18,0	46,1
Nb	1,2	4,2	18,5	6,0	5,4	3,4	6,7	4,4
Sn	0,4	4,7	2,2	3,2	1,2	4,2	1,1	3,7
Cs	5,1	2,8	23,0	9,2	13,2	8,3	19,0	10,6
Ba	29756	5649	1801	18564	18237	984	418	13338
La	98,2	115	69,5	206	223	39,6	24,9	394
Ce	154	284	120	409	469	74,0	47,2	735
Pr	17,8	39,3	11,6	46,6	57,3	7,3	5,4	80,6
Nd	73,8	168	34,9	167	220	22,5	19,2	289
Sm	17,6	40,0	4,1	25,4	42,6	2,1	2,9	45,2
Eu	4,6	11,1	1,2	5,5	11,4	0,4	0,8	10,2
Gd	16,3	29,4	2,6	15,2	33,7	1,1	2,0	31,7
Tb	2,3	4,0	0,4	1,9	4,9	0,1	0,3	4,0
Dy	12,6	19,3	1,5	7,5	26,9	0,6	1,5	15,8
Ho	2,4	3,2	0,3	1,2	5,0	0,1	0,3	2,6
Er	6,4	7,7	0,7	2,8	13,8	0,3	0,8	6,1
Tm	0,9	1,0	0,1	0,4	1,9	0,0	0,1	0,8
Yb	6,0	5,6	0,7	2,1	11,6	0,2	0,7	4,9
Lu	0,8	0,7	0,1	0,3	1,5	0,0	0,1	0,7
Hf	1,6	6,5	0,8	2,4	1,9	1,0	0,3	0,9
Ta	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
W	0,1	0,1	0,5	0,1	0,2	0,0	0,0	0,5
Tl	1,0	3,4	1,2	8,1	2,4	0,3	0,0	13,9
Pb	87,9	1035	327	723	175	60,0	38,4	73808
Th	3,6	11,1	20,8	88,6	105,7	21,0	2,9	154
U	1,8	12,3	30,3	12,0	15,0	8,7	2,2	31,9

Таблица 4.1 (продолжение)

Проба	24/34	24/35	24/37	24/38	24/40	24/41	24/42	24/43
№	9	10	11	12	13	14	15	16
Li	7,1	14,0	12,8	8,9	8,5	19,9	12,5	50,9
Be	17,4	9,3	16,8	8,5	3,2	9,6	13,4	13,1
Sc	0,7	0,8	0,6	1,9	6,9	0,6	0,2	1,4
Ti	26,7	994	6271	1016	1030	21,9	239	400
V	1,6	13,2	390	110	90,1	1,1	1,3	37,2
Cr	2,9	13,7	0,9	2,7	17,1	1,3	1,9	4,0
Mn	640	1707	2149	2785	1104	1794	1448	2071
Co	1,6	0,6	8,5	1,2	2,7	0,7	1,1	0,6
Ni	4,6	15,5	1,5	1,3	12,8	0,7	2,4	1,3
Cu	17,1	11,3	185	4,4	1236	113	176	11,4
Zn	19,6	77,4	512	47,1	19,6	179	140	70,7
Ga	8,7	1,4	11,6	1,5	1,1	1,0	4,7	4,6
Ge	0,3	0,3	0,9	0,2	0,4	0,3	0,3	0,5
Rb	200	265	168	210	5,4	187	211	167
Sr	6918	14568	5929	7874	6354	8534	8930	6195
Y	11,7	20,9	13,4	117	372	246	32,1	49,1
Zr	45,0	144	738	115	15,5	49,6	95,1	60,7
Nb	10,5	47,4	48,1	18,9	9,9	17,7	31,2	226
Sn	2,2	1,7	9,3	3,2	0,9	0,5	3,2	2,4
Cs	23,5	31,4	9,7	13,3	0,2	14,1	29,2	10,2
Ba	5193	6551	11723	12252	10508	22446	3509	9975
La	143	228	191	353	193	450	182	522
Ce	241	427	330	703	378	949	363	1041
Pr	25,2	43,0	33,3	85,4	47,9	123	37,8	111
Nd	79,4	135	95,7	315	203	485	117	367
Sm	9,0	16,4	9,3	51,3	55,8	92,3	13,8	39,6
Eu	2,0	3,4	2,2	12,6	16,5	24,0	2,9	8,5
Gd	4,8	9,1	4,6	35,4	62,8	75,2	8,9	22,5
Tb	0,7	1,2	0,7	4,9	10,6	10,5	1,3	3,1
Dy	2,5	4,4	2,8	22,7	65,2	50,6	5,6	11,2
Ho	0,4	0,7	0,5	4,3	13,9	9,3	1,1	1,9
Er	1,0	1,7	1,3	11,0	41,4	24,5	2,9	4,5
Tm	0,2	0,2	0,2	1,7	6,2	3,5	0,4	0,5
Yb	0,9	1,4	1,2	10,6	41,0	23,4	3,0	3,2
Lu	0,1	0,2	0,2	1,5	5,4	3,1	0,5	0,4
Hf	0,9	2,8	15,4	2,4	1,1	1,5	1,7	0,7
Ta	0,0	0,1	0,6	0,1	0,2	0,2	0,0	0,1
W	0,1	0,7	0,1	0,3	0,6	0,3	0,1	0,3
Tl	2,2	2,5	2,7	1,0	4,3	10,1	1,5	1,5
Pb	476	209	367	259	244	100	606	464
Th	23,8	1,9	102,5	14,3	13,1	0,7	129	7,6
U	8,8	33,3	16,5	34,8	6,6	21,4	34,1	34,8

Таблица 4.1 (продолжение)

Проба	24/44	24/45	50-1	50-3	57-1	59-6	60-1	60-3
№	17	18	19	20	21	22	23	24
Li	9,6	12,6	12,2	19,9	13,3	29,1	16,6	11,9
Be	8,7	9,0	14,6	1,1	12,0	32,7	13,9	13,9
Sc	0,2	0,7	4,0	0,3	5,2	1,2	0,6	1,5
Ti	755	1967	399	1344	327	1167	709	560
V	48,4	11,8	4,8	124	50,3	62,8	71,9	179
Cr	1,2	2,6	0,9	1,1	4,2	11,4	2,0	2,6
Mn	2017	1925	1516	3924	472	3845	786	620
Co	0,4	1,1	0,8	1,7	1,2	5,8	1,3	1,5
Ni	1,4	3,1	8,4	13,9	6,7	22,9	10,7	10,0
Cu	2,7	8,5	10,8	18,7	126	10,1	472	49,8
Zn	22,9	52,4	16,4	30,9	29,1	331	35,2	47,7
Ga	9,0	0,6	11,7	2,4	9,1	30,0	5,9	9,2
Ge	0,3	0,4	1,4	0,9	0,6	2,4	0,4	0,4
Rb	134	289	259	28,2	233	279	245	323
Sr	7839	15224	10936	4369	21526	12430	10413	9626
Y	65,2	21,3	288	125	86,2	463	5,3	35,8
Zr	74,5	169	749	69,1	94,4	499	54,9	62,4
Nb	57,4	79,6	7,5	52,5	2,8	84,5	24,2	19,0
Sn	11,2	1,9	3,5	8,5	0,8	16,3	3,8	6,2
Cs	9,2	33,2	29,9	0,7	7,5	20,7	19,5	17,8
Ba	11417	5882	15351	750	45578	4447	6269	4520
La	180	201	369	126	146	517	112	143
Ce	303	401	800	271	256	1415	210	287
Pr	29,4	41,3	90,3	26,8	23,4	177	16,2	23,5
Nd	91,7	134	392	97,4	93,4	595	45,3	71,8
Sm	13,1	16,0	102	19,8	20,5	102	4,1	9,5
Eu	3,1	3,6	35,7	6,2	16,2	28,4	2,3	3,6
Gd	10,7	9,0	93,3	20,9	19,0	85,6	3,0	8,3
Tb	1,7	1,2	10,7	3,0	2,2	9,3	0,2	0,9
Dy	10,3	4,4	53,4	19,6	12,0	49,3	0,8	4,7
Ho	2,2	0,7	9,2	4,4	2,3	9,5	0,1	0,9
Er	7,2	1,8	22,1	14,7	6,1	26,9	0,3	2,5
Tm	1,1	0,2	2,7	2,4	0,9	4,0	0,0	0,4
Yb	8,3	1,3	14,8	18,5	5,9	28,4	0,3	2,4
Lu	1,2	0,2	1,7	2,8	0,9	4,2	0,0	0,3
Hf	0,8	3,0	16,0	1,0	2,0	5,2	0,8	0,9
Ta	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
W	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1	0,1
Tl	0,9	1,2	1,0	0,1	1,3	2,9	0,5	0,7
Pb	77	106	906	97,2	114	820	150	617
Th	18,4	1,9	3,8	60,0	4,5	58,2	8,9	37,7
U	26,2	32,8	14,3	35,9	2,8	63,7	7,7	13,9

Таблица 4.1 (продолжение)

Проба	112	113	116	118	120	121	122	128
№	25	26	27	28	29	30	31	32
Li	46,9	21,3	15,1	21,5	6,1	13,6	12,1	7,9
Be	16,5	14,4	24,9	18,4	58,4	31,7	22,3	12,7
Sc	1,1	14,9	0,8	1,0	2,1	1,4	1,4	0,4
Ti	1738	2344	1681	1750	2803	1288	1464	586
V	553	2841	71,8	435	1873	1242	778	201
Cr	6,5	25,2	1,1	2,1	12,4	2,5	3,6	51,3
Mn	н/о*	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Co	4,6	10,6	0,8	2,1	4,5	3,9	3,0	1,2
Ni	5,4	17,4	1,1	1,9	4,9	3,9	2,3	3,2
Cu	5,4	9,0	136	158	5,5	3,4	309	52,3
Zn	141	109	102	72,0	123	160	49,2	109
Ga	8,3	20,1	10,6	16,0	22,8	10,4	12,4	5,6
Ge	0,5	0,5	0,3	0,1	0,4	0,4	0,4	0,3
Rb	145	108	223	192	141	193	221	112
Sr	3776	1926	8145	11746	2814	7602	7709	4746
Y	21,9	11,8	308	93,0	141	174	51,5	19,7
Zr	166	102	148	390	205	305	239	55,0
Nb	36,5	20,8	51,3	28,2	276	52,1	23,3	16,5
Sn	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cs	15,1	3,8	13,8	11,2	8,2	19,0	23,4	9,3
Ba	6978	4803	17967	20854	2313	8352	9367	2631
La	147	54,5	438	256	242	459	247	85,5
Ce	283	99,7	968	520	620	1097	449	151
Pr	31,1	10,5	112	60,7	77,5	126	46,6	16,2
Nd	104	37,3	427	226	274	436	148	55,5
Sm	14,2	6,1	82,6	42,0	42,5	62,7	20,4	8,9
Eu	3,1	1,8	24,4	10,3	11,0	17,4	5,4	2,4
Gd	9,2	4,0	81,0	34,3	30,7	47,2	15,5	6,2
Tb	1,2	0,5	11,2	4,2	4,4	6,4	2,1	0,8
Dy	4,7	2,4	58,0	20,0	24,2	30,4	9,8	4,0
Ho	0,8	0,4	10,9	3,4	4,7	5,7	1,8	0,7
Er	2,0	1,1	30,4	8,2	13,4	16,0	4,8	1,7
Tm	0,2	0,2	4,1	1,0	2,2	2,3	0,7	0,2
Yb	1,4	1,3	25,6	5,9	15,4	16,0	4,6	1,4
Lu	0,2	0,3	3,4	0,8	2,4	2,4	0,8	0,2
Hf	4,1	2,3	3,1	8,0	3,5	5,8	5,0	1,1
Ta	0,2	0,1	0,3	0,2	0,5	0,2	0,1	0,0
W	0,2	0,1	0,5	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3
Tl	0,6	0,7	1,4	4,5	1,8	2,3	1,1	0,9
Pb	434	145	337	318	326	603	647	314
Th	19,4	11,4	1823	427	358	58,6	259	56,8
U	9,0	7,5	114	32,3	89,8	45,2	47,2	15,2

Таблица 4.1 (продолжение)

Проба	138	144	147	148	153	182	230	248
№	33	34	35	36	37	38	39	40
Li	13,6	8,1	18,3	8,7	12,2	39,6	18,2	11,8
Be	12,7	13,6	20,9	29,2	21,3	6,1	14,5	18,7
Sc	3,3	0,5	2,7	1,4	1,5	0,3	0,4	1,7
Ti	540	3904	13744	2725	1635	2094	205	6327
V	125	570	1372	414	742	304	35,1	394
Cr	1,7	0,9	7,3	26,0	2,7	5,4	3,5	6,6
Mn	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Co	1,1	2,2	14,9	3,0	3,0	4,5	0,6	3,6
Ni	2,4	1,3	7,1	3,3	2,5	3,4	25,4	6,5
Cu	6,1	20,9	5,9	320	125	4,0	3,5	390
Zn	19,1	38,5	126	99,8	57,4	90,7	50,9	119
Ga	8,6	11,6	7,8	15,6	12,0	2,6	4,6	9,9
Ge	0,2	0,2	0,6	0,5	0,3	0,4	0,1	0,3
Rb	201	113	187	182	196	159	32,2	247
Sr	6840	22898	3415	8590	6312	5078	6320	2973
Y	213	185	137	325	38,4	5,2	17,2	35,3
Zr	634	180	696	347	215	51,0	61,9	399
Nb	8,7	385	167	44,1	24,8	34,9	5,9	821
Sn	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cs	24,6	6,8	6,2	7,5	18,8	13,8	2,2	7,8
Ba	11788	6739	3436	9701	8132	7843	187	5344
La	295	349	70,5	175	211	189	98,0	47,1
Ce	625	734	139	334	386	342	154	100
Pr	78,6	85,7	16,7	40,1	38,6	34,5	12,8	10,6
Nd	328	296	68,1	162	123	102	36,8	34,1
Sm	79,5	49,4	18,8	44,3	16,4	9,1	4,5	5,3
Eu	26,8	16,2	6,3	16,4	4,6	1,5	1,2	1,2
Gd	76,7	41,9	22,8	51,7	12,7	3,6	3,8	4,5
Tb	9,6	6,1	3,7	8,8	1,7	0,5	0,5	0,8
Dy	45,8	33,0	23,4	56,3	7,5	1,2	2,3	4,9
Ho	8,1	6,8	4,9	11,5	1,4	0,2	0,5	1,1
Er	19,5	20,3	15,4	34,9	3,6	0,4	1,2	4,1
Tm	2,5	3,2	2,5	5,1	0,5	0,1	0,2	0,8
Yb	14,4	22,4	17,9	33,6	3,4	0,3	1,2	6,5
Lu	1,9	3,4	2,8	4,6	0,6	0,0	0,2	1,2
Hf	16,3	2,9	13,0	5,8	4,5	0,8	1,3	6,9
Ta	0,2	0,3	2,3	0,3	0,1	0,2	0,1	6,8
W	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	1,3	0,3	0,5
Tl	1,1	0,8	25,9	3,0	0,9	0,7	0,4	3,7
Pb	704	168	191	581	558	362	51,1	454
Th	6,6	253	17,5	293	179,5	1,2	11,5	34,2
U	15,4	117	21,0	39,8	31,5	12,1	19,5	24,1

Таблица 4.1 (продолжение)

Проба	118/5	119/8	147/15	225/24	3/1	3/2	вариации	среднее
№	41	42	43	44	45	46		
Li	9,8	13,1	4,8	15,3	3,8	6,5	2,3 - 46,9	14,5
Be	12,0	15,3	11,4	18,3	19,6	16,9	1,1 - 58,4	16,5
Sc	3,3	0,8	0,2	0,6	0,6	0,4	0,2 - 14,9	1,8
Ti	2596	187	1441	3876	5086	1067	21,9 - 13774	1692
V	1905	23,6	528	279	89,4	490	1,1 - 2841	368
Cr	10,4	1,5	0,1	1,8	2,6	1,3	0,1 - 52,2	7,4
Mn	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	195 - 3845	792
Co	6,8	0,7	1,9	6,4	1,1	2,3	0,3 - 14,9	2,7
Ni	5,1	1,9	0,6	2,0	1,5	2,2	0,7 - 25,4	5,5
Cu	98,7	6,3	4,9	943	14,1	55,4	2,7 - 1614	173
Zn	105	48,9	37,0	254	35,1	40,6	19,1 - 512	93,6
Ga	7,4	21,8	20,6	10,6	13,7	14,4	0,6 - 21,8	9,9
Ge	0,4	0,2	0,2	1,3	0,1	0,1	0,1 - 2,4	0,4
Rb	168	187	74,4	182	111	71,0	5,4 - 289	172
Sr	6578	9145	12751	8299	6610	41941	1182 - 41941	8950
Y	25,3	456	27,6	15,4	27,9	37,0	2,7 - 456	103
Zr	259	272	98,1	668	441	557	15,5 - 749	222
Nb	20,1	34,2	22,7	40,2	116	21,8	1,2 - 226	66,0
Sn	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,5 - 16,3	2,1
Cs	18,1	15,7	3,7	11,0	4,4	3,7	0,2 - 29,9	13,2
Ba	6874	8699	3783	15541	7072	49491	187 - 49491	10500
La	201	371	125	253	95,1	312	47,1 - 522	216
Ce	396	911	190	395	145	361	42,7 - 1415	436
Pr	38,7	119	18,9	34,0	13,9	30,5	5,4 - 177	49,0
Nd	117	476	62,9	91,1	46,3	86,3	22,5 - 595	175
Sm	13,6	100	9,4	9,2	7,7	12,4	2,1 - 102	30,7
Eu	3,6	34,7	2,7	2,1	2,2	3,4	1,2 - 35,7	9,0
Gd	9,7	97,1	7,6	5,7	6,4	10,1	1,1 - 97,1	25,8
Tb	1,2	14,5	1,0	0,8	0,9	1,4	0,2 - 14,5	3,5
Dy	5,0	80,3	5,2	3,0	5,0	6,9	0,6 - 80,3	18,2
Ho	0,9	16,3	1,0	0,6	1,0	1,3	0,1 - 16,3	3,5
Er	2,4	48,7	2,9	1,6	3,1	3,8	0,3 - 48,7	9,7
Tm	0,3	7,0	0,5	0,2	0,5	0,5	0 - 7,0	1,4
Yb	2,5	45,1	3,2	1,5	3,7	3,4	0,3 - 45,1	9,3
Lu	0,4	6,1	0,5	0,2	0,6	0,5	0 - 6,1	1,3
Hf	6,0	5,7	1,3	15,9	9,3	9,3	0,8 - 16,0	4,4
Ta	0,1	0,3	0,2	0,6	0,8	0,2	0 - 6,8	0,3
W	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0 - 1,3	0,3
Tl	0,7	1,3	0,5	4,4	0,6	0,5	0 - 25,9	2,7
Pb	378	470	127	419	470	423	51,1 - 73808	1964
Th	243	6,4	12,1	81,0	63,6	46,3	0,7 - 1823	112,1
U	40,8	36,1	7,5	19,0	13,8	12,4	1,8 - 114	27,7

Примечания: 1-46 - чароитовые породы. Данные анализа РЭ в чароитовых породах методом ICP-MS. н/о\* - не обнаружен. Аналитик - Митрофанова А.Ю., 2010-2015 г.

Спайдер-диаграмма чароитовых пород приведена на рис. 4.3. Конфигурации линии спектров на спайдер-диаграмме чароитовых пород различного состава довольно аналогичны. Для них наблюдаются отрицательные аномалии Nb, Ta, Zr, Hf и Ti и положительные аномалии Ba, Sr, U и Pb. Очень изменчиво поведение Th, - наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии этого элемента. В общем плане конфигурация элементов на спайдер-диаграмме довольно близка к подобной конфигурации в силикатных К-щелочных породах. Если брать в целом, поведение во всех разновидностях чароитовых пород довольно однообразно и свидетельствует об их химической общности и кристаллизации из расплав-флюида близкого состава, который является остаточным дифференциатом от кристаллизации более ранних силикатных К-щелочных пород Мурунского массива.

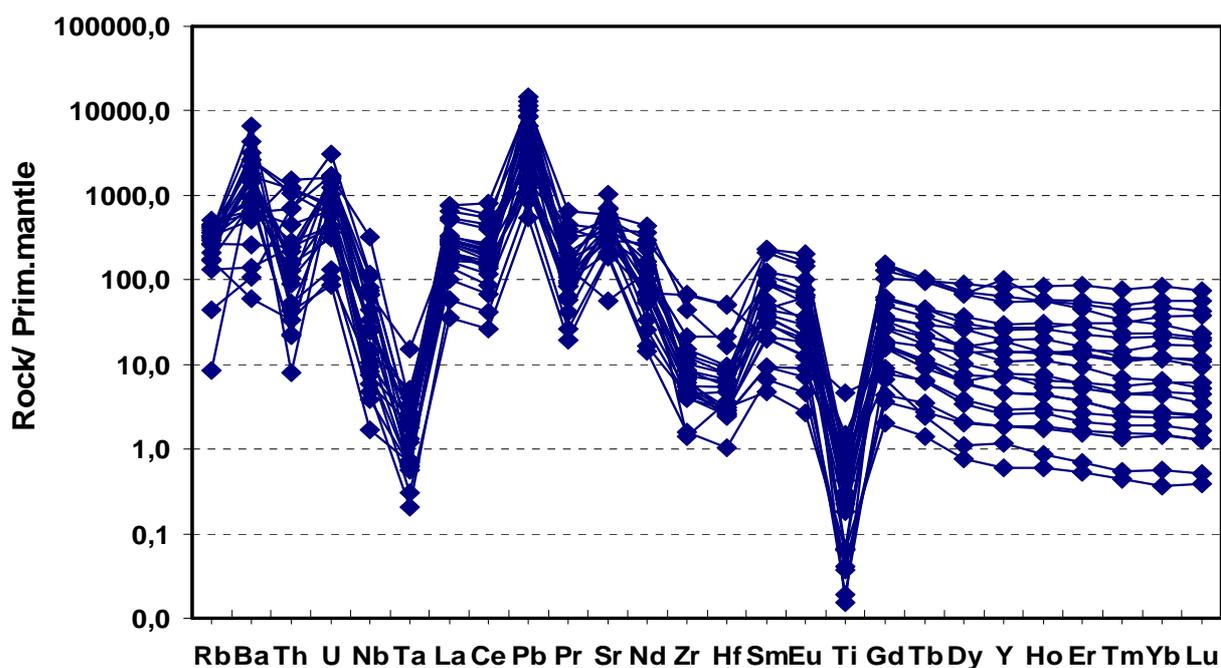


Рис. 4.3 Спайдер-диаграмма чароитовых пород

Кроме описанного поведения РЭ на спайдер-диаграмме, было рассмотрено поведение редких элементов на графиках парных корреляций и их соотношения в чароитовых породах (рис. 4.4). Наблюдаются закономерные прямые корреляционные зависимости между Ba и Sr, Be и Zn и соотношениями Zr/Hf и Nd/Ta и отсутствие корреляции между такими рудными элементами, как Pb и Zn.

Эти закономерности говорят в пользу изоморфного вхождения этих элементов в породообразующие и акцессорные минералы чароитовых пород.

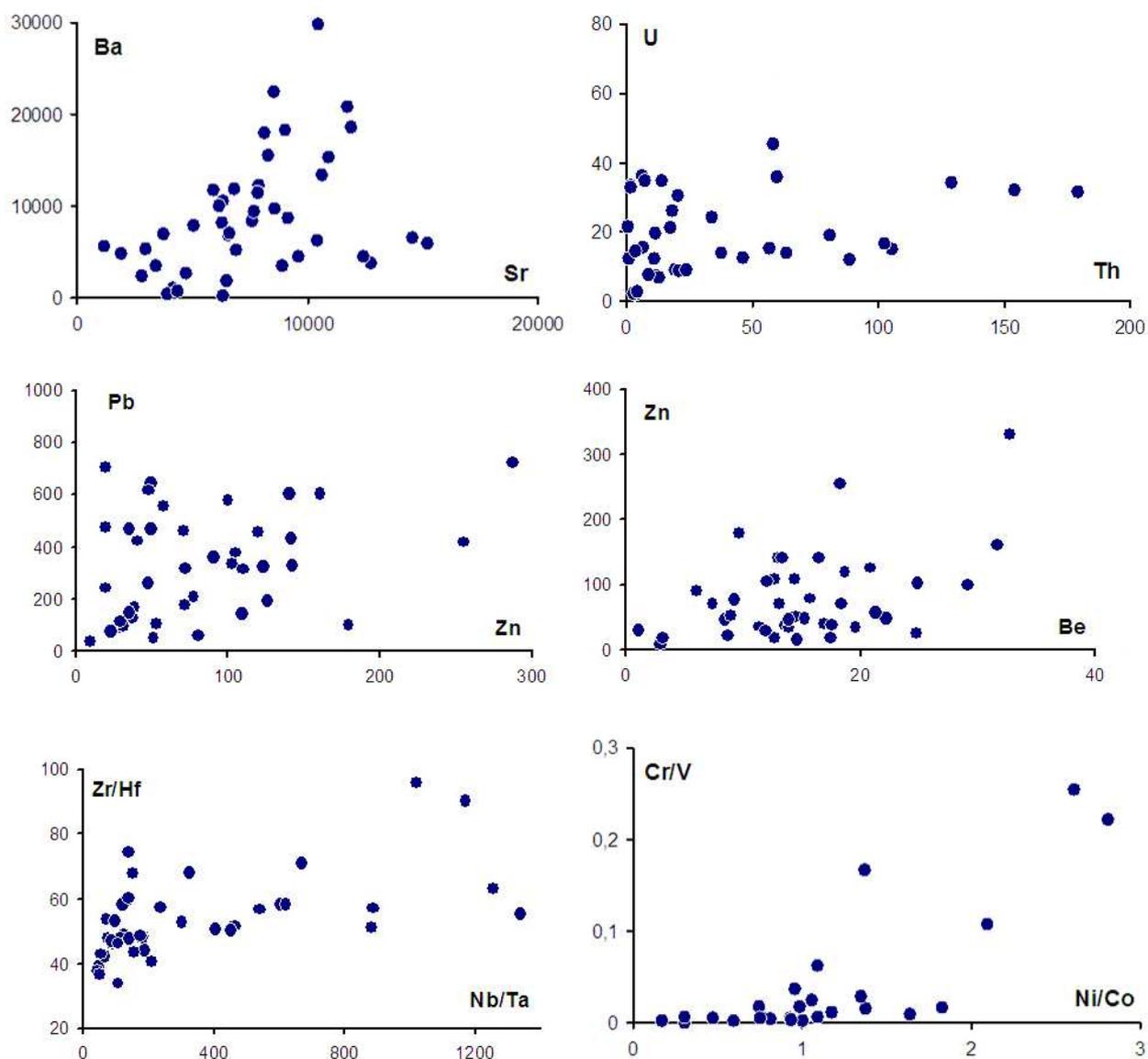


Рис. 4.4 Графики парных корреляций РЭ чароитовых пород

Как видно из таблицы 4.1, очень высокие вариации содержаний (2 - 3 порядка) наблюдаются для следующих элементов: Ti, V, Cu, Y, Nb, Ba, Pb, Th. Вероятно, это связано с тем, что данные элементы концентрируются в собственных минералах (как, например, Ti характерен для тинаксита, V и Cu концентрируются в сульфидах, Pb - в галените, Th - в эканите), а другие редкие элементы рассеиваются в различных минералах чароитовых пород. Эти дисперсии содержания редких элементов связаны с разными содержаниями

минералов-концентраторов в породе. Общие средние содержания редких элементов в чароитовых породах довольно значительны и приближаются к содержаниям многих элементов в карбонатитах. Сумма редкоземельных элементов в чароитовых породах варьирует от 0,1 до 0,5%, такие высокие содержания близки к рудам на эти элементы и даже могут представлять промышленный интерес.

#### **4.2 Геохимические особенности минералов чароитовых пород**

Нами были впервые получены данные о содержании большого количества редких элементов в 11 чароитах разного цвета и существующих с ним минералах чароитовых пород.

Чароит является главным породообразующим минералом в чароитовых породах. Его содержание в породе варьируется от 10 до 95%. Он является одним из главных носителей редких элементов в чароитовых породах, поэтому важно выяснить их содержание в самом чароите. Данные анализа редких элементов в чароитах приведены в таблице 4.2.

Чароит не образует вкрапленников, а встречается в основной массе породы. Он кристаллизуется позже минералов-вкрапленников: кварца, микроклина, тинаксита, пироксена, федорита и франкаменита, поэтому в нем концентрируются некоторые элементы, которые не вошли в минералы-вкрапленники. Как видно из рис. 4.1, в спектрах РЗЭ чароитовых пород не наблюдается фракционирование Eu. Вероятно, это связано с отсутствием плагиоклаза, а более ранние минералы-вкрапленники имеют также  $Eu^{3+}$ . Линии спектра имеют незначительный наклон, но содержание легких лантаноидов значительно превышает сумму средних и тяжелых. Самое высокое содержание РЗЭ фиксируется в наиболее раннем, сиренево-фиолетовом чароите. Под действием выветривания чароит приобретает коричневую окраску, при этом содержание легких лантаноидов в нем остается аналогично их содержанию в фиолетовом чароите, а содержание средних и тяжелых лантаноидов закономерно понижается (вероятно, они выносятся из породы).

Таблица 4.2

## Содержания редких элементов (в ppm) в чароитах

Проба	24/12	24/31	24/51	24/52	24/44	24/34	24/43
№	1	2	3	4	5	6	7
Li	4,5	1,7	2,6	2,2	2,6	1,3	6
Be	н/о*	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Sc	2,1	1,0	0,3	1,3	0,3	0,8	0,8
Ti	23,8	12,7	17,0	60,3	441	13,5	14,1
V	0,9	0,2	0,3	1,3	44,4	0,2	0,3
Cr	11,4	0,3	0,5	1,6	0,6	1,9	1,2
Mn	160	200	220	210	210	90	260
Co	0,2	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,3
Ni	0,4	0,1	0,3	0,5	0,0	0,8	0,9
Cu	7,9	5,2	105,8	14,2	8,7	2,7	3,3
Zn	3,4	51,1	40,3	48,2	13,6	25,2	15,4
Ga	1,1	2,2	1,9	0,8	0,6	1,7	1,7
Ge	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Rb	240	487	516	480	210	229	224
Sr	11606	13081	12857	12286	8230	9649	8896
Y	178	34,3	115	40,5	116	9,9	9,0
Zr	67,3	103	133	86,6	115	32,1	29,7
Nb	3,8	11,2	16,0	12,5	61,8	10,9	11,5
Sn	0,8	1,6	1,8	1,2	13,7	2,1	2,0
Cs	17,8	87,6	99,6	84,5	15,8	20,4	19,3
Ba	23046	4362	4280	4224	16772	6945	6708
La	292	183	190	188	287	167	166
Ce	545	332	340	309	448	253	268
Pr	70,7	36,6	42,0	34,7	50,0	28,2	27,0
Nd	260	115	146	109	155	86,5	81,0
Sm	48,6	15,4	23,1	15,1	21,5	8,6	8,3
Eu	13,1	3,7	6,2	4,0	5,5	1,8	2,0
Gd	33,0	8,4	15,7	8,5	13,2	3,3	3,4
Tb	4,4	0,9	2,1	1,0	2,0	0,3	0,3
Dy	27,4	5,4	14,5	6,3	14,4	1,8	1,7
Ho	5,2	1,0	3,1	1,2	3,3	0,3	0,3
Er	14,4	2,7	9,4	3,2	10,8	0,7	0,7
Tm	1,9	0,4	1,4	0,4	1,8	0,1	0,1
Yb	11,8	2,4	9,7	2,9	12,3	0,6	0,6
Lu	1,3	0,3	1,2	0,3	1,5	0,1	0,1
Hf	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,4	0,4
Ta	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Tl	0,2	2,2	0,3	1,0	1,3	0,4	0,6
Pb	13,4	582	88,3	193	32,1	39,2	38,3
Th	14,3	26,5	22,9	25,1	33,1	6,2	6,1
U	35,1	1,5	2,6	1,4	15,8	2,0	1,9

Таблица 4.2 (продолжение)

Проба	24/17	25/1	22	147/39	вариации	среднее
№	8	9	10	11		
Li	0,9	2,6	2,6	н/о	1,3 - 4,5	2,5
Be	н/о	н/о	н/о	н/о	0	0
Sc	0,1	0,6	2,2	0,2	0,2 - 2,1	0,9
Ti	67,0	884	46,2	512	12,7 - 884	190
V	6,4	13,7	1,2	123	0,2 - 123	17,4
Cr	3,0	48,4	1,0	0,6	0,3 - 48,4	6,4
Mn	30	130	250	-	30 - 260	160
Co	0,2	0,3	0,1	0,6	0,1 - 0,6	0,3
Ni	0,1	1,0	0,1	0,2	0,1 - 1	0,4
Cu	279	7,2	2,3	4,1	2,3 - 279	40,0
Zn	73,5	81,8	31,0	16,8	3,4 - 81,8	36,4
Ga	8,1	5,4	19,9	3,6	1,1 - 19,9	4,3
Ge	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2 - 0,5	0,3
Rb	371	226	290	311	210 - 516	326
Sr	2963	3164	6952	6992	3164 - 12857	8789
Y	21,5	25,4	322	80,8	9 - 322	86,6
Zr	66,1	76,6	144	101	29,7 - 144	86,8
Nb	22,7	27,7	75,7	73,1	3,8 - 75,7	29,7
Sn	2,8	2,4	15,7	8,0	0,8 - 15,7	4,7
Cs	17,7	35,6	21,7	22,7	15,8 - 99,6	40,2
Ba	15122	2370	7016	18548	2370 - 23046	9945
La	356	52,6	423	288	166 - 423	236
Ce	671	102	877	466	102 - 877	419
Pr	76,3	11,1	116	56,3	11,1 - 70,7	49,9
Nd	245	38,5	436	183	38,5 - 436	169
Sm	28,1	6,4	80,5	25,5	6,4 - 80,5	25,6
Eu	6,0	1,8	21,3	8,3	1,8 - 21,3	6,7
Gd	10,9	4,2	53,6	12,1	3,3 - 53,6	15,1
Tb	0,9	0,6	7,5	1,6	0,3 - 7,5	2,0
Dy	4,2	3,6	49,7	11,5	1,7 - 49,7	12,8
Ho	0,7	0,8	10,0	2,5	0,3 - 10	2,6
Er	1,5	2,2	29,6	7,8	0,7 - 29,6	7,5
Tm	0,2	0,3	4,4	1,2	0,1 - 4,4	1,1
Yb	1,1	2,3	29,0	8,6	0,6 - 29	7,4
Lu	0,1	0,3	3,4	1,1	0,1 - 3,4	0,9
Hf	0,5	1,0	1,5	1,3	0,4 - 1,5	1,0
Ta	0,0	0,1	0,0	0,0	0 - 0,3	0,0
W	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1 - 0,4	0,1
Tl	2,4	0,7	1,5	1,0	0,2 - 2,4	1,1
Pb	768	94,7	105	206	13,4 - 582	196
Th	24,3	7,7	50,4	31,3	6,1 - 50,4	22,5
U	2,6	12,6	9,9	11,0	1,4 - 35,1	8,8

Примечания: 1-11 - чароиты. Данные анализа РЭ чароитов методом ICP-MS.

н/о\* - не обнаружен. Аналитик - Митрофанова А.Ю., 2010-2015 г.

1 - 5 - фиолетовый чароит; 6 - 7 - коричневый чароит; 8 - 11 - белый чароит

Графики спектров РЗЭ чароитов показаны на рис. 4.5 и рис 4.6. Чароит белого цвета имеет такой же спектр РЗЭ, как и фиолетовые чароиты с некоторой общей дисперсией содержания этих элементов. В чароит-асбесте концентрации легких РЗЭ такие же, как и во всех чароитах, а начиная с Sm, конфигурации спектров аналогичны коричневым чароитам. Из этого можно сделать вывод, что белые чароиты не являются выветрелыми образованиями, а чароит-асбест по времени образования более поздний, чем основной (сиреневый) чароит.

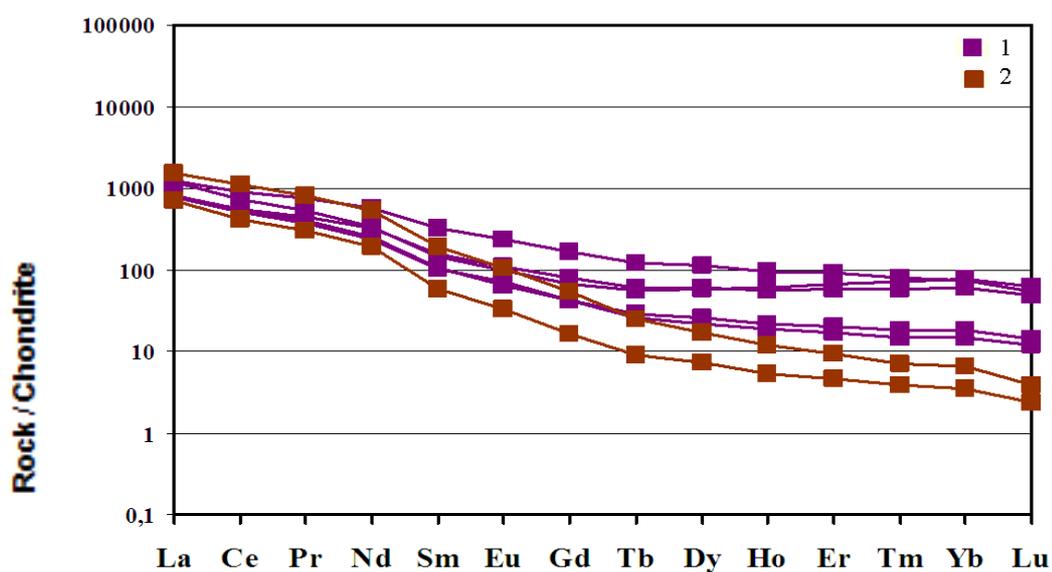


Рис. 4.5 Спектры РЗЭ чароитов

1 - фиолетовый чароит; 2 - коричневый чароит

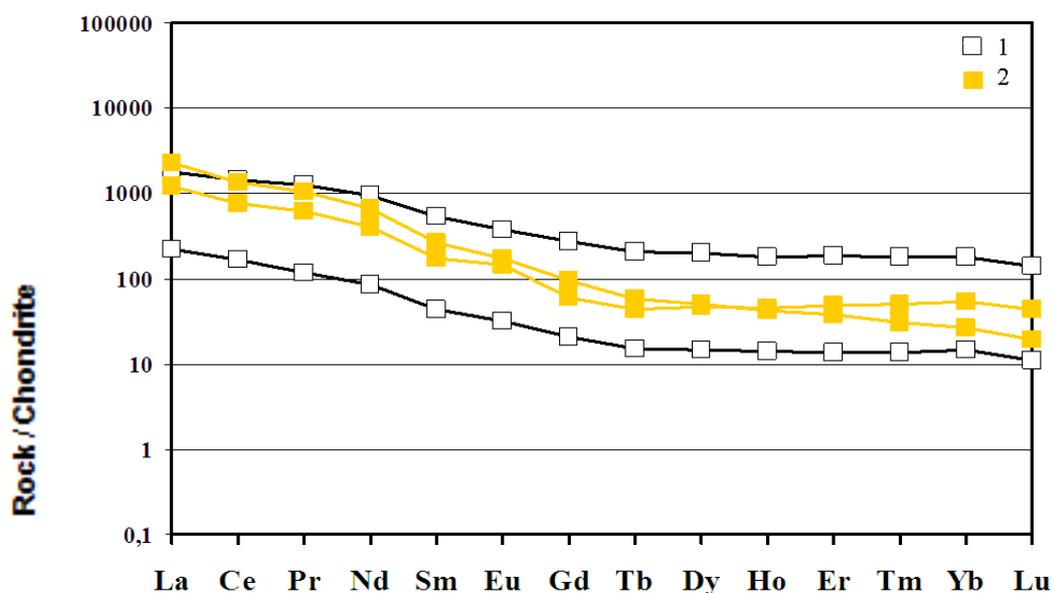


Рис. 4.6 Спектры РЗЭ чароитов

1 - белый чароит; 2 - чароит-асбест

Спайдер-диаграммы поведения редких элементов в чароитах разного цвета показаны на рис. 4.7 и 4.8. Конфигурация кривых на спайдер-диаграмме чароитов всех цветов аналогична конфигурации кривой в чароитовых породах, так как чароит является породообразующим минералом в этих породах. Наблюдаются отрицательные аномалии в чароитах для Th, Nb, Ta, Zr, Hf и Ti. Чароит не концентрирует Th, поэтому поведение Th зависит от количества Th-фазы эканита в породах. В чароитах коричневого цвета содержание REE ниже, чем в фиолетовых.

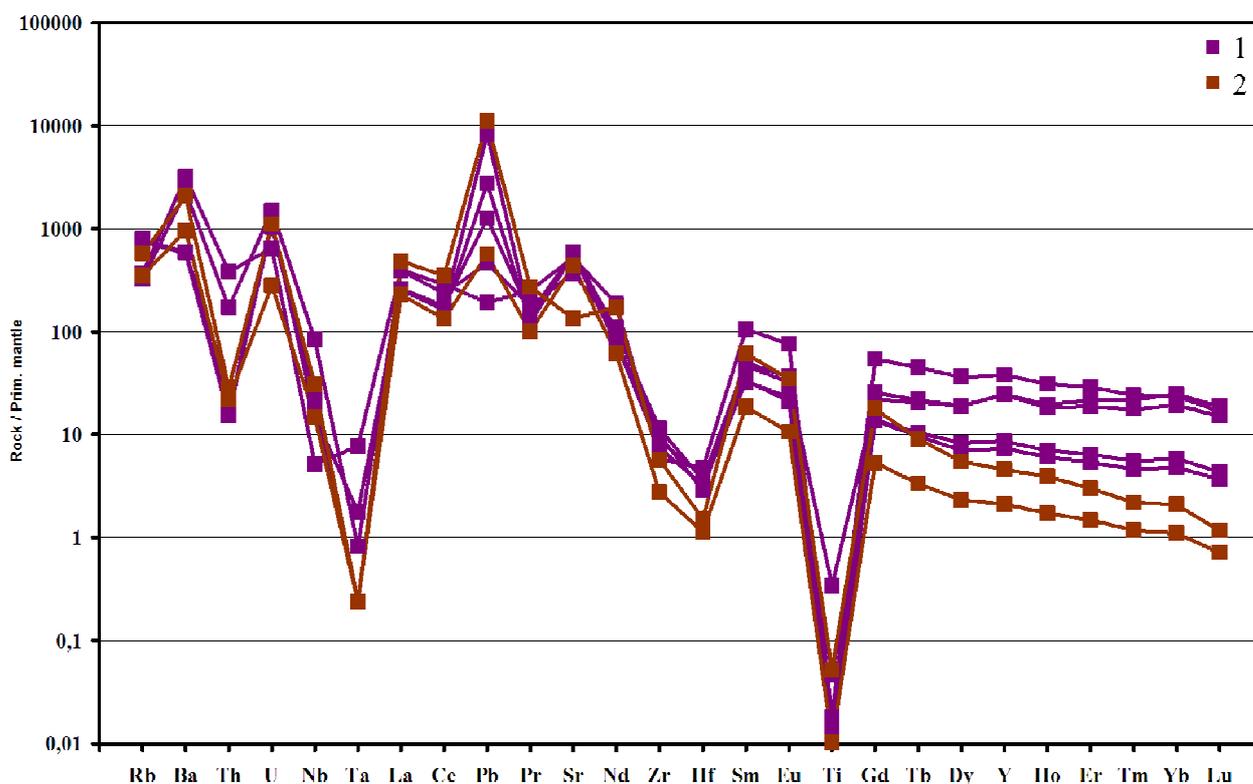


Рис. 4.7 Спайдер-диаграммы чароитов

1 - фиолетовый чароит; 2 - коричневый чароит

Спайдер-диаграммы белых чароитов и чароит-асбеста, показаны на рис. 4.8. Эти разновидности чароита являются последней стадией изменения раннего чароита. Конфигурации линий элементов белого чароита аналогичны фиолетовому и коричневому, а конфигурации чароит-асбеста так же близки к ним, но отличаются более высоким содержанием Pb и дисперсией Ba и Rb. Для мизерита (рис. 4.8) конфигурации линий спектра редких элементов в основном близки к спектрам чароита, но отличаются отрицательной аномалией Ba и Pb и

положительными (более высокими, чем в чароитовых породах) Th, U и La. Как и в чароитах, в нем фиксируется отрицательная конфигурация для Nb и Ta, Ti и в меньшей степени Zr и Nb.

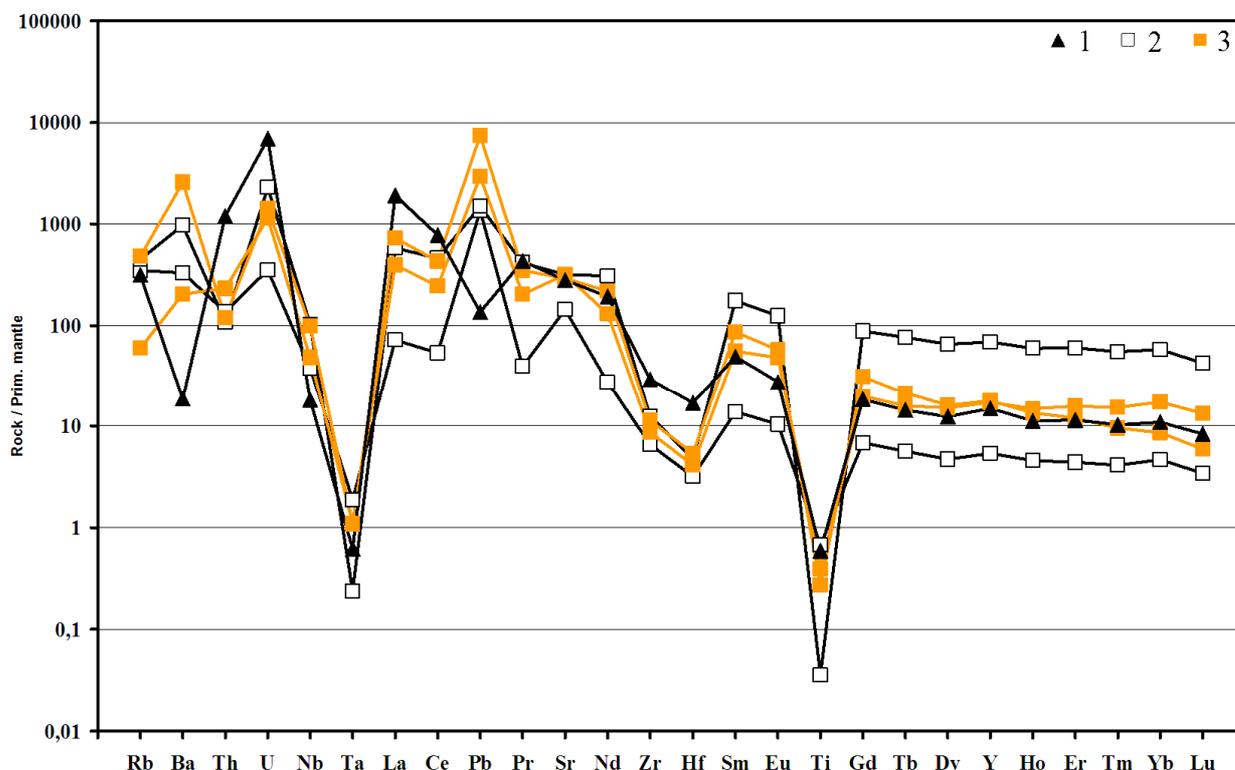


Рис. 4.8 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - мизерит; 2 - чароит; 3 - чароит-асбест

Впервые точным методом ISP-MS получены содержания редкоземельных элементов для минералов чароитового комплекса: чароиты различных цветов (фиолетовый, коричневый, белый, чароит-асбест), мизерит, федорит, франкаменит, апофиллит, агреллит, пектолит, полевой шпат, Mg-силикат, токкоит, тинаксит, нарсарсукиит, юкспорит, рихтерит, арфведсонит, пироксен.

Вариации РЗЭ и их средние значения в чароитах приведены в таблице 4.2. Чароит является главным носителем и концентратором Sr и Ba, которые входят в структуру минерала, а также, в нем встречаются высокие содержания Ti, Rb, Y, Nd, Ce, La, Pb. Для Ti и Pb. Наблюдается большая дисперсия в концентрации этих элементов и возможно их содержания связаны с микропримесями тинаксита и галенита в чароите. Анализы редкоземельных элементов в других минералах чароитовых пород приведены в таблице 4.3.

Содержания редких элементов (в ppm) в минералах чароитовых пород

Проба	24/46	23/4	120	128В	45	161/9	24/10	126/1	Аг-1
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li	0,6	0,2	н/о*	н/о	н/о	н/о	0,2	н/о	0,2
Be	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Sc	0,9	1,3	0,2	0,3	0,0	0,6	0,6	0,1	0,3
Ti	355	773	110	245	41,8	43,7	59,9	121	31,3
V	116	15,2	7,3	6,8	14,5	2,0	1,6	2,9	5,8
Cr	6,9	4,8	0,7	1,2	1,8	3,5	0,4	0,5	0,9
Mn	1100	120	290	120	360	н/о	250	н/о	150
Co	1,1	0,2	0,1	0,8	0,6	0,9	0,6	0,4	0,2
Ni	4,1	2,3	0,0	0,5	0,5	0,3	0,0	0,3	0,6
Cu	1388	1,6	1,1	1,9	6,6	3,6	24,6	31,1	38,4
Zn	399	27,0	5,2	18,6	32,7	11,2	37,2	9,2	11,7
Ga	13,2	1,3	0,3	0,8	1,6	0,5	0,4	0,4	3,2
Ge	0,3	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
Rb	38,8	204	31,3	73,9	16,1	251	308	306	20,6
Sr	6392	6172	11252	2023	279	6252	7653	4260	2720
Y	83,6	70,4	6,5	70,0	0,3	57,5	20,5	1,2	18,7
Zr	132	341	9,4	12,9	13,3	40,4	28,0	5,6	29,9
Nb	35,4	13,5	5,4	2,7	23,0	4,5	17,3	5,3	2,7
Sn	6,3	2,4	0,2	0,6	1,8	1,2	1,0	0,1	1,9
Cs	2,4	5,6	8,1	11,5	9,1	1,9	2,8	1,7	0,5
Ba	1478	135	117	923	124	3332	2341	583	734
La	532	1400	38,1	62,7	2,2	23,9	137	6,5	117
Ce	814	1476	45,6	186	3,8	55,1	156	11,0	273
Pr	97,2	121	4,6	28,2	0,4	6,6	16,1	1,2	33,6
Nd	306	270	13,2	105	1,2	26,5	45,6	3,8	102
Sm	39,5	22,5	1,6	17,8	0,2	6,2	5,4	0,5	11,1
Eu	9,8	4,8	0,4	4,5	0,0	1,7	1,4	0,2	2,6
Gd	18,9	11,2	0,9	10,2	0,1	6,3	2,8	0,2	5,0
Tb	2,1	1,4	0,1	1,4	0,0	1,0	0,4	0,0	0,5
Dy	12,1	9,5	0,9	9,4	0,0	6,8	3,0	0,2	3,2
Ho	2,3	1,9	0,2	1,9	0,0	1,5	0,6	0,0	0,6
Er	6,0	5,7	0,5	6,0	0,0	5,0	1,8	0,1	1,4
Tm	0,8	0,8	0,1	0,9	0,0	0,8	0,3	0,0	0,2
Yb	4,3	5,5	0,6	6,3	0,0	5,3	1,7	0,1	1,1
Lu	0,5	0,7	0,1	0,8	0,0	0,8	0,2	0,0	0,1
Hf	1,7	5,5	0,1	0,3	0,1	0,5	0,4	0,1	0,5
Ta	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
W	0,5	0,8	0,0	0,2	0,5	11,0	0,1	0,1	0,3
Tl	3,2	1,3	0,2	5,2	15,5	0,6	1,0	0,6	43,4
Pb	518	9,5	6,3	12,8	2,9	6,3	10,1	4,1	283
Th	25,1	152	1,9	32,9	1,9	17,8	46,3	2,1	5,5
U	21,2	110	0,8	1,0	0,2	0,2	2,3	0,5	2,9

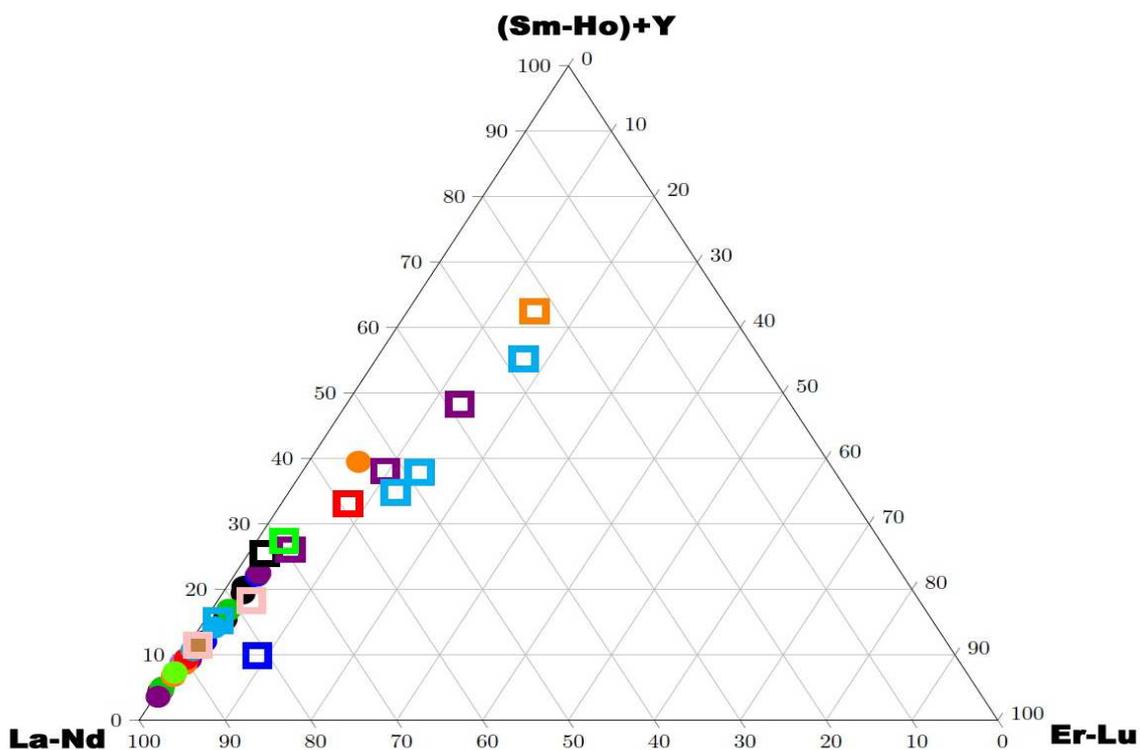
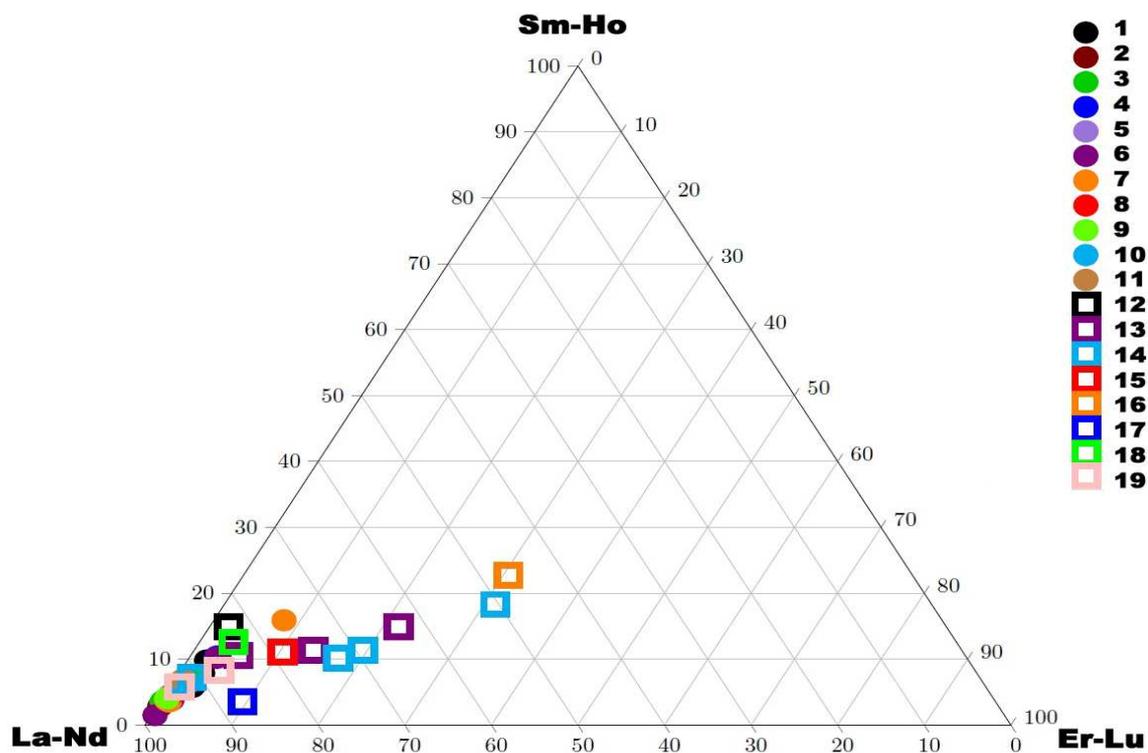
Таблица 4.3 (про должение)

Проба	24/34а	128п	240/4а	19/4	63/1	24/53а	248а	24/55	2/4
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Li	н/о	н/о	н/о	2,6	н/о	0,2	1,3	0,4	0,4
Be	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Sc	0,5	0,4	0,1	14,0	1,4	2,1	0,6	2,4	1,6
Ti	25,7	56,3	284	77,8	8424	10884	1078	5508	19637
V	1,8	20,9	8,0	7,1	78,3	81,2	17,0	34,9	61,9
Cr	3,3	3,7	18,1	121	0,6	1,4	1,5	1,2	1,8
Mn	н/о	н/о	н/о	270	н/о	730	390	820	920
Co	1,3	1,3	1,1	0,2	1,2	1,5	0,1	1,2	1,6
Ni	4,8	4,6	9,9	0,5	0,4	0,3	0,1	0,3	0,8
Cu	8,6	153	60,3	14,6	7,2	156	2,7	11,9	9,4
Zn	10,3	24,8	63,8	24,0	37,4	37,7	11,5	61,0	48,8
Ga	2,2	8,5	27,6	2,4	2,9	2,7	6,4	2,8	1,5
Ge	0,6	0,9	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2
Rb	11,0	12,0	358	116	561	589	151	899	601
Sr	748	842	556	1520	2388	1151	2546	2005	1788
Y	4,8	7,6	1,7	264	40,3	32,1	129	87,3	39,0
Zr	37,6	95,6	31,3	250	348	459	362	299	994
Nb	12,5	8,7	1,6	8,2	1035	1898	53,5	373	435
Sn	11,1	28,5	0,6	2,6	2,4	3,2	14,1	1,5	1,4
Cs	0,9	0,4	1,2	7,5	17,3	19,5	5,0	52,0	17,8
Ba	621	347	10839	9478	3022	481	3057	2335	4589
La	23,0	21,4	10,3	291	21,5	8,3	126	15,4	24,2
Ce	40,5	36,1	13,0	720	31,6	14,0	239	24,1	32,2
Pr	4,7	4,5	1,7	104	3,9	2,0	32,4	3,0	4,3
Nd	16,1	14,4	5,9	434	12,7	7,2	116	10,9	14,6
Sm	2,4	2,1	1,0	107	2,6	1,6	20,8	3,0	2,7
Eu	0,7	0,5	0,5	30,5	1,0	0,5	6,0	1,1	0,8
Gd	1,4	1,2	0,5	74,1	2,1	1,5	14,7	3,6	2,2
Tb	0,2	0,2	0,1	9,3	0,4	0,3	2,2	0,8	0,4
Dy	0,9	1,2	0,3	50,3	3,8	2,7	17,9	8,5	3,6
Ho	0,2	0,2	0,1	8,5	1,0	0,8	3,9	2,4	1,1
Er	0,4	0,7	0,1	21,3	3,9	3,1	12,9	10,3	4,9
Tm	0,1	0,1	0,0	2,7	0,8	0,6	2,2	2,1	1,1
Yb	0,3	0,7	0,1	15,7	7,1	6,1	16,5	18,1	10,2
Lu	0,0	0,1	0,0	1,7	1,1	0,9	2,3	2,6	1,6
Hf	0,5	1,6	0,6	5,2	4,7	3,5	6,3	1,9	5,6
Ta	0,0	0,4	0,5	0,2	2,8	4,9	0,1	0,3	0,8
W	0,2	1,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Tl	0,5	2,9	0,6	9,9	1,5	2,9	0,5	2,9	9,3
Pb	14,0	152	135	1162	4,9	150	422	7,3	26,6
Th	1,5	11,7	0,3	26,3	24,9	17,8	54,6	14,1	24,1
U	0,8	23,3	2,0	2,4	2,8	1,2	14,5	2,6	16,7

Табл. 4.3 (продолжение)

Проба	248	24	24/48	24/47	135/7	117/3	118	124	227/1
№	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Li	0,4	0,4	0,2	0,2	н/о	н/о	н/о	н/о	2,1
Be	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	6,4
Sc	1,7	0,9	4,1	1,7	1,2	1,6	3,5	2,5	7,5
Ti	55583	52921	19435	44829	1109	686	4811	5055	2610
V	183	181	97,9	139	776	2573	7787	8769	734
Cr	5,3	4,0	24,9	0,0	2,9	24,0	32,6	14,9	16,1
Mn	990	720	100,00	260	н/о	430	н/о	н/о	н/о
Co	1,7	1,4	0,6	0,5	14,0	53,6	21,1	22,4	8,4
Ni	0,3	0,9	1,1	0,5	5,5	48,4	20,3	7,2	10,0
Cu	17,2	11,7	98,7	20,1	68,9	3,6	185,1	14,1	7,2
Zn	111	80,1	51,6	90,0	383	344	128	336	94,2
Ga	1,5	0,8	11,5	3,7	5,2	1,5	4,5	10,9	7,3
Ge	0,4	0,3	0,1	0,3	2,3	0,5	0,5	0,9	1,1
Rb	649	716	35,1	290	13,0	15,5	7,7	2,6	41,6
Sr	1048	1369	727	37104	935	1571	1710	878	1363
Y	37,1	1,9	68,1	249	0,8	6,5	3,0	3,5	16,9
Zr	1175	731	1489	3281	31,5	10,5	70,1	120	476
Nb	1903	916	9,1	170	1,3	8,1	9,4	1,2	12,0
Sn	13,9	3,4	1,6	20,9	2,2	1,4	20,7	83,4	-
Cs	18,3	20,7	1,3	8,5	0,0	0,3	0,5	0,2	0,6
Ba	2496	649	1003	51536	79	618	3460	756	696
La	15,9	4,6	43,9	42,9	1,4	6,3	14,5	6,8	8,8
Ce	28,1	8,9	75,8	37,7	6,8	12,1	18,7	11,5	22,3
Pr	3,5	1,1	9,4	5,4	0,3	1,7	2,4	1,4	2,9
Nd	12,4	3,9	33,6	23,5	0,9	6,6	7,6	5,1	11,5
Sm	2,6	0,6	7,2	8,1	0,1	1,4	1,2	0,9	2,5
Eu	0,7	0,2	2,0	2,9	0,0	0,4	0,3	0,2	0,7
Gd	1,9	0,4	4,8	11,4	0,1	1,0	0,6	0,5	2,4
Tb	0,4	0,1	0,7	2,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4
Dy	3,4	0,3	6,9	22,2	0,1	1,0	0,5	0,5	2,4
Ho	1,0	0,1	1,7	6,6	0,0	0,2	0,1	0,1	0,6
Er	4,6	0,2	6,4	26,7	0,1	0,6	0,2	0,3	1,9
Tm	1,1	0,0	1,3	4,9	0,0	0,1	0,0	0,1	0,4
Yb	9,8	0,2	11,9	35,4	0,7	0,5	0,2	0,7	2,8
Lu	1,6	0,0	1,8	4,7	0,2	0,1	0,0	0,1	0,5
Hf	11,9	3,2	24,8	50,0	0,2	0,3	1,1	1,7	11,6
Ta	4,9	3,8	0,5	8,8	0,0	0,0	0,2	0,0	0,6
W	0,1	0,0	0,0	2,6	1,8	0,2	0,1	0,1	0,2
Tl	8,7	2,3	1,1	5,4	0,3	0,1	3,5	0,2	0,3
Pb	20,3	1,6	746	184	24,8	8,8	54,3	20,8	26,5
Th	23,5	7,4	14,4	47,7	0,0	0,6	1,1	2,1	1,0
U	8,7	0,2	15,8	4,0	0,1	0,6	5,8	34,6	1,2

Примечания: данные анализа РЭ методом ICP-MS. Аналитики - Митрофанова А.Ю., Зарубина О.В., 2015 г.  
н/о\* - не обнаружен. 1 - мизерит; 2-4 - федорит; 5-7 - франкаменит; 8 - апофиллит; 9 - агреллит; 10-11 - пектолит, 12-КПШ; 13 - Mg-силикат; 14-17 - токкоит; 18-20 - тинаксит; 21 - нарсарсукиит; 22 - юкспорит; 23 - рихтерит; 24 - арфведсонит; 25-26 - пироксен; 27 - волластонит.



**Рис. 4.9** Распределение редкоземельных элементов в минералах чароитовых пород (Без Y и с учетом Y)

Примечания: 1 - фиолетовый чароит; 2 - коричневый чароит; 3 - белый чароит; 4 - чароит-асбест; 5 - мизерит; 6 - федорит; 7 - франкаменит; 8 - апофиллит; 9 - агреллит; 10 - пектолит; 11 - полевоы шпат; 12 - Mg-силикат; 13 - токкоит; 14 - тинаксит; 15 - нарсарсуцит; 16 - юкспорит; 17 - рихтерит; 18 - арфведсонит; 19 - пироксен

В минералах чароитовых пород имеются элементы, с которыми происходит изоморфизм различных редких земель (рис. 4.9). Это Са и Тi. Для минералов с высоким содержанием Са, характерны высокие содержания легких редкоземельных элементов. Минералы, содержание Тi, обогащены изоморфно входящими тяжелыми и средними редкоземельными элементами.

Спектры содержания РЗЭ в различных минералах чароитовых пород приведены на рис. 4.10 – 4.16.

Для титаносиликатов (тинаксит, нарсарсуцит и юкспорит) (рис. 4.10) нормированные содержания тяжелых лантаноидов выше, чем содержание легких, однако в тинаксите встречается и нормальное распределение РЗЭ, когда легкие лантаноиды преобладают над тяжелыми. Такие необычные спектры TR связаны, вероятно, с кристаллохимической структурой Тi-силикатов, в которых тяжелые лантаноиды изоморфны с Тi, а содержание Са, с которым обычно изоформны легкие лантаноиды, в этих минералах очень низко.

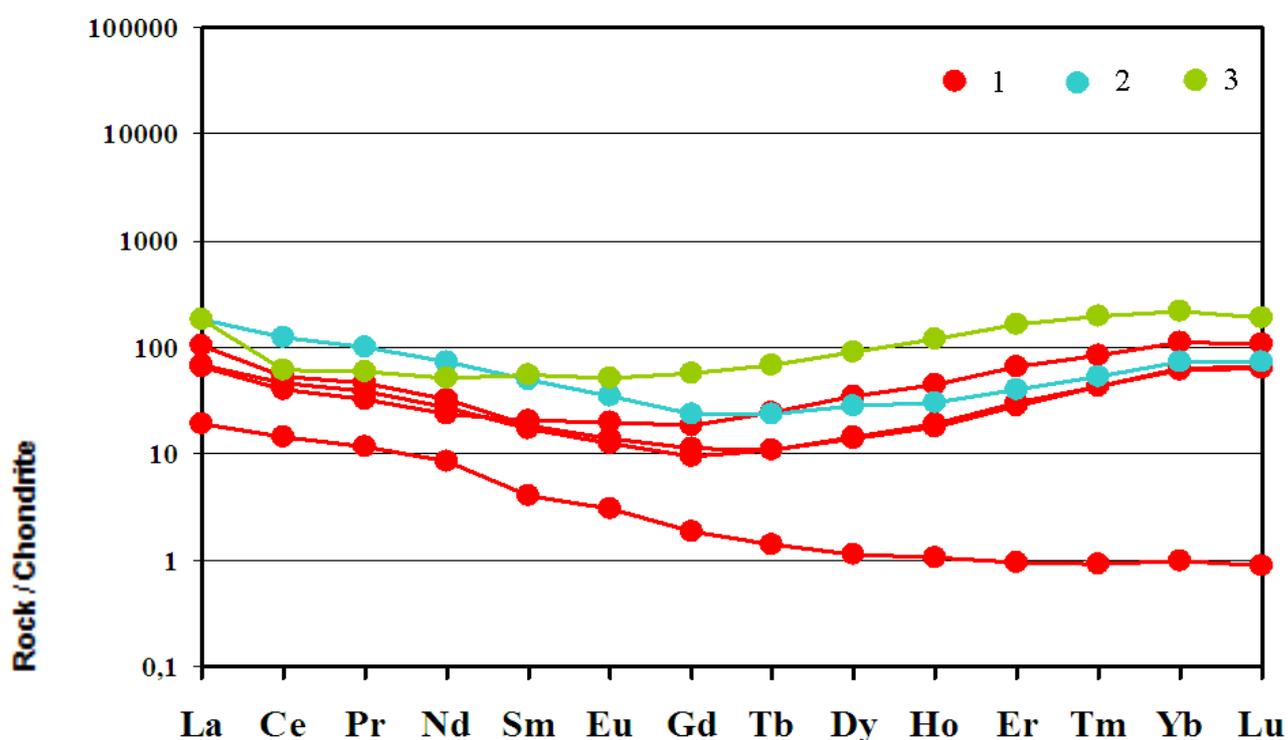


Рис. 4.10 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1- тинаксит; 2 - нарсарсуцит; 3 - юкспорит

На рис. 4.11 сопоставляются спектры минералов с одинаковой структурой, но разным составом (тинаксит и токкоит). Их спектры РЗЭ почти аналогичны.

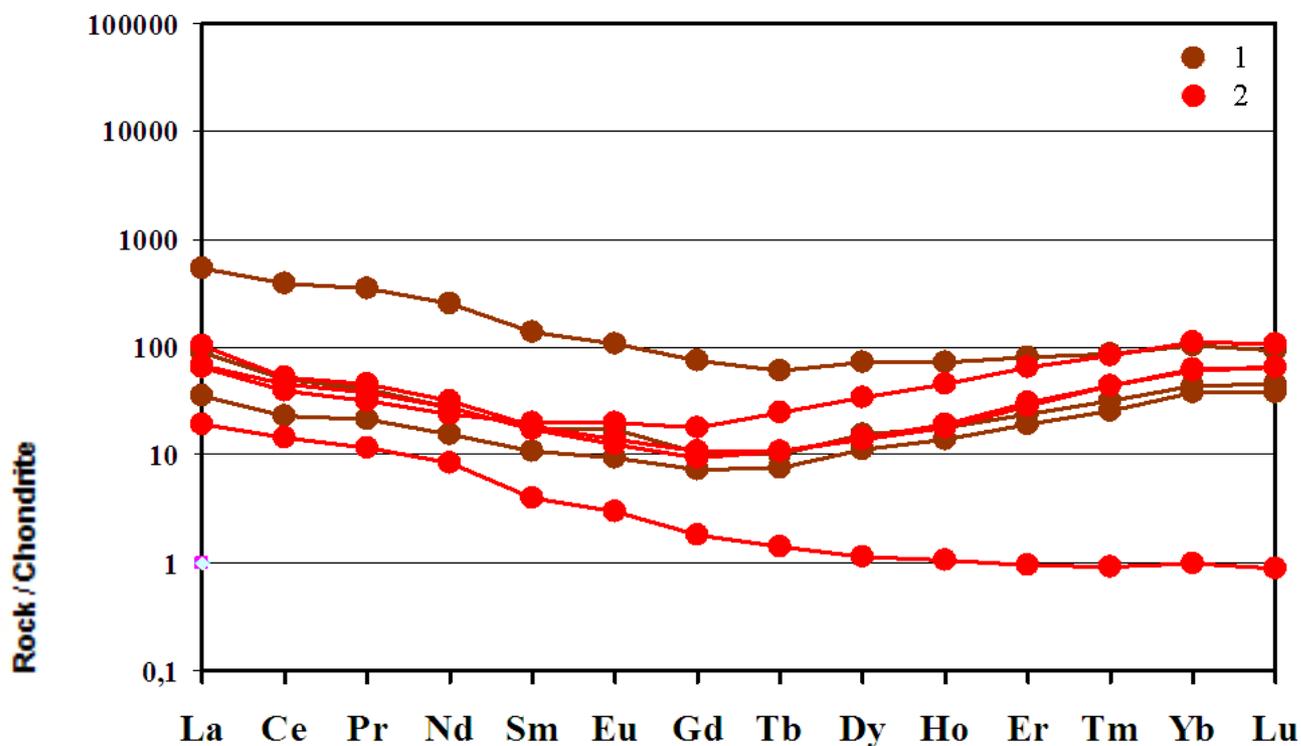


Рис. 4.11 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1 - токкоит; 2 - тинаксит

На рис. 4.12 приведены спектры для федорита и мизерита. В мизерите содержание легких лантаноидов самое высокое из всех щелочных силикатов в чароитовых породах. Легкие лантаноиды входят в структуру и формулу минерала. Для мизерита наблюдается довольно крутой наклон спектра легких лантаноидов. В федорите формы спектров анализов из разных типов чароитовых пород аналогичны, но отличаются общими содержаниями всех элементов.

Во франкамените (рис. 4.13) спектры лантаноидов близки к спектрам в федорите, но более пологие. Как уже было отмечено ранее, во всех минералах отсутствует фракционирование Eu.

Спектры в Mg-силикате (рис. 4.14) по конфигурации близки к спектрам токкоита, но с более высокими содержаниями средней группы лантаноидов.

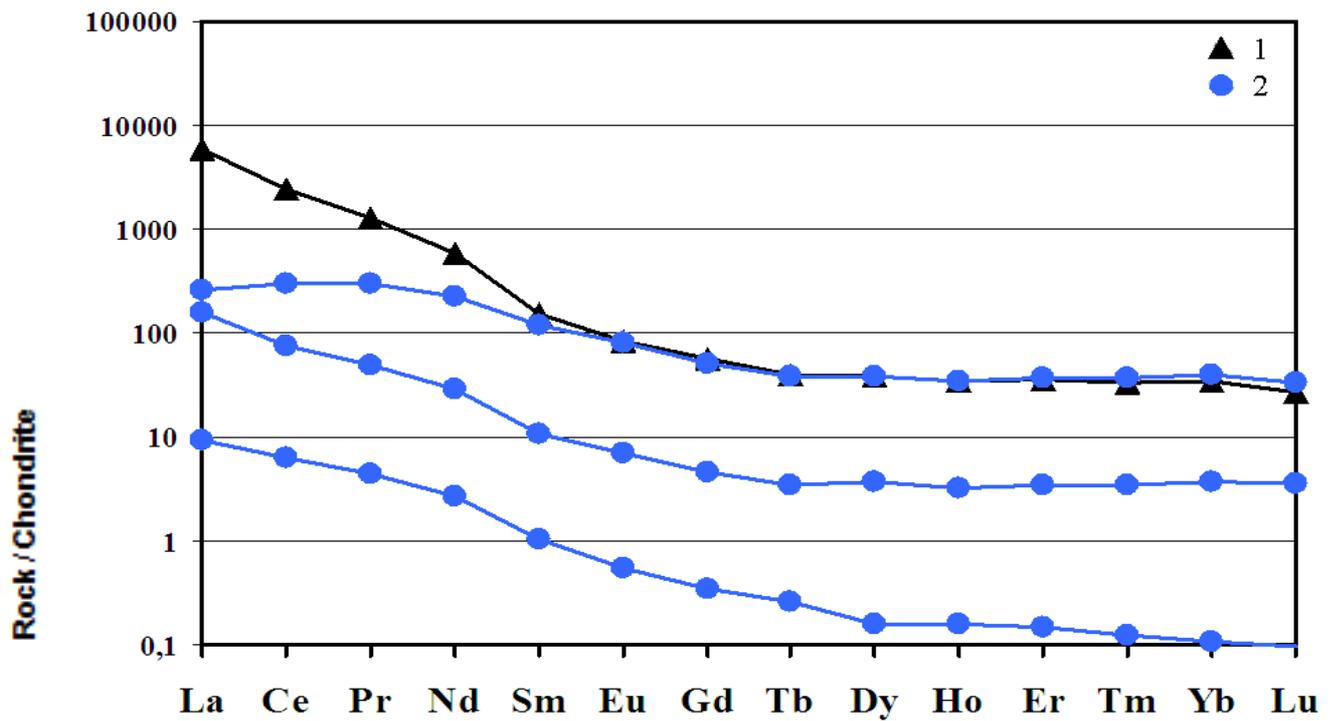


Рис. 4.12 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1 - мизерит; 2 - федорит

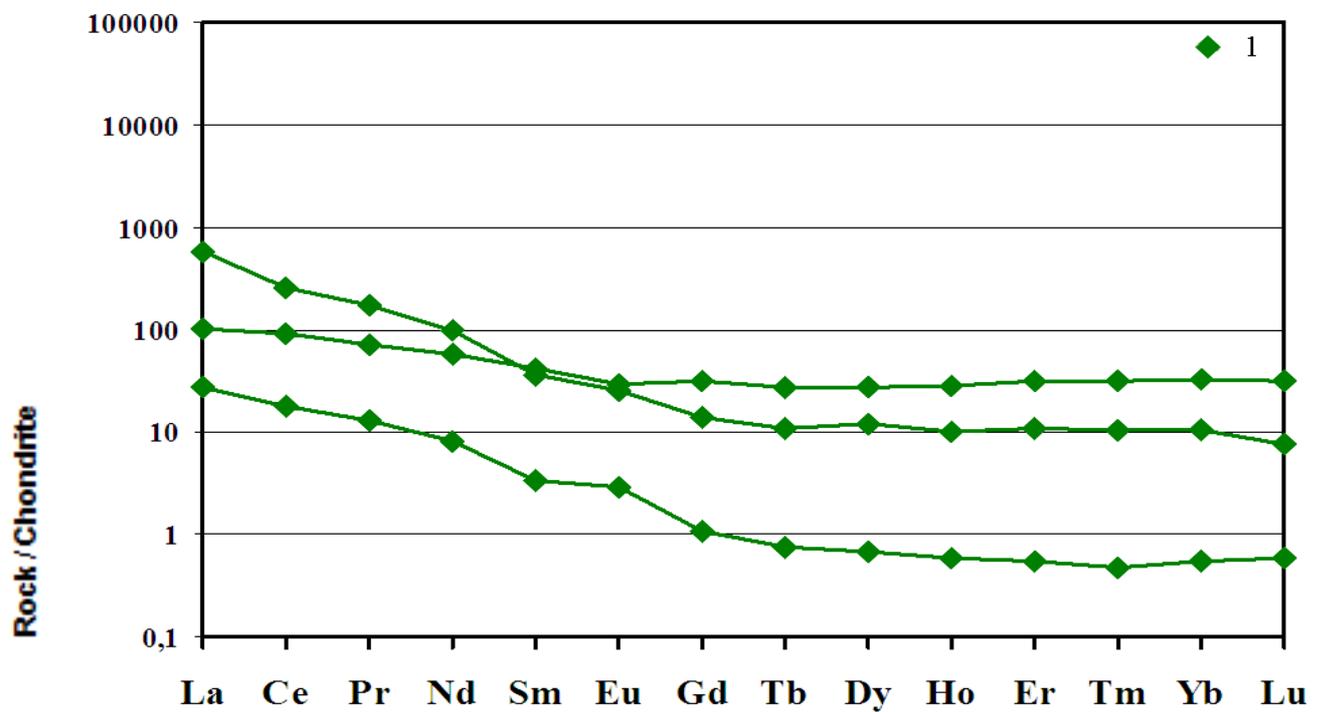


Рис. 4.13 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1 - франкаменит

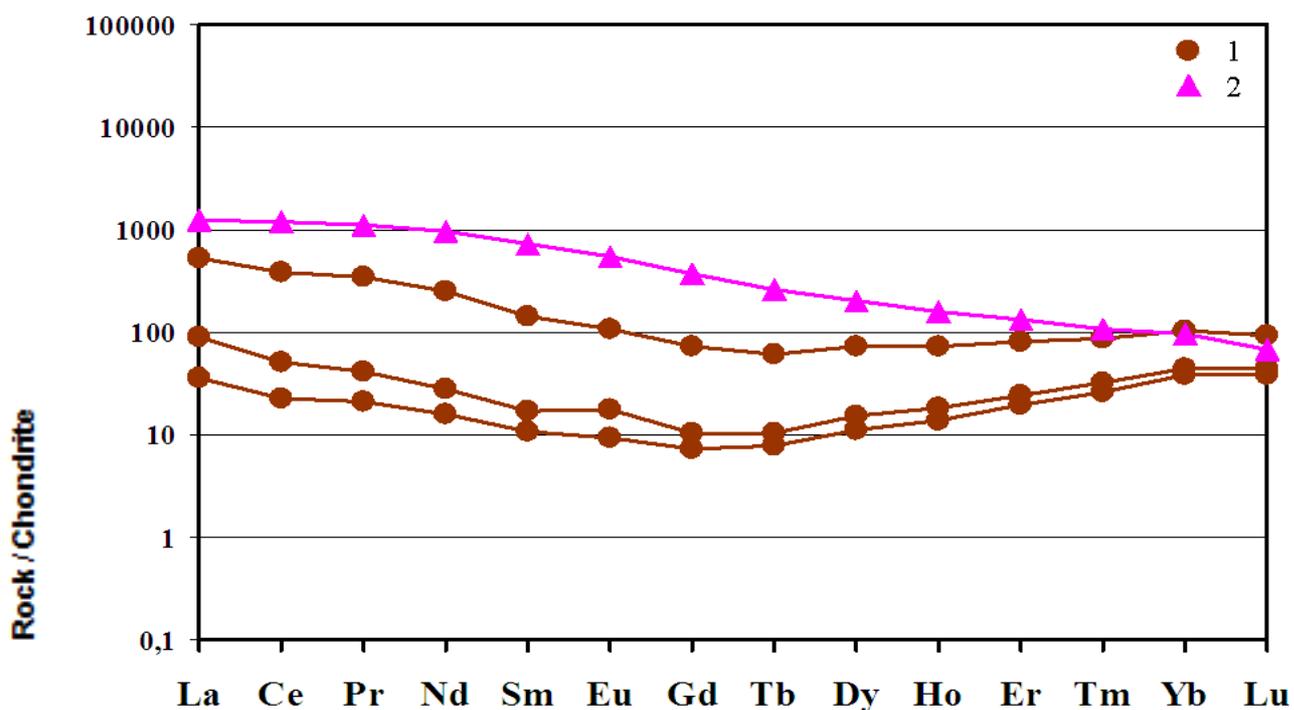


Рис. 4.14 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1 - токкоит; 2 - Mg-силикат

Спектры лантаноидов в агреллите и апофиллите абсолютно аналогичны (рис. 4.15) и вероятно потому, что оба минерала близки к цеолитам. Аналогичные спектры наблюдаются для пектолита и КПШ, однако в КПШ все же наблюдается небольшая положительная аномалия Eu.

Спектры пироксена и арфведсонита (рис. 4.16) полностью совпадают, а спектр К-рихтерита значительно отличается от них. В его спектре отмечается положительная аномалия Ce, далее довольно резко идет снижение концентрации средней группы лантаноидов от Sm до Tb, а начиная с Dy до Lu, кривая резко поднимается вверх, - это говорит о том, что нормированные содержания Y и Lu в рихтерите выше, чем содержание легких лантаноидов. Рихтерит не кристаллизуется в самих чароитовых породах, а является реакционным минералом на границе чароитовых пород и КПШ-лампроитов и карбонатных пород. Вероятно, с этим и связаны его аномальные формы РЗЭ спектров.

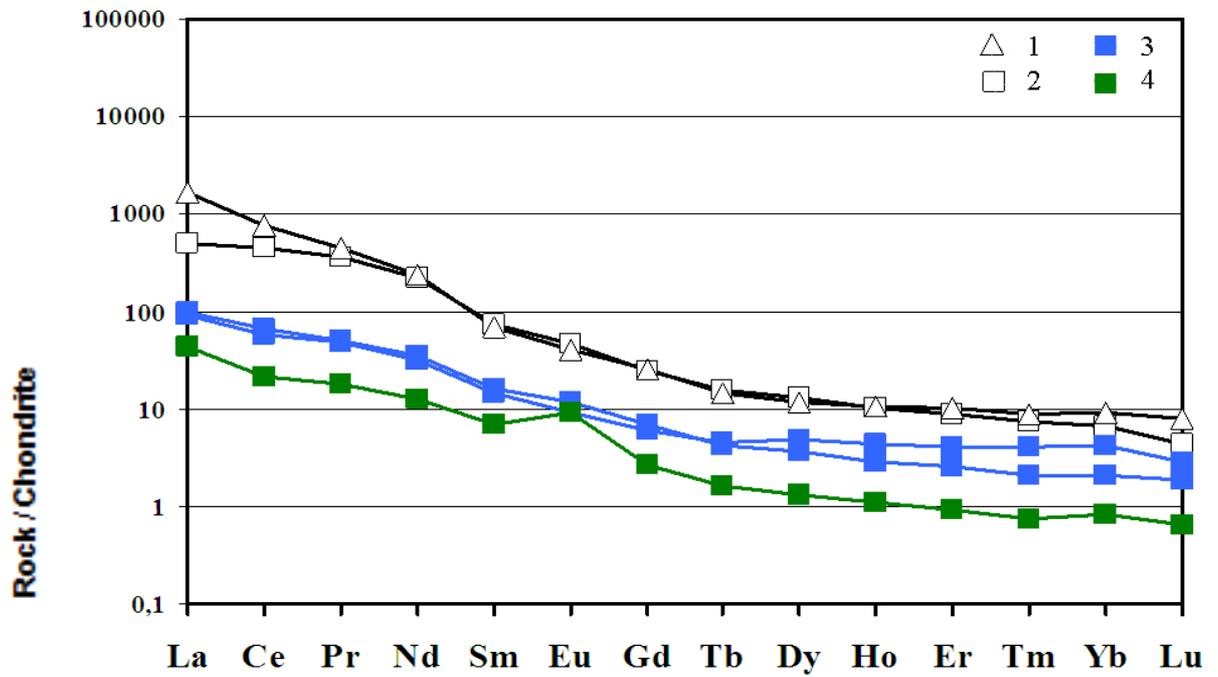


Рис. 4.15 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1 - агреллит; 2 - апофиллит; 3 - пектолит; 4 - КПШ

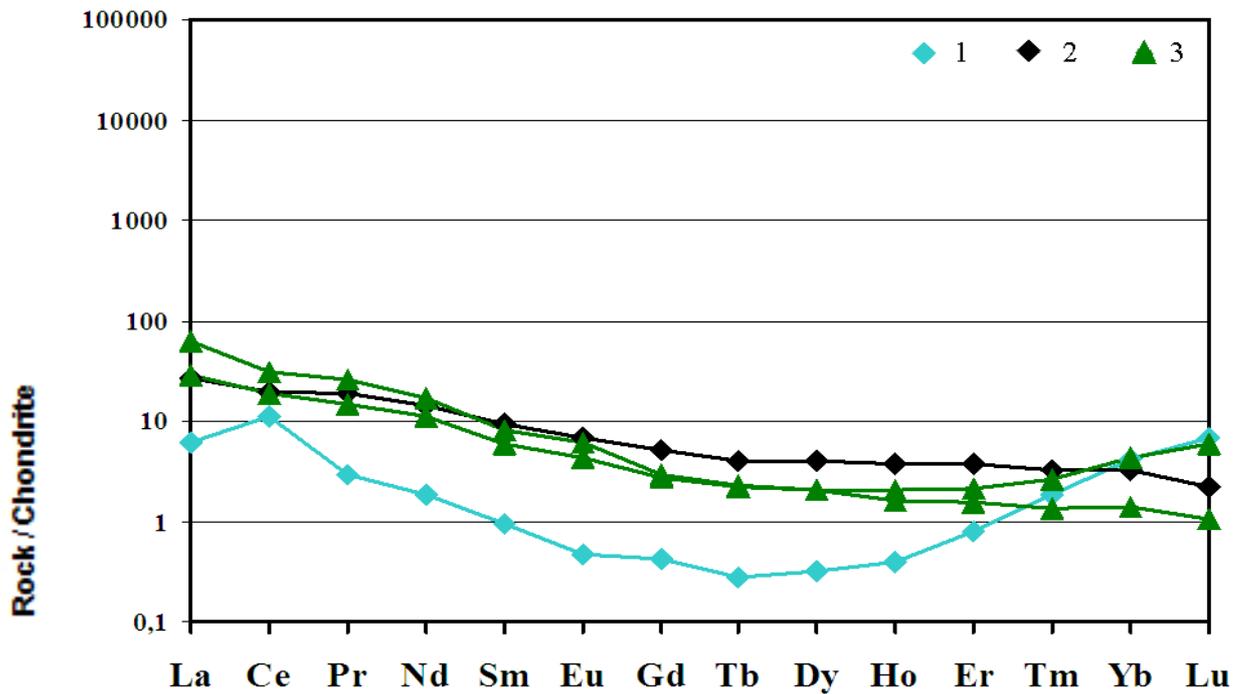


Рис. 4.16 Спектры РЗЭ минералов чароитовых пород

1 - рихтерит; 2 - К-арфведсонит; 3 - пироксен

Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород приведены на рис. 4.17 - 4.22. Спайдер-диаграммы титаносиликатов (тинаксита, юкспорита, нарсарсукиита)

показаны на рис. 4.17. Для тинаксита отмечается дисперсия концентраций Th, Pb, Ti и тяжелых лантаноидов. У него нет положительной аномалии Ba, но фиксируется по сравнению с чароитом положительная аномалия Ti, которая характерна для всех Ti минералов из чароитовых пород. Кроме того, у тинаксита наблюдается отрицательная аномалия Ce, La, Pr, Nd и положительная аномалия Zr, Hf, чем он резко отличается от чароита.

В других титаносиликатах - юкспорите и нарсарсуките (рис. 4.17), спектры редких элементов аналогичны тинакситу, но наблюдаются более резкие положительные аномалии для U, Br, Sr, Zr, Hf. При этом в юкспорите наблюдается резкая положительная аномалия Ba. Содержание тяжелых лантаноидов в этих двух минералах более высокое, чем в тинаксите. Так же, во всех Ti-минералах наблюдается небольшая положительная аномалия Y, которая не характерна для чароитовых пород.

В спайдер-диаграмме токкоита (рис. 4.18) общая конфигурация близка к тинакситовой, но для токкоита характерна большая дисперсия содержаний Th, La, Ce, Pr, Nd и других REE. Причина этих аномалий пока не ясна. Конфигурация кривых Mg-силиката близка к токкоитовой, но с более высокими концентрациями PЗЭ. Для микроклина (рис. 4.18) отмечаются наиболее низкие концентрации почти всех элементов по сравнению с другими минералами, при этом, его отличительной особенностью является отрицательная аномалия Nb при более высоких содержаниях U и Ta. Линии Zr, Hf и тяжелых лантаноидов более низкие, по сравнению с токкоитовыми.

По сравнению с тинакситом, у токкоита (рис. 4.19) более высокие содержания PЗЭ и Pb, и резко отрицательный пик Ti. Остальные элементы почти совпадают с тинакситовыми. У федорита и франкаменита (рис. 4.20) конфигурации кривых довольно близки между собой и отличаются только общими содержаниями, при значительной дисперсии всех элементов как в одном, так и в другом минерале. Но они все ниже, чем в мизерите, у которого отмечается положительная аномалия Pb, La и U. В отличие от чароита (рис. 4.7) с

положительной аномалией Pb, в федорите и франкамените напротив, наблюдается его отрицательная аномалия и довольно резкая отрицательная аномалия Th.

Для апофиллита и агреллита (рис. 4.21) конфигурации кривых во многом совпадают, кроме Zr, Hf и Sr и La, содержание которых в агреллите намного выше, чем в апофиллите.

У пектолита (рис. 4.21) кривые спайдердиаграммы близки к чароитовым, но присутствует довольно большая дисперсия U, Th, Pb, Zr, Hf.

Для микроклина (рис. 4.21) характерны низкие содержания почти всех редких элементов кроме положительных аномалий для Ba, Sr и высоких содержаний Rb.

У пироксенов и амфиболов (рис. 4.22) при близком поведении редких земель и Pb наблюдаются существенные различия в содержаниях Ti, Zr, Hf, Ta, Th.

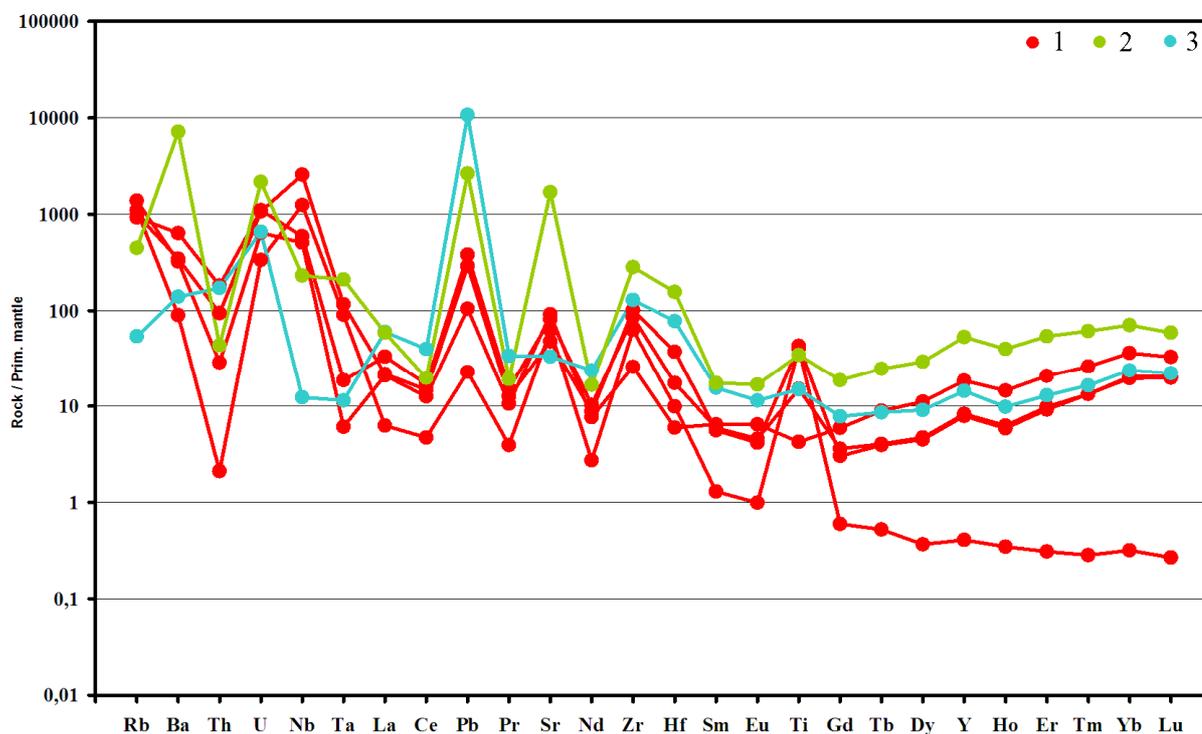


Рис. 4.17 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - тинаксит; 2 - юкспорит; 3 - нарсарсукиит

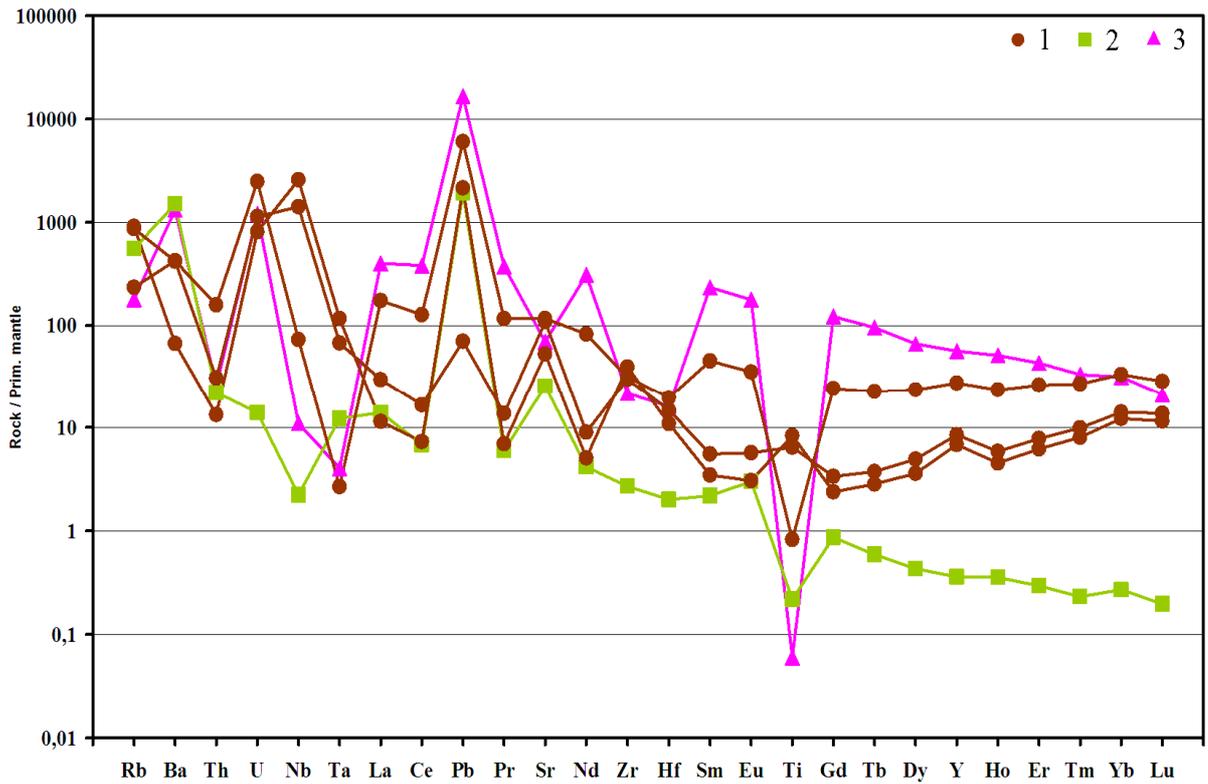


Рис. 4.18 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - токкоит; 2 - микроклин; 3 - Mg-силикат

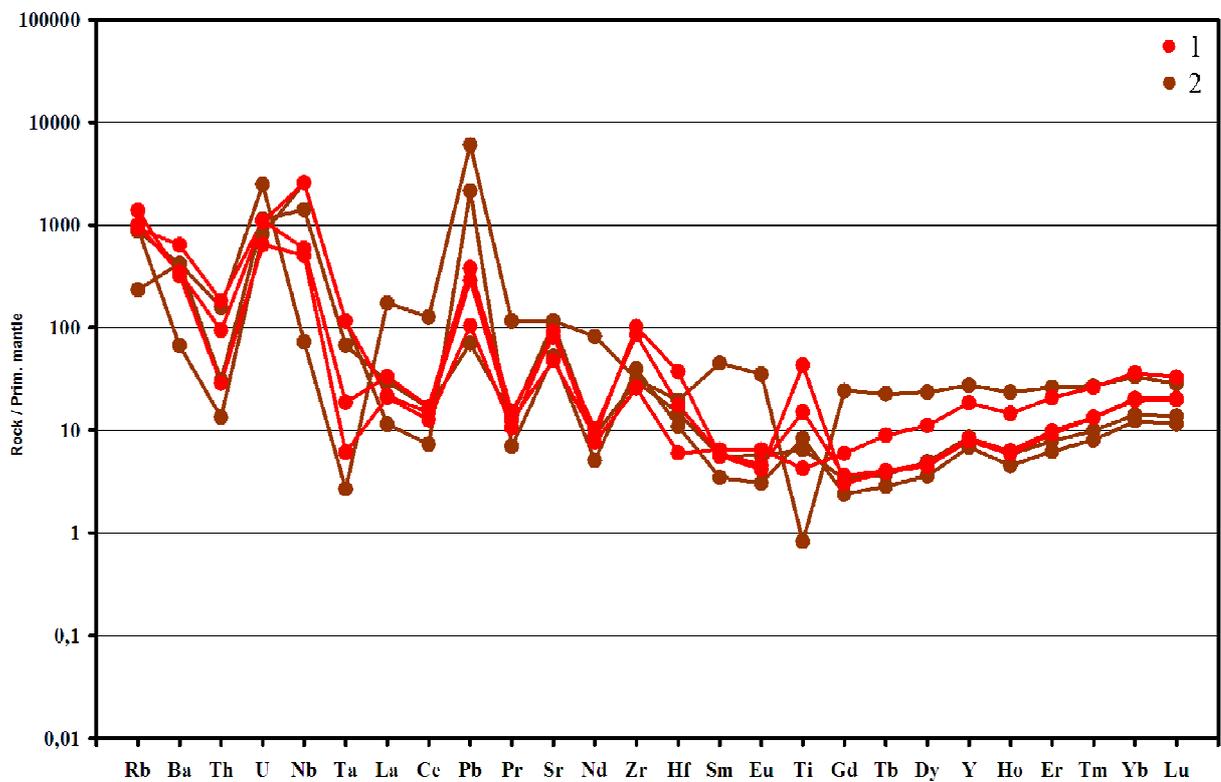


Рис. 4.19 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - тинаксит; 2 - токкоит

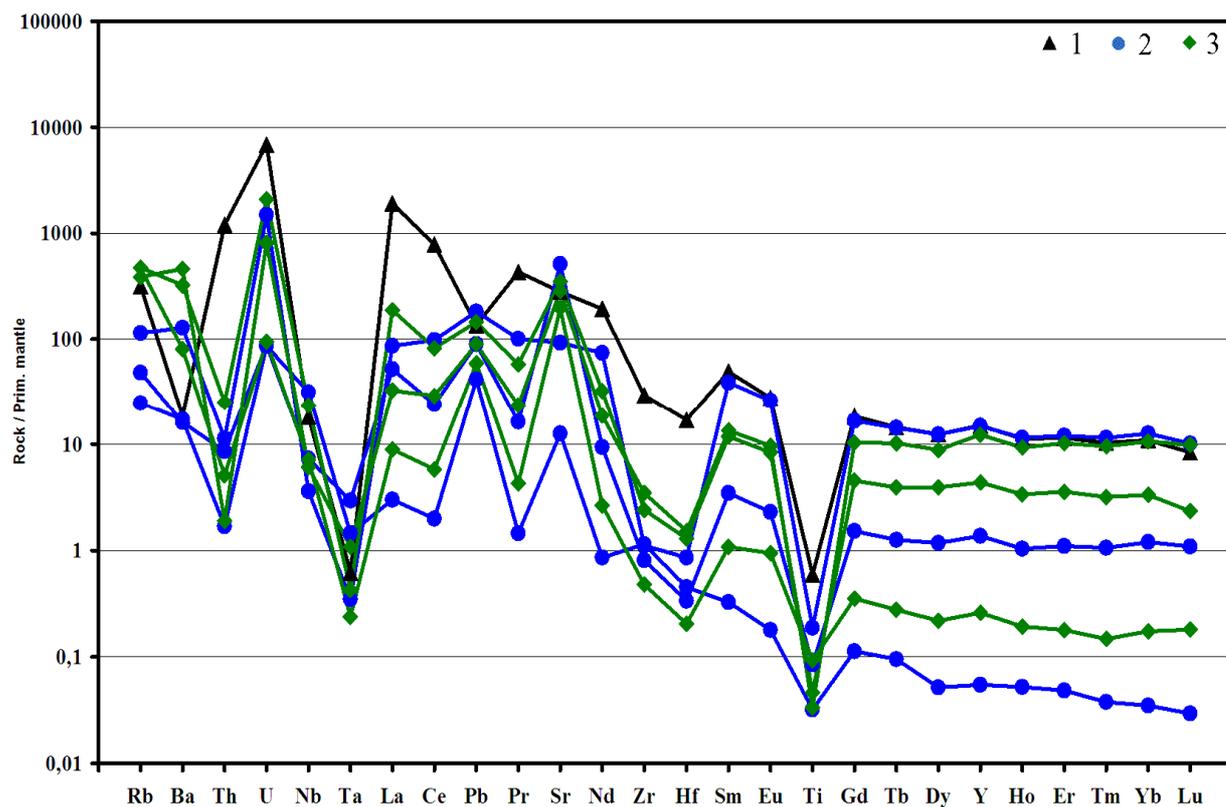


Рис. 4.20 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - мизерит; 2 - федорит; 3 - франкаменит

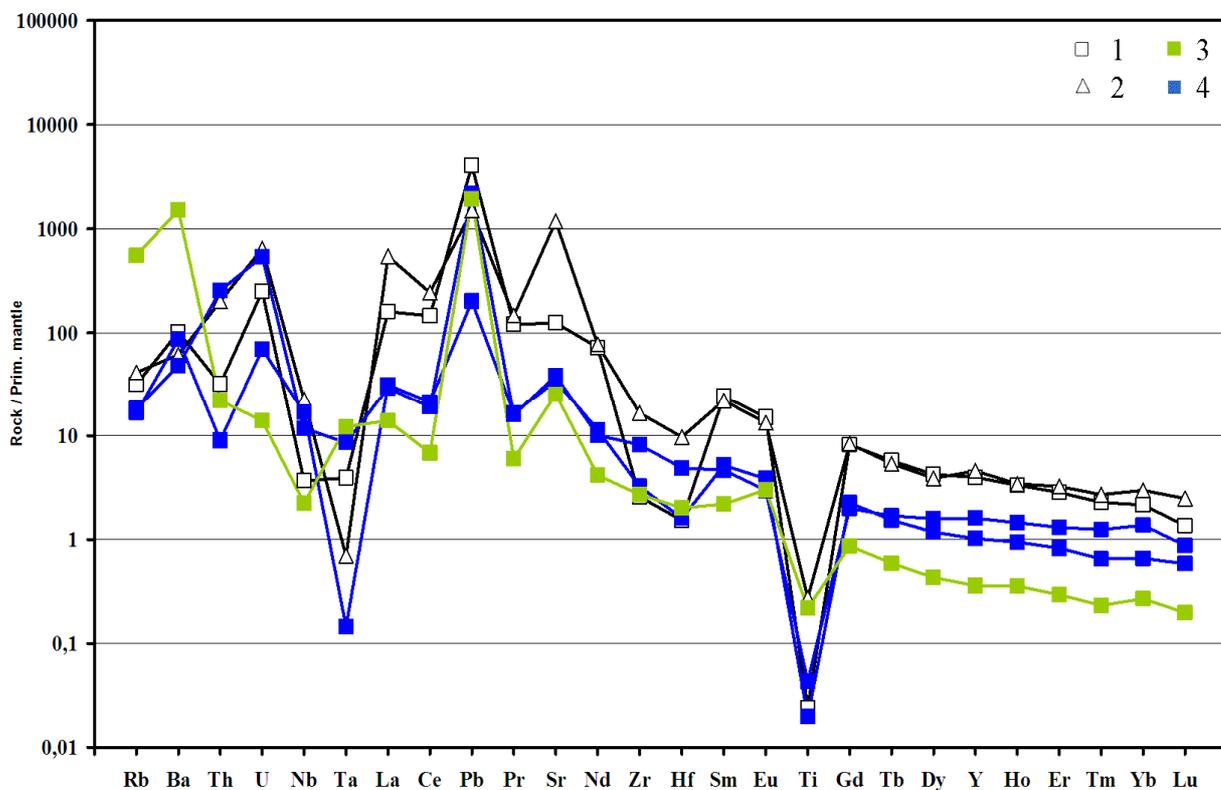


Рис. 4.21 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - апофиллит; 2 - агреллит; 3 - микроклин; 4 - пектолит

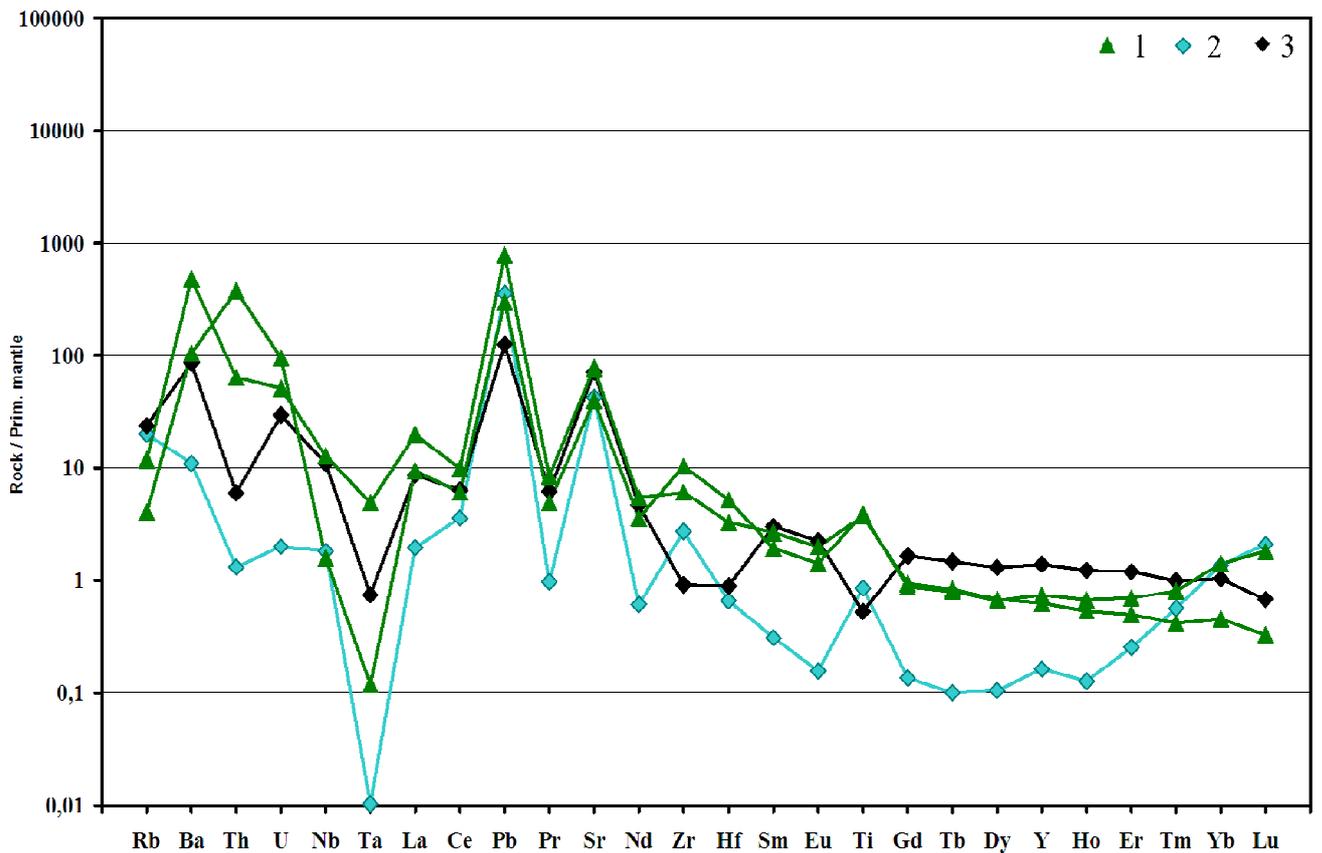


Рис. 4.22 Спайдер-диаграммы минералов чароитовых пород

1 - пироксен; 2 - рихтерит; 3 - арфведсонит

Несмотря на то, что чароитовые породы при довольно разнообразном содержании минералов характеризуются очень близкими конфигурациями спектров при разных содержаниях элементов, в самих минералах этих пород редкие элементы ведут себя по-разному.

Получается, что суммарное содержание редких элементов в минерале и его количество в породе дополняют друг друга, а содержания элементов в породах разного минерального состава довольно близки.

Эти закономерности свидетельствуют о кристаллизации чароита с различным количеством породообразующих минералов из единого расплав-флюида.

## ГЛАВА 5. ГЕНЕЗИС, ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВОЗРАСТ И МАНТИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ, ЧАРОИТОВЫХ ПОРОД

### 5.1 Генезис чароитовых пород

Впервые в породах К-серии обнаружен полный ряд дифференциатов – от ультраосновных-щелочных, через основные и средние к кислым составам (щелочным гранитам) [Владыкин и др., 1983, Владыкин, 2005]. Подобный ряд дифференциатов обнаружен в Мурунском массиве и Билибинском массиве (Центральный Алдан). Ответственными за образование такого полного ряда пород являются процессы дифференциации и магматического расслоения, широко проявленные во всех породах комплекса. Такой интенсивной дифференциации способствовал значительный температурный интервал: от 1500°C до 700°C в магматических породах [Панина, 1985]. В силикатно-карбонатном дифференциате, при кристаллизации от ранних минералов к поздним в чароитовых породах и карбонатитах, температурный интервал варьировался от 800°C до 400°C [Bogovikov et al., 2016]. Наиболее высокотемпературным минералом этих пород является пироксен, который образовался при температуре 800°C - 700°C.

Крайним дифференциатом всей магматической серии являлись остаточные силикатно-карбонатные магмы и флюид-расплавы, которые внедрились в юго-западной контактовой зоне Мурунского массива. Главные процессы при кристаллизации этого остатка проявились в расслоении остаточного силикатно-карбонатного расплава. В силикатной части образовались микроклиниты и микроклин-пироксеновые породы, занимающие 80% площади. От них отделился силикатно-карбонатный флюид-расплав, который при понижении температуры разделился на чароитовую и карбонатитовую части, а карбонатитовая часть далее разделилась еще на три типа карбонатитовых, как описано ранее в 1 главе.

В связи с довольно примитивным составом раннего силикатного кристаллизата микроклин-пироксеновых пород, в остатке резко накопились

редкие элементы, особенно Ba и Sr, которые в чароитовых породах содержатся от 1 до 3%, а в карбонатитах – до 10-30% (бенстонитовые карбонатиты).

С момента открытия чароита появилось несколько различных точек зрения на генезис этого минерала. Многие исследователи ранее считали чароит минералом метасоматического происхождения [Конев и др., 1996; Евдокимов и др., 1985; Борисов, 1984; Лазебник, 1981; Лазебник и др. 1977], однако, в чароитовых породах не выражена метасоматическая зональность, и чтобы они образовались из кварцита (95%  $\text{SiO}_2$ ), все компоненты необходимо было привнести, чего не наблюдается в чароитовых породах.

Другие исследователи [Владыкин и др., 1983, Воробьев 2008] считали чароитовые породы магматическими образованиями. В пользу магматического генезиса говорят геологические и петрографические особенности чароитовых пород, а именно: жильные и шпировые образования самих пород с резкими контактами с вмещающими породами, наличие ранних минералов-вкрапленников и обтекающей их основной массы, явные структуры течения (рис. 5.1 а-б) и закаленные участки (рис. 5.2 а-б).

Флюидонасыщенные и обогащенные щелочами расплавы чароитовых пород были реакционными с вмещающими и контрастными по составу породами. Но с инертными кварцитами образуется только небольшая зона (10%) перекристаллизации, в которых появляются в небольших количествах пироксен и чароит.

На контакте с меланократовыми ксенолитами лампроитов как чароитовые породы, так и карбонатиты образуют зоны взаимодействия, которые выражаются в появлении меланократовой пироксен-К-рихтеритовой зоны.



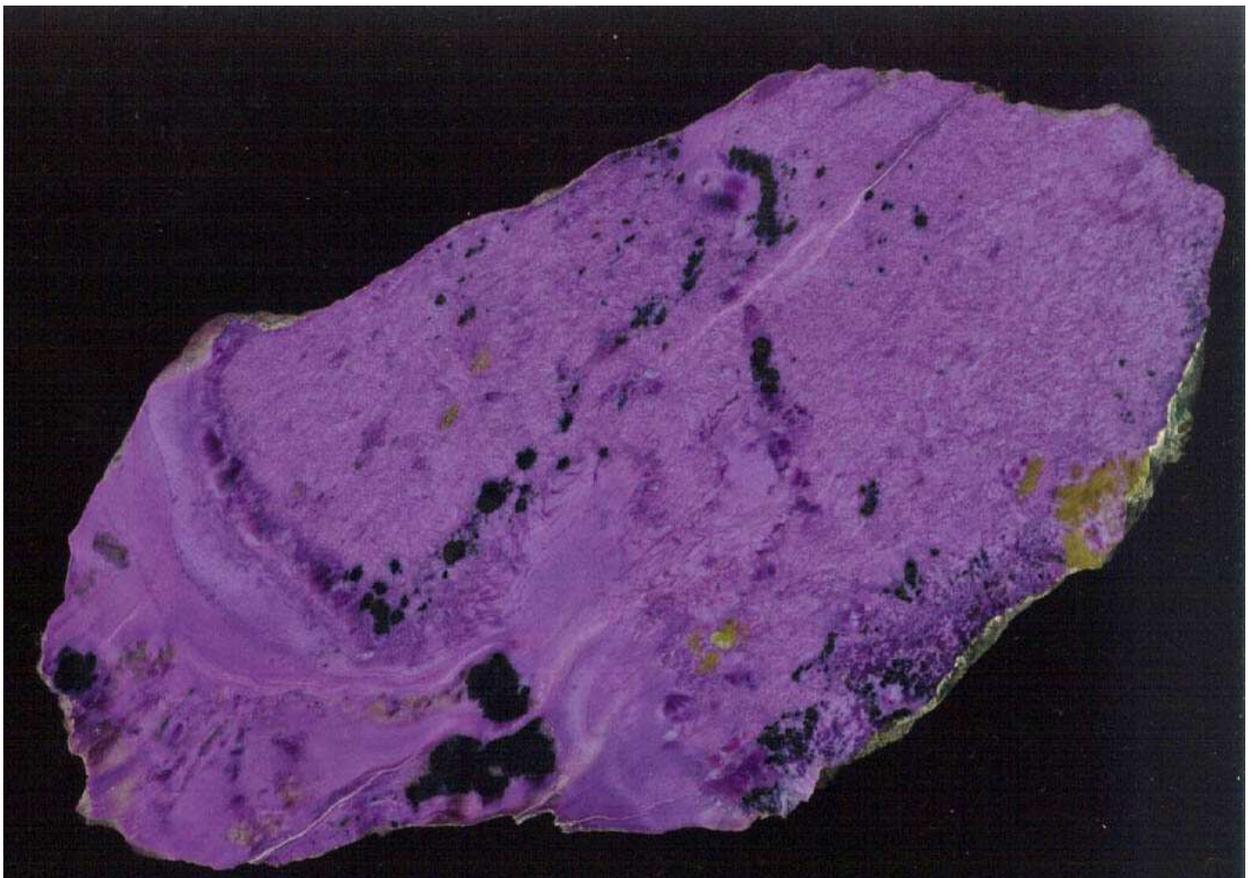
Рис. 5.1 а Структуры течения в чароитовой породе



Рис. 5.1 б Структуры течения в чароитовой породе



**Рис. 5.2 а Закаленная чароитовая порода**



**Рис. 5.2 б Закаленная чароитовая порода**

Доказательством магматического генезиса чароита являются находки закаленных участков, представленных микрозернистым чароитом, и каплевидные

отделениями пироксена и тинаксита (рис. 5.1 а-б), которые были обнаружены в более поздние годы изучения месторождения.

По поводу магматического происхождения минерала существовало две точки зрения. Воробьев Е.И. считал, что первичным был карбонатитовый расплав, после кристаллизации которого в остатке образовались чароитовые породы, а силикатные пироксен-полевошпатовые породы являются фенитами [Воробьев и др., 1983; Прокофьев, Воробьев, 1991; Воробьев, 2008]. Этому противоречит геологический факт – фениты (пироксен-полевошпатовые породы) на месторождении занимают более 80% площади, и небольшие тела чароитовых пород и карбонатитов не могли вызвать такой громадный процесс фенитизации.

Владыкин Н.В. [Владыкин, 2005] считает, что остаточный от кристаллизации массива расплав-флюид был силикатно-карбонатным, и в процессе кристаллизации и расслоения он дал начало четырем разновидностям пород: микроклинитам, микроклин-пироксеновым породам, чароитовым породам и карбонатитам. Одним из доказательств этой точки зрения является микрозернистый состав микроклинитов, как самых ранних пород чароитового комплекса. Ранее все породы чароитового комплекса считались фенитами. В пределах месторождения проявлена фенитизация, но в очень незначительных размерах, когда мы наблюдаем сечение полевошпат-пироксеновых пород (с кварцем) другими полевошпат-пироксеновыми породами чароитового комплекса, которые, в свою очередь, секутся мелкими прожилками полевошпат-пироксеновых пород гидротермального происхождения (рис. 5.3).

Косвенным доказательством расслоения первичного расплава на эти составляющие является одинаковый состав пироксена во всех четырех разновидностях пород, притом, с высоким содержанием кальциевой составляющей. В составе пироксена всего 50% эгириновой-натровой составляющей и 50% - кальциевой составляющей.

Кроме того, силикатные чароитовые породы тоже содержат до 20% CaO, так как они являются продуктом силикатно-карбонатного расслоения.



**Рис.5.3 Сечение полевошпат-пироксеновых пород (с кварцем) другими полевошпат-пироксеновыми породами чароитового комплекса, которые, в свою очередь, секутся мелкими прожилками полевошпат-пироксеновых пород гидротермального происхождения**

Примечания: 1 - приконтактные фениты; 2 - полевошпат-пироксеновые породы чароитового комплекса; 3 - гидротермальные пироксен-полевошпатовые прожилки

Наиболее достоверно говорить о генезисе чароитовых пород возможно после проведения термобарохимических исследований. Из-за сложности состава пород и их агрегатного состояния (наличие газов и жидкостей в расплаве), долгое время не удавалось измерить P-T условия по включениям. Первые данные о расплавных включениях в чароитовых и родственных им карбонатитовых образованиях, показали высокие начальные температуры их кристаллизации, от 750°C [Владыкин и др. 1994; Владыкин и др. 1996; Воробьев и др., 1983], но в то время, не удавалось точно диагностировать продукты этих включений.

## 5.2 Термобарогеохимические исследования

В связи с развитием технологии термобарогеохимических исследований и последующей диагностики фаз и продуктов закалки расплавных включений, по нашим материалам недавно были получены данные по расплавным и флюидным включениям, проведенные А.А. Боровиковым (ИГМ, Новосибирск) [Borovikov et al., 2016]. Эти исследования показали, что чароитовые породы кристаллизуются из остаточного расплав-флюида при температурах от 750 до 400°C. Было подтверждено расслоение расплав-флюида на несколько жидкостей - силикатную, карбонатную и водную.

Для остаточного силикатно-карбонатного расплав-флюида очень характерны процессы расслоения, но если в карбонатитах идет полосчатое разделение на микроклиновые, пироксеновые и карбонатные полосы, то для чароитовых пород более характерно капельное расслоение – отделение капель пироксена и тинаксита, которые при быстрой кристаллизации образуют сферолиты. Эти ранние вкрапленники обтекаются чароитовой массой, отчего и образуются необычные структуры течения, где чароитовая масса огибает сферолиты тинаксита и пироксена.

### Петрография расплавных и флюидных включений в минералах Мурунского массива.

В минералах пород карбонатитового комплекса Мурунского массива (кальцитовые карбонатиты, бенстонитовые породы, чароиты) и кварц-анатаз-брукитовых жил присутствуют расплавные, кристалло-флюидные, многофазные, двухфазные и газовые включения. Это многообразие фазового состава включений отражает сложное агрегатное состояние флюидо-магматической системы щелочно-базитовой магмы при возникновении в ней силикатно-солевой жидкостной несмесимости. Включения в минералах пород щелочных массивов Алдана по своему фазовому наполнению могут быть условно представлены несколькими типами (табл. 5.1).

## Типы включений минералообразующих сред в минералах Мурунского массива.

Тип	Фазовый состав	Твердые фазы (по данным КР-спектроскопии - см. ниже)	Примечания
А	Сростки силикатных и солевых фаз	Алюмосиликаты Ca, Na, Fe, КПШ, апатит, гиалофан, солевые фазы – сульфаты и карбонаты Na, Ca, Ba, Sr, Pb, Cu и X – фазы содержащие Zr, W, Pb.	Раскристаллизованные расплавные включения с небольшой порцией флюида
Б	Раствор + газ + 4 и более тв. фаз	Тенардит, нахколит и солевые фазы – сульфаты и карбонаты Na, Ca, Ba, Sr, Pb, Cu	Кристалло-флюидные. Солевыми фазами заполнен почти весь объем вакуоли включения, обычно присутствует непрозрачная рудная фаза.
В	Раствор + газ + 2-4 тв. фазы	Тенардит, нахколит, галит и прочие твердые фазы	Многофазные флюидные. Солевые фазы занимают не более 50-60 % объема включения
Д	Раствор + газ (жСО <sub>2</sub> + газ)	Отсутствуют	Двухфазные флюидные включения. Раствора много больше чем газа
Г	Газ ±жСО <sub>2</sub> + раствор + 1 и более тв. фаз	Тенардит, нахколит и прочие твердые фазы	Многофазные газовые включения. Газ и жидкая СО <sub>2</sub> занимают большую часть объема включения

**Тип А.** Расплавные силикатно-солевые и карбонатные включения встречаются главным образом в минералах магматических пород Мурунского массива и щелочных пегматитах (рис. 5.4). Они обычно раскристаллизованы и полностью заполнены сростками твердых фаз часто обладающих анизотропией, между которыми просматривается темная пустота. Характерной особенностью расплавных включений в минералах магматических щелочных пород является частое присутствие небольшой порции флюидной фазы, что выражается в округлых очертаниях пустоты заполненной газом, особенно это типично для вторичных расплавных включений. Твердые фазы представлены алюмосиликатами Na, K, Ca, Fe, а также карбонатами, фосфатами, сульфатами и непрозрачной рудной фазой. Расплавные включения в минералах меланократовых пород Маломурунского массива имеют силикатно-солевой состав (рис. 5.4).

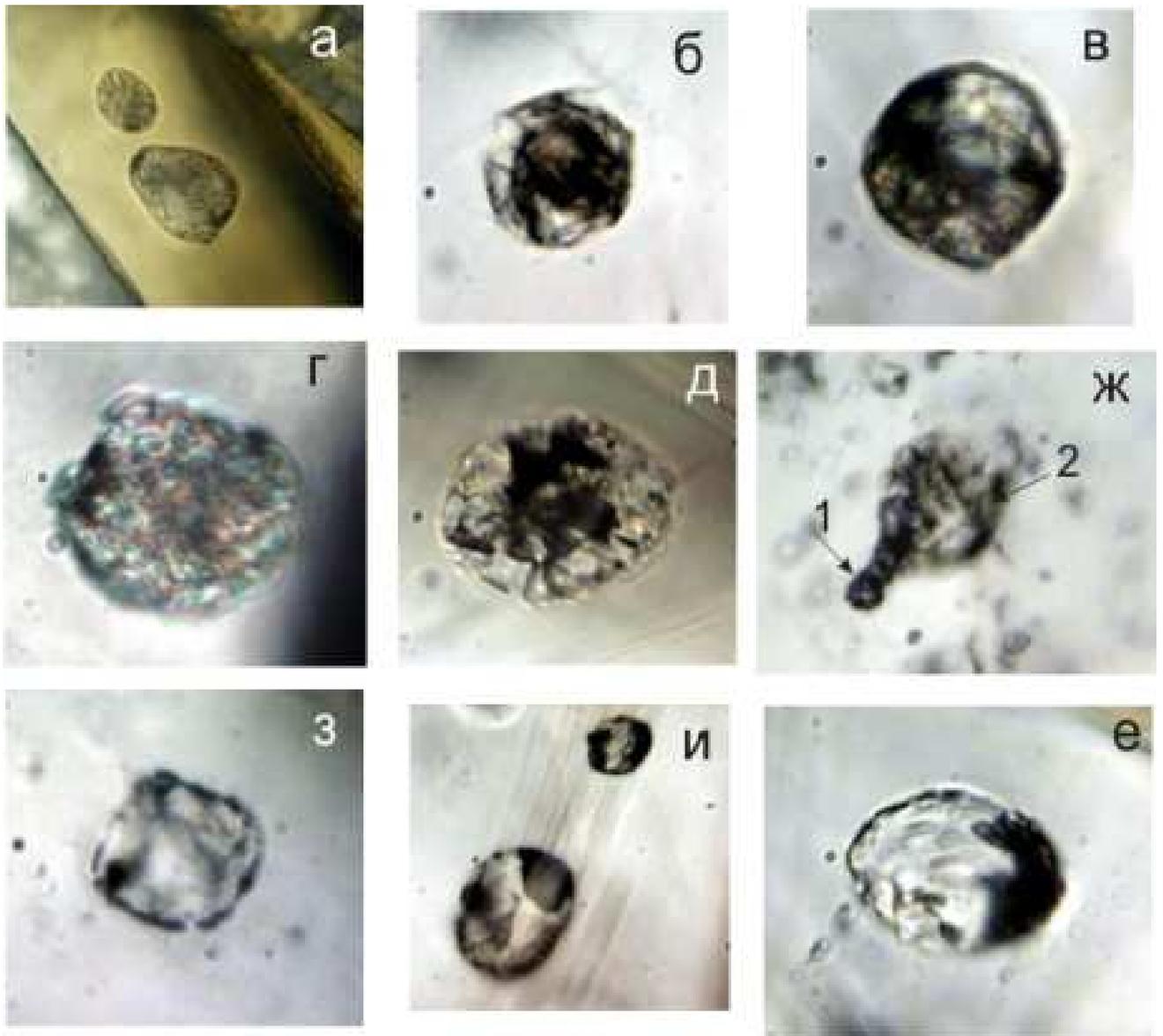


Рис. 5.4 Включения типа А. Включения состоящие из агрегата тонкокристаллических фаз карбонатов в пироксене и кварце. Газовый пузырек – 1, карбонатный агрегат – 2 (а-ж).

Включения стронциодрессита тип А (з-и).

**Тип Б.** Кристалло-флюидные включения, содержащие несколько твердых фаз, которые занимают большую часть объема вакуоли включения, и незначительную порцию водно-солевого раствора и газа. Первичные кристалло-флюидные включения присутствуют в пироксене, апатите, титаните, кварце кварц-карбонатных и чароитовых пород, а также в кварце кварц-анатаз-брукитовых жил (рис 5.5).

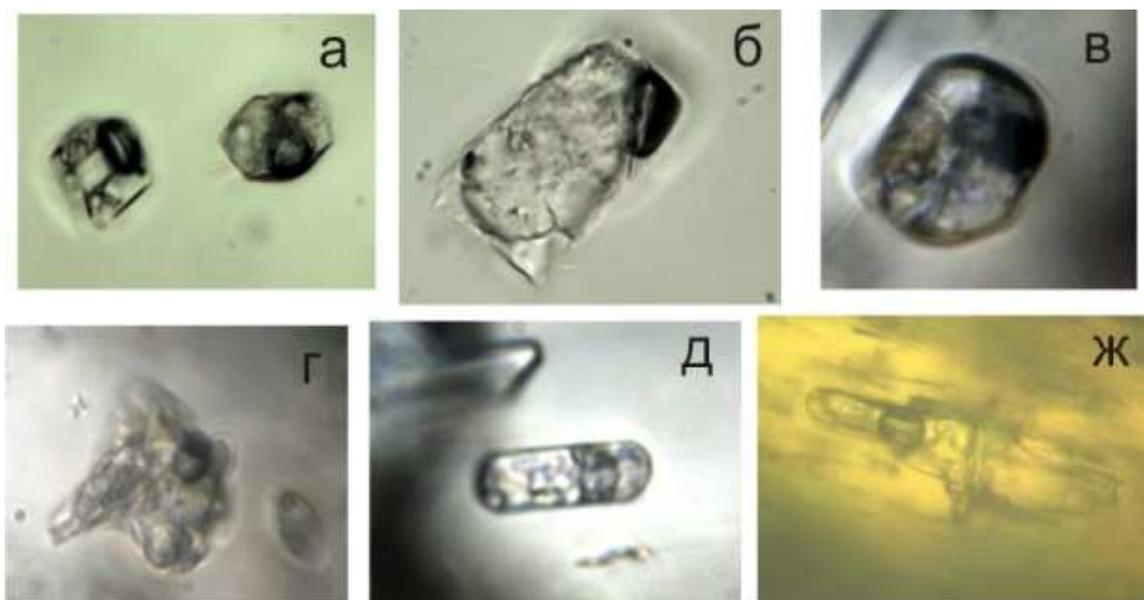


Рис. 5.5 Включения типа Б. Кристалло-флюидные включения в кварце анатаз-брукитовых жил (а, б), в апатите чароитовых пород (г), в апатите и пироксене бенстонитовых пород и кальцитовых карбонатитов (в, д, ж).

**Тип В.** Многофазные флюидные включения, по сравнению с кристалло-флюидными характеризуются присутствием большего количества жидкости, содержат от одной до нескольких твердых фаз. Такие включения наблюдаются в апатите, зеленом пироксене, кварце, титаните чароитовых пород, карбонатитов, а также в кварце кварц-анатаз-брукитовых жил (рис. 5.6).

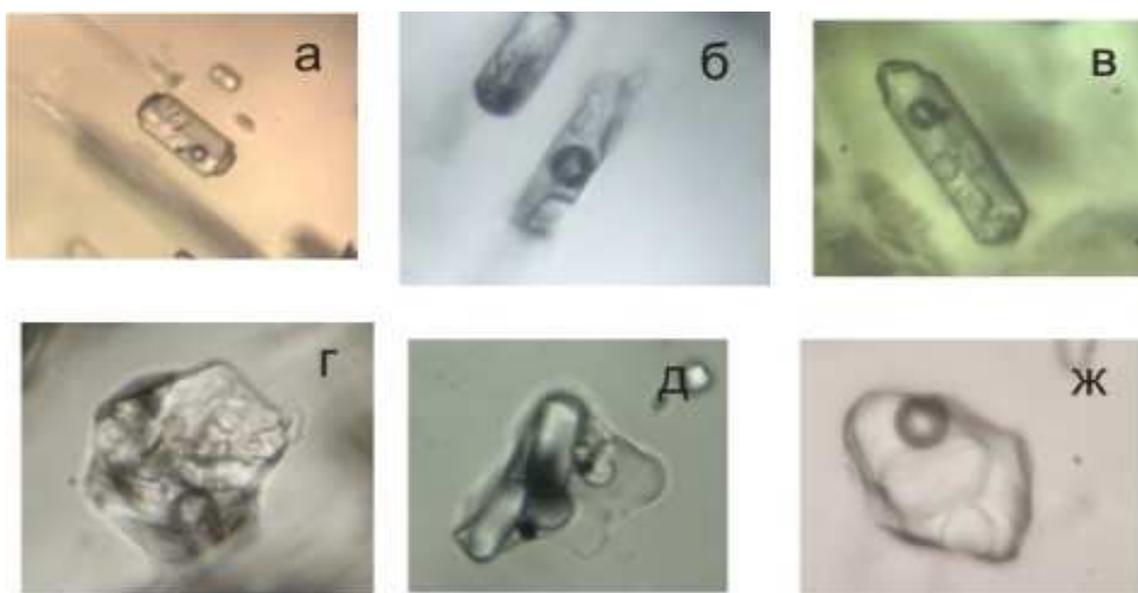


Рис. 5.6 Включения типа В. Многофазные флюидные включения в апатите и пироксене кальцитовых карбонатитовых пород (а,б,в), в апатите чароитовых пород с галенитом (г), в кварце анатаз-брукитовых жил (д).

**Тип Г.** Двухфазные включения, содержащие пузырек газа и водно-солевой раствор. Пузырек газа может содержать фазу жидкой  $\text{CO}_2$ . Вторичные включения этого типа совместно с газовыми включениями широко распространены в кварце и других минералах чароитовых и карбонатно-силикатных пород и кварцевых жил Мурунского массива. В карбонатитовых породах двухфазные включения в изобилии насыщают кальцит, в котором находятся в тесной ассоциации с газовыми включениями и экссолюционными вкрапленниками Ca, Ba, Sr карбонатов (рис. 5.7). Первичные двухфазные включения наблюдаются в минералах кварц-брукит-анатазовых жил, где они трассируют зоны роста кварца и других минералов. Первичные двухфазные включения наблюдаются так же в центральных частях некоторых кварцевых зерен кварц-карбонатных пород.

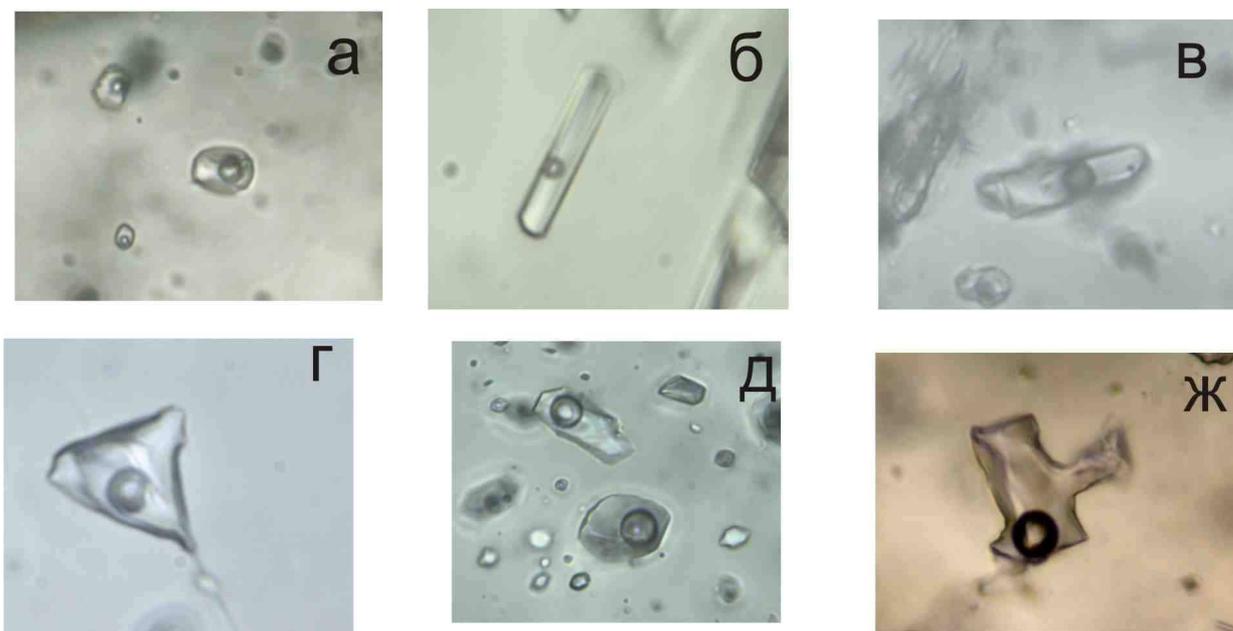


Рис. 5.7 Включения типа Г. Первичные двухфазные флюидные включения в титаните карбонатитов (а) и апатите чароитовых пород (б), в пироксене карбонатитов (в). Вторичные двухфазные включения в кварце чароитовых пород (г, д) и кварце анатаз-брукитовых (ж) жил.

**Тип Д.** Газовые включения содержат главным образом газ, водно-солевой раствор либо не виден, либо смачивает стенки вакуоли, образуя тонкую каемку. Газовые включения могут содержать фазу жидкой  $\text{CO}_2$ , а также мелкие твердые прозрачные и непрозрачные минеральные фазы, вероятно ксеногенного происхождения (рис. 5.8).

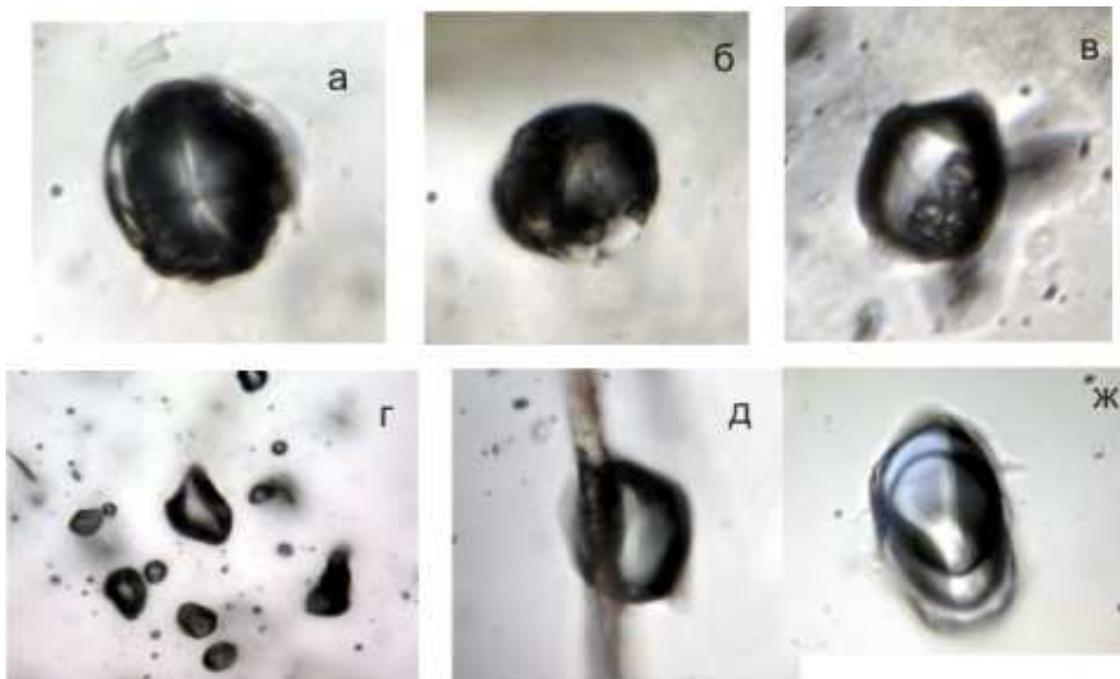


Рис. 5.8 Включения типа Д. Первичные газовые включения в кварце чароитовой породы (а, б) и в кварце кальцитового карбонатита (в) на стенках вакуолей видны твердые фазы.

Газовые включения в кварце чароитовой породы (г, д). Газовые включения в кварце анатаз-брукитовых жил (ж).

К первичным расплавленным включениям относятся тонкокристаллические карбонатные включения округлой формы в кристаллах пироксена, которые сосуществуют с флюидными и кристалло-флюидными включениями в пироксене (рис. 5.4 А). Расплавленные включения в карбонатах кальцитовых карбонатитов идентифицировать практически невозможно, так как в первичных Ca, Sr, Ba карбонатах карбонатитов нашли широкое развитие процессы позднего распада с обособлением экссолюционных выделений карбонатов Ba, Sr, Ca смешанного состава, образующих вкрапленность в кальците (баритокальцит, Sr-витерит, паральстонит, олекминскит [Конев и др., 1996]. В кристаллах апатита (Ча 136-10) и титанита (образец 1-8) первичные включения минералообразующей среды представлены кристалло-флюидными, многофазными флюидными, двухфазными водно-солевыми включениями (рис. 5.5 и 5.7).

Подобная ассоциация расплавленных включений карбонатного состава и

кристалло-флюидных с флюидными многофазными и двухфазными включениями указывает на сложное агрегатное состояние минералообразующей среды в процессе формирования чароитовых и кварц-карбонатных пород Мурунского массива. Есть все основания полагать, что эта минералообразующая среда была представлена карбонатитовым расплавом и карбонатно-сульфатно-хлоридным водным гетерофазным флюидом, фазы которого были представлены высококонцентрированным солевым расплавом-рассолом, низкоконцентрированной водно-солевой и углекислотной газовой фазами.

### Методы изучения флюидных включений

Флюидные включения, содержащиеся в минералах магматических пород и гидротермальных жил были исследованы методами крио-, термометрии (микротермокамера THMSG-600 фирмы “Linkam” с диапазоном измерений –196 +600 °С). Изучение состава газовой фазы и определение отдельных твердых фаз включений проводилось методом КР-спектроскопии (спектрометр «Ramanor U-1000» фирмы Jobin Yvon, лазер Millennia Pro S2 (532 nm), детектор HORIBA JOBIN YVON). Для идентификации отдельных дочерних фаз в многофазных включениях использовалась известная база КР-спектров RRUFF (<http://rruff.info/>). Изучение морфологии, фазового и химического состава образцов со вскрытыми включениями проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO1430VP, снабженного энергетическим спектрометром “OXFORD” [Borovikov et. al., 2016].

Элементный состав индивидуальных включений исследовался методом LA-ICP-MS масс-спектрометры Agilent 7500s ICP-MS (г. Иркутск) и ELEMENT-2 FINNIGAN MAT с системой лазерной абляции New Wave UP213 1 (г. Новосибирск). Для оценки содержаний во включениях рудных и петрогенных элементов в качестве внешнего стандарта использовалось стекло NIST 612, внутренним стандартом служил Na, концентрация которого во включениях определялась на основании крио- и термометрических измерений. Концентрация Na, определенная методами крио-, термометрии, корректировалась исходя из

соотношений абсолютных количеств Na и K выявленных методом LA-ICP-MS [Борисенко, 2011].

Оценка концентрации основных солевых компонентов ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaHCO}_3$ ) в сульфатных многофазных включениях в кварце жил Мурунского массива проведена на основании расчетов, в которых использовались данные по результатам определений объемов отдельных фаз в многофазных включениях, а так же значений плотности тенардита, нахколита и насыщенного водного раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaHCO}_3$  при  $20^\circ\text{C}$  известного состава [Borovikov et. al., 2016].

#### Результаты исследования включений методом КР-спектроскопии.

Расплавные включения (тип А) в кварце чароитовых пород представлены мелкокристаллическим агрегатом стронцио-дрессита ( $\text{SrAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \times \text{H}_2\text{O}$ ) и дрессита ( $\text{Ba}_2\text{Al}_4(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_8 \times 3\text{H}_2\text{O}$ ). На КР-спектрах карбонатных расплавных включений периодически отмечаются линии кальцита, баритокальцита, а также силикатов несквегонита ( $\text{K}_5\text{Ca}_8(\text{Si}_6\text{O}_{15})_2(\text{Si}_6\text{O}_{16})\text{OH} \times n\text{H}_2\text{O}$ ), чароита, дельхайелита ( $\text{K}_7\text{Na}_3\text{Ca}_5\text{Al}_2\text{Si}_{14}\text{O}_{38}\text{F}_4\text{Cl}_2$ ), флюорапофиллита ( $\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{F} \times 8\text{H}_2\text{O}$ ), которые присутствуют в качестве второстепенных твердых фаз.

Кристалло-флюидные включения (тип Б) в кристаллах апатита из чароитовых пород с галенитом содержат кварц, в виде шестигранных пластинок, силикаты группы цеолитов - эдингтонит ( $\text{Ba}(\text{Si}_3\text{Al}_2)\text{O}_{10} \times 4\text{H}_2\text{O}$ ), сколецит ( $\text{Ca}(\text{Si}_3\text{Al}_2)\text{O}_{10} \times 3\text{H}_2\text{O}$ ), стеллерит ( $\text{Ca}_4(\text{Si}_{28}\text{Al}_{18})\text{O}_{72} \times 28\text{H}_2\text{O}$ ), нахколит, несквегонит, вульфенит, сфалерит, а так же ванадинит ( $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$ ). Газовая фаза этих многофазных включений в апатите представлена  $\text{CO}_2$ .

Сравнение результатов изучения методом КР-спектроскопии расплавных включений в минералах карбонатитов и чароитовых пород показывает, что включения в карбонатитах содержат, главным образом, безводные минеральные фазы, среди которых преобладают баритокальцит и кальцит. В тоже время, во включениях в минералах чароитовых пород преобладают водосодержащие минеральные фазы: дрессит и стронциодрессит. Эти данные позволяют заключить, что бенстонитовые и кальцитовые карбонатиты Мурунского массива

кристаллизовались при участии расплавов с небольшим содержанием воды, кристаллизация чароитовых пород, напротив, происходила при участии обогащенных водой карбонатитовых расплавов и металлоносных водосодержащих высококонцентрированных флюидов силикатного состава [Borovikov et. al., 2016].

### Результаты термометрических исследований

При нагревании расплавных включений (типа А) в кварце чароитовых пород первое заметное плавление твердых фаз фиксируется по округлению газовых пустот при 580-600°C (рис. 5.9). Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению размеров сферических пузырей газовой фазы и исчезновению фазовой границы между содержимым включения и кварцем, при этом невозможно видеть расплавилась ли твердая фаза или нет. При 970°C видны только газовые пузыри, которые начинают уменьшаться в размерах, при 1200°C полной гомогенизации достичь не удастся. Часть включений обнаруживает признаки разложения вещества, приобретая тонкокристаллический вид после остывания, в некоторых включениях, подвергнутых нагреванию, происходит обособление фаз водно-солевого раствора и плотной CO<sub>2</sub> (рис. 5.10) [Borovikov et. al., 2016].

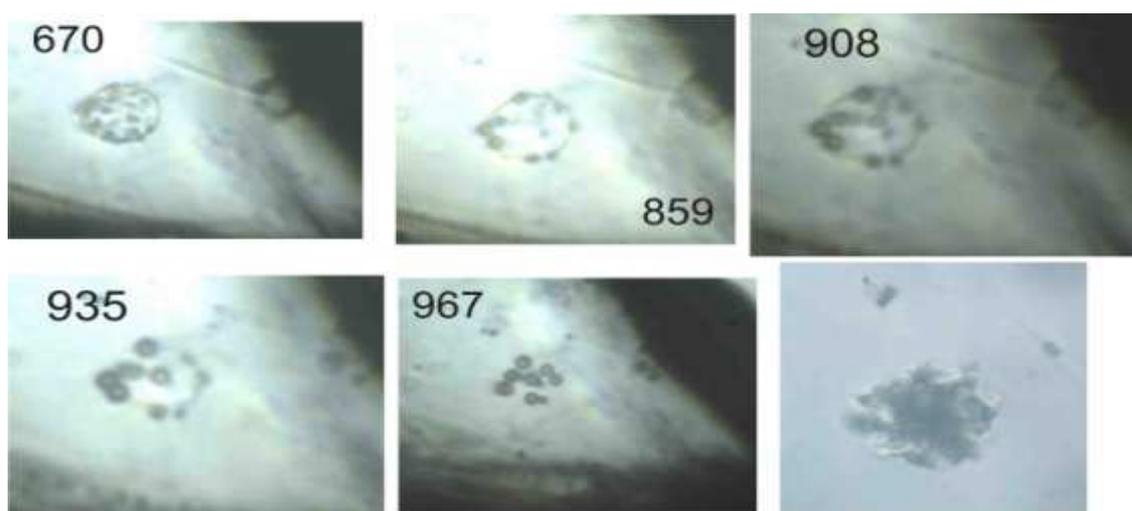


Рис. 5.9 Чароитовая порода (ча 6-1). Поведение включения типа А2 в кварце при нагревании до 970°C (ча 6-1). Указана температура нагрева - цифры на фотографиях, фотография без цифры – остывшее включение.

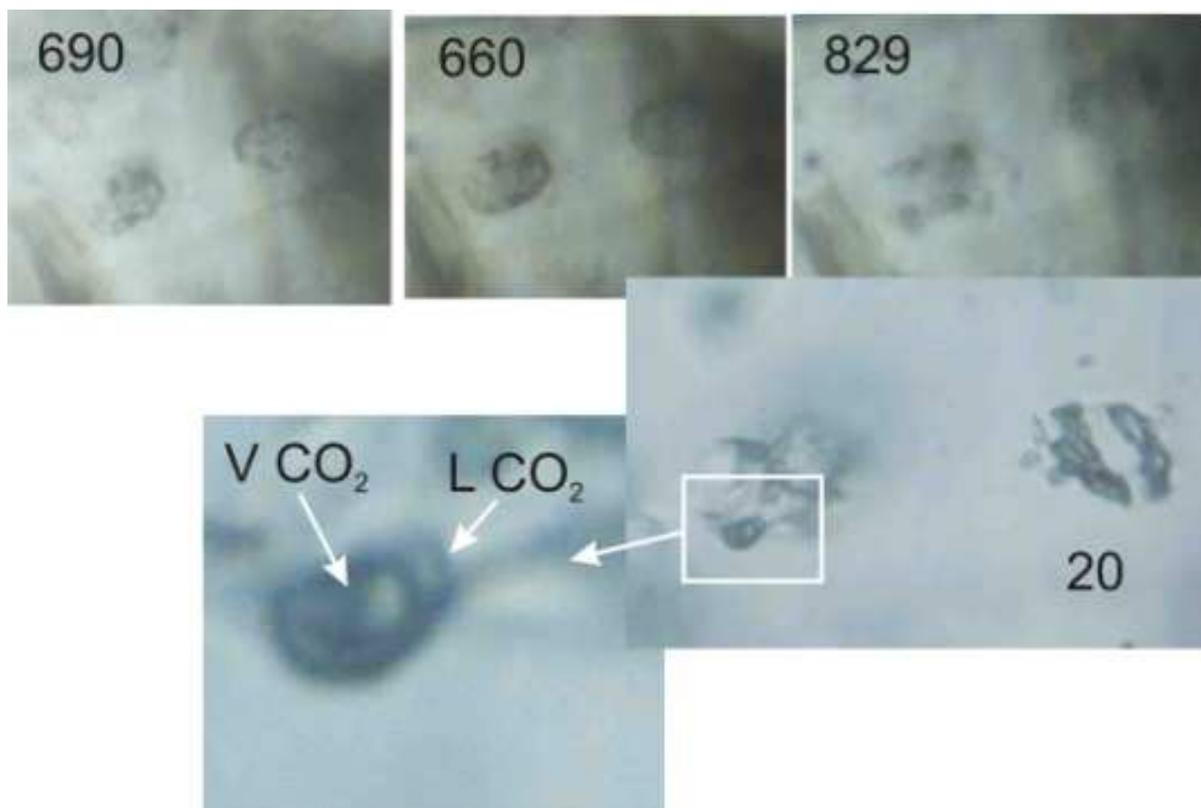


Рис. 5.10. Плавление стронцидресситового включения с разложением при охлаждении.

При остывании появился округлый пузырь с жидкой  $\text{CO}_2$ . Цифры на фотографиях – температура нагрева.

#### LA-ICP-MS анализ расплавных и флюидных включений.

Применение LA-ICP-MS метода при исследовании элементного состава включений в минералах магматических гидротермальных образований Мурунского массива, затруднено в первую очередь отсутствием в минералах достаточного количества крупных включений, годных для анализа. Поэтому удалось проанализировать крайне ограниченное количество относительно крупных (20-30 мкм) включений разных типов в кварце кальцитовых карбонатитов, в кварце и апатите чароитовых пород и кварцевых жил.

Методом LA-ICP-MS были проанализированы карбонатные расплавные включения в кварце чароитовых пород. Карбонатный состав расплавных включений в кварце чароитовых пород подтверждается данными КР-спектроскопии. По этим данным, преобладающими минеральными фазами являются дрессит  $\text{Ba}_2\text{Al}_4(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_8 \times 3\text{H}_2\text{O}$  и стронцидрессит

$\text{SrAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \times \text{H}_2\text{O}$ , установлены так же баритокальцит, кальцит, и другие карбонаты.

По результатам LA-ICP-MS анализа основными петрогенными элементами расплавных карбонатных включений в порядке убывания являются Ba, Ca, Sr и Mn. Идентификация во включениях в качестве основных фаз дрессита и стронциодрессита, позволяет вычислить количества этих фаз, эквивалентные концентрациям Ba, Ca, Sr и Mn, определенным по данным LA-ICP-MS анализа, и определить минеральный состав включений. По этим данным расплавные включения имеют состав (мас.%): дрессит (88,6), кальцит (5,8) и стронциодрессит (5,4). На этой основе были оценены концентрации петрогенных и рудных элементов в расплавных карбонатных включениях (в мас. %): Ba (28,3), Ca (2,3), Sr (1,3), а так же Mn (0,06), в качестве примесей такие расплавы содержали (в ppm) Na (40), Pb (13), K (7), Cu (4), As (5), Mo (6), Cs (3), Sb (1,2), Ni (1), Ag (1), W (1) и B (0,7) (таблица 5.2). Не были обнаружено в значимых количествах Bi, Au и Sn. Расчет количеств (мас.%) CaO (3,0), BaO (16,5), SrO (1,1) и других окислов в составе расплавных включений показывает обеднение их состава CaO, SrO, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O, по сравнению с составом стронцианит-бариткальцитовых карбонатитов.

Кристалло-флюидные включения, находящиеся в округлых зернах апатита в чароитовой породе с галенитовой минерализацией, содержат в качестве главных петрогенных компонентов Ba, Si, Na и K. Данные КР-спектроскопии, говорящие о присутствии кварца и эдингтонита  $\text{Ba}(\text{Si}_3\text{Al}_2)\text{O}_{10} \times 4\text{H}_2\text{O}$  в качестве одних из главных твердых фаз, и преобладание Ba и Si в составе включений по результатам LA-ICP-MS анализа, позволяют в первом приближении, попытаться оценить концентрации петрогенных и рудных элементов в кристалло-флюидных включениях. Общую минерализацию таких включений можно оценить в величину не менее 60 мас.%, учитывая объемное отношение твердых фаз к солевому раствору составляющее примерно 3/1 - 2/1 и плотность преобладающих твердых фаз кварца (2,65) и эдингтонита (2,7). Исходя из этого, расчет концентраций элементов, без учета Ca, приводит к следующему результату: Ba (мас.%) – 7,95; Si

– 1,49; Na – 0,5; K – 0,5; Pb – 0,7; Mn – 0,2; As – 0,13; Cu – 0,12; Rb (ppm) – 600; Mo – 220; Ag – 130; Ni – 130; B – 50; Cs – 70 (таблица 5.2). Не обнаружено значимых количеств Fe, Sn, Sb, W и Au.

Таблица 5.2

Результаты расчета данных LA-ICP-MS анализа кристалло-флюидного включения в апатите чароитовой породы

Ba	Si	Na	K	Mn	Pb	As	Cu	Rb	Mo	Ag	Ni	Bi	B	Cs
мас. %					ppm									
7,95	1,49	0,5	0,5	0,2	7300	1300	1200	600	220	130	130	100	50	70

В кварце чароитовой породы были проанализированы и существенно газовые включения, которые содержат не идентифицированные твердые минеральные фазы. Данные LA-ICP-MS анализа газовых включений были пересчитаны на 100 мас. % «сухого остатка», что дало следующий результат (в мас.%): Na (4,9-1,9), K (8,5-4,4), Ca (66,8-52,5), Mn (14,8-5,2), Rb (1,6-1,4), Sr (5,9-3,7), Cs (0,7-0,5), Ba (12,3-11,1), Bi (2,3-0,4), Cu (до 0,73) и As (до 0,85), а так же (в ppm) (60-30), S (90-20), Fe (20), Sn (50) и Sb (40). Из этих данных можно заключить, что газовая магматическая фракция концентрировала Cs, Bi, Cu, As.

Подобные исследования были проведены А.А. Боровиковым и по карбонатитовым породам Мурунского массива, где были получены так же начальные высокие температуры кристаллизации. Эти данные подтверждаются экспериментальными данными по ступенчатому распаду минерала бенстонита карбонатитов на 12 фаз. При начальной температуре кристаллизации 750°C, Е.И.Воробьевым были детально проведены эти исследования [Воробьев и др. 1983]. Из всех этих исследований можно сделать однозначный вывод о кристаллизации остаточной силикатной части чароит-карбонатитовых пород из расплав-флюида магматическим путем [Borovikov et. al., 2016].

Изучение состава расплавных включений в ранних породах комплекса, проведенное Л.И. Паниной, показало, что первичные магмы, из которых кристаллизовались породы комплекса, отвечают щелочным базальтоидам и близки к лампроитовым [Панина, 1985]. Кроме того, обнаружено расслоение во включениях на силикатную и карбонатно-сульфатную части.

### 5.3 Мантийные источники магматизма массива

Исследования геохимии изотопов Sr, Nd, O, C, Pb свидетельствуют о глубинном мантийном источнике, обогащенном мантией EM-1, для образования магмы, давшей начало Мурунскому щелочному комплексу [Владыкин, 2009; Владыкин, 2016].

По данным изотопов Pb, полученных при анализе галенитов из пород всего щелочного комплекса (табл. 5.3, рис. 5.11), в том числе и из чароитовых пород, получилась большая растяжка значений, по которой удалось вычислить возраст субстрата, из которого выплавлялась первичная магма. Он составляет 3,2 млрд. лет [Владыкин, 2009]. Этот возраст совпадает с возрастом другого выхода субстрата Сибирской платформы, т.н. Гарганской глыбы.

Табл. 5.3

Соотношение изотопов Pb в породах Мурунского массива

Образец	Порода	206Pb/204Pb	207Pb/204Pb	208Pb/204Pb
ra123	кварц-кальцитовый карбонатит	16,226999	15,141000	36,474998
180	кальцитовый карбонатит	16,379999	15,194000	36,737000
157	бенстонитовый карбонатит	16,280001	15,160000	36,544998
175	эвдиалитовый луаврит (дайка)	16,621000	15,250000	37,037998
145	силикатно-карбонатная порода	16,399000	15,169000	36,671001
154	пироксеновая порода	16,478001	15,220000	36,932999
133	лампрофир с таусонитом (дайка)	16,677999	15,271000	37,160000
192	лампрофир с таусонитом (дайка)	16,695000	15,266000	37,195000
cha170	нефелиновый сиенит (дайка)	16,705999	15,268000	37,130001
cha238	биотитовый карбонатит	16,083000	15,107000	36,375000
cha1	чароитовая порода	16,153999	15,117000	36,431999
cha242	Pb-руда	17,076000	15,358000	39,506001
cha231	гранит	16,431000	15,199000	37,060001
cha154a	пироксеновая порода	16,414000	15,174000	36,705002
cha119	лампроит	16,240000	15,144000	36,477001

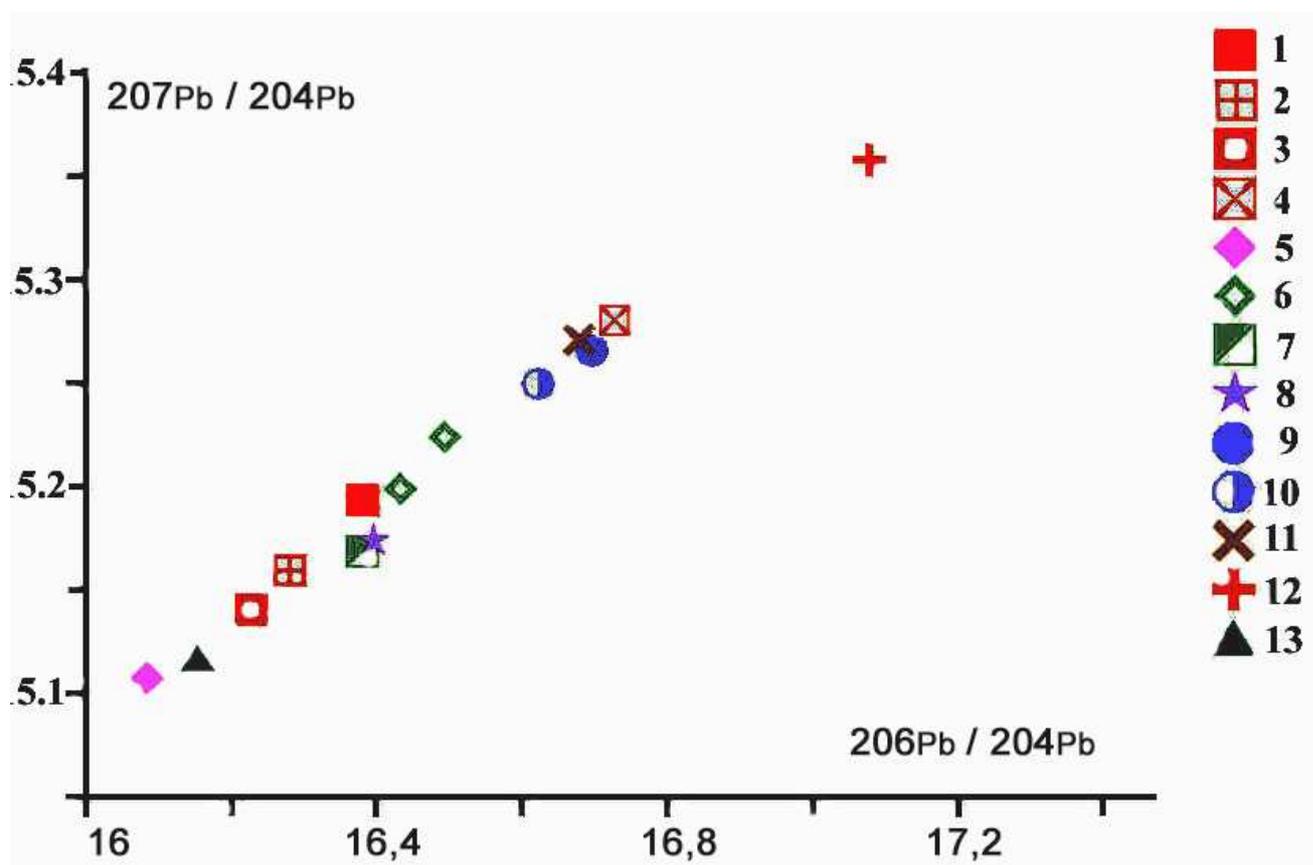


Рис. 5.11 Соотношение изотопов Рb в породах Мурунского массива

Примечания: карбонатиты: 1 - бонстонитовый, 2 - кальцитовый, 3 - кварц-кальцитовый, 4 - карбонатит со слюдой; Другие породы: 5 - чароитовые породы, 6 - полевошпатово-пироксеновая порода, 7 - микроклинит, 8 - лампроит, 9 - сиенит лейцитовый, 10 - сиенит нефелиновый, 11 - лампрофир, 12 - щелочной гранит, 13 - кварцевая жила с сульфидами.

#### Возраст пород Мурунского массива.

В 70-е-80-е годы 20 в. проводилось много определений возраста пород Мурунского массива, в т.ч. и чароитового комплекса [Костюк и др., 1990]. Измерения проводились в основном К-Аг методом, и в меньшей степени – Rb-Sr. Был получен большой разброс определений возраста – от 100 млн. лет для чароитовых пород до 180 млн. лет для других силикатных пород Мурунского массива. Наиболее точные значения возраста были получены для мурунских лампроитов К/Аг методом – 132 млн. лет [Махоткин и др., 1989] и Rb/Sr методом для серии пород Мурунского массива – 145 млн. лет [Mitchell et al., 1994]. Самыми неточными были определения по микроклину чароитовых пород К-Аг

методом (100 млн. лет), потому что при распаде микроклин-пертита  $Ag$  улетучивается, и получается заниженный возраст.

В Институте земной коры СО РАН г. Иркутска проведено определение возраста минералов чароитовых пород  $Ag/Ag$  методом по тинакситу, токкоиту, микроклину и франкамениту [Иванов и др., 2016]. Возраст составляет 135-137 млн. лет. Эти данные попадают в пределы определений возраста, полученных И.Л.Махоткиным и Р.Митчеллом.

## **ВЫВОДЫ**

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Чароитовые породы по химическому составу аналогичны сиенитам с высокими (до 20%) содержаниями  $CaO$  и повышенными (первые проценты)  $Ba$  и  $Sr$ . Из-за различных  $P-T$  условий их кристаллизации, в разных участках месторождения наблюдаются вариации их составов, а средний состав приближается к составу закаленных (микрозернистых) чароитовых пород. Тренды составов петрогенных элементов чароитовых пород свидетельствуют об их кристаллизации из единого расплав-флюида.

Поведение редких элементов в чароитовых породах аналогично поведению этих элементов в карбонатитах и силикатных породах Мурунского массива, что подтверждает их единое генетическое происхождение. Вариации содержания редких элементов в чароитовых породах различного минерального состава, образовавшихся в разных  $P-T$  условиях незначительны, а их средние содержания отвечают закаленным чароитовым породам.

Чароитовые породы образовались из силикатно-карбонатного расплав-флюида, остаточного от кристаллизации пород массива, при его расслоении на силикатную составляющую (микроклиниты и микроклин-пироксеновые породы)

и карбонатно-силикатную. Последняя разделяется снова на силикатную чароитовую и карбонатную - карбонатитовую составляющие.

Проведенные термобарогеохимические исследования чароитовых пород подтвердили магматический генезис остаточного силикатно-карбонатного комплекса пород.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Билибина Т.В. К геологии и металлогении Алданского щита. В кн.: Вопросы генезиса и закономерности размещения эндогенных рудных месторождений. М., 1966, с. 233-257.
2. Билибина, Донаков, Дашкова. Петрология щелочно-вулканогенно-интрузивного комплекса Алданского щита/ и др., Недра, 1967, 262 стр.
3. Борисов А.Б. О времени и условиях образования чароитовых пород разной текстуры // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1985. Ч. 114, вып. 4. С. 455-462.
4. Борнеман-Старынкевич И.Д. К уточнению формулы чароита// Зап. ВМО, 1982 г.
5. Бухтиярова Е.В., Смирнов А.А. Природа шелковистого и перламутрового отлива чароита. // Минерал. ж. 1992. N 2. С. 95-99.
6. Владыкин Н.В., Матвеева Л.Н., Богачева Н.Г., Алексеев Ю.А. Новые данные о чароите и чароитовых породах // Минералогия и генезис цветных камней Восточной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1983. С. 41-56.
7. Владыкин Н.В., Симонов В.А., Соколов С.В. Флюидный режим и температуры кристаллизации минералов чароитовых пород. Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Вып. 3. Летучие компоненты: Сб. науч. тр. / РАН, Сиб. отделение, Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. - Новосибирск, 1994. - 143 с.
8. Владыкин Н.В., Царук И.И. Полезные ископаемые Мурунского ультрабазитового массива // Вестник ГеоИГУ, вып.1, 2000, с.21 – 40.

**9.** Владыкин Н.В. Алданская провинция К-щелочных пород и карбонатитов: вопросы магматизма, генезиса и мантийных источников // Щелочной магматизм и проблемы мантийных источников. - Иркутск. - С. 18-45. 2001

**10.** Владыкин Н.В., Царук И.И. Геология, химизм и генезис Ва-Sr («бенстонитовых») карбонатитов Мурунского массива // Геология и геофизика, том 44, № 4, 2003, с.325-339

**11.** Владыкин Н.В. "Уникальный Мурунский массив ультракалиевых агпаитовых щелочных пород и карбонатитов - магматизм и генезис" // сборник ИМГРЭ "Генетические типы рудных месторождений" "Прикладная геохимия", вып. 7, 2005, с.20

**12.** Владыкин Н.В. Петрология К-щелочных лампроит-карбонатитовых комплексов, их генезис и рудоносность // Геология и геофизика 2009, т.50, № 12. с 1443-1455.

**13.** Модель зарождения и кристаллизации ультраосновных-щелочных - карбонатитовых магм Сибирского региона, проблемы их рудоносности, мантийные источники и связь с плюмовым процессом. Владыкин Н.В. Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 5, с.889-905.

**14.** Воробьев Е.И., Малышонок Ю.В., Алексеев Ю.А. О генезисе чароита // Проблемы кристаллохимии и генезиса минералов. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1983. С. 83-93.

**15.** Воробьев Е.И., Конев А.А., Малышонок Ю.В. О кальцито-кварцевых породах графической структуры в Мурунском щелочном массиве. ЗВМО, ч.113, вып.3, стр.300-308, 1984.

**16.** Воробьев Е.И. Чароит. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. 140 с.

**17.** Борисенко А. С., Боровиков А. А., Васюкова Е. А., Павлова Г. Г., Рагозин А. Л., Прокопьев И. Р., Владыкин Н. В. Окисленные магматогенные флюиды, их металлоносность и роль в рудообразовании // Геология и геофизика. -

2011. - Т. 52. - №1. - С. 182-206

**18.** Добровольская М.Г., Рогова В.П., Цепин А.И., Малов В.С. О сульфидной минерализации в чароитовых породах // Минерал. журн. 1980. Т. 2, № 6. С. 3-13.

**19.** Добровольская М.Г., Цепин А.И., Евстигнеева Т.Л. и др. Мурунскит  $K_2Cu_3FeS_4$  - новый сульфид калия, меди и железа // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1981. Ч. 110, вып. 4. С. 468-473.

**20.** Добровольская М.Г., Рогова В.П., Вальясов Л.Н. Новая находка калийсодержащего талкусита в чароитовых породах Мурунского массива // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267, № 5. С. 1214-1217.

**21.** Добровольская М.Г., Малов В.С., Владыкин Н.В. Минералы платины и палладия в чароитовых породах // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284, № 2. С. 438-442.

**22.** Докучиц Э.Ю. Особенности химического и минерального состава чароитовых пород Мурунского массива // Вестник НИИрГТУ. Иркутск, 2014. № 84(1). Стр. 34-40.

**23.** Докучиц Э.Ю. Особенности химического состава пород чароитового комплекса. «Современные проблемы геохимии». Материалы конференции молодых ученых (23-28 сентября 2013 г.) Иркутск. Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. – 165 с. стр. 18-19

**24.** Докучиц Э.Ю. Геохимия редкоземельных элементов в породах чароитового комплекса. Журнал «Вопросы естествознания», (ISSN 2308-6335). Материалы конференции молодых ученых. 21-24 сентября, 2015 г., Институт геохимии СО РАН, Иркутск. стр. 47-50

**25.** Докучиц Э.Ю., Владыкин Н.В. Вариации составов чароита и парагенных с ним минералов из чароитовых пород // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2 (55). С. 51–60. DOI 10.21285/0301-108X-2016-55-2-51-60.

**26.** Евдокимов М.Д., Булах А.Г., Борисов А.Б. Морфогенетические типы

чароита и их ювелирные качества // Минерал. журн. 1985. Т. 7, № 5. С. 24-31.

**27.** Евдокимов М.Д., Регир Е.П. Канасит в чароититах Мурунского щелочного комплекса: ("Месторождение Сиреневый камень")© ЗВМО, № I, 1994 г.

**28.** Иванов А.В., Горовой В.А., Гладкочуб Д.П., Шевелев А.С., Владыкин Н.В. Первые прецизионные данные о возрасте чароитовой минерализации (Восточная Сибирь, Россия). Доклады Академии наук, 2016 в печати.

**29.** Конев А.А., Воробьев Е.И., Лазебник К.А. Минералогия Мурунского щелочного массива. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. 221 с.

**30.** Костюк В.П., Панина Л.И., Жидков А.Я., Орлова М.П., Базарова Т.Ю. Калиевый щелочной магматизм Байкало-Становой рифтогенной системы. Новосибирск, Наука, 1990, 234 с.

**31.** Лазебник К.А., Заякина И.В., Лазебник Ю.Д., «Новые данные о чароите из метасоматических пород Мурунского массива». Минералы эндогенных образований Якутии. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1977, 123-135

**32.** Лазебник К.А., Лазебник Ю.Д. Редкие силикаты - мизерит, канасит и федорит в чароитовых породах // Минералогия и геохимия ультраосновных и щелочных пород Якутии. Якутск, 1981. С. 32-50.

**33.** Лазебник К.А. Самородная медь в чароитовых породах // Самородное минералообразование в магматическом процессе. Якутск, 1981. С. 83-8416.

**34.** Лазебник К.А., Лазебник Ю.Д., Кулагина Д.А. Чароит-асбест - новая морфологическая разновидность чароита // Бюл. НТИ / Якут. фил. СО АН СССР. - Якутск, 1981. - С. 23-27.

**35.** Лазебник К.А., Никишова Л.В., Лазебник Ю.Д., Махотко В.Ф. Бирюзовый щелочной кальций-магниевый силикат из чароититов // Докл. АН СССР. 1992. Т. 327, № 4-6, С. 561-565.

**36.** Махоткин И.Л., Владыкин Н.В., Аракелянц М.М. О возрасте лампроитов Алданской провинции.// ДАН СССР, Т.306, N3, 1989, с.703-707.

**37.** Никишова Л.В., Лазебник К.А., Рождественская И.В. и др. Триклинный канасит из чароититов Якутии // Минералогический журнал - 1992,

№ 1. С. 71-77.

**38.** Никишова Л.В., Лазебник К.А., Рождественская И.В., Емельянова Н.Н., Лазебник Ю.Д. Франкаменит -  $K_3Na_3Ca_5(Si_{13}O_{30})F_3(OH) \cdot H_2O$  – новый минерал. Триклинный аналог канасита из чароититов. Записки всероссийского минералогического общества Ч. СХХV, #2 Новые минералы, 1996.

**39.** Никольская Л.В., Новожилов А.И., Самойлович М.И. О природе окраски нового щелочного кальциевого силиката из Восточного Забайкалья // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1976. - № 10. - С. 116-120.

**40.** Панина Л.И., Владыкин Н.В. Лампроиты Мурунского массива и их генезис // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (12), с. 100-113.

**41.** Панина Л.И. Физико-химические условия формирования пород в интрузивах щелочно-ультраосновной формации // Геология и геофизика, 1985 (1), с. 39-51.

**42.** Прокофьев В.Ю., Воробьев Е.И. РТ-условия образования стронций-бариевых карбонатитов, чароитовых пород и торгалитов Мурунского щелочного массива (Восточная Сибирь). // Геохимия. 1991. N 10. С. 1444-1452.

**43.** Рогов Ю.Г., Рогова В.П., Воронков А.А., Молева В.А. Тинаксит  $NaK_2Ca_2TiSiO_{19}(OH)$  - новый минерал // Докл. АН СССР. 1965. Т. 162, № 3. С. 658-661.

**44.** Рогова В.П., Завьялова Л.Л. Минеральный состав чароититовой породы - нового ювелирно-поделочного камня // Минералы и минеральные ассоциации Восточной Сибири. Иркутск, 1977. С. 135-141.

**45.** Рогова В.П., Рогов Ю.Г., Дриц В.А., Кузнецова Н.Н. Чароит - новый минерал и новый ювелирно-поделочный камень // Зап.Всесоюз.минер.о-ва. 1978. Ч. 107, вып. 1. С. 94-100.

**46.** Рогова В.П., Костюков С.П., Воробьев Е.И. Чароит. Сиреневое чудо Сибири. Иллюстрированное научно-популярное издание. Ч-21 Иркутск: изд-во «Петрографика», 2011. - 192 с.

**47.** Рождественская И.В., Никишова Л.В., Баннова И.И., Лазебник Ю.Д.

Канасит - уточнение и особенности структуры, структурный типоморфизм. Минералогический журнал 1988 – 10, №4. 31-41.

**48.** Соколова М. Н., Забавникова Н. И., Яковлевская Т. А. Рудницкая Е. С. Тинаксит из пегматитов апатитового месторождения Расвумчорр (Хибинский массив). - В кн.: Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. Л., «Наука», 1975.

**49.** Яровой П.Н., Ракшаев Д.Л. Люминесцентные свойства чароита. Книга "Прикладная минералогия Восточной Сибири", Иркутск, Изд. ИГУ, 1992, с. 243-251.

**50.** Anderson B. W., Carringbull G. F., Davis R. J., Hil D. K. e. a. Ekanite a new metamict gem from Ceylon // Nature. 1961. Vol. 10.

**51.** Blackburn W.H. & Dennen W.H. Encyclopedia of Mineral Names. Mineral. Assoc. Can., Spec. Publ. 1. 1997.

**52.** Borovikov A.A., Vladykin N.V., Borisenko A.S., Dokuchits E.Yu. «Genesis of Charoite Rocks of the Murunsky Massif (melt and fluid inclusion studies)». Mineralogy and Petrology, 2016. В печати

**53.** Buerger M.J. The determination of the crystal structure of pectolite. Zeitschrift fiir Kristallographie, 108, 1956. p. 248-262.

**54.** Dokuchits E.Yu, Vladykin N.V. Chemical composition, geochemical features and genesis of charoite and charoite rocks, Murun complex. 30th International Conference on “Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism”. Abstract book. Antalya, Turkey, 2014. p. 46-48

**55.** Dokuchits E.Yu., Vladykin N.V. Rare earth elements in charoite rocks, Murun complex. Материалы XXXII Международной конференции «Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов» 7-14 августа 2015г. г. Апатиты, 2015 г.

**56.** Flink, G. Part I. On the minerals from Narsarsuk on the Firth of Tunugdliarfik in Southern Greenland. 1899 p.8-180.

**57.** Joswig W., Drits, V.A. & Sokolova G.V. Refinement of the structure of

fedorite. *Sov. Phys. Crystallogr.* 33, 1988. 763-765.

**58.** Hammer V., Libowitzky E., Rossman G.R. Single-crystal IR spectroscopy of very strong hydrogen bonds in pectolite,  $\text{NaCa}_2[\text{Si}_3\text{O}_8\text{OH}]$ , and serandite,  $\text{NaMn}_2[\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})]$  *American Mineralogist*, Volume 83, pages 569-576, 1998.

**59.** Gittins, J., Bown M.G., Sturman D. Agrellite, a rockforming mineral in regionally metamorphosed aluminous rocks. *Can. Mineral.* 1976. 14. 120-126

**60.** Kaneva, E. Crystal structure and crystal chemical studies of minerals of alkaline rocks from Russia, Tajikistan and Mongolia. Thesis, Università Degli Studi Di Bari "Aldo Moro", Italy, 2014.

**61.** Kaneva E., Lacalamita M., Mesto E., Shingaro E., Scordari F., Vladykin N. Structure and modeling of disorder in miserite from the Murun (Russia) and Dara-i-Pioz (Tajikistan) massifs. *Phys Chem Minerals* (2014) 41:49–63. DOI 10.1007/s00269-013-0623-3.

**62.** Kraeff A., Poorter R.P.E., Schwiling R.D. Additional information on charoite. *N. Jb. Miner. Mh.* 11, 1980. p. 498-500.

**63.** Kukharencov, A. A., Orlova, M. P., Bulakh, A. G., Bagdasarov, E. A., Rimskaya-Korsakova, O. M., Nefedov, E. I., Ilinskii, G. A., Sergeev, S.E. Norway, Abakumova, N. B. Caledonian Complex of Alkaline Ultrabasic Rocks and Carbonatites of Kola Peninsula and North Karelia (in evidence from fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, Russian). Leningrad: Nedra. 1965.

**64.** Merlino, S. The structure of reyerite,  $(\text{Na,K})_2\text{Ca}_{14}\text{Si}_{22}\text{Al}_2\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . *Mineral. Mag.* 52, 1988. 247-256.

**65.** Mitchell R.H., Burns P.C. The structure of fedorite: A re-appraisal, Locality: Turij complex, Kola Peninsula, Russia. *The Canadian Mineralogist*, 39. 2001, p. 769-777.

**66.** Mitchell R.H., Smith C.B., Vladykin N.V. Isotopic composition of Sr and Nd in potassic rocks of the Little Murun complex, Aldan Shield, Siberia.// *Lithos*, 32, 1994, p. 243-248.

**67.** Orlova, M.P. Recent findings on the geology of the Malo Murun alkaline

pluton. *Internat. Geol. Review*, 30, 1988. p. 945-953.

**68.** Orlova, M.P., Borisov, A.B. and Shadenkov, Y.M. Alkaline magmatism of the Murun areal (sic) (Aldan Shield). *Sov. Geol Geophys.*, 33, 1992, p. 45-55.

**69.** Peacor D.R., Buerger M.J. The determination and refinement of the structure of narsarsukite,  $\text{Na}_2\text{TiOSi}_4\text{O}_{10}$ . *American Mineralogist*, 47.1962. p. 539-556.

**70.** Reguir, E.P. Mineralogy of the Little Murun Alkaline Complex, Yakutia. M.Sc. thesis, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, 2001.

**71.** Rozhdestvenskaya I.V., Kogure T., Abe E., & Drits V.A. A structural model for charoite. *Mineralogical Magazine* 73, 2009, p. 883-890.

**72.** Rozhdestvenskaya I., Mugnaioli E., Czank M., Depmeier W., Kolb U., Reinholdt A. and Weirich T. The structure of charoite,  $(\text{K,Sr,Ba,Mn})_{15-16}(\text{Ca,Na})_{32}[(\text{Si}_{70}(\text{O,OH})_{180})](\text{OH,F})_{4.0}n\text{H}_2\text{O}$ , solved by conventional and automated electron diffraction. *Mineralogical Magazine*, February, 2010, Vol. 74(1), p. 159-177.

**73.** Sokolova G.V., Kashaev A.A., Drits V.A., Ilyukhin V.V. The crystal structure of fedorite. *Sov. Phys. Crystallogr.* 28, 1983. 95-97.

**74.** Vladykin N.V. Malyi Murun Volcano-Plutonic Complex: An Example of Differentiated Mantle Magmas of Lamproitic Type // *Geochemistry International*, v. 38, suppl. 1, 2000. p. 573-583.

**75.** Vladykin N.V. Potassium alkaline lamproite-carbonatite complexes: petrology, genesis, and ore reserves *Russian Geology and Geophysics*. Elsevier, 50, 2009, p. 1–10.

**76.** Vladykin N.V. Geochemistry of isotopes Sr-Nd and TR of lamproiyes Aldan Shild // *Geochemistry of magmatic rocks*, 2009. Moscow, p. 158-160.

**77.** Warren, B. E.; Amberg, C. R. 1934: X-ray study of narsarsukite  $\text{Na}_2(\text{Ti, Fe})\text{Si}_4\text{O}_{11}$ . *American mineralogist* 19: p. 546-548.