

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)  
Институт наук о Земле

Комарова Алена Дмитриевна

**Химический состав зональных корундов месторождения Лук Йен  
(Вьетнам)**

Выпускная квалификационная работа по направлению 05.03.01 «Геология»  
Уровень бакалавриат

Научный руководитель:  
Канд.г.-м.н., доцент А. А. Золотарёв  
Заведующий кафедрой минералогии:  
Докт. г.-м.н , проф. А. И Брусницын.

Санкт-Петербург

2023

## Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Генетические типы месторождений корунда .....	5
Глава 2. Геологическое строение района Лук Йен .....	11
Географическое положение района Лук Йен .....	11
Геологическое строение месторождения Лук Йен .....	12
История разработки и изучения месторождений Лук Йен.....	14
Глава 3. Морфология и окраска .....	16
Исследование морфологии и окраски корундов .....	16
Исследование контакта корунда и шпинели .....	21
Глава 4. Особенности химического состава корундов .....	24
Проверка гипотезы о связи цвета, морфологии и химического состава.....	24
Исследование зональных кристаллов.....	29
Выводы .....	34
Список литературы .....	36

## Введение

Рубины и сапфиры района Лук Йен на севере Вьетнама является значимым месторождением рубинов, шпинелей и турмалинов ювелирного качества с 1987 года. История разработки включает как подконтрольную государству добычу самоцветов, так и нелегальную: с 1988 года правительство Вьетнама основало компанию Vinagemco для контроля за добычей, но с 1989 года по 1990 в район Лук Йен приехало более 10000 старателей (Van Long et al., 2004). Один из самых крупных и известных образцов из этого месторождения, 56-каратный рубин был куплен за 562 000 долларов (Van Long et al., 2004). Всего после этого были добыты сотни килограммов рубинов и розовых корундов ювелирного качества. Примерно с середины 1990-х годов ведутся исследования в самых разных направлениях – морфологии, химического состава, и геммологических свойств рубинов.

Несмотря на долгую историю исследований, к минеральному сырью данного месторождения только начал (Sorokina et al., 2016) применяться онтогенический подход, подразумевающий выявление закономерностей распределение химических элементов в индивидах. При становлении онтогенического подхода в минералогии наибольшее внимание традиционно уделялось морфологическим (облику, габитусу) и физическим (окраске, твердости, кристаллооптическим) свойствам кристаллов (Григорьев, 1961; Юшкин, 1977; Марин, 1981 и др.). Между тем, из более поздних работ стало ясно, что данные параметры минеральных индивидов связаны не только и не столько с термодинамическими условиями их формирования, сколько с геохимической неоднородностью минералообразующей среды (Алексеев, Марин, 2012). При этом считается, что результаты онтогенических исследований проливают свет на условия кристаллизации минералов. В этой работе термин «онтогения» будет употребляться в том же смысле, как в работе Сорокиной с соавторами и статье Алексеева и Марина (E. S. Sorokina et al. 2016; Алексеев, Марин 2012).

Объект исследования в данной работе – образцы корундов, в том числе рубины, розовые корунды, а также не ювелирные разновидности, предмет – их химический состав, в том числе зональных кристаллов, морфология, а также связь между обликом, химическим составом и цветом корундов (E. S. Sorokina et al., 2016) на выборке из 29 образцов, отобранных Павлом Борисовичем Соколовым и его коллегами. Коллекция включает как корунды из коренных проявлений, так и из аллювиальных россыпей района Лук Йен в северном Вьетнаме. Цель исследования – всестороннее исследование особенностей микроэлементного состава, реакционных отношений корунда с другими

минералами, прежде всего со шпинелью. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить литературные источники с целью сопоставления результатов анализа корундов Вьетнама с разновидностями из других месторождений;
- 2) На выборке из 29 образцов с ясной морфологией попытаться выявить наличие закономерности между обликом кристалла и его химическим составом;
- 3) Проанализировать химический состав в корундах, в том числе в зональных кристаллах;
- 4) Получить представление об особенностях генезиса корунда.

Автор выражает искреннюю благодарность президенту ООО «СОКОЛОВ» Павлу Борисовичу Соколову за предоставленную для работы коллекцию корундов, терпеливые объяснения, постановку задачи и предоставленную литературу. Отдельную благодарность хотелось бы выразить моему научному руководителю Анатолию Александровичу Золотареву за неоценимую помощь в создании данной работы и Катерине Александровне Куксе.

## Глава 1. Генетические типы месторождений корунда

Корунд как минерал встречается в различных горных породах. Он распространен во многих горных породах различного состава, и его область P-T устойчивости велика. Например, этот минерал появляется во время лесных пожаров на почвах, богатых алюминием (при атмосферном давлении), и наблюдается как высокоградная фаза в алмазах (Simonet, Fritsch, and Lasnier, 2008). Корунд может также быть продуктом гидротермального изменения, например, андалузита. Этот минерал, как правило, присутствует в глиноземистых, бедных кремнеземом горных породах. Сочетания корунда и кварца редки, и эти минералы обычно не контактируют. Исключения, в которых кварц и корунд формируют устойчивые или метастабильные сочетания, известны в высокоградных и высокотемпературных гранулитах, а также в гидротермально измененном кварцевом порфире (Simonet, Fritsch, and Lasnier, 2008).

Для благородных разновидностей корунда, можно выделить следующие генетические типы месторождений (Барнов и Мельников, 2015):

### 1) Магматический

- в интрузивных щелочных лампрофирах (Його-Галч, США)
- в щелочных базальтах (Паилин, Камбоджа; Новая Англия, Австралия; месторождения Таиланда)

### 2) Пегматитовый

- в сиенитовых пегматитах (сапфиры Кашмира; Хибины)
- в гранитных десилицированных пегматитах (Ратнапурский горнорудный район, Шри-Ланка)

### 3) Метаморфогенный

- в мраморах и кальцифирах; в кристаллических сланцах и гнейсах; в мигматитах, гранулитах, чарнокитах и кондалитах; в регионально развитых метасоматитах: плюмазитах, скарнах, слюдитах, плагиоклазитах (все месторождения рубинов в Мьянме, район Лук Йен во Вьетнаме, Джигдамлек в Афганистане)

### 4) Метасоматический

-в локальных слюдит-плагиоклазитах, в эндоконтактах мафит-ультрамафитовых комплексов (Лонгидо, Умба и Маньяра в Танзании; Сунджан)

#### 5) Россыпи

- в экзогенных элювиально-делювиальных и аллювиальных отложениях (Могокский район, Мьянма; Кашмир, Индия; Шри-Ланка; месторождения Мозамбика и Мадагаскара; в меньшей степени Лук Йен, Вьетнам)

В зарубежной литературе часто используется генетическая классификация месторождений рубинов с делением на три типа. Месторождения рубина подразделяются в зависимости от их геологической среды образования: Тип I - магматические, Тип II – метаморфические, к типу III относятся россыпи. Тип I характеризуется двумя подтипами, в частности Тип IA, где ювелирные рубины метаморфического (иногда магматического) происхождения находятся в щелочных базальтах (Мадагаскар и другие), а Тип IB соответствует ксенокристаллам рубина в кимберлитах (Демократическая Республика Конго). Тип II также имеет два подтипа; метаморфические месторождения в строгом смысле термина образовавшиеся в условиях от амфиболитовой до гранулитовой фации (Тип IIA), и метасоматические месторождения (Тип IIB), образованные при взаимодействии флюидов с горными породами. Россыпи находятся в осадочных породах, которые образовались в результате эрозии, гравитационного воздействия, механической транспортировки и осаждения вдоль склонов или бассейнов, связанных с неотектоническими движениями и деформациями. Примеры месторождений каждого типа представлены в таблице 1.1 (Giuliani et al. 2020).

Кристаллы рубина высочайшего качества добывают в Центральной и Юго-Восточной Азии, а также на Востоке Африки. Месторождение Могок В Мьянме известно тем, что производит рубины самого высокого качества с 600 года н.э (Giuliani et al., 2020). Их цвет часто называют "голубиная кровь", это термин мьянманского происхождения, который был популяризирован английскими торговцами в 19 веке. Другие азиатские производители, включая Таиланд (месторождение Чантхабури-Трат) и Камбоджу (Пайлин и Самлаут), стали серьезными игроками в 1970-х годах, но их производительность резко сократилось за последние 20 лет. Месторождения рубина во Вьетнаме (районы Лук Йен и Куи-Чай), Афганистане (Джигдамлек), Пакистане (долина Хунза), Азад-Кашмире (Батакунди и Нангимали) и Таджикистане (Кукурт, Тураколума

и Бадахшан) стали значительными производителями с конца 1980-х годов, но их производство остается ограниченным. В начале 1990-х годов Монг-Шу на востоке Мьянмы стал крупным месторождением, но его производство снизилось с начала 2000-х годов.

Высокая добыча и качество рубинов из Мозамбика (и в меньшей степени Мадагаскара) изменили рынок торговли рубинами, и добыча на многих других месторождениях, например, в нескольких в Кении, прекратилась. В Африке рубины добываются на выдержавших конкуренцию месторождениях Кении (Мангаре и Баринго), Танзании (Усба-Калалани, Морогоро, Махенге и Лулера), Малави (Чимвазулу), Мадагаскаре (Ватомандри, Андиламена, Диди, Захамена и Илакака) и Мозамбике (Монтепуэс, Руамбезе и М`Сойз), при этом самая высокотехнологичная добыча происходит на месторождении Монтепуэс. В Южной Гренландии компания True North Ges In. начала разработку месторождения Аапалутток недалеко от Фискнессета в 2005 году, а месторождение было введено в эксплуатацию под контролем компании «Гренландский рубин» в 2017.

Для наиболее важных из перечисленных месторождений и некоторых других был произведен химический анализ методом LA-ICP-MS, подборка которых была собрана (Giuliani et al., 2020) (табл. 1.1).

Разницу в возможных составах микропримесей в зависимости от типа месторождения хорошо демонстрирует график (рис. 1.1), составленный для рубинов цвета голубиная кровь. На нём мы видим характерное поле для месторождений в мраморах с низким, относительно других метаморфических пород, содержанием железа, при этом точка с максимальным содержанием хрома для Вьетнама составляет 0,6 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , что соответствует 0,4 мас.% Cr. Другими графиками, на которых иллюстрируют разницу между корундами магматического и метаморфического происхождения, является  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ .

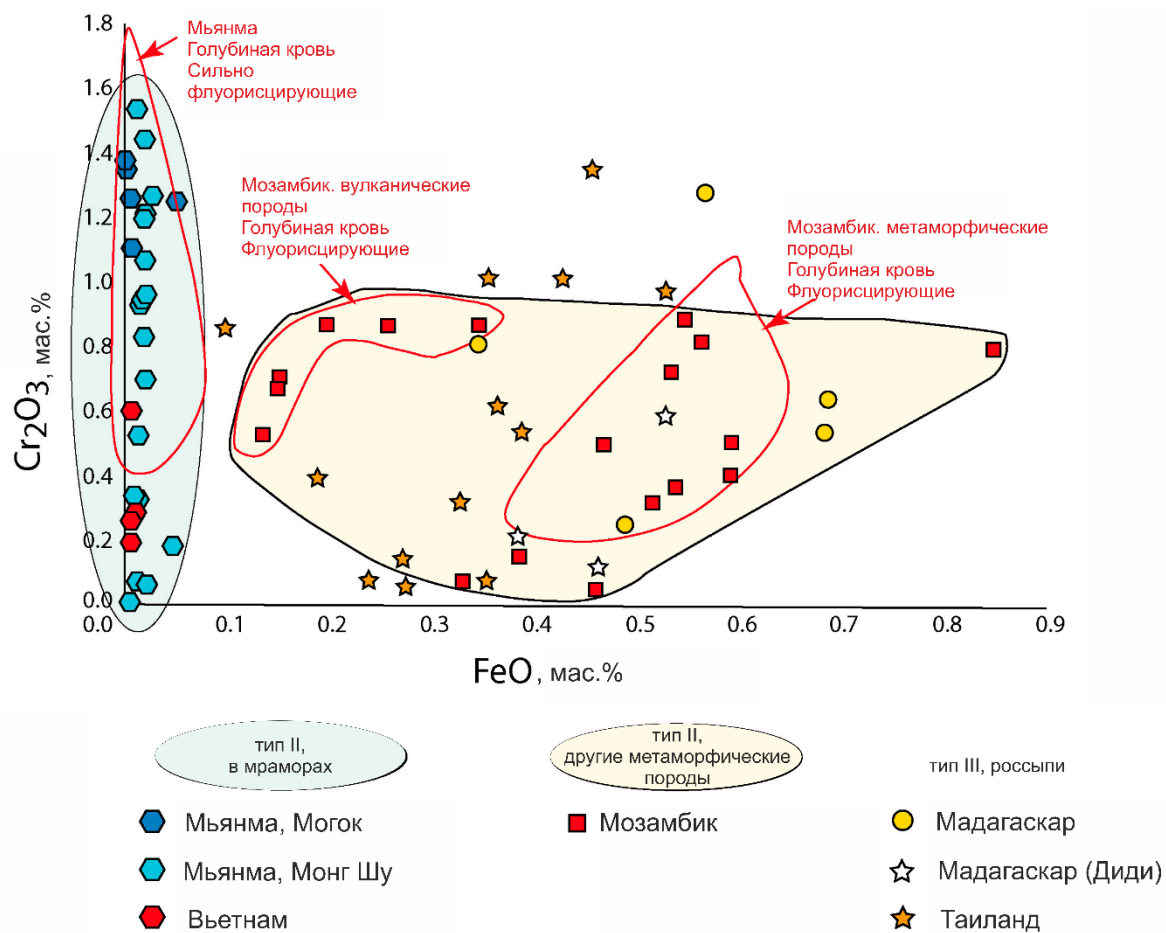


Рис. 1.1. Содержание железа и хрома в рубинах из мраморов и других пород (Giuliani et al., 2020)



Таблица 1.1. Анализы наиболее важных микропримесей в корундах по месторождениям мира (Giuliani et al., 2020)

Тип месторождения	Месторождение или район	Страна	Mg, г/т	Ti, г/т	V, г/т	Fe, г/т	Ga, г/т	Cr, г/т	Количество анализов
Тип ПА (в мафит-ультрамафитах)	Лонгидо	Танзания	(7–42)	нт*	(3–25)	(62–544)	(6–10)	(1604–5059)	16
	Винза		(0–118)	нт	(0–1)	(405–1596)	(4–11)	(161–1094)	14
	Чимвадзулу	Малави	(10–39)	нт	(1–10)	(953–2760)	(5–15)	(269–1816)	18
Тип ПА (в мраморах)	Могок	Мьянма	(5–75)	(7–80)	(48–1089)	(нпо-301)	(2–51)	нт	65
	Дагтав		(нпо*)	(105–702)	(66–97)	(нпо-237) ***	(32–42)	(105–702)	4
	Кадоке Тат		(нпо –25)	(нпо -580)	(150–1472)	(нпо-644) ***	(11–140)	(61–2963)	13
	Бав Падан		(33–40)	(70–74)	(206–347)	(270–442)	(106–166)	(29–2339)	2
	Намья		(нпо –66)	(79–739)	(184–489)	(нпо-234) ***	(23–107)	(479–6864)	12
	Монг-Шу		(48–115)	(778–1815)	(324–417)	(нпо-29)	(66–89)	(2026–7015)	65
	Неизвестно	Вьетнам	(1–130)	(нпо -1214)	(2–214)	(нпо-28)	(1–122)	нт	93
	Джигдамлек	Афганистан	(7–380)	(9–486)	(4–135)	(нпо-1128)	(5–35)	нт	74
	Снежное	Таджикистан	(6–58)	(нпо –579)	(24–112)	(нпо-155)	(14–28)	нт	48
(4–72)			(6–75)	(51–122)	нпо***	(61–83)	(1696–4204)	6	
Тип ПВ	Аапалутток	Гренландия	(2–81)	(15–210)	(0.1–14)	(655–2516)	(0.7–25)	(50–2871)	17
Тип III	Паилин	Камбоджа	(97–258)	(32–128)	(5–22)	(818–1935)	(5–11)	нт	34
			(118–226)	(95–210)	(16–33)	(2454–3620)	(18–34)	(450–7761)	14
	Чантабури-Трат	Таиланд	(126–181)	(32–138)	(4–14)	(756–1442)	((5–10)	нт	7
			(102–163)	(81–219)	(9–30)	(2175–3794)	(16–32)	(955–2856)	10
	Новая Англия	Австралия	(9–55)	(6–203)	(4–14)	(2560–3150)	(170–310)	(870–3370)	?
	Муглото	Мозамбик	(11–50)	нт	(2–7)	(851–2034)	(5–12)	(506–1737)	14
	Манинге Найс		(19–47)	нт	(1–6)	(261–402)	(6–9)	(1886–4941)	5
	Монтепьез		(8–65)	(нпо -59)	(нпо –10)	(231–2154)	(5–14)	нт	85
	Захамена	Мадагаскар	(13–61)	нт	(10–100)	(284–1994)	(10–30)	(135–3922)	14
Диди	(0–67)		нт	(2–17)	(533–1274)	(3–17)	(32–2698)	21	
Андиламена	(19–53)		нт	(4–29)	559–1559)	(7–21)	(53–1569)	14	

\* нт - неточный результат, \*\* нпо – ниже предела обнаружения, \*\*\* содержание железа измерялось с помощью электронно-зондового микроанализа

Другой важной микропримесью, установленной во всех корундах из таблицы 1.1, является галлий. Он характерен для природных рубинов в большей концентрации, чем для синтетических, и при определённой пропорции возможно утверждать, что рубин природный с большой долей уверенности (рис. 1.3). (Giuliani et al., 2020).

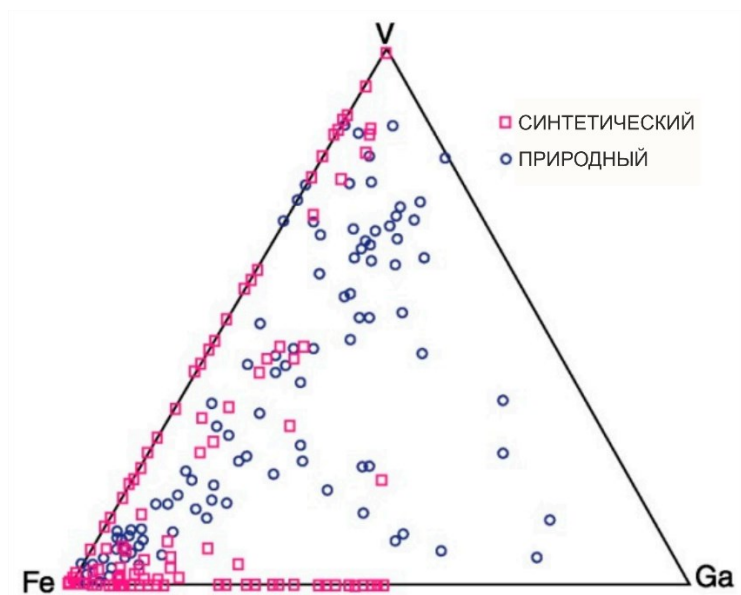


Рис. 1.3. Тройная диаграмма в координатах Ga-V-Fe, демонстрирующая различия между природными и синтетическими рубинами (Giuliani et al., 2020)

## Глава 2. Геологическое строение района Лук Йен

### Географическое положение района Лук Йен

Лук Йен – это название региона провинции Йен Бай на севере Вьетнама (рис. 2.1). В этом районе джунгли, расположенные на закарстованных участках, соседствуют с узкими долинами, в которых расположены поселения, включая и столицу Лук Йена – Йен Те ( $22^{\circ}6'38.84''\text{N}$ ,  $104^{\circ}45'57.80''\text{E}$ ) (Chauviré et al., 2015). Она расположена примерно в 200 км от Ханоя, столицы Вьетнама. С запада, юга и востока район граничит с озером Тхак Ба. Рельеф региона преимущественно горный.



Рис. 2.1. Карта северного Вьетнама с обозначением богатого самоцветами района Лук Йен (Van Long, Pardieu, and Giuliani, 2013)

Средняя температура в провинции Йен Бай составляет около  $20^{\circ}\text{C}$  и падает до  $0^{\circ}\text{C}$  в некоторых частях, зимой может даже эпизодически выпадать снег, но чаще идёт мелкий дождь, а в целом декабрь-январь – это месяцы засушливого сезона. Период с апреля по декабрь считается летом или сезоном дождей (Donovan, 1997). Такие климатические особенности могут быть напрямую связаны с процессами карстообразования, характерного для мраморов Северного Вьетнама.

## Геологическое строение района Лук Йен

Регион Юго-Восточной Азии, где расположены месторождения Лук Йен, сформировался в результате интенсивного метаморфизма горных пород, преимущественно вызванного закрытием Палео-Тетиса и процессом Гималайской орогении. Первое событие носит название Индозинской орогении, оно привело к коллизии блоков Янгтзе и Индокитая в перми-триасе (240-245 Ма). В течение кайнозойской гималайской коллизии между Индией и Евразией около 21-23 Ма (Van Long, Pardieu, and Giuliani, 2013) эти террейны были интенсивно переработаны и метаморфизованы (Chauviré et al., 2015).

Месторождения района Лук Йен расположены в тектонической зоне Ло Гам к востоку от сдвига Красной реки – основного сдвига в Восточной Азии. Он отделяет данную зону от хребта Дей Нуи Кон Voi (рис. 2.2), который является метаморфическим поясом, сложенным милонитизированными гнейсами – продуктами высокоградного метаморфизма. Его условия оцениваются как соответствующие амфиболитовой фации с давлением 4-8 Кбар и температурой 650-850°С (Quang Vinh et al., 1999).

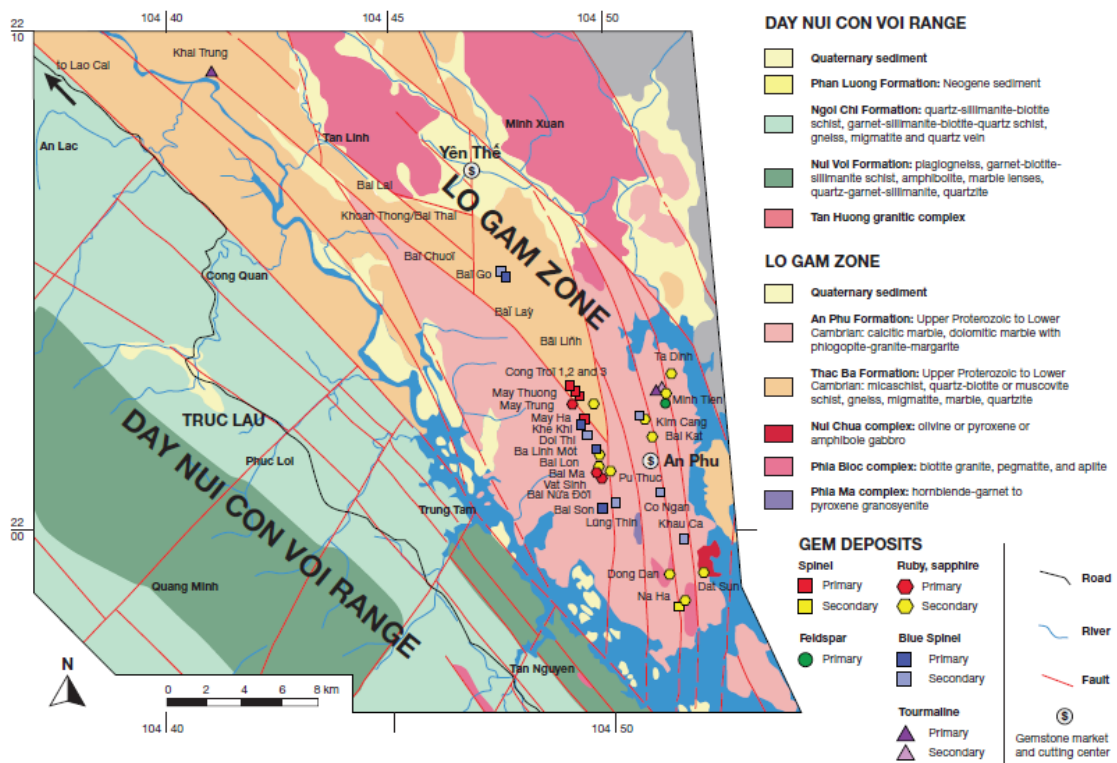


Рис. 2.2. Геологическая карта района Лук Йен с указанием первичных и вторичных месторождений рубина (красные и жёлтые шестиугольники) (Van Long, Pardieu, and Giuliani, 2013)

Горные породы зоны Ло Гам, в которых локализованы рубин и шпинель, являются средне- и высокотемпературными мраморами верхнепротерозойско-раннекембрийского возраста. Они перекрыты силиманит-биотит-гранатовыми сланцами. В коренных месторождениях встречаются:

1. рассеянные кристаллы корунда в ассоциации с флогопитом, дравитом, маргаритом, пиритом, рутилом, шпинелью и графитом (месторождения Бай Да Лан, Ау Фу, Мин Тьен, Нуок Нгап, и Кхонг Тонг)
2. прожилки, выполненные помимо корунда кальцитом, дравитом, пиритом, маргаритом и флогопитом (Ау Фу)

Россыпные месторождения связаны с накоплением гравия в карстовых кавернах и в аллювиальных веерообразных конусах выноса в долинах Лук Йена. Такие долины как правило являются узкими небольшими депрессиями площадью от 0,5 до 3 км<sup>2</sup> (Van Long et al., 2004).

В данной работе изучались корунды, располагающиеся в тектонически ослабленных зонах и складках в мраморах (рис. 2.3), минеральная ассоциация которых состоит из кальцита, доломита, шпинели, флогопита, маргарита, амфиболов, хлорита, форстерита, графита и пирита, а также корунды из аллювиальных конусов выноса.

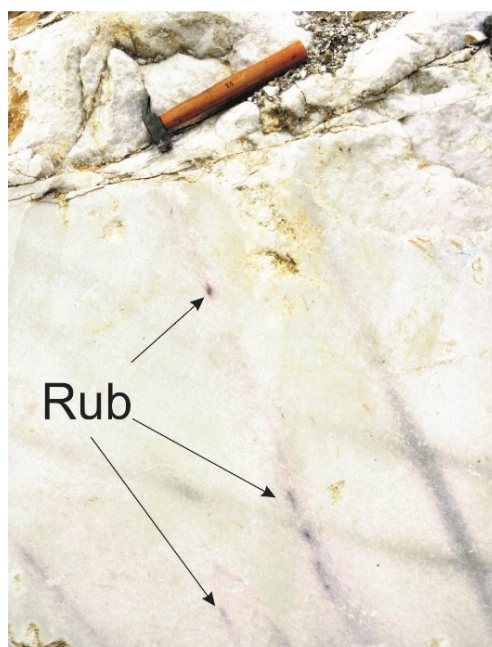


Рис. 2.3. Корунд (рубин) в шарнире складки в мраморах района Лук Йен

## История разработки и изучения месторождений Лук Йен

Коренное проявление было изначально открыто после извлечения рубинов из россыпей фермерами в конце 1987 года. Рубины были найдены в аллювии и коллювии, предположительным их источником считались мрамора. Для добычи рубинов, изучения и последующей продажи была основана государственная компания VINAGEMCO. Сама добыча началась в июне 1988. В 1989-1990 годы добыча составила 244 килограмма сырья ювелирного качества (Van Long, Pardieu, and Giuliani, 2013). С 1990 по 1994 год тысячи независимых старателей приехали в район Лук Йен и обнаружили новые проявления рубина, причём как коренные, так и россыпные. В 1995 году месторождения стали контролироваться компанией VIGEGO, а к 2003 году добыча уже не подчинялась государству. Сейчас значительная часть добычи выполняется местными фермерами.

Есть публикации, посвящённые мрамору месторождения Лук Йен и его химическим особенностям, связанным с наличием или отсутствием шпинели или корунда. В богатых шпинелью мраморах кальцит обычно содержит больше магния тогда как кальцит из мрамора с корундом как правило отличаются более высокими содержаниями железа и марганца (рис. 2.4) (Sutthirat et al., 2008). Кальцит без камнесамоцветной минерализации варьирует по содержанию этих элементов в широком диапазоне. Некоторые корундсодержащие мраморы могут также проявлять тенденцию к повышенной магниальности, что может указывать на замещение шпинели корундом. Такое замещение описывается формулой  $Al_2MgO_4 + CaCO_3 + CO_2 \leftrightarrow Al_2O_3 + CaMg(CO_3)_2$  (шпинель + кальцит  $\leftrightarrow$  корунд + доломит) (Huong et al., 2012).

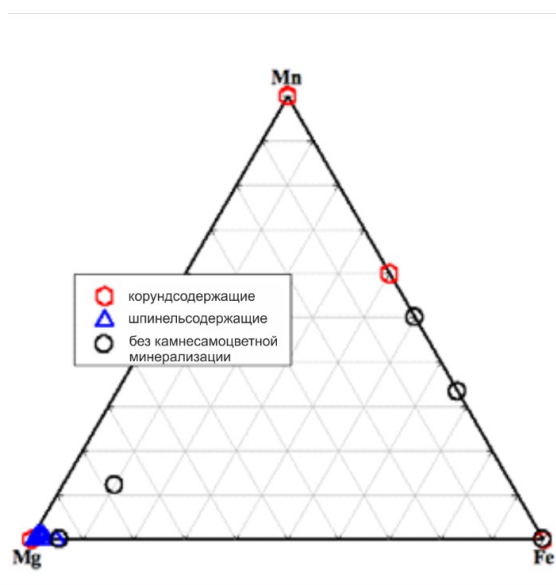


Рис. 2.4. Тройная диаграмма содержаний железа, марганца и магния в кальците в зависимости от типа мрамора (Sutthirat et al., 2008)

Химический состав рубинов месторождений района Лук Йен был определён с помощью электронно-зондового микроанализа на сканирующем электронном микроскопе Hitachi 2500, оснащённый энергодисперсионным спектрометром. Химический анализ рубина из Лук Йен показал наличие хрома, железа, титана, ванадия, кремния, марганца, магния, кальция, галлия, германия, скандия и цинка. В корундах района Лук Йен среднее содержание хрома, железа и титана составляет соответственно 0,227 мас.%, 0,083 мас.% и 0,050 мас.%. Для сравнения, корунд месторождения Куй Чау содержит немного больше хрома, чем корунд из Лук Йен (0,295 мас.% по сравнению с 0,227 мас.%). Кроме того, рубин из Куй Чау обычно имеет более высокое соотношение хрома к железу плюс титану (2,252 к 1,707). Это объясняет широкое преимущественное распространение рубинов в Куй Чау, в то время как в Лук Йен представлен широкий спектр цветов рубинов и корундов другого цвета (Van Long et al., 2004).

Возраст рубинов месторождения Лук Йен был определён непрямым Ar-Ar методом. Были продатированы флогопит и другие слюды из тех же мраморов, предположительно образовавшихся в ходе одного и того же процесса метаморфизма. Получился миоценовый возраст 23,2 и 24,4 Ма в районе сдвига Красной реки, и олигоценый между 30,8 и 34,0 непосредственно в зоне Ло Гам (Garnier et al., 2002).

### Глава 3. Морфология и окраска корунда

#### Исследование морфологии и окраски корундов

Корунд относится к дитригонально-скаленоэдрическому классу ( $L_3L_23PC$ ), в котором возможны такие простые формы, как дитригональный скаленоэдр, ромбоэдр, гексагональная дипирамида, дигексагональная и гексагональная призмы, пинакоид. В исследованной коллекции встречаются гексагональные призма и дипирамида, пинакоид и ромбоэдр, последний выступает в роли второстепенной простой формы.

Примерно 90% образцов имеют призматический габитус (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Типичные призматические кристаллы на примере образца V-15

Удлиненные призматические кристаллы более распространены в образцах, чем бочонковидные, но бывают исключения. Примерно у одной пятой призматических индивидов встречаются мелкие грани ромбоэдра (рис. 3.2).

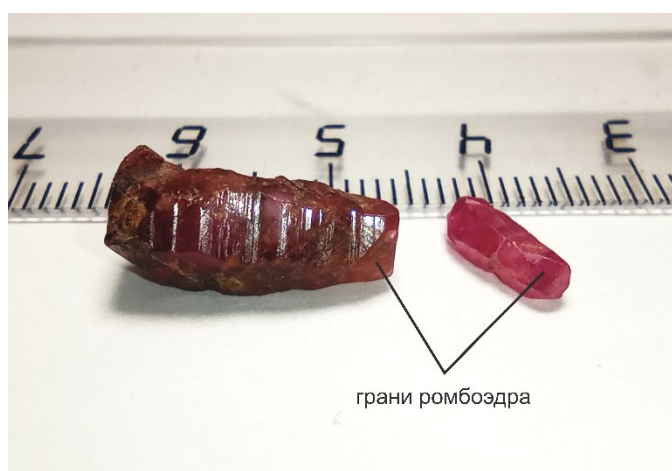


Рис. 3.2. Бочонковидный и длиннопризматический кристаллы с гранями ромбоэдра на примере образца VM-13



Другая распространённая доминирующая простая форма – это гексагональная дипирамида. На рисунке 3.3 мы видим дипирамиды с разной степенью сохранности. Кристалл справа имеет наиболее искажённую форму. На кристаллы такого габитуса приходится оставшиеся 10% изученных образцов.



Рис. 3.3. Дипирамидальный габитус на примере образца VM-13

Для кристаллов из аллювиальных проявлений характерен тот же облик и габитус, что и для образцов из коренных проявлений, однако грани оказываются более сглаженными из-за процесса транспортировки материала (рис. 3.4)

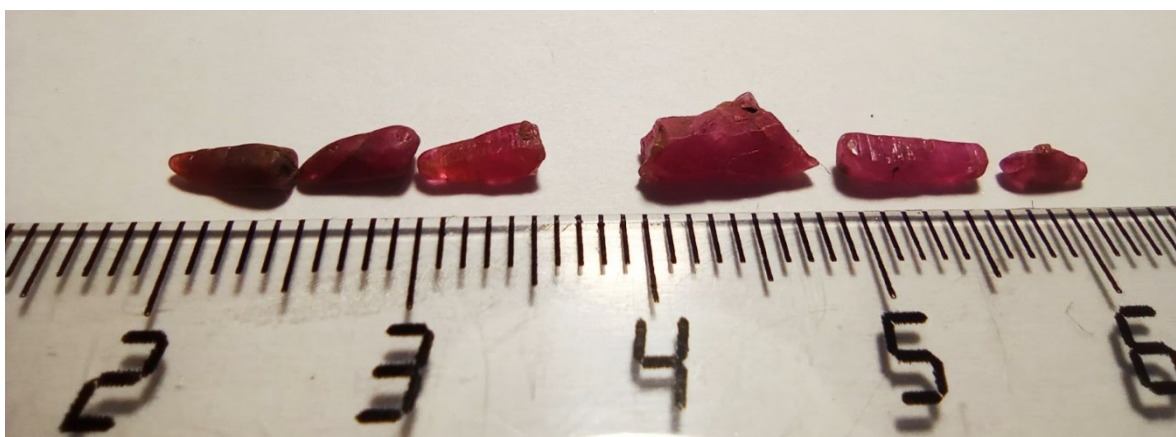


Рис. 3.4. Обломки дипирамидальных (три слева) и призматических кристаллов из аллювиального проявления на примере образца V-21-05

Наконец, редко встречаются кристаллы с хорошо прослеживаемой комбинацией двух основных простых форм – призмы и дипирамиды (рис. 3.5). Данный образец более короткопризматический, чем большинство описанных кристаллов. В этом случае не видна характерная штриховка.



Рис. 3.5. Образец V-15 дипирамидально-призматического габитуса

Наиболее редким морфологическим типом являются скелетные кристаллы, представленные в коллекции одним образцом VM-14. То, что это монокристалл можно понять по одновременному блеску граней со штриховкой в данном образце. (рис. 3.6) Стоит отдельно отметить его большой размер, около 9 см в длину.

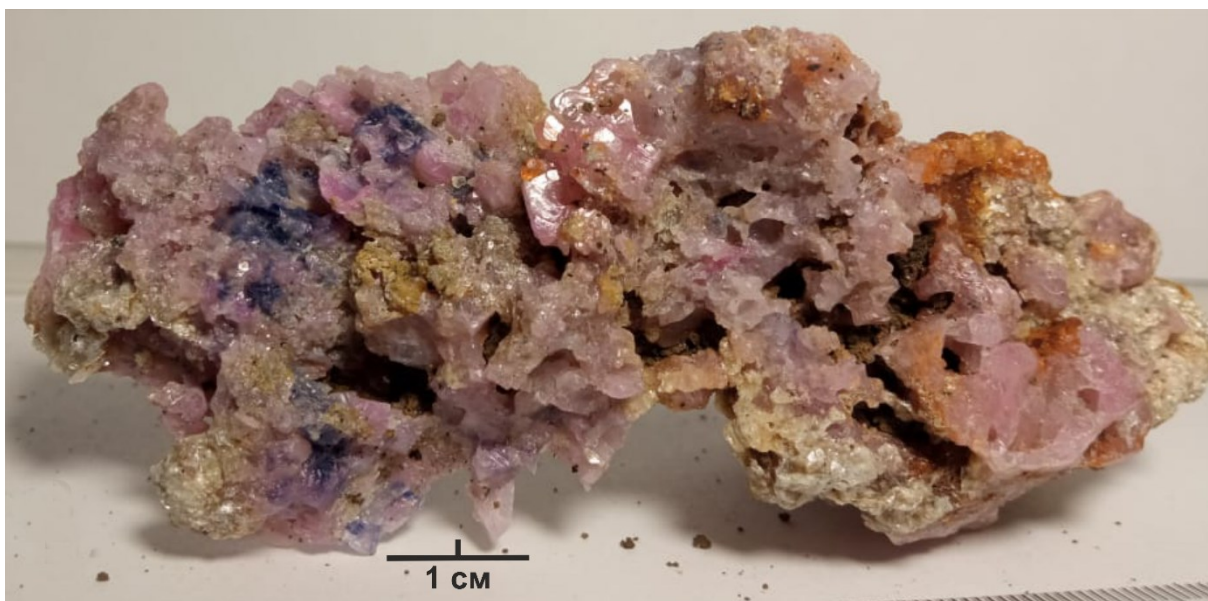


Рис. 3.6. Образец VM-14

Также для корундов из района Лук Йен характерны незакономерные сростки. Как правило, это комбинация из нескольких призматических кристаллов, случай срастания призматических и дипирамидальных кристаллов встречается реже (рис. 3.9). Такие сростки характерны и для нового проявления в совокупности с типичными призмаматическими кристаллами (рис. 3.7)

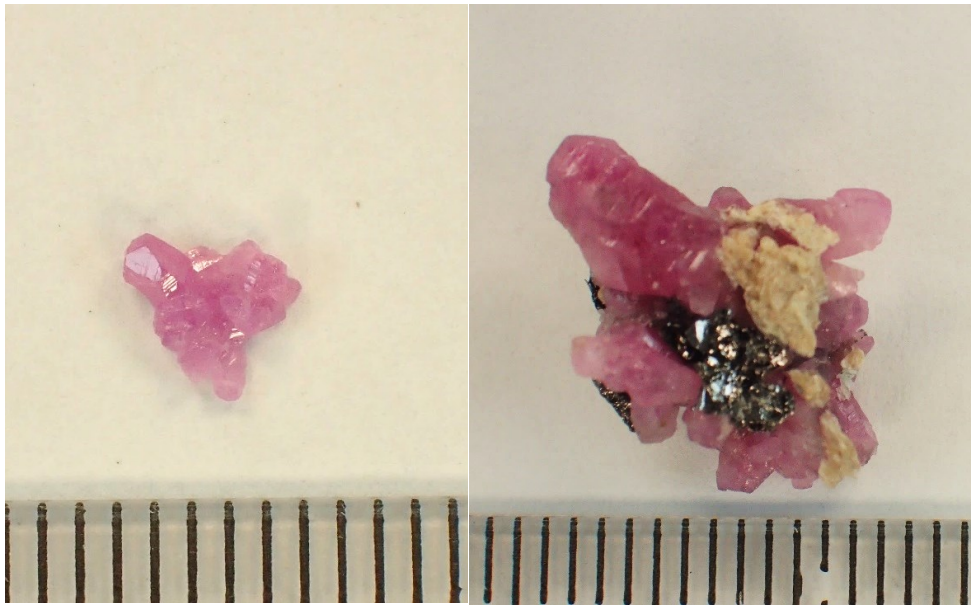


Рис.3.7. Незакономерные сростки кристаллов корундов разных оттенков на примере образцов V-39-02 и V-40-05/1

В большей степени для призматических и в меньшей – для бипирамидальных кристаллов характерна комбинационная штриховка, возникающая вследствие неравномерности скоростей роста по граням призмы и дипирамиды. В одних случаях мы можем выделить основную форму, в других происходит значительное искажение граней (рис. 3.8)



Рис. 3.8. Пример комбинационной штриховки (образец VM-53). Длина кристалла по оси с составляет 1,5 см.

Как видно на предыдущих фотографиях, основными цветами корундов, представленных в коллекции, являются розовый, причём от бледно-розового до насыщенно малинового (рис. 3.7), и красный (рис. 3.8). У некоторых кристаллов (рис. 3.6, 3.9) видны синие зоны, которые, по-видимому, образовались раньше розовых и могут быть центрами зарождения кристаллов. Причиной такой зональности также может

быть химическая неоднородность растворов, поступающих к месту образования корундов.



Рис. 3.9. Образец VM-7, зональный кристалл

Итак, наиболее часто встречающиеся простые формы в изученных образцах месторождения Лук Йен— гексагональная призма (около 90% образцов) с обрамляющими её гранями пинакоида и гексагональная дипирамида. Удлиненные призматические кристаллы более распространены в пределах месторождения, чем бочонковидные; дипирамидальные отличаются меньшим отношением высоты пирамиды к диаметру шестиугольника. Очень характерной для всех изученных кристаллов является штриховка на гранях призмы и заметно реже - дипирамиды. Таким образом, можно выделить три основных морфологических типа корундов месторождения Лук Йен – с призматическим габитусом, дипирамидальным и тип скелетных кристаллов.

### Исследование контакта корунда и шпинели

Наиболее интересным случаем, который нужно было рассмотреть при рентгеноспектральном микроанализе – это морфологические особенности замещения корундом шпинели, а также её химический состав, в особенности содержание железа. Для этого был распилен образец, в котором виден контакт розового корунда и синей шпинели, и залита шайба для проведения рентгеноспектрального микроанализа (рис. 3.10).

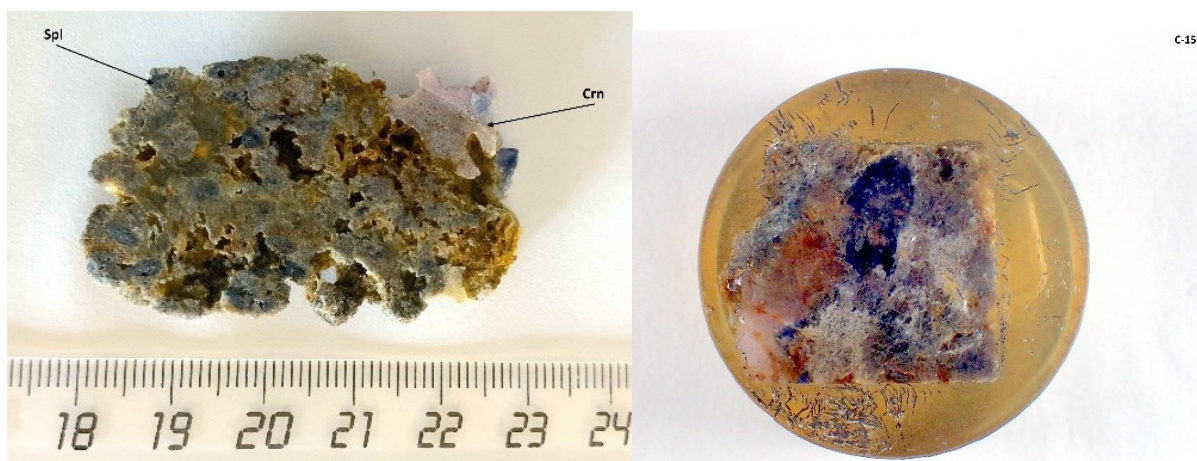


Рис. 3.10. Контакт розового корунда и синей шпинели в образце VM-86 и шайба, сделанная из него

Оказалось, что в данном образце наибольшее площадное распространение имеет не прямое соприкосновение внедрившегося корунда и шпинели, а переход корунд-хлорит-шпинель (рис. 3.11). Результаты анализа шпинели показывают, что в ней около 6 мас.% железа, а хлорит оказался довольно близок по составу к клинохлору, но с существенным содержанием железа. Формула шпинели была рассчитана по кислороду, а хлорита – по катионам (табл. 3.1). Так как микропримеси в корунде обычно имеют порядок сотен и тысяч г/т, их не удалось определить этим методом, и экспериментальная формула корунда -  $Al_2O_3$ . Исходные данные анализов и условия съёмки приведены в Приложении.

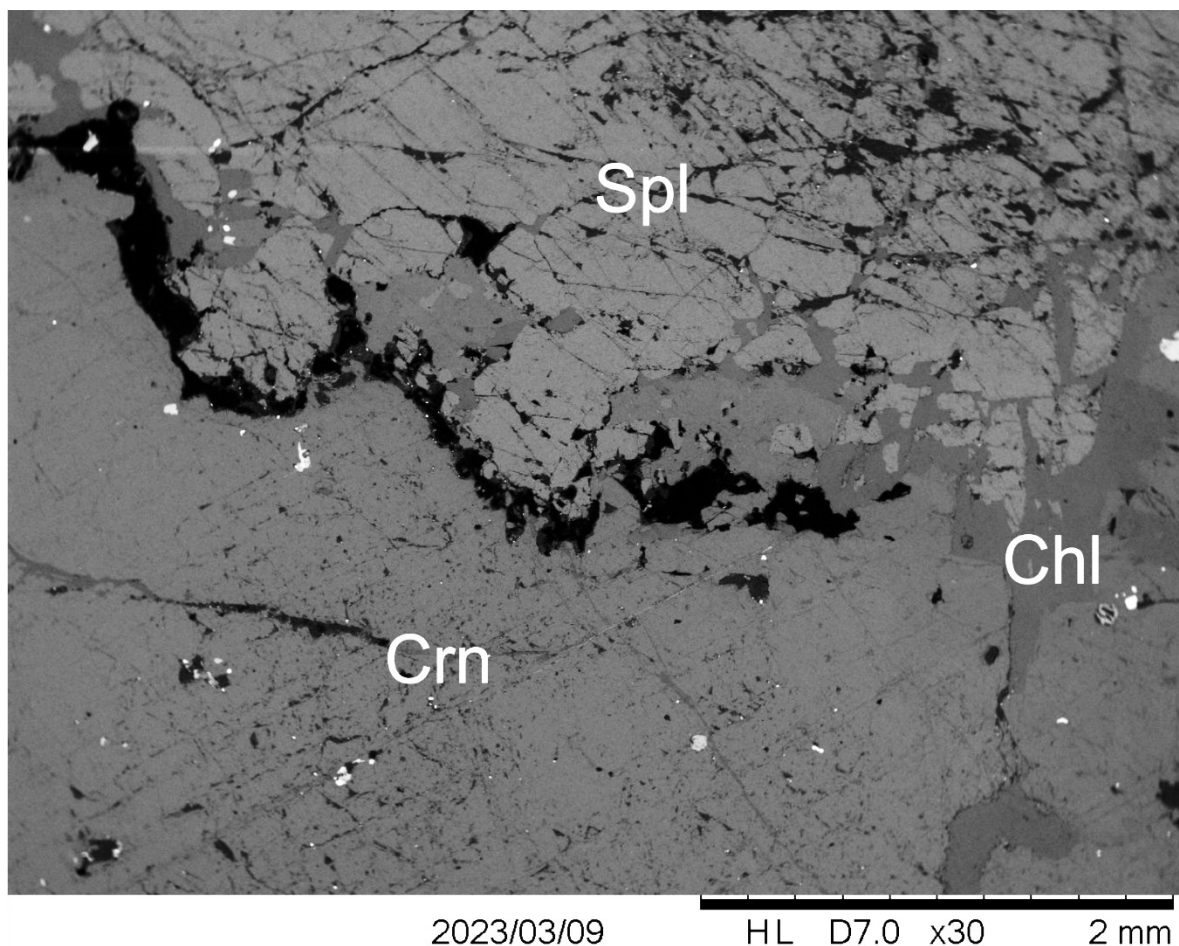


Рис. 3.11. BSE изображение пространственных отношений между корундом (Crd), хлоритом (Chl) и шпинелью (Spl)

Таблица 3.1. Расчёт коэффициентов в формуле хлорита и шпинели

Хлорит							
Компонент	Вес.%	Молекулярный вес	Молекулярное количество	Атомное количество		Коэффициент	заряд
				катион	анион		
<i>MgO</i>	33,13	40,295	0,8222	0,8222	0,8222	4,06	8,1113
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	33,296	101,94	0,3266	0,6532	0,9799	3,22	9,6669
<i>SiO<sub>2</sub></i>	31,04	60,09	0,5166	0,5166	1,0331	2,55	10,1922
<i>FeO</i>	2,534	71,837	0,0353	0,0353	0,0353	0,17	0,3480
Сумма	100		Сумма	2,0273		Сумма	28,3184
			Расчётный фактор	0,2027		коэф. О	10,00
						коэф. ОН	8,32

Формула		$(Mg_{4,06}, Fe_{0,17})Al_{1,77}(Al_{1,45}Si_{2,55}O_{10})(OH)_{8,32}$					
Шпинель							
Компонент	Вес.%	Молекулярный вес	Молекулярное количество	Атомное количество		Коэффициент	заряд
				катион	анион		
<i>MgO</i>	23,458	40,295	0,5822	0,5822	0,5822	0,85	1,6981
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	70,603	101,94	0,6926	1,3852	2,0778	2,02	4,0405
<i>FeO</i>	5,939	71,837	0,0827	0,0827	0,0827	0,12	0,2412
Сумма	100			Сумма	2,7426	Сумма	3,00
				Расчётный фактор	0,6857		
Формула		$(Mg_{0,85}, Fe_{0,12})Al_{2,02}O_{4,00}$					

Другим случаем контакта корунда со шпинелью, шире представленным в коллекции, является случай прямого замещения, когда корунд развивается по ней, внедряясь по трещинам (рис 3.12).

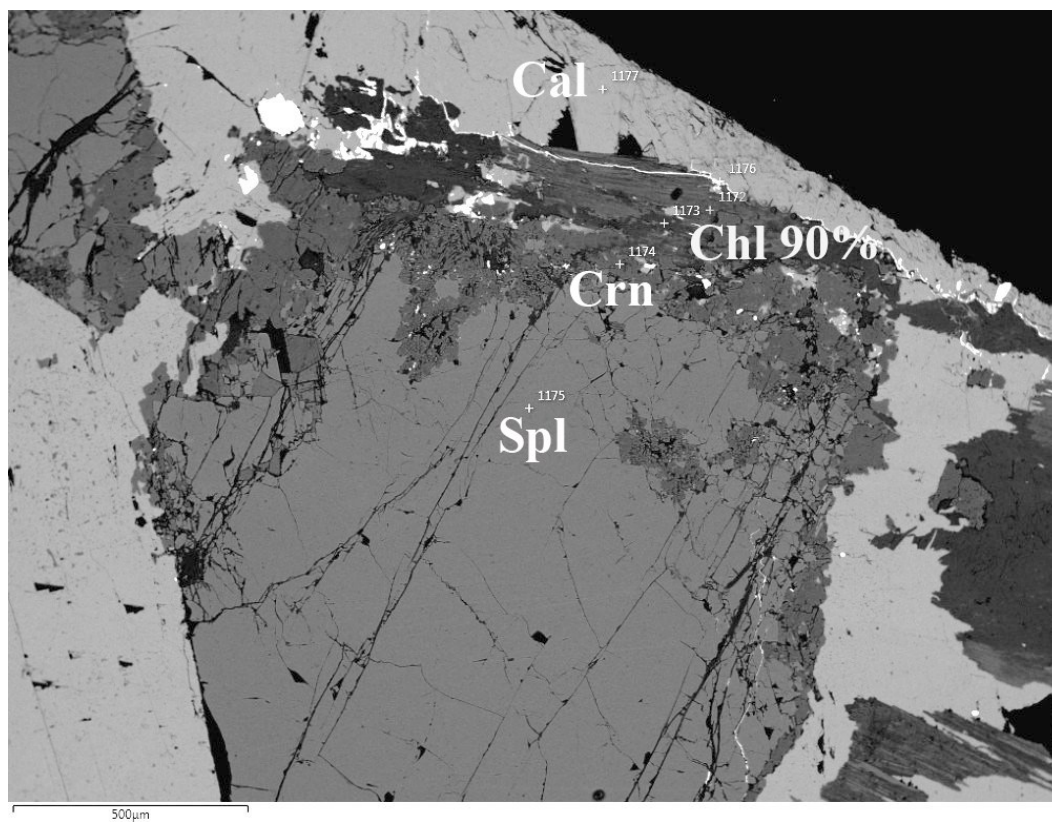


Рис. 3.12. BSE-изображение корунда (Crn), замещающего шпинель (Spl).

Другие минералы – кальцит (Cal) и хлорит (Chl)

## Глава 4. Особенности химического состава корундов

### Проверка гипотезы о связи цвета, морфологии и химического состава

Корунды были проанализированы на микроэлементный состав в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН в Черноголовке, Московская область, Россия. Использовался импульсный лазер с длиной волны 266 нм, энергией импульса 3,5 Дж, длительностью импульса 4 нс и частотой повторения импульсов 10 Гц, с диаметром пятна 100 мкм. Предметный столик перемещался со скоростью 20 мкм/с во время измерений, если размер образца позволял. Калибровка производилась с использованием стандартных образцов NIST SRM-610 ÷ SRM-616, а нормировка была выполнена по внутреннему стандарту. При необходимости измерение проводилось в два этапа: первый этап - очистка поверхности лазерным лучом, второй этап - анализ при сканировании лазера по уже очищенной поверхности. Для каждого образца было проведено несколько измерений, которые затем усреднялись (аналитиком - Хвостиков Владимир Анатольевич).

Основными микроэлементами, обнаруженными в корундах района Лук Йен, являются Ti, Fe, Cr, Ga, и V. Их минимальные, максимальные содержания (табл. 4.1),

Таблица 4.1. Минимальные и максимальные содержания микроэлементов

Элемент	Минимальное содержание, г/т	Максимальное содержание, г/т
Ti	62	3418
Fe	18	23890
Cr	9	9488
Ga	8	105
V	8,51	697

Для данной выборки были вычислены несколько статистических показателей, включая среднее значение, медиану, моду, выборочное среднеквадратичное отклонение, асимметрию и эксцесс (табл. 4.2). Выборочное среднеквадратичное отклонение было рассчитано по формуле  $s = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$ , где  $x$  – один результат анализа,  $\bar{x}$  – среднее содержание элемента в выборке,  $n$  – количество измерений, остальные величины были



вычислены с помощью стандартных функций MS Excel. Значения асимметрии положительны, это означает, что выборка имеет отклонение от нормального распределения. положительный эксцесс может говорить о более островершинном распределении относительно нормального, либо о серьёзном отклонении от нормального распределения.

Таблица 4.2. Статистические показатели для микроэлементов корундов района Лук Йен

Элемент	Среднее содержание	Стандартное отклонение	Медиана	Мода	Асимметрия	Эксцесс
Ti	480	714	150	137	0,5	4
Cr	1062	1569	491	302	0,5	11
Fe	453	519	230	58	0,8	3
V	57	84	36	19	0,5	41
Ga	32	21	28	21	0,5	2

Также была выполнена проверка распределения на нормальность по критерию Шапиро-Уилка. Значение  $p$  для титана, хрома и ванадия равны нулю, для железа этот показатель равен  $2,89 \cdot 10^{-15}$ , а для галлия –  $5,18 \cdot 10^{-10}$ . Для уровня значимости  $\alpha=0,05$  это распределение не удовлетворяет критерию нормальности.

При сопоставлении результатов анализа в таблицах 4.1 и данными по Вьетнаму из таблицы 1.1 можно заметить, что максимальное содержание титана оказывается выше, чем в приведенных анализах для Вьетнама примерно в 3 раза, ванадия – в 2 раза, железа – более чем в 20 раз. Такие концентрации железа характерны для образцов, развивающихся по высокожелезистой фиолетовой шпинели (Кукса и др., 2019). Если сопоставить анализы для корундов (32 анализа) и шпинелей (15 анализов) в образцах, где происходит замещение, то в координатах Fe-Cr получатся следующие поля составов (рис. 4.1)

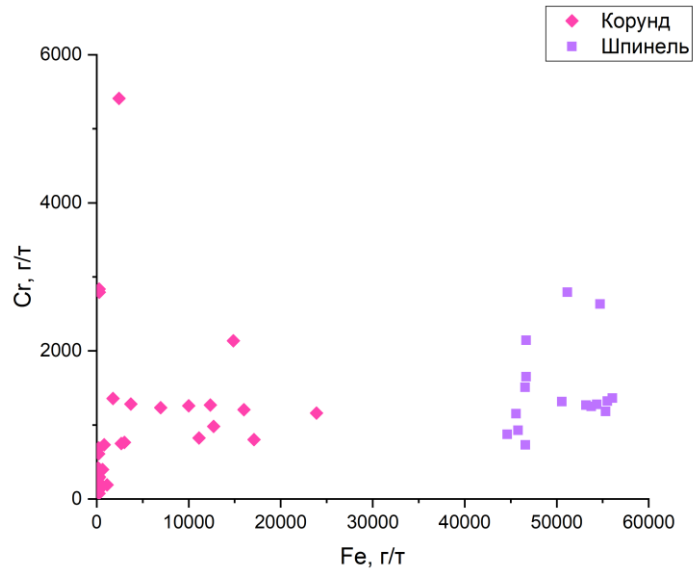


Рис. 4.1. Распределение железа и хрома в образцах корундов и шпинелей

Рубины с наибольшим содержанием хрома (9200-9500 г/т) приурочены к зонам тектонических деформаций в мраморах (рис. 2.3) вблизи дайки оливиновых микрогаббро. На графике Fe-Cr для 123 составов корундов (рис. 4.2) такие рубины также будут обособляться в отдельное поле составов (1), не характерное для мраморного типа месторождений (рис. 1.1), наряду с высокожелезистыми корундами (2).

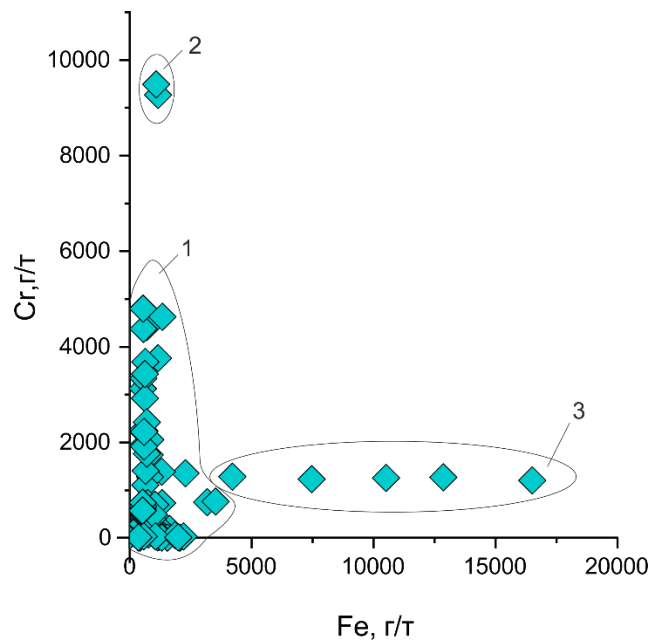


Рис. 4.2. Распределение железа и хрома в образцах корундов из месторождения Лук Йен (поле 1- обычные для мраморного типа корунды, 2 – высокохромистые рубины из зоны тектонических деформаций, 3 - высокожелезистые корунды, замещающие шпинель), остальные – типичные для мраморного типа месторождений корунды

Связь химического состава, морфологии и цвета рубинов и сапфиров, а также зональные кристаллы были исследованы Е.С. Сорокиной с соавторами (E. Sorokina et al., 2016) с применением онтогенетического подхода. Согласно их данным, состав микропримесей связан с развитием основной простой формы, что было продемонстрировано на рубинах из Африки и Юго-Восточной Азии, включая Лук Йен, и была выдвинута соответствующая гипотеза. В этой статье утверждается, что изменения скоростей роста граней, связанными с различными концентрациями железа и хрома в корундах разного цвета, влияют на габитус кристалла (рис. 4.3). Также присутствует утверждение, что железо и хром являются элементами, связанными с рТ- условиями роста кристаллов корунда.

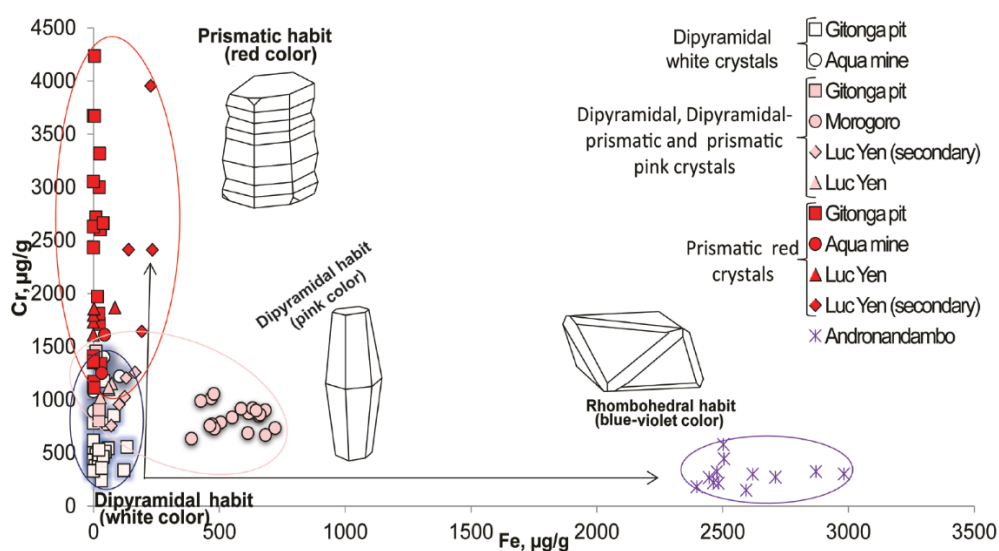


Рис. 4.3. График, показывающий корреляцию между формой кристаллов (и цветом) корунда из коренных и россыпных месторождений в Лук Йен во Вьетнаме, район Мандарин в Кении (карьер Гитонга на рубиновом руднике Джона Сола и Аквамарин) и район Морогоро в Танзании (E. S. Sorokina et al. 2016)

На выборке из 29 образцов корундов из района Лук Йен с явной морфологией была проверена эта гипотеза. Для каждого образца было сделано несколько анализов, их результаты представлены на рисунке 4.4. Корунды из оригинального исследования были разделены по генетическому признаку – треугольники соответствуют россыпным проявлениям, а ромбы – коренным. В рамках текущей работы такого разграничения сделано не было, так как и по морфологии, и по химическому составу кристаллы из аллювия не отличаются от таковых из коренных проявлений. Для 29 образцов было выделено 3 морфологических типа согласно особенностям габитуса кристалла –

призматический, дипирамидальный или тип скелетного кристалла. Результаты были разделены по цветам и нанесены на график (рис. 4.4).

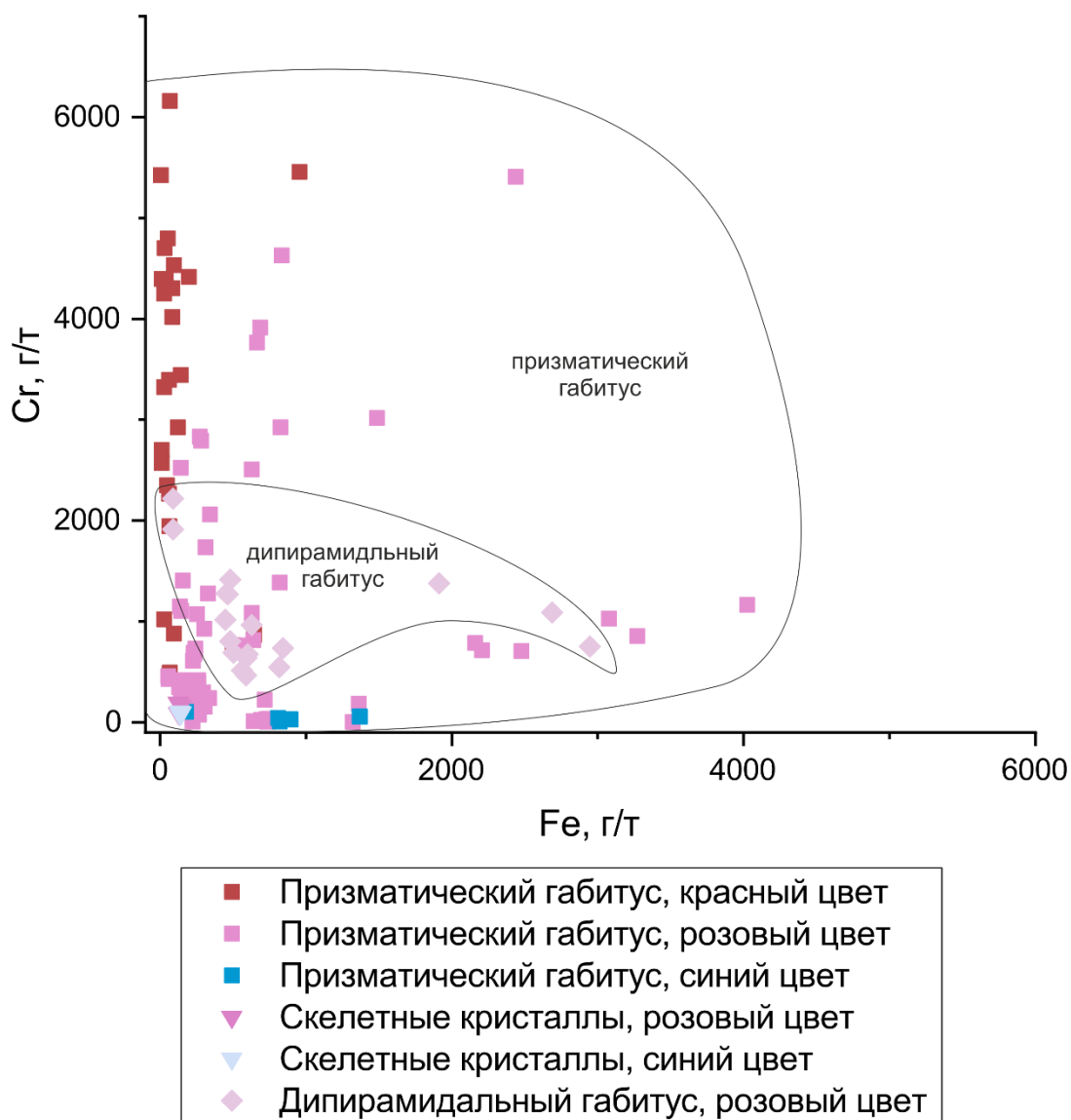


Рис. 4.4. График, показывающий отсутствие связи между составом и морфологией кристаллов корунда из выборки только из Лук Йена

Если данные Е.С. Сорокиной с соавторами формируют поля составов, для которых характерна определенная морфология, то на выборке только из Лук Йена составы, характерные на этом графике для дипирамид, характеризуют призматические кристаллы. Точки составов для кристаллов дипирамидального габитуса хаотически разбросаны между таковыми для призм, и не соответствуют полям Е.С. Сорокиной и соавторов по содержанию железа. Таким образом, гипотезу о связи габитуса и состава кристаллов корунда на выборке исключительно из Лук Йена подтвердить не удалось.

## Исследование зональных кристаллов

Были исследованы несколько зональных кристаллов корунда, чтобы установить различия в составе микропримесей в зависимости от цвета. Особый интерес вызвали вопросы, связанные с определением различий между синими зонами, предположительно являющимися центрами образования кристаллов корунда, и розовыми, а также возможность влияния галлия на процесс изменения цвета.

Анализ шайбы образца VM-23a (рис.4.5) показывает, что основную роль в процессе перехода от синих зон к розовым, и, в конечном итоге, к насыщенно-розовым (точка 7), играет снижение концентрации титана. Падение содержания железа и рост хрома при переходе к розовому цвету выражены менее резко. На графике Ga-Cr мы видим, что результаты анализов синих и розовых зон обособляются в два отдельных поля (рис. 4.5)

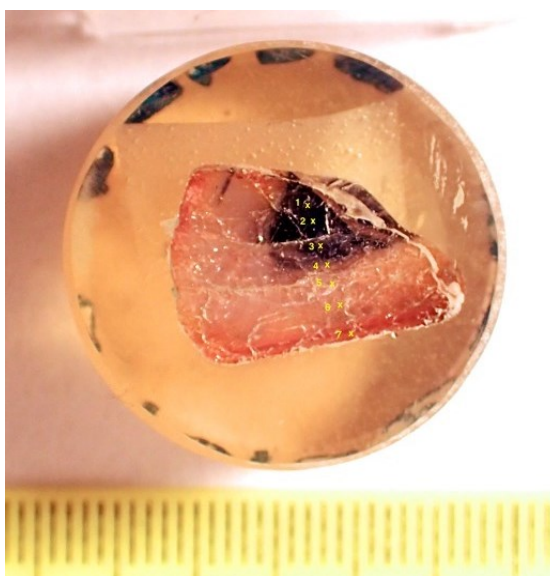
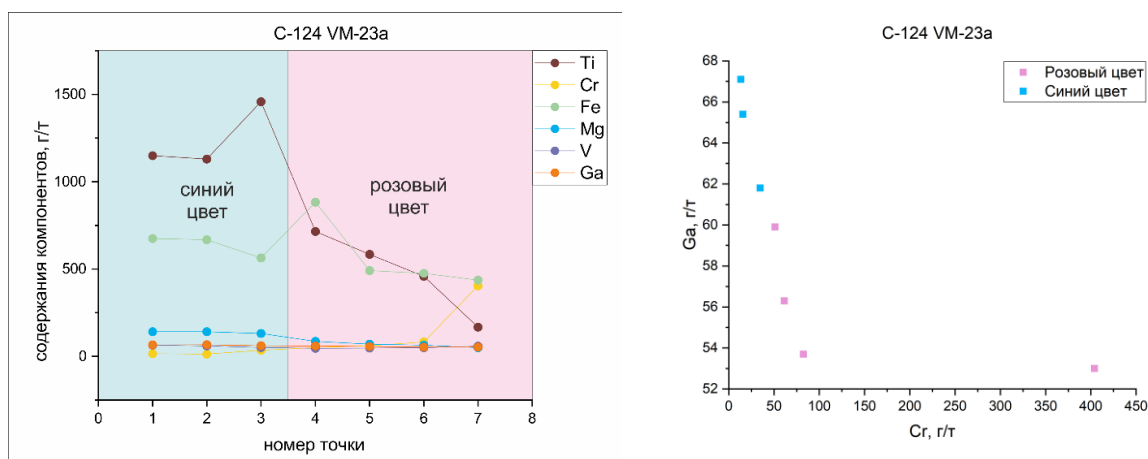


Рис. 4.5. Содержания основных микроэлементов в образце VM-23a, график Ga-Cr и фотография зонального кристалла

В образцах, не пропускающих свет, наблюдается схожая закономерность резкого изменения концентрации титана при переходе от розовых зон кристаллов и агрегатов к синим, однако, следует отметить, что в зоне синего цвета наблюдается резкое пикирующее снижение содержания титана в образце VM-23a (рис. 4.6). В связи с тем, что хрома на порядок меньше, чем железа, был построен график Ga-Cr, на котором так же отчётливо обособляются поля для синих и розовых зон.

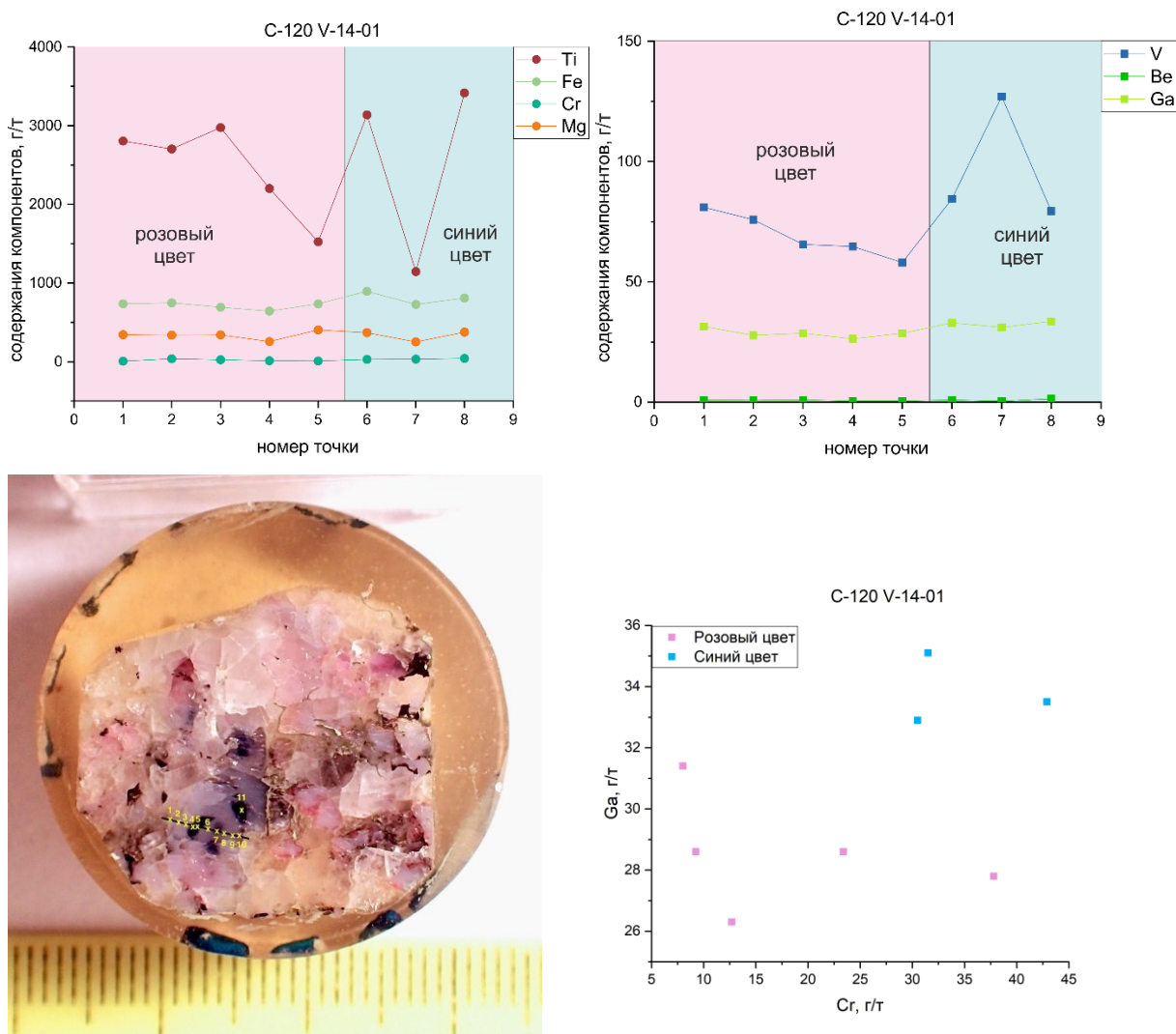


Рис. 4.6. Содержания основных микроэлементов в образце VM-23a, график Ga-Cr и фотография зонального агрегата

Однако, с содержанием хрома может наблюдаться и обратная ситуация: его может быть больше в синих зонах и меньше в розовых. В таком случае основным фактором, ответственным за изменение характера зональности, будет резкое падение содержания титана. Такая закономерность прослеживается в образце VM-23b (рис. 4.7). Также на этом примере наиболее отчётливо видна связь между содержанием галлия и цветом зоны.

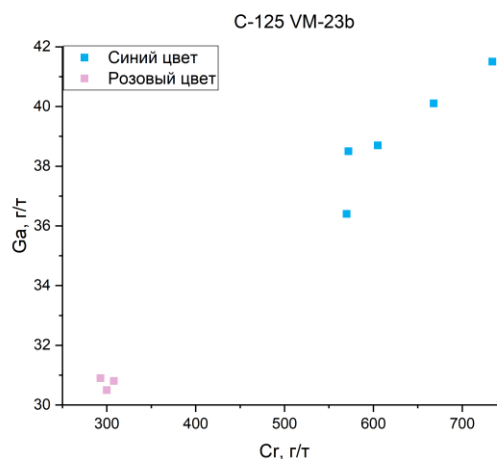
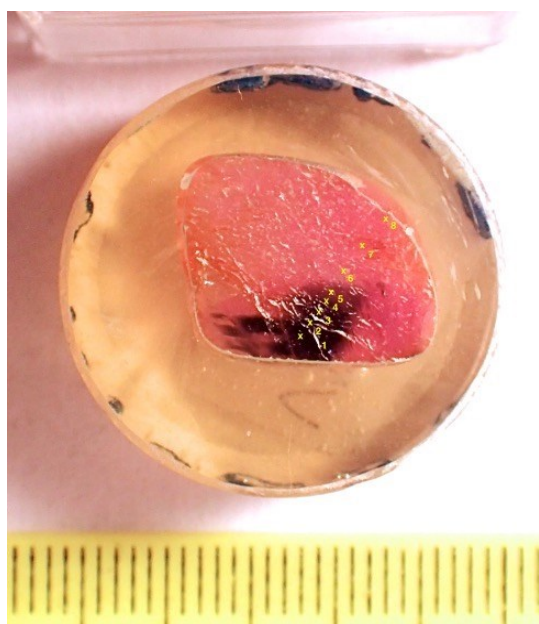
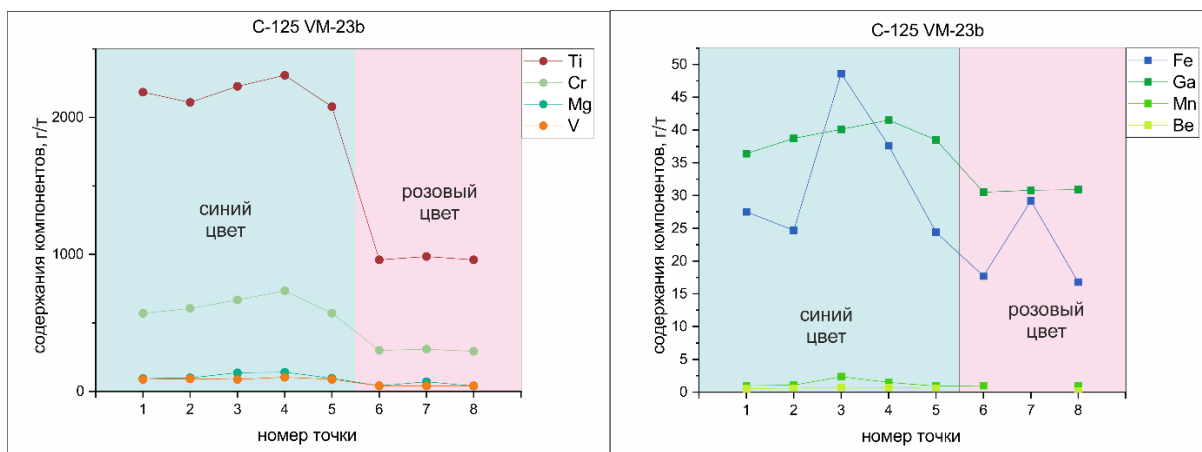


Рис. 4.7. Содержания основных микроэлементов в образце VM-23b, график Ga-Cr и фотография зонального кристалла

При анализе красных образцов наибольший интерес представляет исследование материала, заполняющего трещины, и возможное наличие различий в химическом составе между смежными с ним зонами и основной частью кристалла. На примере образца V-15-01 (рис. 4.8, кристалл, обведенный синим) видно, что зоны трещиноватости существенно обогащены магнием и часто беднее хромом (рис.4.9, кристалл выделен синим). Разница между содержанием хрома в самой обогащённой точке и самой обеднённой в 13 раз, магния – в 877 раз. При этом если проанализировать кристалл схожего цвета, но менее трещиноватый (кристалл, выделенный на фото 4.10 белым), то флуктуации содержания магния будут на уровне 34,6-158 г/т, хрома – 3800-4703 г/т (таблица 4.3), то есть, различия в микроэлементном составе будут незначительными при сравнении анализов.

Также интерес представляет образец из нового проявления V-39-02 (рис. 4.10, обведенный оранжевым). Усреднение трёх анализов даёт среднее содержание магния в 4924 г/т, титана в 387 г/т, ванадия в 136 г/т, хрома в 3115 г/т, железа в 713 г/т и галия в 92 г/т. Эти значения входят в диапазон из таблицы 3.3, по сравнению со средними величинами заметно повышенное содержание хрома и галия.

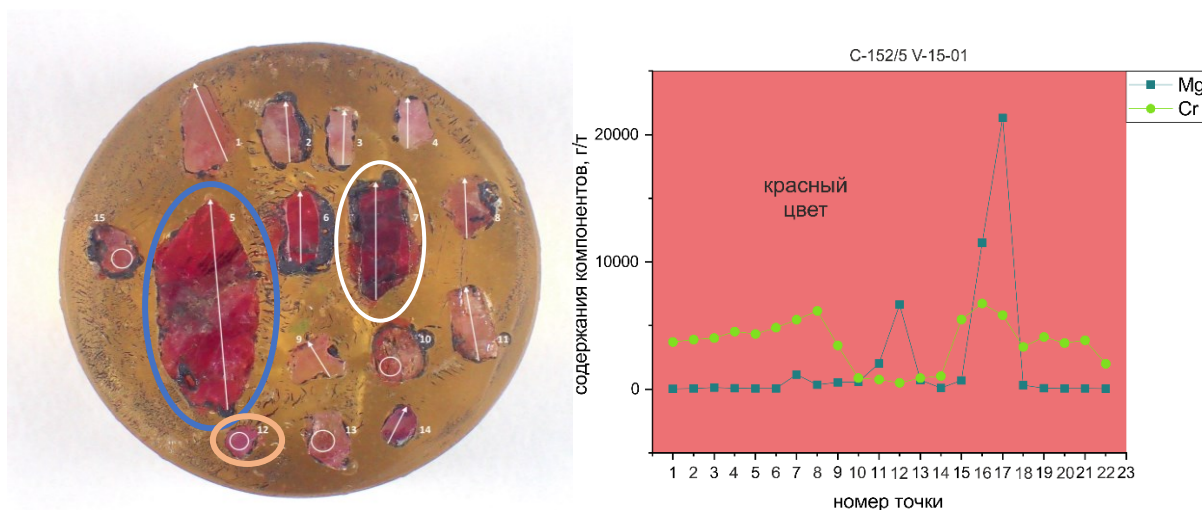


Рис. 4.10. Фотография трещиноватого образца V-15-01 (обведен синим), V-21-05 (обведён белым) и образца V-39-02 из нового проявления (обведен оранжевым) (диаметр шайбы=25 мм) и содержание Mg и Cr в образце V-15-01.

Таблица 4.3. Таблица содержаний основных микроэлементов в кристалле V-21-05 по профилю

Номер точки	Элемент, г/т					
	Mg	Ti	V	Cr	Fe	Ga
1	50,1	138	276	4412	<10	22
2	36,2	85,8	217	3800	<10	24,2
3	69,5	175	304	4305	82,2	22,2
4	81,2	535	527	5424	4,58	24,4
5	158	430	307	4703	30,9	26,1
6	39,5	135	243	3397	61,2	22,5
7	34,6	132	241	4341	<10	23,7
8	39,8	195	256	4173	<10	23,9
9	43,2	137	247	4396	11,7	23,0
10	44,7	140	270	4252	28,3	22,8



11	37,2	134	250	4393	37,9	22,8
12	65,3	206	259	4534	94	22,4

Таким образом, титан является основным элементом, который влияет на изменение характера роста кристаллов и вызывает смену цвета во всех 6 исследованных образцах. Это может быть связано со сменой состава питающих растворов в процессе метасоматической реакции. Также следует отметить, что помимо титана, хром и железо также являются важными элементами хромофорами, которые влияют на цвет кристаллов корунда. Так, хром является основным элементом, придающим насыщенный розовый и красный цвет прозрачным и непрозрачным кристаллам. В зональных кристаллах была обнаружена связь между содержанием галлия и цветом зоны, по-видимому, тоже связанная с изменением характера питающей среды во время роста. В зонах трещиноватости красных кристаллов повышение содержания магния можно объяснить их заполнением карбонатным материалом, который также вызывает вынос хрома в случае интенсивного заполнения.

## Выводы

В результате изучения морфологии и особенностей химического состава корундов был предложен их новый генетический тип – замещение шпинели корундом, исследованы его химические особенности и сняты BSE изображения.

Изучение представительной коллекции корундов из различных коренных мраморов и аллювиальных отложений района Лук Йен в северном Вьетнаме показало, что наиболее типичные простые формы минерала – гексагональная призма и гексагональная дипирамида, часто со второстепенными гранями ромбоэдра. Также были обнаружены скелетные кристаллы, и, соответственно, выделены три морфологических типа – призматический, дипирамидальный и скелетного кристалла.

Основными примесными элементами в корунде являются Fe, Ti и Cr, в подчиненных количествах присутствуют, Ga и Zn. При этом нами были обнаружены разновидности с повышенными концентрациями хрома (9200-9500 г/т) и железа (5000-17000 г/т), не характерные для мраморного типа месторождений. Высокохромистые рубины приурочены к зонам тектонических деформаций в мраморах вблизи контакта с оливиновым микрогаббро, а корунды с повышенными концентрациями Fe развиваются за счет замещения высокожелезистой шпинели. Взаимосвязь формы и химического состава хорошо огранённых кристаллов на выборке из 29 корундов с явной морфологией выявить не удалось. Более того, результаты наших исследований не подтверждают выводы, сделанные ранее при исследовании корундов месторождения, о преобладании среди красных рубинов призматических кристаллов, а среди розовых кристаллов – дипирамидальных форм.

Были выявлены закономерности распределения микроэлементов в зональных кристаллах корундов. Изменение цвета в кристаллах корунда с розовыми и синими зонами прежде всего связано с резкими (на 800-1000 г/т) колебаниями содержания титана, несколько второстепенную роль играют железо и хром, однако последний не всегда напрямую связан с ростовой зональностью, а скорее подчинён уже упомянутым колебаниям микросодержаний титана. В красных кристаллах обнаружены трещины, заполненные материалом с повышенным содержанием магния (8000-20000 г/т), что позволяет сделать вывод об их заполнении карбонатным материалом с одновременным выносом хрома в этих зонах. Также содержания галлия, по-видимому, связаны с изменением ростовой зональности, но причина этих изменений не очень ясна.

Образцы из нового проявления корунда не отличаются от других ни по морфологии, ни по химическому составу, так как попадают в диапазон содержания микроэлементов в рамках данного исследования. Содержания хрома и галия, однако, выше, чем средние значения для этих микроэлементов.

Таким образом, цель выпускной квалификационной работы была выполнена. Обзор литературы помог связать особенности распределения микроэлементов с типом месторождения корундов и выявить аномальные поля составов, которым до этого уделялось мало внимания. Реакционные отношения между корундом и шпинелью были исследованы с помощью нескольких точных методов анализа. Также удалось проследить изменения полей составов по профилям зональных кристаллов и сделать выводы о возможных причинах таких изменений.

В будущем хотелось бы продолжить анализировать данные образцы, особенно включения и характер зональности с помощью рамановской спектроскопии.

## Список литературы

1. Алексеев В. И. и Марин, Ю. Б. 2012. Структурно-химическая неоднородность природных кристаллов и микрогеохимическое направление в онтогении минералов. Записки Российского Минералогического Общества, 141(1), 3–21.
  2. Барнов Н.Г и Е.П. Мельников. 2015. “Генетические Типы Благородных Корундов.” Горный информационно-аналитический бюллетень: 79–85.
  3. Григорьев Д. П. Онтогения минералов. Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961. 284 с.
  4. Кукса, К.А. и др. 2019. Минералогия, Геохимия и Вопросы Генезиса Благородной Шпинели Месторождения Лук Йен, Вьетнам. Минералогия 5(3): 56–69.
  5. Марин Ю. Б. Рациональное использование минералогических критериев при оценке редкометальной рудоносности гранитоидных массивов / Минералогические критерии оценки рудоносности. Л.:Наука, 1981. С. 63-72.
  5. Юшкин Н. П. Теория и методы минералогии (избранные проблемы). Л.: Наука, 1977. 291 с
  6. Chauviré, Boris et al. 2015. “Blue Spinel from the Luc Yen District of Vietnam.” *Gems & Gemology* 51(1): 2–17.
- Donnovan, Deanna. 1997. *Development Trends in Vietnam’s Northern Mountain Region: Case Studies and Lessons from Asia*. Stockholm: National Political Publishing House.
- Garnier, Virginie, Gaston Giuliani, Henri Maluski, and Daniel Ohnenstetter. 2002. “Ar – Ar Ages in Phlogopites from Marble-Hosted Ruby Deposits in Northern Vietnam : Evidence for Cenozoic Ruby Formation.” *Chemical geology* 188: 33–49.
- Giuliani, Gaston et al. 2020. “Ruby Deposits : A Review and Geological Classification.” *Minerals* 10(597): 1–83.
- Huong, Le Thi-thu et al. 2012. “Gemstones from Vietnam: An Update.” *Gems & Gemology*: 158–76.
- Van Long, Pham et al. 2004. “Marble-Hosted Ruby from Vietnam.” *Canadian Gemmologist* 25(3): 83–96.
- Van Long, Pham, Vincent Pardieu, and Gaston Giuliani. 2013. “Update on Gemstone Mining in Luc Yen, Vietnam.” *Gems and Gemology* 49(4): 233–45.
- Quang Vinh, Hoang et al. 1999. “Origin of Ruby Formation in Yen Bai Province.” *Tap chi*

*Dia Chat, Series B* 13–14: 118–23.

- Simonet, Cédric, Emmanuel Fritsch, and Bernard Lasnier. 2008. “A Classification of Gem Corundum Deposits Aimed towards Gem Exploration.” *Ore Geology Reviews* 34(1–2): 127–33.
- Sorokina, Elena et al. 2016. “Morphological and Chemical Evolution of Corundum (Ruby and Sapphire): Crystal Ontogeny Reconstructed by EMPA, LA-ICP-MS, and Cr<sup>3+</sup> Raman Mapping.” *American mineralogist* 101: 2716–22.
- Sorokina, Elena S. et al. 2016. “Morphological and Chemical Evolution of Corundum (Ruby and Sapphire): Crystal Ontogeny Reconstructed by EMPA, LA-ICP-MS, and Cr<sup>3+</sup> Raman Mapping.” *American Mineralogist* 101(12): 2716–22.
- Sutthirat, Chakkaphan, Pisutha-Arnond Visut, Lapngamchana Sarawut, and Ngoc Khoi Nguyen. 2008. “Petrography and Some Mineral Chemistry of Gem-Bearing Marble from Luc Petrography and Some Mineral Chemistry of Gem-Bearing Marble from Luc Yen Gem Deposit , Northern Vietnam.” In *International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes*, , 283–88.
- Алексеев, В.И., and Ю.Б. Марин. 2012. “Структурно-Химическая Неоднородность Природных Кристаллов и Микрогеохимическое Направление в Онтогении Минералов.” *Записки российского минералогического общества* 141(1): 3–21.
- Барнов, Н.Г., and Е.П. Мельников. 2015. “Генетические Типы Благородных Корундов.” *Горный информационно-аналитический бюллетень*: 79–85.
- Кукса, К.А. et al. 2019. “Минералогия, Геохимия и Вопросы Генезиса Благородной Шпинели Месторождения Лук Йен, Вьетнам.” *Минералогия* 5(3): 56–69.

## Приложение

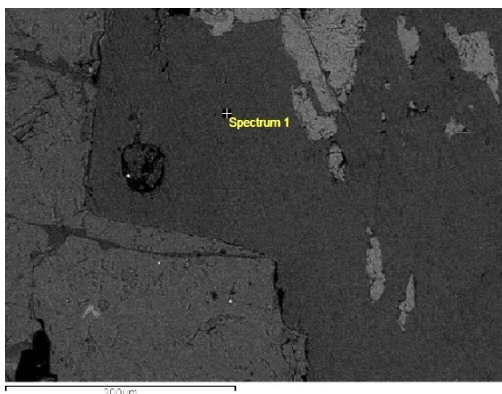
### Результаты рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа

#### Название спектра

Хлорит

#### Электронное изображение

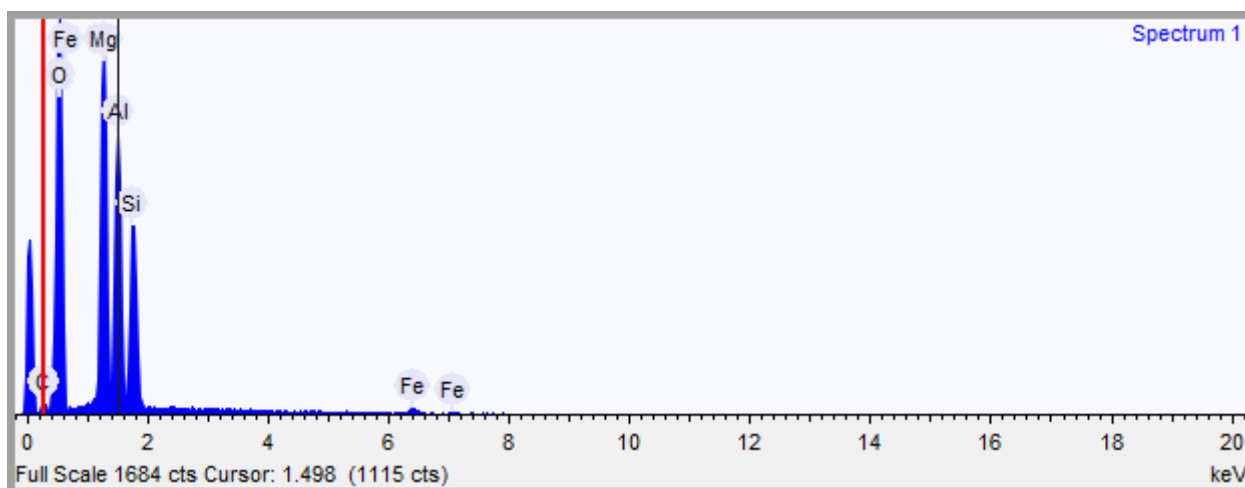
Ширина изображения: 663.2 нм



#### Условия сбора данных

Время сбора данных (с) 15.0

Ускоряющее напряжение (кВ) 15.0



#### Настройки количественной оценки

Метод оценки	Стехиометрия (нормализованная)
Форма выдачи результата	Оксиды
Количество анионов	2.0
Элемент покрытия	Углерод

## Результат

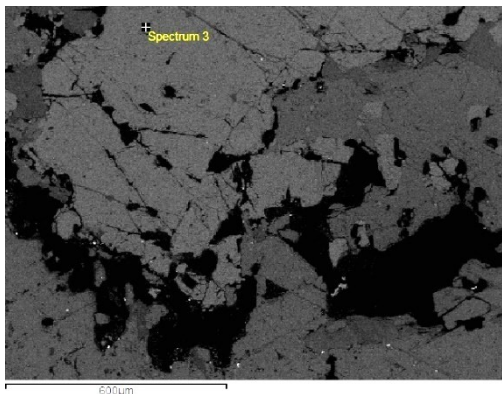
Элемент	Мас. %	Мас. % $\sigma$	Атом %	Мас.% в оксиде.	Формула оксида
Магний	19.981	0.288	16.783	33.130	MgO
Алюминий	17.622	0.302	13.337	33.296	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Кремний	14.510	0.288	10.550	31.040	SiO <sub>2</sub>
Железо	1.969	0.263	0.720	2.534	FeO
Кислород	45.918	0.404	58.609		

## Название спектра

Шпинель высокожелезистая

## Электронное изображение

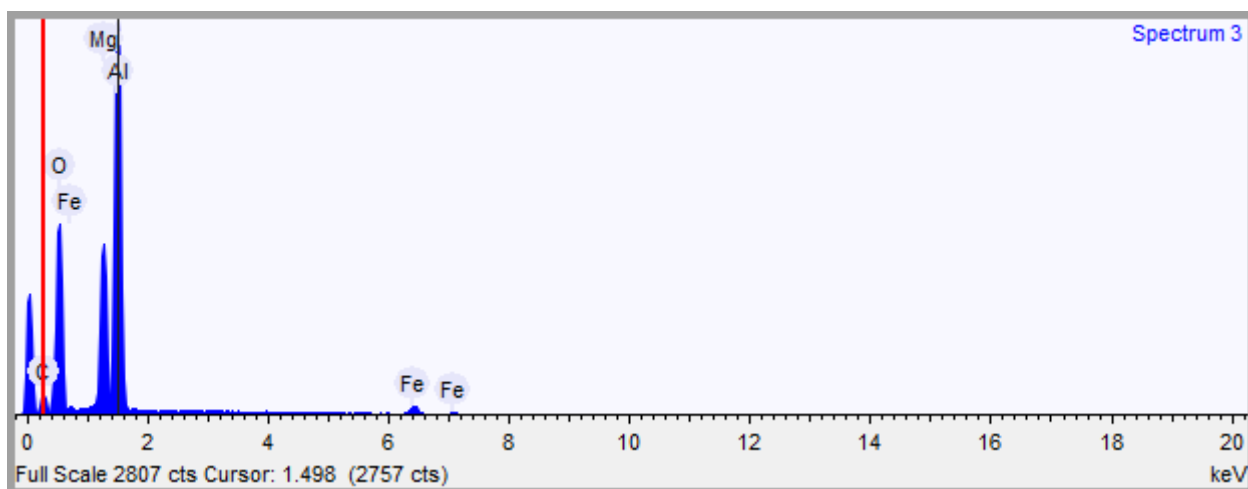
Ширина изображения: 1.382 mm



## Условия сбора данных

Время сбора данных (с) 15.0

Ускоряющее напряжение (кВ) 15.0



## Настройки количественной оценки

Метод оценки	Стехиометрия (нормализованная)
Форма выдачи результата	Оксиды
Количество анионов	2.0
Элемент покрытия	Углерод



## Результат

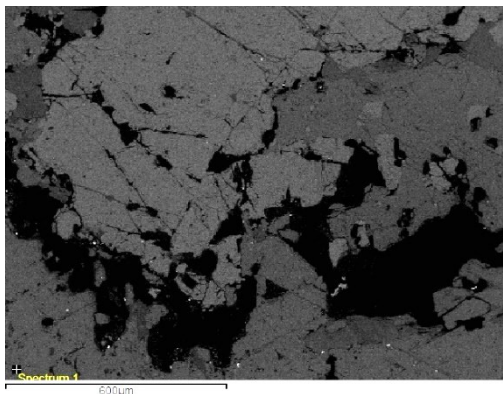
Element	Мас. %	Мас. % σ	Атом %	Мас.% в оксиде.	Формула оксида
Магний	14.148	0.247	12.145	23.458	MgO
Алюминий	37.367	0.337	28.904	70.603	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Железо	4.617	0.317	1.725	5.939	FeO
Кислород	43.868	0.360	57.226		

## Название спектра

Корунд

## Электронное изображение

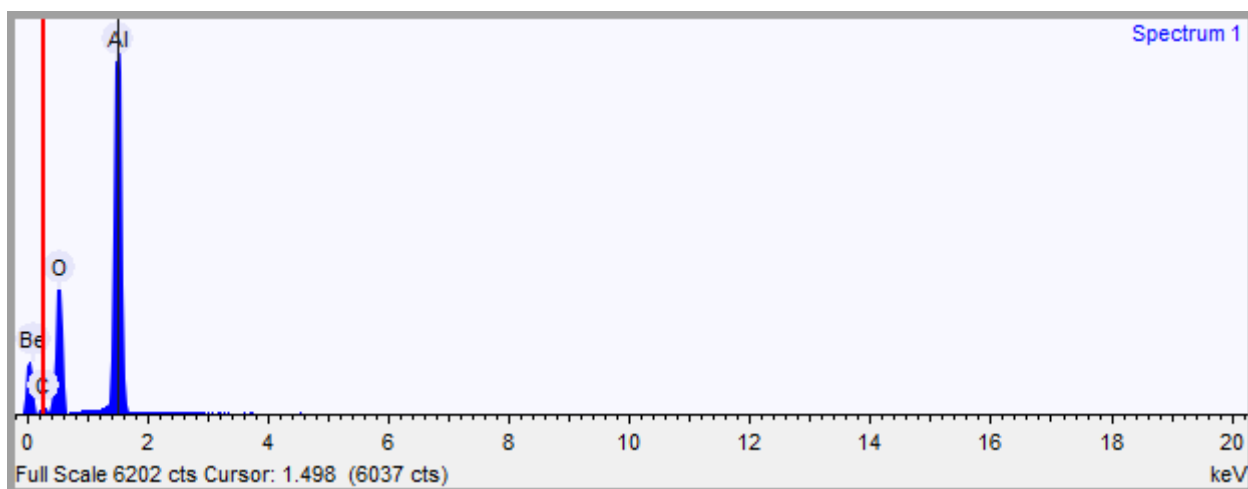
Ширина изображения: 1.382 mm



## Условия сбора данных

Время сбора данных (с) 15.0

Ускоряющее напряжение (кВ) 15.0



## Настройки количественной оценки

Метод оценки	Стехиометрия (нормализованная)
Форма выдачи результата	Оксиды
Количество анионов	2.0
Элемент покрытия	Углерод

## Результат

Element	Мас. %	Мас. % σ	Атом %	Мас.% в оксиде.	Формула оксида
Алюминий	52.926	0.241	40.000	100.000	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Кислород	47.074	0.241	60.000		

