

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

Климачева Мария Евгеньевна

**Амфиболы в мраморах месторождения рубинов и благородной шпинели Лук Йен,
северный Вьетнам**

Выпускная квалификационная работа по направлению 05.03.01 «Геология»
Уровень бакалавриат

Научный руководитель:
профессор кафедры минералогии,
доктор геолого-минералогических наук
Брусницын Алексей Ильич

Санкт-Петербург
2020

Содержание

Аннотация	3
Аббревиатуры минералов	4
Введение	5
Материалы и методы исследования	8
Благодарности	12
Глава 1. Общая информация о месторождении Лук Йен	13
1.1. Физико-географический очерк	13
1.2. История открытия и разработки	13
1.3. Региональное геологическое положение	14
1.4. Геологическое строение месторождения Лук Йен	15
Глава 2. Минералогическая и петрографическая хар-тики мраморов месторождения	18
2.1. Минеральный состав	18
2.2. Геммологические группы мраморов	20
2.2.1 Геммологическая группа 3/1	21
2.2.2 Геммологическая группа 3/2	24
2.2.3 Геммологическая группа 4/2	28
2.2.4 Геммологическая группа 6/2	31
2.2.5 Геммологическая группа 6/4	34
Глава 3. Характеристика амфиболов	37
3.1. Общие сведения об амфиболах	37
3.2. Амфиболы месторождения Лук Йен	40
3.2.1 Амфиболы шпинель-содержащих мраморов	41
3.2.2 Амфиболы корунд-содержащих мраморов	42
3.3. Химический состав амфиболов	43
Глава 4. Генезис корунд- и шпинель-содержащих мраморов месторождения	52
4.1. Парагенетический анализ	52
Глава 5. Обсуждение результатов	56
5.1. Дискуссия	56
5.2. Поисковый признак	58
Заключение	60
Список литературы	62
Приложение	65

Аннотация

В данной работе представлены результаты исследования морфологических и петрографических особенностей, а также химического состава амфиболов месторождения Лук Йен, северный Вьетнам. Выделено три морфологических разновидности амфиболов, ассоциирующих с рубинами и шпинелью. При помощи рентгеноспектрального микроанализа было впервые установлено, что по химическому составу амфиболы из шпинелевого и корундового парагенезисов образуют неперекрывающиеся группы: со шпинелью ассоциирует паргасит, магнезиогорнблендит и тремолит, тогда как с корундом – саданагаит. Результаты парагенетического анализа показали, что изменения соотношения инертных компонентов в породе при переходе от шпинелевых к корунд-содержащим парагенезисам не происходит, а сам переход обусловлен смещением равновесий обменных реакций между карбонатами (кальцитом, доломитом), корундом, шпинелью, паргаситом и саданагаитом. Установленные различия в химическом составе амфиболов могут быть использованы для оценки потенциальной рубино- и шпинеленосности мраморов соседних районов.

Abstract

The paper presents the results of studies of morphological and petrographic features, as well as chemical composition of amphiboles, associated with ruby and spinel at Luc Yen deposit. Three morphological varieties of amphiboles were distinguished. The results of X-Ray microanalysis show that amphiboles are divided into to non-overlapping groups according to their chemical composition: in ruby paragenesis there is sadanagaite, whereas in spinel paragenesis there are pargasite, magnesio-hornblende and tremolite. The paragenetic analysis allows us to see the interconnection between minerals from spinel- and ruby-bearing paragenesis. And also it allows us to describe the reasons that may cause a shift in equilibrium between paragenesis. Established differences in amphibole chemical composition can be applied to assess the presence of ruby and spinel in potentially barren marbles of adjacent areas.

Аббревиатуры минералов

Аббревиатуры минералов, упоминающихся в работе, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Аббревиатуры минералов

Актинолит	Act
Альбит	Ab
Анортит	An
Апатит	Ap
Графит	Gr
Гумит	Gm**
Диопсид	Di
Доломит	Dol
Кальцит	Ca
Клинохлор	Clc
Корунд	Crn
Магнезиальная роговая обманка (магнезиогорнблендит)	Mg- Hb**
Паргасит	Prg
Пентландит	Pn
Пирит	Py
Пирротин	Po
Рутил	Rt
Саданагаит	Sad**
Скаполит	Sc**
Сфен (титанит)	Ttn
Тремолит	Tr
Турмалин	Tur
Уранинит	Ut**
Флогопит	Phl
Флюорит	Fl
Форстерит	Fo
Халькопирит	Ccp
Хондродит	Chn
Циркон	Zrn
Цирконолит	Zlt**
Чермакит	Ts**
Шпинель	Spl
Эденит	Ed
Эпидот	Ep

Согласно Whitney, Evans, 2010. American Mineralogist, Volume 95, pages 185–187, 2010

Abbreviations for names of rock-forming minerals/; ** - название в рамках данной работы.

Введение

Данная работа посвящена изучению амфиболов месторождения Лук Йен (ориг. Luc Yen), которое находится на севере Вьетнама. Это месторождение знаменито благодаря рубинам и благородной шпинели ювелирного качества, которые добываются из мраморов и развитых в окрестностях россыпных залежей с конца 70-х годов прошлого века. Месторождение является основным источником рубинов и шпинели, и, в особенности, синей кобальтовой шпинели, которые в большом количестве поступают отсюда на мировой ювелирный рынок.

Мрамора месторождения сложены преимущественно кальцитом и доломитом (70-99%) и содержат ограниченный набор других минеральных фаз. В виде второстепенных и акцессорных фаз встречаются форстерит, клиногумит, флогопит, сульфидные минералы (пирит, пирротин, халькопирит) и амфиболы. Амфибол ассоциирует как с рубинами, так и разноокрашенными разновидностями шпинели.

Месторождение Лук Йен расположено в северном Вьетнаме. Существует несколько мнений касательно происхождения камнесамоцветной минерализации в мраморах месторождения Лук Йен. Одни исследователи связывают их генезис с процессами скарнирования палеозойских мраморов (Киевленко, 2001). Другие полагают, что возникновение камнесамоцветной минерализации произошло в результате регионального метаморфизма специфических по составу лагунных карбонатных отложений (Garnier et al., 2005).

Согласно второй версии, шпинель-содержащие мрамора образовывались в условиях амфиболитовой фации метаморфизма ($T = 610$ до 790 °C и $P \sim 6$ кбар) на ее прогрессивной стадии (Garnier et al., 2008). Датирование единичных зерен цирконов, находящихся в виде включений в шпинели из вьетнамских мраморов, показало, что возраст ее формирования составляет ~ 235 млн. лет (Garnier et al., 2008). В то же время изучение флюидных включений и датировки рубинов свидетельствуют о том, что минерал образовался в результате ретроградного

метаморфизма ($620 < T < 670$ °C и $2.6 < P < 3.3$ кбар) в районе 15-20 млн. лет назад (Garnier et al., 2008).

Амфибол остается одним из наименее изученных минералов мраморов месторождения. В настоящее время имеются лишь отрывочные сведения о химическом составе амфибола – 2 микрозондовых анализа в работе (Garnier et al., 2008), показывающие, что амфибол является фторсодержащим эденитом, а также 4 микрозондовых анализа амфиболов, которые позволяют классифицировать амфиболы как магнезиогорнблендит (магнезиальную роговую обманку) и паргасит, приводится в работе Гарньер с коллегами (Garnier et al., 2005). Вопросы морфологии и генезиса амфиболов минеральной ассоциации месторождения ранее никем не рассматривались.

Известно, что наряду с корундом (рубином) и шпинелью, амфибол используется, как полудрагоценный камень для изготовления кабашонов. При продаже все эти амфиболы называются паргаситами, что оказалось не совсем верным в ходе данного исследования.

Многочисленные работы французских, итальянских, тайских и вьетнамских исследователей были посвящены минералогии (Giuliani et al., 2003; Giuliani et al., 2015), геохимии (Falic et al., 2019; Garnier et al., 2002; Garnier et al., 2005) и геологии (Garnier et al., 2008), и генезису мраморов месторождения и камнесамоцветной минерализации в них. При этом наибольшее внимание было уделено непосредственно рубинами и шпинели, тогда как вопросы химизма и условий образования других минералов остались практически не затронуты. Амфибол остается одним из наименее изученных минералов мраморов месторождения. В настоящее время имеются лишь отрывочные сведения о его химическом составе в нескольких работах (Garnier et al., 2005; 2008), а вопросы морфологии и генезиса вообще ранее никем не рассматривались.

В этой связи становится очевидной актуальность данной исследовательской работы, целью которой является изучение химического

состава и морфологических особенностей амфиболов, сопутствующих корундам и разноокрашенной благородной шпинели.

Для достижения этих целей был поставлен ряд задач:

1. Дать минералогическое и петрографическое описание амфиболов и вмещающих их мраморов, с целью выделения морфологических разновидностей амфиболов, ассоциирующих с корундом (рубином) и шпинелью,
2. Провести рентгеноспектральный микроанализ кристаллов амфиболов месторождения, для оценки вариаций их химического состава,
3. Осуществить подбор изоморфных схем для описания состава диагностированных амфиболов,
4. Провести парагенетический анализ для выявления взаимосвязи между минералами шпинелевого и корундового парагенезисов,
5. Найти признак, который позволил бы оценивать потенциальную рубино- и шпинеленосность мраморного массива на основе особенностей химического состава амфиболов.

Материалы и методы исследования

В работе был использован каменный материал и фотографии, любезно предоставленные президентом ООО «СОКОЛОВ» Павлом Борисовичем Соколовым. Автором были изучены и описано 32 образца амфиболсодержащих мраморов месторождения Лук Йен, выполнено их петрографическое описание (96 шлифов), выделены геммологические группы образцов, содержащие различные морфологические и цветовые разновидности амфиболов (в ассоциации со шпинелью и рубинами); обработаны данные химического анализа минерала с применением методов статистического анализа и использованием современного программного обеспечения Microsoft Excel, Statistica.

Образцы амфиболов отобраны из 3 районов в пределах месторождения Лук Йен, где ведется добыча камнесамоцветного сырья: Конг Чой, Ван Хоа, Бай Сон (Рисунок 1, Таблица 2).

Таблица 2 – Список точек отбора образцов мраморов с амфиболом на месторождении Лук Йен и их координаты

Место отбора	Точка отбора	Специализация	N	E
V-1	Cong Throi	Мрамор с лиловой шпинелью и светло-зеленым амфиболом (3/1), мрамор с красной шпинелью и ярко-зеленым амфиболом (3/2)	22°2'1"	104°48'45"
V-11	Cong Throi	Мрамор с лиловой шпинелью и светло-зеленым амфиболом (3/1), мрамор с красной шпинелью и ярко-зеленым амфиболом (3/2)	22°2'2"	104°48'38"
V-12	Cong Throi 2	Мрамор с лиловой шпинелью и светло-зеленым амфиболом (3/1), мрамор с красной шпинелью и ярко-зеленым амфиболом (3/2)	22°2'1"	104°48'38"

Продолжение Таблицы 2

Место отбора	Точка отбора	Специализация	N	E
V-8	Van Khoa quarry №2, An Phu area	Мрамор с малиновым рубином и зеленым амфиболом (в виде тонких прожилков) (6/2)	21°58'45"	104°51'12"
V-10	Bai Son	Мрамор с полихромным рубином и зеленым амфиболом (6/2)	21°59'54"	104°49'13"
VM	Образцы приобретены на местном рынке	Мрамор с синей шпинелью и серо-зеленым амфиболом (4/2)	-	-



Рисунок 1 - Схема точек отбора образцов мраморов на месторождении Лук Йен

Минералогические исследования и фотодокументация кристаллов амфиболов производилась с помощью двух фотоаппаратов: Nikon D800E (объектив 25-70, светосила 1/2,8) и Olympus TOUGH (объектив 4,5-180, светосила 1/2 – 4,9).

Для визуально-оптических методов исследования были использованы петрографические шлифы стандартной толщины 0,03 мм для каждого образца. Описание шлифов выполнялось в РЦ “Геомодель” СПбГУ на оптическом поляризационном микроскопе Leica DM4500 P, оснащенный цифровой камерой Leica DFC 495 при увеличении x200 и x400.

В ходе исследований состава зерен амфиболов использовался метод электронной микроскопии. Анализ химического состава амфиболов был

выполнен на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съёмка проводилась в РЦ «Геомодель», СПбГУ при следующих условиях: 20кВ ускоряющее напряжение, 1 нА ток зонда, 20 сек. экспозиция, измерения проводились в точечном режиме, локальность анализа определяется физическими размерами области генерации рентгеновского излучения и составляет для данных характеристик полусферу диаметром примерно 4 мкм.

Всего было выполнено 109 анализов амфиболов из различных геммологических групп образцов с пределом обнаружения по каждому элементу 0.01-0.02 мас. %, содержание кислорода и ОН-группы рассчитывалось по балансу зарядов. Расчет кристаллохимических формул производился по следующему алгоритму (Leake et al., 1997):

1. перевод содержаний элементов из весовых процентов в атомные количества путем деления весовых процентов на молекулярную массу,
2. получение формульных количеств атомов элементов по сумме зарядов анионов: путем умножения атомных количеств на нормировочный коэффициент, равный частному 46 и суммы зарядов катионов,
3. сумма катионов в позиции Т заполняется до 8.00 сначала Si, затем Al, а затем Ti^{4+} ,
4. сумма катионов в позиции С заполняется до 5.00 сначала Al или Ti, которые остались после заполнения позиции Т. Затем последовательным добавлением Zr, Cr^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} , Mg, Fe^{2+} , Mn^{2+} и Li,
5. сумма катионов в позиции В приводится к 2.00 путем добавления оставшихся после заполнения позиции С катионов Mg, Fe^{2+} , Mn^{2+} и Li, затем Ca, и в последнюю очередь - Na.

Избыточный Na размещался в позиции А, куда затем добавлялся весь К.
Число катионов в позиции А должно находиться в интервале от 0.00 до 1.00.

Благодарности

Выражаю глубокую и искреннюю благодарность своему научному руководителю д-ру геол.-минерал. наук, профессору кафедры минералогии СПбГУ Брусницыну Алексею Ильичу за чуткое наставничество и ценные советы при планировании исследования. Также хочу поблагодарить президента ООО «СОКОЛОВ» Соколова Павла Борисовича за любезно предоставленные материалы и интересную тему для исследований, а также за поддержку в ходе работы и консультации. Благодарю Кукса Катерину Александровну, мл. науч. сотр. кафедры геоморфологии СПбГУ за постоянную помощь, внимание и интерес к работе. За ценные советы и консультации хочу поблагодарить профессора кафедры петрографии СПбГУ Кольцова Александра Борисовича. Хочется также выразить благодарность операторам Н.С. Власенко и В.В. Шиловских и РЦ «Геомодель» СПбГУ за помощь в проведении рентгеноспектрального микроанализа.

Глава 1. Общая информация о месторождении Лук Йен

1.1. Физико-географический очерк

Территория Вьетнама располагается в зоне тропического климата. Для этой страны характерны большое количество осадков, высокая влажность воздуха, большое количество солнечных дней. Месторождение Лук Йен находится в северной части страны, вблизи границы с КНР, где климат тропический муссонный. Среднегодовая температура воздуха варьирует от 22 до 25 С°. На севере Вьетнама годовые колебания температуры зимой составляют 15-20 С°, летом – 22,5-27,5 С°. Что касается влажности, то на всей территории страны в год выпадает более 1000 мм осадков, период с мая по сентябрь считается сезоном дождей, в другие месяцы осадки более редки. В период дождей дуют южные и юго-восточные ветра, в остальное время – северные и северо-восточные.

Месторождение Лук Йен находится севернее Красной Реки, впадающей в залив Бакбо. Из-за особенностей почв, вода в реке очень мутная, но это не мешает ее использованию в выращивании риса и ловли рыбы. В этом районе рельеф имеет высоту от 500 до 2000 метров. Понижение рельефа отмечается при движении на юг, к урзу реки.

Ближайший к месторождению населенный пункт – город Йен Дэ, откуда до месторождения можно добраться на рейсовом автобусе. Добыча камнесамоцветного сырья ведется на нескольких участках, общая площадь которых составляет около 50 км², расположенных в небольших долинах горного хребта Бак Бо и окружающих холмов.

1.2. История открытия и разработки

Впервые рубины были обнаружены в процессе геологического картирования в 1983 году в районе деревни Ан Фу (An Phu) в 270 км к северо-западу от Ханоя. Корундовое проявление было подробно изучено и уже в 1987 году началась добыча рубинов. В марте 1988 для контроля добывающей деятельности вьетнамским правительством была создана компания Vinagemco (Vietnam gemstones company) и в том же году Vinagemco и тайская компания

Boonsing-Hang Mining Company учредили совместное предприятие для добычи камнесамоцветного сырья из россыпей. В период с ноября 1989 года по март 1990 года, было извлечено около 224 кг корундов ювелирного качества. Следующие 4 года эта территория кишела старателями, и вскоре были обнаружены новые рубиновые проявления. Наибольший интерес вызвала структурная зона Ло Гам (Lo Gam, Рисунок 3) и в 80-е и 90-е годы в ее пределах начала активно развиваться добыча камнесамоцветного сырья.

1.3. Региональное геологическое положение

Месторождение Лук Йен относится к структурам Гималайского горного пояса и имеет много общих черт с рубин-содержащими мраморами других месторождений этого горного пояса – Хунза, (Пакистан), Могок, (Мьянма), Кухи Лал (Таджикистан), Джегдалек (Афганистан), Пайгутан (Непал), Намья (Мьянма) (Fallic et al., 2019) (Рисунок 2). Проявления рубинов отмечаются в метаморфических блоках, изменения которых связаны с главными тектоническими подвижками Кайнозойской Индо-Азиатской коллизии. Рубин-содержащие области подстилаются метаморфическим фундаментом предположительно кембрийского возраста (Rossovskiy et al., 1982), который прорван интрузиями олигоценного возраста. Однако рубиновая и шпинелевая минерализации имеют более широкое распространение, чем контактовые зоны и ареолы интрузивных тел (Rossovskiy et al., 1982) Большинство месторождений отдалены от зон контакта.

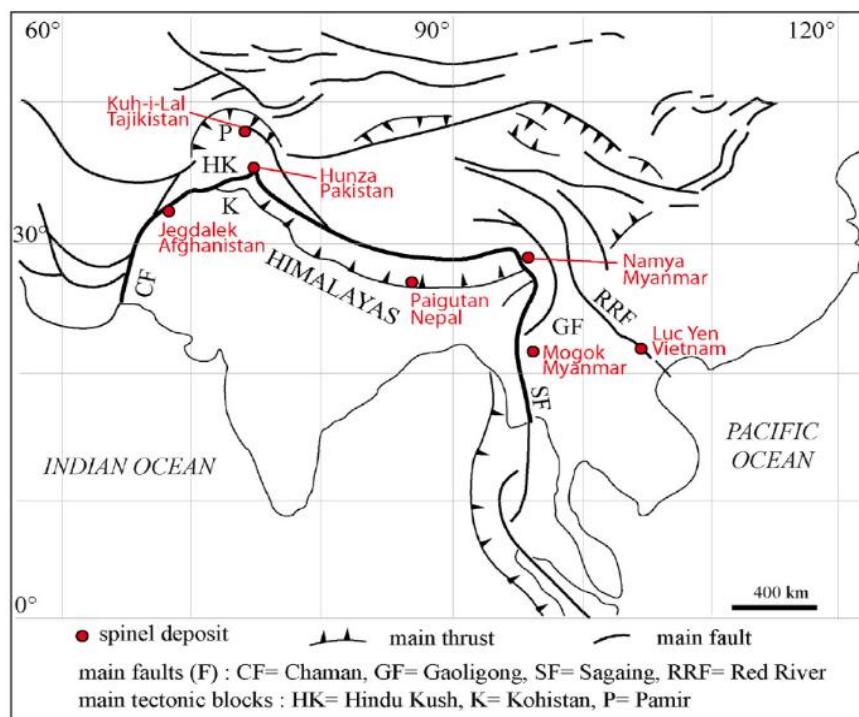


Рисунок 2 – Расположение главных месторождений шпинели и рубинов в северо-восточной части Азии (Fallic et al., 2019)

1.4. Геологическое строение месторождения Лук Йен

Рассматриваемая область делится линией сдвига Красной реки на две зоны: севернее линии располагается Lo Gam, а южнее – Day Nui Con Voi. Зона Ло Гам (Lo Gam) сложена формациями Dai Thi (кварц-слюдяной-полевошпатовый сланец, кварц-биотит-серицитовый сланец, кварцит), An Phu (кальцитовый мрамор, доломитовый мрамор с флогопитом, графитом и маргаритом), Thac Ba (слюдяной сланец, кварц-биотитовый или мусковитовый сланец, гнейс, мигматит, мрамор, кварцит), также в состав входят Nui Chua комплекс (оливиновый, пироксеновый или амфиболовый габбро), магматический комплекс Phia Bюс (биотитовый гранит, пегматит и аплит), комплекс Phia Ma (рогообманково-гранатовый до пироксенового гранитогнейс). Зона Day Nui Con Voi сложена формациями Ngoi Chi и Nui Voi (гнейс, сланцы с мраморами и линзами амфиболитов), в состав зоны также входит гранитный комплекс Tan Huong.

Месторождение Лук Йен локализовано в слабо измененных мраморах тектонической зоны Ло Гам (Schärer et al., 1990; Tapponnier et al., 1990; Schärer et al., 1994; Garnier et al., 2005), см. Рисунок 3. Она сложена преимущественно

кальцитовыми и доломитовыми мраморами верхнепротерозойского-нижнекембрийского возраста (Giuliani et al., 2015), которые чередуются с телами амфиболитов и гнейсов. Камнесамоцветная минерализация представлена разноокрашенной благородной шпинелью (розового, красного, сиреневого и синего цветов), минерализация которой проявлена в виде разноориентированных линз и гнезд; и корундом (преимущественно ярко-красными рубинами), минерализация которого характеризуется стратиформным залеганием.

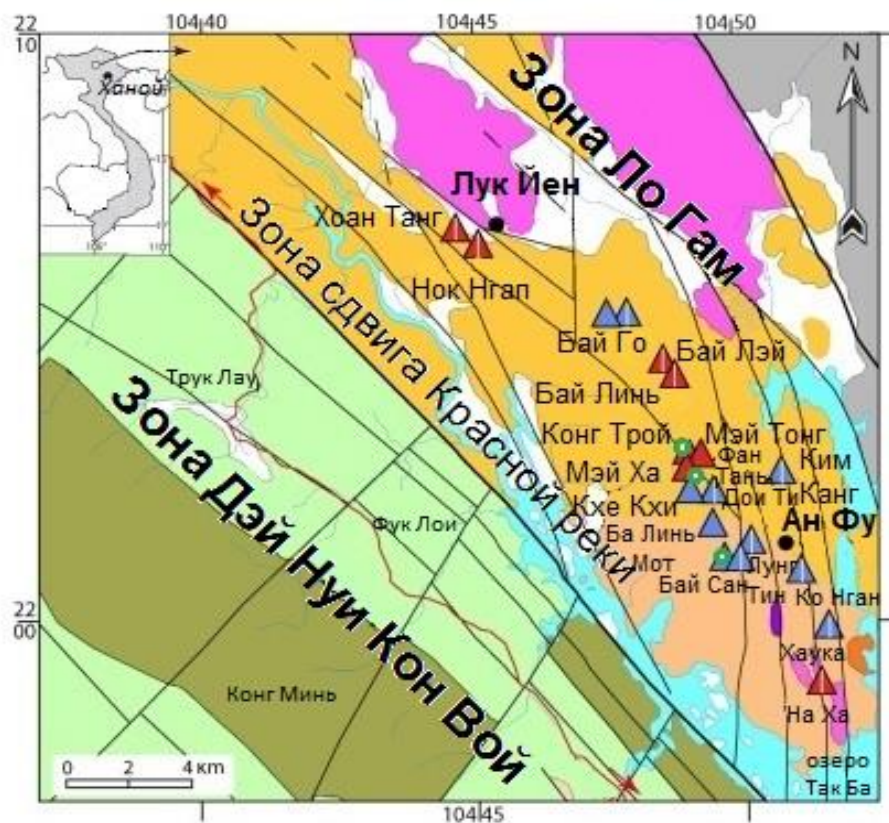


Рисунок 3 – Расположение зоны Ло Гам и м-ния Лук Йен относительно зоны сдвига Красной реки (по Кукса и др., 2019 с изменениями), легенда к этому плану на рисунке 4



Рисунок 4 – Легенда к плану на рисунке 3

Эти метаморфизованные осадочные пласты (карбонатные породы и мрамора) прорваны гранитными дайками и пегматитами. Но рубиновая минерализация, как правило, стратиформна и распределена в слоях мраморов (Garnier et al., 2008).

Глава 2. Минералогическая и петрографическая характеристики мраморов месторождения

2.1. Минеральный состав

Лук Йен – месторождение мрамора и камнесамоцветного сырья. Особенность этого мрамора в его чистоте – он белоснежный. Цветовые разводы встречаются лишь периодически, близ областей рудной минерализации (в рамках данного исследования в качестве рудных минералов рассматриваются шпинель и рубин). Возникают объективные трудности в отнесении рудных минералов к определенной категории. В масштабе месторождения рудные минералы оказываются аксессуарными, а в масштабе штуфа – близкими к второстепенным.

Главными минералами мраморов месторождения являются кальцит и доломит, а также их симплектитовые сростания. Среди второстепенных присутствуют форстерит, клиногумит, флогопит, амфиболы, основной плагиоклаз (анортит), скаполит (мейонит), моноклинный пироксен (диопсид). В аксессуарных количествах отмечаются сульфиды (пирит, пирротин, пентландит, халькопирит), а также графит, рутил, уранинит, циркон, цирконолит, титанит, эпидот, турмалин, флюорит и апатит (Таблица 3).

В данной главе основное внимание уделяется описанию макроскопических и микроскопических особенностей амфиболов, корунда (рубина) и шпинели, так как эти минералы являются носителями главных признаков для выделения геммологических групп. А также описанию кальцита и доломита, как главных минералов месторождения Лук Йен. Остальные минералы ассоциаций перечислены в начале каждого раздела.

Таблица 3 – Минералы мраморов месторождения Лук Йен

№	Минерал	Формула	Геммологические группы				
			Шпинель-содержащие			Корунд-содержащие	
			3/1	3/2	4/2	6/2	6/4
Главные минералы							
1	Кальцит	CaCO_3	+	+	+	+	+
2	Доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	+	+	+	-	+

Продолжение Таблицы 3

№	Минерал	Формула	Геммологические группы				
			Шпинель-содержащие			Корунд-содержащие	
			3/1	3/2	4/2	6/2	6/4
Второстепенные минералы							
3	Форстерит	Mg_2SiO_4	+	+	+	-	-
4	Диопсид	$CaMg(Si_2O_6)$	-	-	-	-	-
5	Анортит	$Ca(Al_2Si_2O_8)$	-	-	-	+	+
6	Паргасит	$NaCa_2(Mg_4Al)(Al_2Si_6O_{22})(OH)_2$	+	+	-	-	-
7	Магнезио- рнблендит	$Ca_2(Mg_4Al)(AlSi_7O_{22})(OH)_2$	-	+	+	-	-
8	Магнезио- данагаит	$NaCa_2(Mg_3Al_2)(Al_3Si_5O_{22})(OH)_2$	-	-	-	+	+
9	Клиногумит	$Mg_9(SiO_4)_4F_2$	+	-	-	-	-
10	Флогопит	$KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	-	-	-	+	+
11	Мейонит	$Ca_4(Al_2Si_2O_8)_3(CO_3,SO_4)$	-	-	-	-	-
Акцессорные минералы							
12	Шпинель	$MgAl_2O_4$	+	+	+	-	-
13	Корунд	Al_2O_3	-	-	-	+	+
14	Графит	C	+	-	-	-	-
15	Пирротин	$Fe_{1-x}S$	+	+	-	+	+
16	Пирит	FeS_2	+	-	+	+	+
17	Пентландит	$(Ni,Fe)_9S_8$	-	-	+	-	+
18	Халькопирит	$CuFeS_2$	-	-	-	-	-
19	Рутил	TiO_2	+	+	+	+	+
20	Уранинит	UO_2	+	+	-	-	-
21	Циркон	ZrO_2	-	-	+	+	+
22	Цирконолит	$CaZrTi_2O_7$	-	+	-	-	-
23	Титанит	$CaTi(SiO_4)O$	+	+	-	+	-
24	Эпидот	$Ca_2Fe^{3+}Al_2(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	+	-	-	-	-
25	Турмалин	$NaFe_3Al_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_4$	-	-	-	+	-
26	Флюорит	CaF_2	+	-	-	+	-
27	Апатит	$Ca_5(PO_4)_3F$	+	+	+	+	+

Примечание: в таблице приведены идеальные формулы минералов.

2.2. Геммологические группы мраморов

В процессе изучения мраморов были выделены несколько геммологических групп. Деление производилось в зависимости от присутствия камнесамоцветной минерализации (шпинель- и корунд-содержащие), а также по цветовой гамме и морфологическим особенностям мраморов. Кодировки геммологических групп были введены в ходе предыдущих исследований корундов и шпинели месторождения Лук Йен. В данной работе сохранены исходные кодировки во избежание путаницы в обозначениях.

Всего были выделены пять геммологических групп, три из которых включают в себя шпинель, две – корунд (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Геммологические группы образцов мраморов месторождения Лук Йен, Сев. Вьетнам

2.2.1 Геммологическая группа 3/1 (характерная особенность – светло-зеленый амфибол и лиловая шпинель)

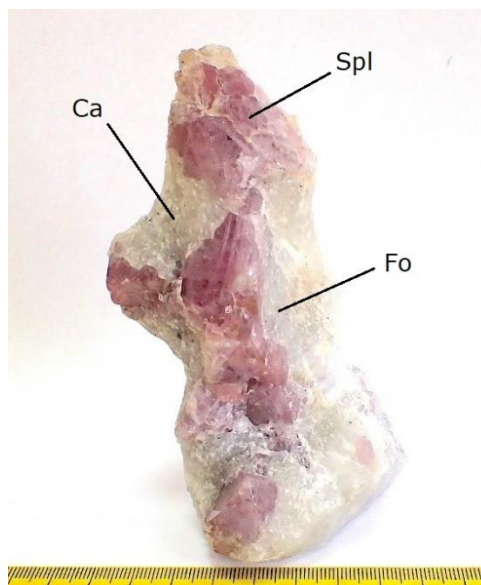


Рисунок 6 – Фрагмент мрамора из ассоциации 3/1 (розовый минерал – шпинель, белый со стекляннным блеском - форстерит, в основной массе – кальцит)

Главные минералы (>10%): кальцит, доломит.

Второстепенные (1-10%): форстерит, паргасит, магнезиогорнблендит, группа гумита-клиногумита.

Акцессорные (<1%): апатит, рутил, пирротин, флюорит, пирит, сфен, уранинит, циркон, эпидот, графит, шпинель (рудный).

Макроскопические особенности

Пример образца из данной геммологической группы изображен на рисунке 6.

Текстура массивная, структура средне-мелкозернистая. Текстура шпинель-содержащих мраморов характеризуется особым «мерцанием»: при повороте образца отдельные области (группы зерен) дают отблеск одновременно.

Амфибол от светло-зеленого до серо-зеленого. Кристаллы достигают размеров от 0,3 до 3 см по удлинению, имеют длиннопризматический облик, в некоторых образцах отмечены грани призмы.

Шпинель лиловая, светло-розовая, до темно-фиолетовой. Кристаллы

достигают размеров от 0,5 до 5 см, форма кристаллов от идиоморфных до панидиоморфных. Характерный стеклянный блеск.

Форстерит от белого до серого и светло-желтого. Кристаллы достигают размеров от 0,5 до 5 см, по форме – короткостолбчатые или округлые, изометричные. Ярко выраженные грани не отмечены. Блеск стеклянный.

Минералы группы гумита-клиногумита представляют собой неравнозернистый агрегат (зерна от 0,3 до 8 см), цвет от желтого до коричневатого-оранжевого.

Микроскопические особенности

Структура породы гранобластовая, гетеробластовая, зубчатая. Текстура массивная. Основная ткань породы сложена неравнозернистым кальцитом, с четко проявленной двойниковой структурой и зубчатыми границами (Рисунок 7). Размеры зерен варьируют от 0,1 до 2мм. Паргасит присутствует в виде удлиненных гипидиоморфных кристаллов (размером в среднем от 0,5 до 1,5 мм по удлинению и от 0,1 до 0,3 мм в поперечнике), имеющих длиннопризматический облик. В некоторых кристаллах отмечена трещиноватость, параллельная удлинению. Присутствуют включения кальцита (от 0,05мм до 0,2 мм в поперечнике) в кристаллах паргасита (Рисунок 8). Эти включения характеризуются от округлой до прямоугольной формами. Границы кристаллов паргасита будто подрастворены, так как отмечаются кальцитовые заливы «в теле» кристаллов паргасита. В некоторых участках отмечен графит в виде сноповидных сростков кристаллов чешуйчатого облика (0,2 – 0,5 мм по удлинению). Прослеживается приуроченность графита к паргаситу: графит встречается как в виде включений, так и в виде индивидов, облекающих кристаллы паргасита (Рисунок 9). Форстерит отмечен в виде округлых зерен со сглаженными углами, реже встречаются зерна неправильной удлиненной формы. Для многих выделений форстерита характерна трещиноватость.

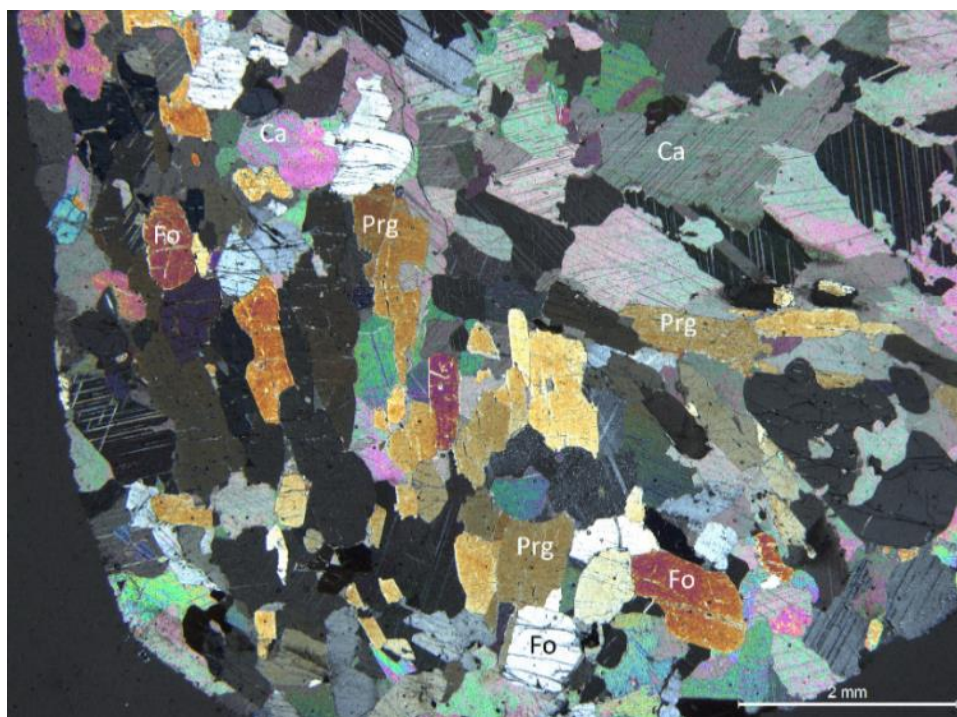


Рисунок 7 – Доломит-кальцитовый (Ca) мрамор с паргаситом (Prg), и форстеритом (Fo). Фото в проходящем свете, в скрещенных николях (шлиф V-11-2)

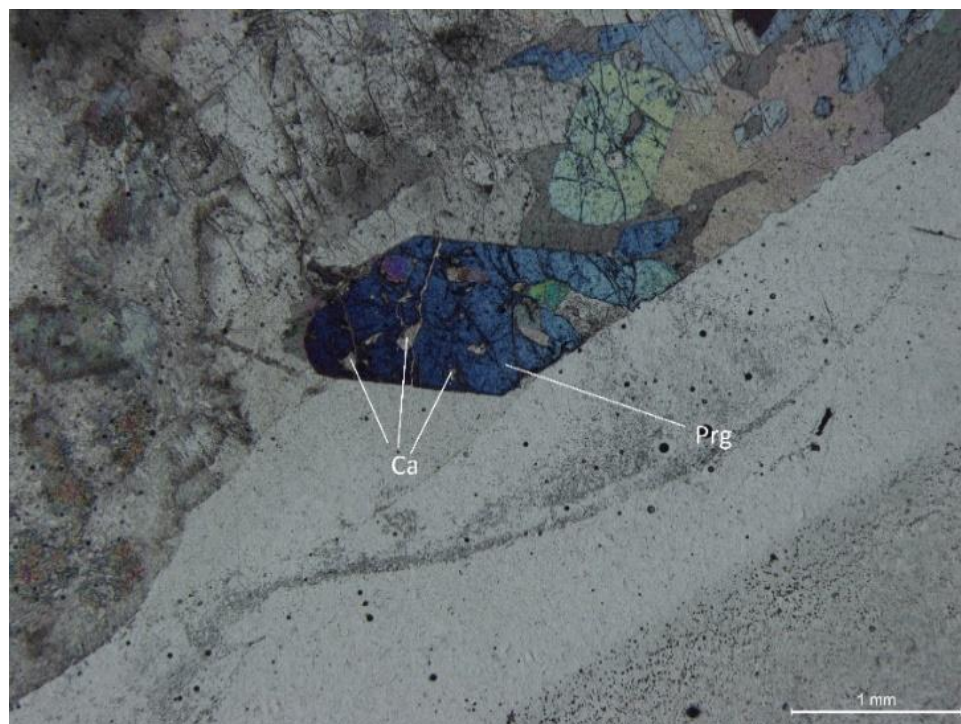


Рисунок 8 – Включения кальцита (Ca) в кристалле паргасита (Prg). Фото в проходящем свете, в скрещенных николях (шлиф V-11-2)

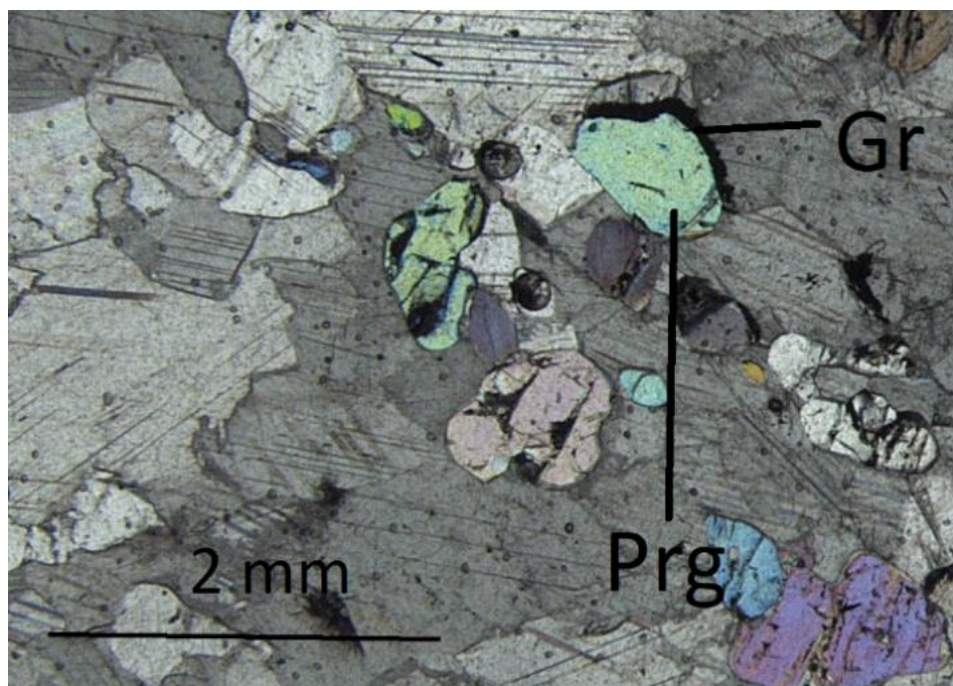


Рисунок 9 – Графит, облекающий кристалл паргасита в шлифе V-12-2. Фото в проходящем свете в скрещенных николях

2.2.2 Геммологическая группа 3/2 (характерная особенность – ярко-зеленый амфибол и красная шпинель)

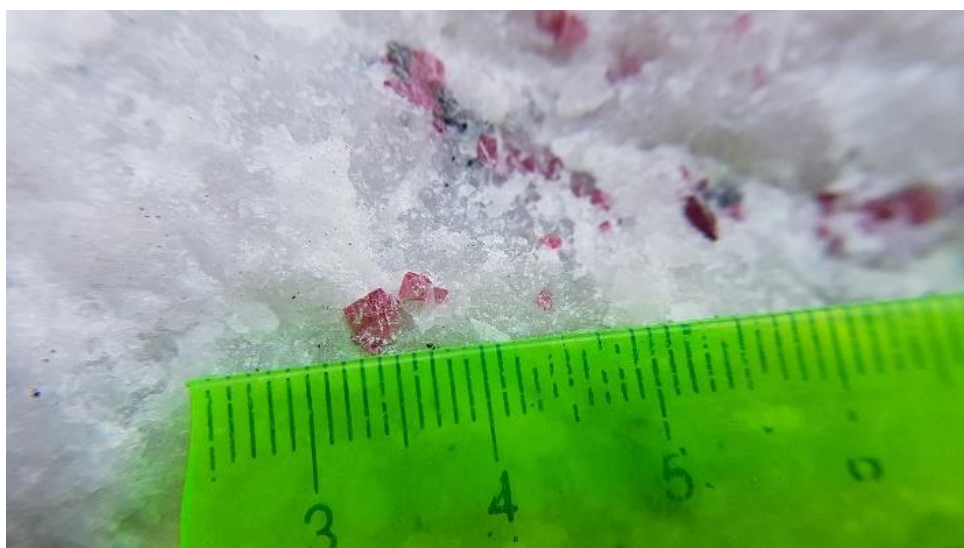


Рисунок 10 – Кристаллы шпинели во фрагменте мрамора ассоциации 3/2

Главные минералы (>10%): кальцит, доломит.

Второстепенные минералы (1-10%): паргасит, магнезиогорнблендит, форстерит.

Акцессорные (<1%): апатит, рутил, сфен, уранинит, цирконолит, пирротин, шпинель (рудный).

Макроскопическое описание

Пример образца из этой геммологической группы изображен на рисунке 10.

Текстура – массивная, «мерцающая». Структура – средне-мелкозернистая.

Основная мраморная масса представляет собой симплектитовые срастания кальцита и доломита (Рисунок 11), также отмечены области идиоморфного доломита в основной массе. Кроме того, присутствуют области чисто доломитового состава (Рисунок 12).

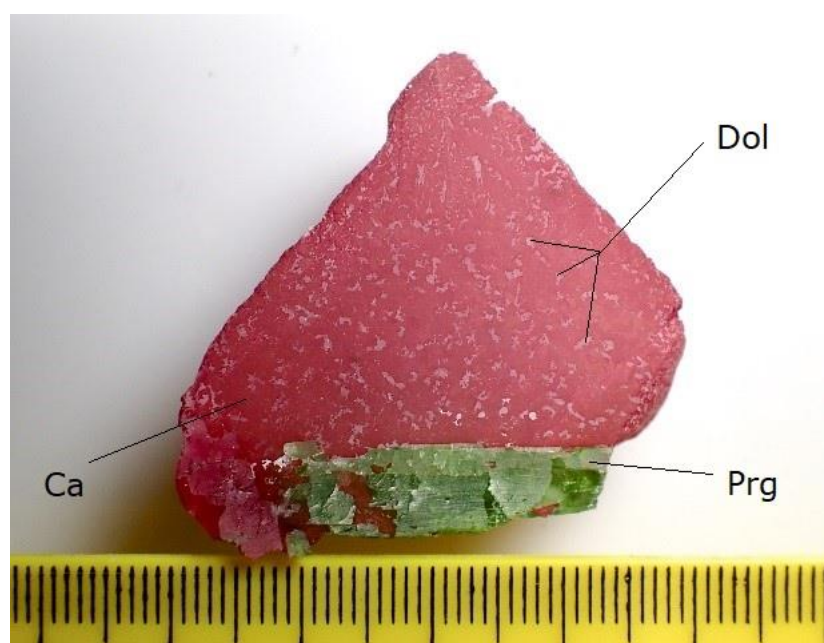


Рисунок 11 – Симплектитовое срастание кальцита и доломита (кальцит окрашен красным цветом)

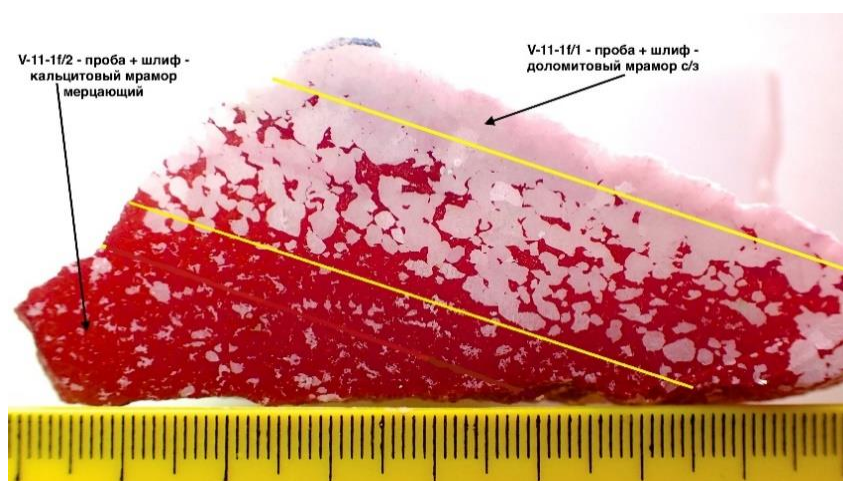


Рисунок 12 – Переходная зона от кальцитового мерцающего мрамора к доломитовому мрамору (кальцит окрашен красным цветом)

Шпинель в образцах данной ассоциации ярко-розового, красного до темно- и буро-красного цветов, размеры кристаллов варьируют от 0,1 до 3 см. Кристаллы хорошо образованы. характеризуются октаэдрическим обликом и стекляннным блеском.

Амфибол изумрудно-зеленый, кристаллы достигают размеров 0,3-3 см, по форме от идиоморфных до гипидиоморфных. В образце VM-43 отмечено обрастание шпинели кристаллами амфибола (Рисунок 13). Размеры таких сростаний варьируют от 0,7 до 2 см в поперечном срезе.

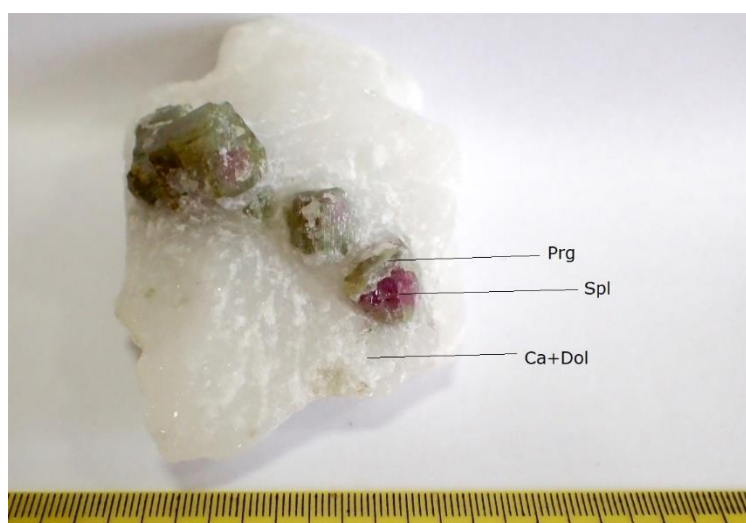


Рисунок 13 – Нарастание амфибола на кристаллы шпинели в образце VM- 43

В образце VM-62 панидиоморфный кристалл шпинели является включением в гигантокристаллическом кристалле ярко-зеленого амфибола (Рисунок 14).



Рисунок 14 – Кристалл шпинели в виде включения в гигантокристаллическом паргасите в образце VM-62.

Микроскопическое описание

Структура породы гранобластовая, гетеробластовая и зубчатая. Текстура массивная. В основной ткани породы – неравномернозернистый кальцит (размеры зерен варьируют от 0,1 до 2-3 мм), границы зерен кальцита волнистые с заливами. Паргасит присутствует в виде гипидиоморфных удлиненных зерен (до 2 мм по удлинению), расположенных разбросанно, сростаний в данном шлифе не обнаружено (Рисунок 15). В кристаллах амфибола отмечены единичные включения кальцита неправильной формы, размеры которых варьируют от 0,05 до 0,1 мм.

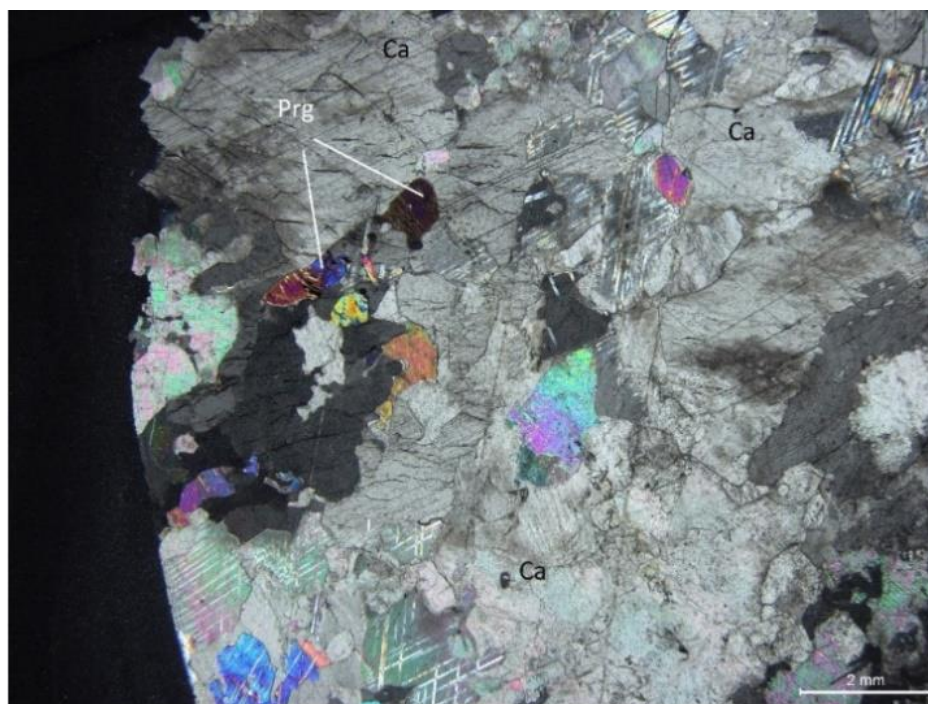


Рисунок 15 – Кальцитовый мрамор с паргаситом (шлиф V-1-1, общий вид, фото в проходящем свете, в скрещенных николях)

2.2.3 Геммологическая группа 4/2 (характерная особенность – голубая шпинель, серо-зеленый амфибол)



Рисунок 16 – Синяя Со-шпинель в образце из ассоциации 4/2

Главные минералы (>10%): кальцит, доломит.

Второстепенные минералы (1-10%): магнезиогорнблендит, форстерит.

Акцессорные (<1%): апатит, рутил, пентландит, пирит, циркон, шпинель

(рудный).

Макроскопическое описание

Пример образца из этой геммологической группы изображен на рисунке 16.

Текстура породы массивная, «мерцающая», структура – средне-мелкозернистая.

Кальцит и доломит образуют симплектитовые срастания в основной массе (Рисунок 17). Присутствуют области двух типов: где в срастаниях преобладает доломит, где преобладающей фазой является кальцит.



Рисунок 17 – Симплектитовые срастания с преобладанием кальцита и доломита (красным цветом окрашен кальцит).

Шпинель от светло- до темно-синей. Идиоморфные до панидиоморфных кристаллы варьируют от первых мм до 1-2 см в поперечном срезе, характеризуются стеклянным блеском.

Амфибол в виде идиоморфных кристаллов серо-зеленого цвета длиннопризматического облика, достигающих в размере от долей мм до 1 см. В образцах присутствуют в виде мелко-среднезернистых агрегатов, часто в срастании со шпинелью, что может указывать на их сингенетическое образование (Рисунок 18).



Рисунок 18 – Срастания синей шпинели и серо-зеленого амфибола в образце VM-61 из ассоциации 4/2

Микроскопические особенности:

Структура породы гранобластовая, гетеробластовая и зубчатая. Текстура массивная. В основной ткани породы неравномернoзернистые доломит и кальцит (размеры варьируют от 0,5 до 3 мм в поперечнике). Встречаются срастания доломита и кальцита. Доломитовые участки выглядят мутными, в них отсутствует двойникование.

Амфибол в шлифе присутствует в виде идиоморфных кристаллов (размеры варьируют от 0,2 до 4 мм по удлинению, от 0.1 до 1 мм в поперечнике), часто находящихся в сростках (Рисунок 19). Отмечены редкие включения кальцита ромбовидной формы в кристаллах амфибола. Амфибол бесцветный при рассмотрении параллельных николях.

Шпинель в шлифе представлена в виде идиоморфных кристаллов со сглаженными углами. Размеры варьируют от 0,1 до 1,5 мм. В кристаллах шпинели отмечены частые включения кальцита округлой формы, размером около сотых долей миллиметра.

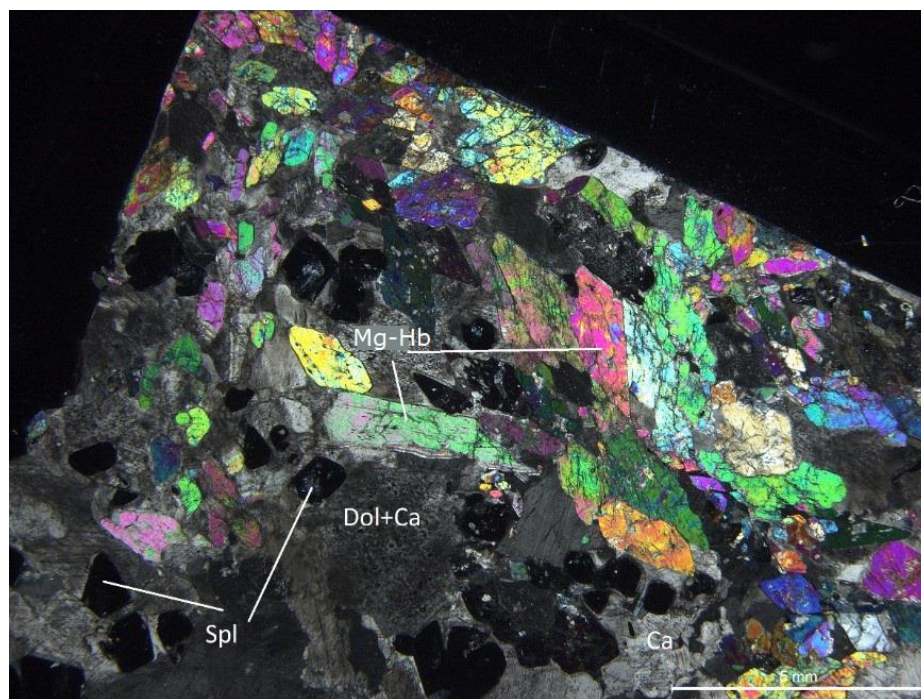


Рисунок 19 – Доломит-кальцитовый мрамор с магнезиальногорнблендит (Mg-Hb) и шпинелью(Spl), фото в проходящем свете, в скрещенных николях

2.2.4 Геммологическая группа 6/2 (характерная особенность – малиновый корунд, зеленый амфибол, тонкие прожилки в мраморе)

Главные минералы (>10%): кальцит.

Второстепенные минералы (1-10%): магнезиосаданагаит, саданагаит, флогопит, анортит.

Акцессорные (<1%): апатит, рутил, пирит, пирротин, сфен, турмалин, флюорит, циркон, корунд (рудный).

Макроскопическое описание

Текстура: массивная, «немерцающая». Рудная минерализация в жилах мощностью около 2-4 см. Структура среднезернистая. Вокруг и внутри жил отмечен переход среднезернистого кальцитового мрамора в среднекрупнозернистый с небольшим количеством мелкого (до 2-3 мм) доломита (Рисунок 20).



Рисунок 20 – Белые зерна доломита близ жилы в основной массе кальцитового мрамора (кальцит окрашен красным цветом)

Рубин идиоморфный до панидиоморфного, кристаллы размером от первых мм до 1 см, характеризуются столбчатым обликом. Цвет красный, красно-розовый, малиновый. Блеск стеклянный.

Амфибол ярко-зеленый, идиоморфный, длиннопризматический облик. Кристаллы от первых мм до 1-1,5 см по удлинению. Проявления кристаллов паргасита приурочены к жилам перекристаллизации (Рисунок 21). Отмечаются периодические срастания с кристаллами корунда.

Микроскопическое описание

Структура породы гранобластовая, гетеробластовая, мозаичная. Текстура – массивная. В основной ткани породы неравномернoзернистый кальцит (размеры варьируют от 0,5 до 5 мм в поперечнике. Отчетливо проявлена двойниковая структура.

Амфибол в шлифе присутствует в виде кристаллов (от идиоморфных до гипидиоморфных) с трещиноватой поверхностью, размеры варьируют от 0,2 до 2,5 мм (Рисунок 22). В шлифе бесцветный. Отмечено присутствие включений кальцита, повторяющих форму трещин в кристаллах амфибола.

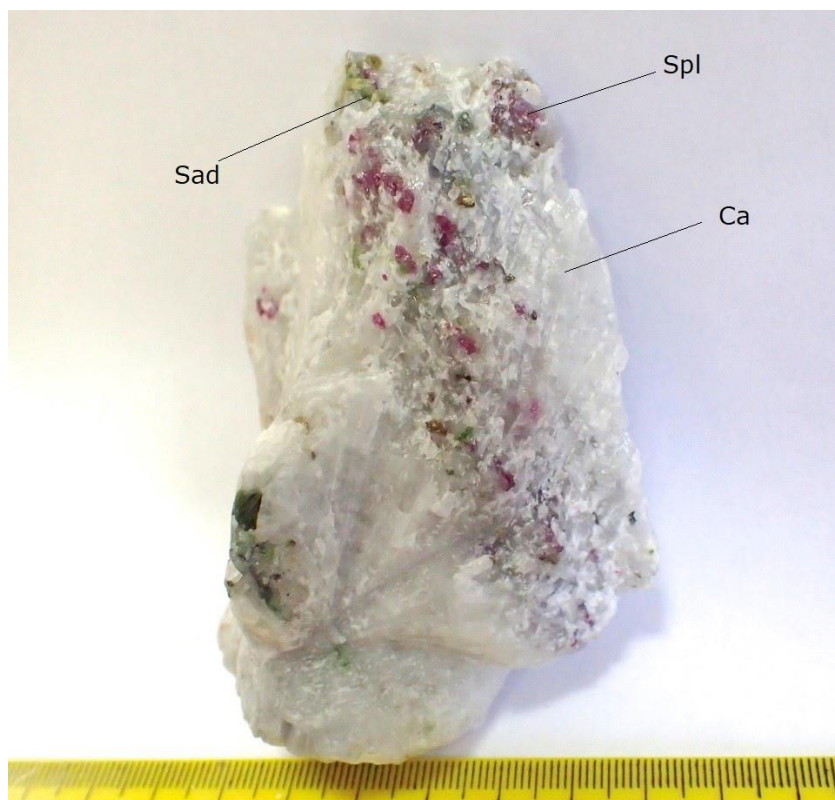


Рисунок 21 – Кристаллы саданагаита (зеленые) и шпинели (малиновые) в жилах перекристаллизации (асс. 6/2)

Рутил присутствует в виде срастания гипидиоморфных кристаллов (яркого красно-бурого цвета в шлифе). Они характеризуются удлиненным обликом, трещиноватостью, перпендикулярной удлинению. Содержат в себе единичные включения кальцита удлиненной формы со сглаженными углами, размер включений составляет около 0,05 мм.

Флогопит проявлен в двух генерациях. В виде идиоморфных удлиненных кристаллов, чешуйчатого облика (расщеплены параллельными трещинами), до 1,5 мм по удлинению, в шлифе бесцветные. А также в виде чешуйчатых скоплений, не образующих отдельных кристаллов.

Турмалин проявлен в виде округлых кристаллов (поперечное сечение, диаметр около 0,1 мм). В шлифе имеют зеленоватый оттенок.

Рудный минерал присутствует в шлифе в виде преимущественно округлых (и одного угловатого) включений в кристаллах кальцита. Размер таких включений составляет около 0,5 мм.

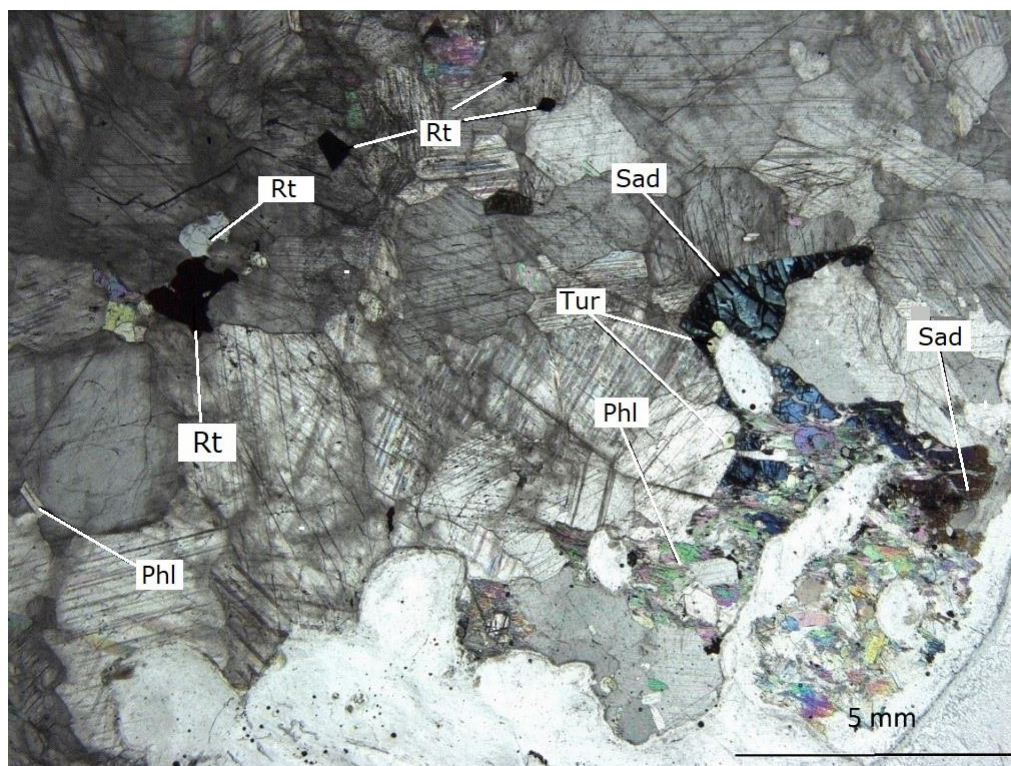


Рисунок 22 – Кальцитовый мрамор с рутилом (Rt), флогопитом (Phl) и саданагаитом (Sad) (шлиф VM-47/2, общий вид, фото в проходящем свете, в скрещенных николях)

2.2.5 Геммологическая группа 6/4 (характерная особенность: яркий полихромный корунд, крупные кристаллы)

Главные минералы (>10%): кальцит, доломит.

Второстепенные минералы (1-10%): магнезиосаданагаит, саданагаит, флогопит, анортит.

Акцессорные (<1%): апатит, рутил, пентландит, пирит, пирротин, циркон, корунд (рудный).

Макроскопические особенности

Структура породы мелко- средне- крупнозернистая, текстура массивная, «немерцающая». Ассоциация очень схожа с 6/2. Принципиальное отличие в том, что в рассматриваемой ассоциации рудная минерализация не приурочена к жильным формам, имеет более широкое распространение в объеме породы, кристаллы корунда крупнее – достигают по удлинению 1,5 -3 см. Размеры кристаллов амфибола варьируют от до 0,5-0,6 мм.

Микроскопические особенности

Порода характеризуется гранобластовой гетеробластовой зубчатой структурой и массивной текстурой. Основная ткань породы сложена зернами кальцита различного размера с зубчатыми, волнистыми границами (иногда с заливами) и с отчетливо проявленной двойниковой структурой. Размеры зерен варьируют от 1-2 до 4 мм.

Амфибол присутствует в виде идиоморфных кристаллов с ромбовидным поперечным сечением размером 3-4 мм (Рисунок 23, Рисунок 24). В шлифе он бесцветный. В нем встречаются редкие включения кальцита неправильной, угловатой формы (~0,2 мм), а также более распространенные включения анортита – изометричные или гипидиоморфные (~до 0,5 мм). Пример включения кальцита и анортита изображены на рисунке 23.

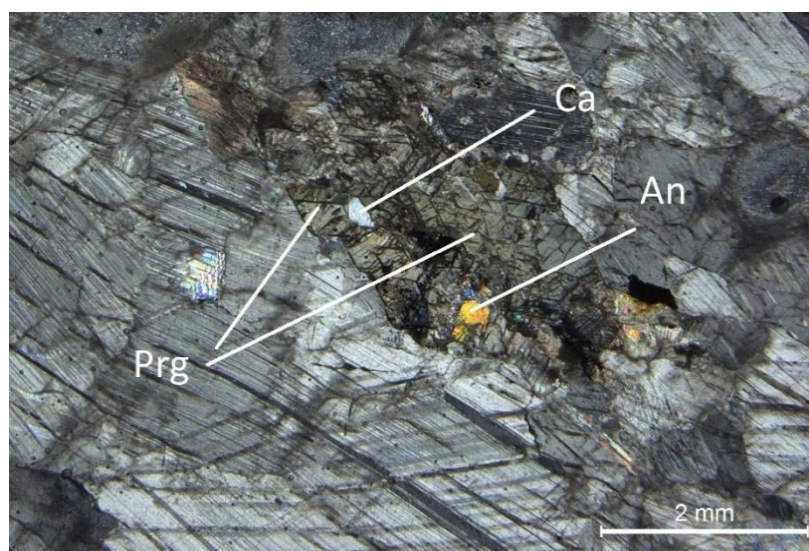


Рисунок 23 – Включения кальцита (Ca) и анортита (An) в кристалле паргасита (Prg) в шлифе V-10-3, фото в проходящем свете в скрещенных николях

Анортит присутствует в виде гипидиоморфных кристаллов, которые по удлинению достигают 0,5 см. Анортит отмечается как в качестве включений в паргасите, так и в виде самостоятельной фазы в основной ткани породы (рис. 24).

Флогопит отмечен в виде чешуйчатого агрегата вдоль граней кристалла паргасита.

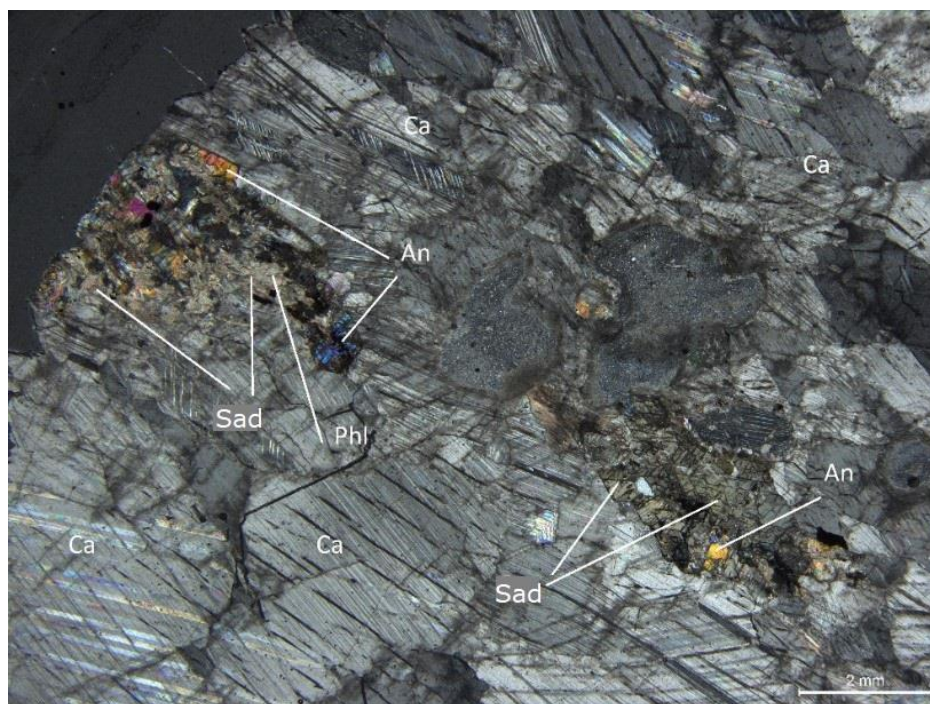


Рисунок 24 – Кальцитовый мрамор с анортитом (An) и саданагаитом (Sad), корундом (Crn) и флогопитом (Phl). (шлифV-10-3, общий вид, фото в скрещенных николях)

Глава 3. Характеристика амфиболов

3.1. Общие сведения об амфиболах

Амфибол — в переводе с греческого «Амфиболос», что значит двойственный, из-за переменного состава и различного габитуса.

Основой классификации амфиболов является их стандартная кристаллохимическая формула $A_{0-1}B_2C^{VI}_5T^{IV}_8O_{22}(OH)_2$ (Leak et al., 1997). В этой формуле предполагается заселение позиций следующими атомами: вакансии и К — только в А; Na — в А или В; Са — только в В; катионы типа L (Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Li, реже катионы, близкие по размеру, такие как Zn, Ni, Co) — в С или В; катионы типа М (Al, Fe³⁺ и значительно реже Mn³⁺, Cr³⁺) — только в С; катионы высокой валентности Ti⁴⁺ — в позиции С или Т, Zr⁴⁺ — только в позиции С; Si — только в позиции Т; анионы (ОН), F, Cl, O — только в позиции (ОН). Разнообразие составов амфиболов вызвано широким проявлением изоморфизма (изо- и гетеровалентного типов).

Структура амфиболов ленточная. В ней можно выделить параллельные слои из амфиболовых лент, вытянутые вдоль оси с. Амфиболовые ленты состоят из тетраэдров. Одна из сторон ленты сложена вершинами тетраэдров, другая — гранями. Попарно ленты ориентированы свободными вершинами друг к другу. Выделяется два типа тетраэдров — (Т1)O₄ (содержат три мостиковых кислорода и один немостиковый) и (Т2)O₄ (содержат два немостиковых кислорода, что делает их более крупными и неправильной формы). Если Si изоморфно замещен Fe или Al, то они, как правило локализуются в положении Т1. Амфиболовые слои чередуются со слоями катионных полиэдров. Ленты катионных полиэдров (слагающие слои) состоят из двух- или трехзвенных октаэдрических лент, в которых различаются три неэквивалентных позиции катионов (М1, М2, М3). Эти позиции занимают катионы Mg, Fe, Al, Ti. К ним с двух сторон примыкают полиэдры катионов в позиции М4 — они в зависимости от катиона приобретают разную форму (У. Брэгг, 1967) (Рисунок 25).

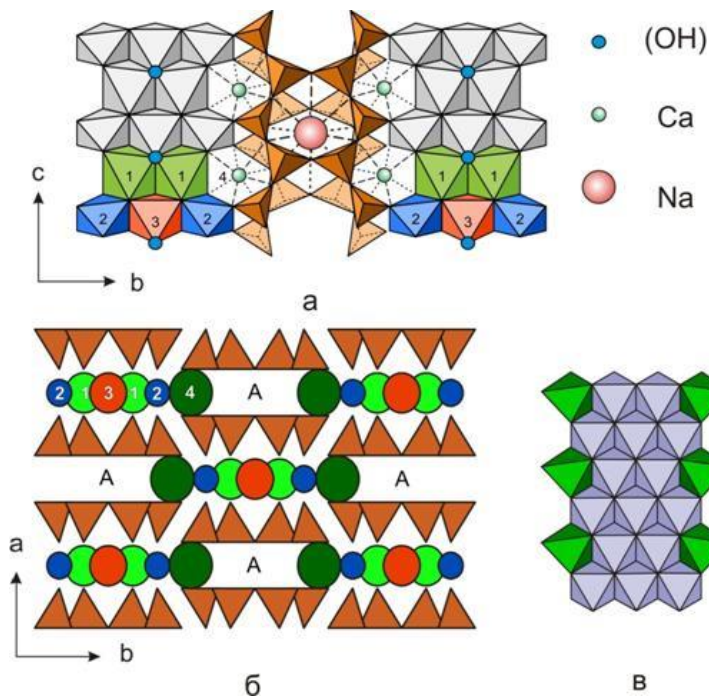


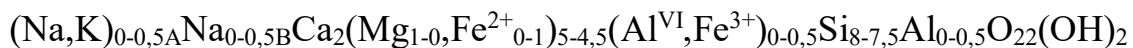
Рисунок 25 – Структура амфиболов в проекциях: а) на (010), б) (001)

По соотношению главных катионов амфиболы по (Leak et al., 1997) делятся на:

1. группу магнезиально-железисто-марганцево-литиевых амфиболов, где $(Ca + Na)_B < 1.00$ и $(Mg, Fe, Mn, Li)_B > 1.00$;
2. группу кальциевых амфиболов, где $(Ca + Na)_B > 1.50$ и $Na_B < 0.50$, также чаще всего выполняется $Ca_B > 1.50$;
3. группу натриево-кальциевых амфиболов, где $(Ca + Na)_B > 1.00$ и $0.50 < Na_B < 1.50$;
4. группу натриевых амфиболов, где $Na_B > 1.50$.

В данной работе будут рассмотрены амфиболы, относящиеся к группе кальциевых. Эта подгруппа объединяет в себе амфиболы с высоким содержанием кальция (около 2-ух формульных единиц (далее – ф.е.)), низким содержанием натрия (0-1 ф.е.) и интервалом содержаний кремнезема от 8 до 4,5 ф.е. В подгруппе выделяются (Маракушев А.А., 2018). магнезиально-железистые серии актинолита, горнблендита (роговой обманки), каннилоита, эденита, чермакита, керсутита, паргасита-гастингсита и саданагаита.

Ряд актинолитов



Конечные члены этого ряда – тремолит и ферроактинолит. Представляют собой кристаллы от призматических до игольчатых. Показатели преломления возрастают с ростом железистости амфиболов: $n_p=1,599-1,688$; $n_m=1,612-1,697$; $n_g=1,622-1,705$; $n_g-n_p=0,027-0,017$. Спайность совершенная с углом 56° . Окраска в шлифе у тремолита бесцветная, у актинолитов – желто-зеленоватые и синеватые цвета с плеохроизмом. Амфиболы этого ряда являются типичными минералами метасоматических и метаморфических пород. При прогрессивном региональном и контактовом метаморфизме тремолит может возникать по кремнистым доломитам и доломитистым песчаникам при температурах $350-500^\circ\text{C}$, и может находиться в ассоциации с кальцитом, доломитом или кварцем. Могут возникать при регрессивном метаморфизме и гидротермальных процессах. Магнезиальные члены ряда распространены в ипородах зеленосланцевой фации, а также в измененных магнезиальных скарнах.

Ряд магнезиально-железистых горнблендитов



Ряд магнезиально-железистых горнблендитов имеет следующие пределы составов - $(\text{Na},\text{K})_{0-0,5\text{A}}\text{Na}_{0-0,5\text{B}}\text{Ca}_2(\text{Mg}_{1-0}\text{Fe}^{2+}_{0-1})_{4,5-3,5}(\text{Al}^{\text{VI}},\text{Fe}^{3+})_{0,5-1,5}[\text{Si}_{7,5-6,5}\text{Al}_{0,5-1,5}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$. На классификационной диаграмме (см. рис_) занимает положение между актинолитом и чермакитом. Оптические характеристики у данных амфиболов следующие: $n_p=1,615-1,669$; $n_m=1,618-1,697$; $n_g=1,634-1,704$; $n_g-n_p=0,017-0,035$. Спайность совершенная под углом 56° . Окраска в шлифе от желтовато-зеленой до голубоватой, трудноотличимы от актинолитов. Амфиболы этого ряда обычно встречаются в продуктах изменения магнезиальных скарнов, а также распространены в метабазитах зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций. Более высокотемпературны, чем амфиболы ряда тремолит-актинолита.

Изоморфные серии эденита-ферроэденита, чермакита-феррочермакита, паргасита-ферропаргасита имеют генетические, парагенетические и

морфологические сходства. Все эти изоморфные ряды имеют сходные оптические и макроскопические свойства, достаточно трудноразличимые без специальных аналитических исследований

Амфиболы серии эденита-ферроэденита были названы по местности Эденвилл в штате Нью Йорк, США. Состав серии выражается формулой $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$. В шлифе имеют серо-голубые тона плеохроизма, $N_g=20-35^\circ$.

Серия паргасита – ферропаргасита характеризуется формулой $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. Название этому ряду было дано по местности Паргас в Финляндии. Паргасит в шлифе может быть от бесцветного до серо-голубого. Характеризуются низким двуприломлением (0,012-0,023).

Серия чермакита – феррочермакита с формулой $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ была названа по имени австрийского минералога Чермака. Представляет собой высокоглиноземистую роговую обманку и характеризуется умеренным двупреломлением (0,016-0,024).

Вышеназванные серии составов имеют широкое распространение. Для паргаситов и чермакитов характерно присутствие в амфиболитах, постмагматических магнезиальных скарнах, а также метабазах. В метаморфических комплексах роговые обманки обычно приурочены к породам амфиболитовой фации. Магнезиальный чермакит и паргасит не встречаются с кварцем и кислыми полевыми шпатами. Для них характерны ассоциации – с магнезиальными оливинами, энстатитом, диопсидом, шпинелью, магнетитом, основным плагиоклазом, титанитом, флогопитом в магнезиальных скарнах. (Маракушев А.А., 2018)

3.2. *Амфиболы месторождения Лук Йен*

При макроскопическом рассмотрении амфиболов в образцах наиболее явные отличия проявляются в интенсивности окраски, степени идиоморфизма, а также размера кристаллов. Амфиболы из корунд- и шпинель-содержащих

геммологических групп макроскопически трудноотличимы, для этого необходимо диагностировать их в соответствии с их химическим составом. Но внутри этих групп макроскопические свойства амфиболов меняются довольно заметно.

В ходе данного исследования была отмечена следующая закономерность: в корунд-содержащих геммологических группах мрамор имеет чистый кальцитовый состав и массивную текстуру. В то же время шпинель-содержащие мрамора всегда сложены двумя карбонатными минералами (кальцит-доломитовые и доломитовые мрамора), которые часто образуют симплектитовые сростания своеобразную «мерцающую» текстуру.

3.2.1 Амфиболы шпинель-содержащих мраморов

Амфибол (паргасит, магнезиогорнблендит) из геммологической группы 3/1 (с лиловой шпинелью) характеризуется светлыми оттенками зеленого до серовато-зеленого, стеклянным блеском и совершенной спайностью, черта белая. Размеры кристаллов варьируют от 0,3 до 3 см по удлинению, часто отчетливо видны грани призмы. Сростаний с кристаллами шпинели в образцах обнаружено не было. Шпинель характеризуется светлыми оттенками лилового цвета. При рассмотрении шлифов образцов этой геммологической группы с помощью оптического микроскопа была отмечена интересная деталь: пластинчатый графит как бы облекает кристаллы амфибола (паргасита). Это характерно для многих кристаллов амфибола в шлифе V-12-2 (Рисунок 9).

При переходе к геммологической группе 3/2 (с ярко-розовой шпинелью) краска шпинели приобретает более насыщенные оттенки – ярко-розовый, красный до красно-бурого, и цвет амфиболов (паргасит, магнезиогорнблендит) становится более выраженным – зеленым до изумрудного. Таким образом, общая цветовая гамма аксессуарных минералов при переходе к этой группе образцов становится ярче и насыщеннее. Изменений в размерах кристаллов амфиболов не отмечено, они варьируют от 0,3 до 4 см по удлинению. Блеск стеклянный.

Характеризуется совершенной спайностью. В этой геммологической группе отмечаются нарастания амфибола на кристаллы шпинели с повторением облика ее кристаллов (см. рис.13). А также отмечен кристалл шпинели менее одного мм в поперечном сечении в виде включения в гигантокристаллическом паргасите (Рисунок 14).

От вышеописанных сильно отличается минеральный агрегат амфибола из геммологической группы 4/2, в которой амфибол (магнезиогорнблендит) находится в ассоциации с синей шпинелью. Часто кристаллы амфибола образуют срастания со шпинелевым минеральным агрегатом. В данной группе амфибол характеризуется размером всего от долей мм до 1 см. Кристаллы идиоморфные с длиннопризматическим обликом. Цвет амфибола блеклый серо-зеленый, иногда с желтоватым оттенком (Рисунок 18). Блеск стеклянный, спайность совершенная. Что касается кристаллов шпинели в данной геммологической группе образцов – ее цвет варьирует от голубого до ярко-синего. Но кристаллы ее значительно мельче, чем в предыдущих группах – от пары мм до 1-2 см.

3.2.2 Амфиболы корунд-содержащих мраморов

Особенность геммологической группы 6/2 (с прожилковым ярко-малиновым корундом) в том, что здесь кристаллы амфибола (магнезиосаданагаита, саданагаита) приурочены к жилам перекристаллизации в кальцитовом мраморе (Рисунок 21). Амфибол ярко-зеленого цвета, со стеклянным блеском, совершенной спайностью. Размеры кристаллов варьируют от пары мм до полутора см по удлинению. Кристаллы амфибола характеризуются длиннопризматическим обликом, периодически отмечаются срастания их со столбчатыми кристаллами ярко-красного корунда.

Кристаллы амфибола (магнезиосаданагаит, саданагаит) в геммологической группе 6/4 (с яркими полихромными кристаллами корунда) были отмечены только при помощи оптического микроскопа в проходящем свете. Идиоморфные кристаллы амфибола (магнезиосаданагаит, саданагаит) имеют

длиннопризматический облик. В проходящем свете в шлифе бесцветные. В этой геммологической группе в ромбических поперечных сечениях кристаллов амфибола были отмечены включения анортита и кальцита.

3.3. Химический состав амфиболов

Ранее работами Гарньер с коллегами (Garnier et al., 2005, 2008) было установлено, что амфиболы в мраморах месторождения Лук Йен представлены фторсодержащим эденитом, паргаситом и магнезиогорнблендитом (магнезиальной роговой обманкой).

Результаты нашего исследования показали, что все изучаемые амфиболы относятся к группе кальциевых, так как в каждом анализе соблюдается условие $(Ca+Na)_B > 1,50$ и $Na_B < 0,5$ (Leak et al., 1997). Точки, соответствующие химическим составам изучаемых амфиболов, легли на две классификационные диаграммы кальциевых амфиболов со следующими параметрами:

1. $Ca_B > 1,50$; $(Na+K)_A > 0,50$; $Ti < 0,50$;
2. $Ca_B > 1,50$; $(Na+K)_A < 0,50$; $Ca_A < 0,50$.

Таблица 4 – Нормированное на 100% содержание элементов (масс%) и коэффициенты в кристаллохимических формулах амфиболов месторождения Лук Йен

N образца	Шпинелевая геммологическая группа				
	V-12-02a	VM-37	V-11-02e	V-01-03	V-12-03
	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1
	1	2	3	4	5
	Mg-Hb	Mg-Hb	Prg	Prg	Prg
Si	25,76	21,56	23,98	22,55	21,85
Ti	0,34	0,52	0,88	0,50	0,92
Al	4,56	7,82	6,56	7,46	8,71
Fe	0,18	-	-	-	-
Mg	14,02	12,53	13,25	12,68	12,53
Ca	10,48	10,05	10,77	10,25	10,60
Na	1,06	1,49	1,30	1,64	2,17
K	-	0,39	-	0,18	0,18
V	-	-	-	0,25	0,15
Cr	-	-	-	-	-
F	-	0,84	-	0,83	-
O	43,60	44,73	43,26	43,66	42,88

Продолжение таблицы 4

№ образца	Шпинелевая геммологическая группа				
	V-12-02a	VM-37	V-11-02e	V-01-03	V-12-03
	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1
	1	2	3	4	5
	Mg-Hb	Mg-Hb	Prg	Prg	Prg
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов					
Na	0,36	0,53	0,44	0,58	0,75
K	0,00	0,08	0,00	0,04	0,04
Ca	-	0,09	0,03	0,03	0,03
сумма "А"	0,36	0,70	0,47	0,65	0,81
Ca	2,00	1,97	2,00	2,00	2,00
Mg	-	0,03	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,03	-	0,06	0,02	0,06
Mg	4,47	4,21	4,25	4,19	4,07
Fe ²⁺	0,02	-	-	-	-
Al	0,42	0,70	0,55	0,67	0,69
Ti ⁴⁺	0,05	0,09	0,14	0,08	0,15
V ³⁺	-	-	-	0,04	0,02
Cr ³⁺	-	-	-	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	0,89	1,68	1,35	1,55	1,86
Si	7,11	6,32	6,65	6,45	6,14
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	1,62	2,00	1,65	2,00
F	-	0,36	-	0,35	-
Cl	-	0,02	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
сумма зарядов к-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
сумма катионов	15,36	15,70	15,47	15,65	15,81

Продолжение Таблицы 4

№ образца	Шпинелевая геммологическая группа				
	VM-60	VM-60	VM-42	V-11-01f.2	VM-60
	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2
	6	7	8	9	10
	Tr	Prg	Prg	Prg	Prg
Si	25,86	23,80	23,63	22,80	21,42
Ti	0,67	0,52	0,56	0,36	0,41
Al	3,47	6,09	7,25	7,96	8,41
Fe	-	-	-	-	-
Mg	14,34	13,40	13,03	12,88	12,54
Ca	10,49	10,37	10,68	10,59	10,15
Na	1,03	1,66	1,37	1,86	2,28
K	-	-	-	0,21	0,30
V	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	0,15	-
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов					
Na	0,35	0,57	0,47	0,64	0,81
K	-	-	-	0,04	0,06
Ca	-	0,01	0,04	0,04	0,04
сумма "А"	0,35	0,58	0,51	0,72	0,91
Ca	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,05	0,04	0,04	0,04	0,02
Mg	4,62	4,37	4,19	4,17	4,19
Fe ²⁺	-	-	-	-	-
Al	0,22	0,51	0,68	0,71	0,72
Ti ⁴⁺	0,11	0,09	0,09	0,06	0,07
V ³⁺	-	-	-	-	-
Cr ³⁺	-	-	-	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	0,79	1,28	1,42	1,61	1,81
Si	7,21	6,72	6,58	6,39	6,19
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	1,73	1,65	2,00
F	-	-	0,27	0,33	-
Cl	-	-	-	0,02	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
сумма зарядов к-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
сумма катионов	15,35	15,59	15,51	15,72	15,91

Продолжение таблицы 4

N образца	Шпинелевая гемм. группа			Корундовая гемм. группа			
	VM-28	VM-27	VM-36	VM-50	V-09-01d	V-10-03	V-09-04
	4/2	4/2	4/2	6/2	6/4	6/4	6/4
	11	12	13	14	15	16	17
	Mg-Hb	Mg-Hb	Mg-Hb	Sad	Sad	Sad	Sad
Si	26,86	25,48	24,66	19,73	19,43	18,90	17,83
Ti	0,26	-	0,46	0,83	0,95	1,19	1,35
Al	4,09	5,84	6,39	12,12	12,43	12,81	13,58
Fe	-	-	0,27	0,39	1,18	1,89	3,87
Mg	14,10	13,64	13,26	10,66	10,29	9,60	8,20
Ca	11,09	10,51	10,79	9,95	10,20	9,91	9,68
Na	0,52	0,96	0,88	2,51	2,51	2,53	1,92
K	-	-	-	0,42	0,39	0,40	1,58
V	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	0,50	-	-	-
F	-	-	-	1,85	-	-	--
O	43,08	43,58	43,28	41,05	42,60	42,77	41,98
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов							
Na	0,17	0,32	0,29	0,81	0,86	0,84	0,64
K	-	-	-	0,09	0,08	0,08	0,33
Ca	-	-	0,06	-	-	-	-
сумма "А"	0,17	0,32	0,35	0,90	0,94	0,92	0,97
Na	-	-	-	0,06	0,02	0,05	0,05
Ca	2,00	2,00	2,00	1,94	1,98	1,95	1,95
Mg	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	-	-	0,03	0,04	0,06	0,05	0,04
Mg	4,42	4,33	4,23	3,50	3,39	3,19	2,78
Fe ²⁺	-	-	0,04	0,06	0,17	0,27	0,57
Al	0,44	0,66	0,64	1,19	1,23	1,28	1,38
Ti ⁴⁺	0,04	-	0,07	0,14	0,16	0,20	0,23
V ³⁺	-	-	-	-	-	-	-
Cr ³⁺	-	-	-	-	-	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	0,71	1,01	1,20	2,39	2,46	2,56	2,77
Si	7,29	6,99	6,80	5,61	5,54	5,44	5,23
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
О	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	2,00	1,22	2,00	2,00	2,00
F	-	-	-	0,78	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
сумма зарядов к-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
сумма катионов	15,18	15,33	15,36	15,90	15,94	15,92	15,98

Примечание к таблице 4

Примечание. Минералы: 3-5,7-10 – паргасит; 1,2 и 11-13 – магнезиогорнблендит; 14 - 17 – саданагаит, 6 – тремолит. Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

При этом оказалось, что точки, характеризующие химический состав изучаемых амфиболов из шпинель- и корунд-содержащих групп расположились в виде не пересекающихся между собой областей. (Рисунок 26). Точки составов амфиболов из шпинель-содержащих групп образцов вытягиваются в линию, так как содержания железа в этих амфиболах невелико и не превышает 0,03 масс% (что находится в пределах погрешности). Точки составов из корунд-содержащих геммологических групп образовали растянутое пятно, так как вариации содержания железа в этих образцах больше (от 0,7 до 0,57 масс%). Изменчивость химического состава амфиболов в пределах каждой из пяти геммологических групп можно отследить в таблице 4. Все результаты анализов химического состава амфиболов с расчетами кристаллохимических формул приведены в Приложении к данной работе.

Из диаграмм (Рисунок 26, Рисунок 27) видно принципиальное различие в составах амфиболов: в шпинелевых группах образцов они по составу соответствуют паргаситу (в группах 3.1 и 3.2) и магнезиогорнблендиту (магнезиальной роговой обманке) (в группах 3.2 и 4.2), а в корундовых группах – амфиболы представляют собой промежуточные члены ряда магнезиосаданагаит – паргасит (в группах 6.2, 6.3 и 6.4).

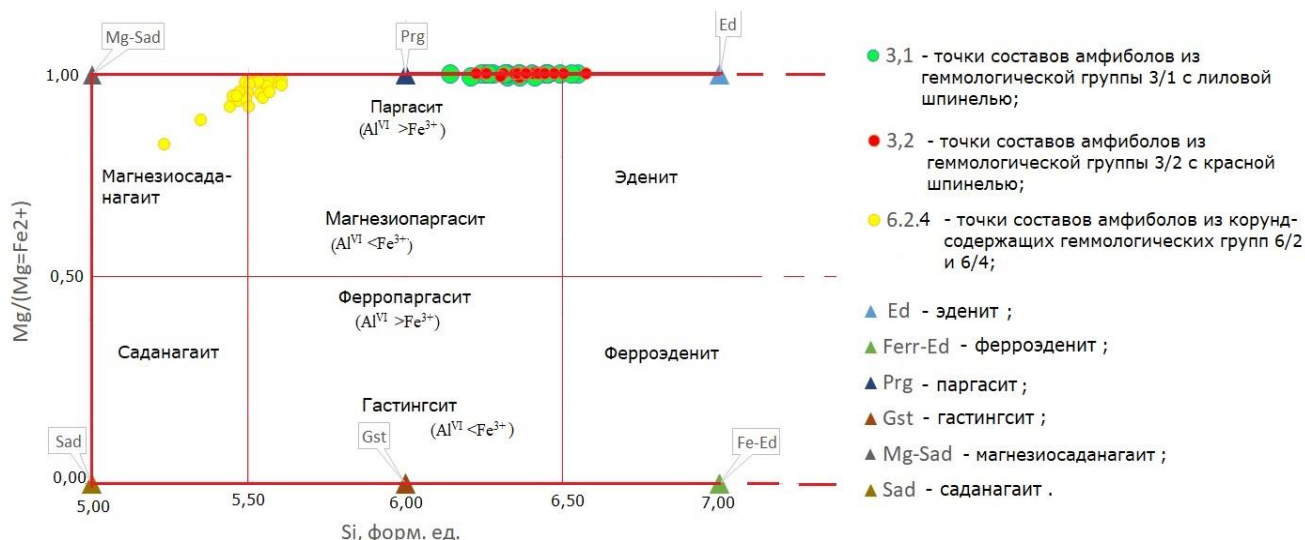


Рисунок 26 – Классификационная диаграмма амфиболов с параметрами $Ca_B > 1,50$; $(Na+K)_A > 0,50$; $Ti < 0,50$ (Leake et al., 1997).

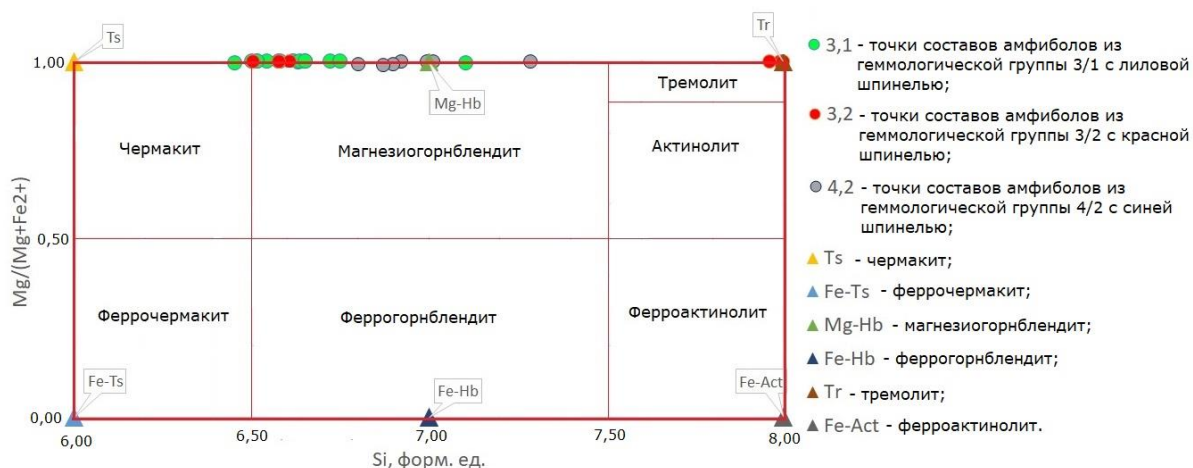


Рисунок 27 – Классификационная диаграмма амфиболов с параметрами $Ca_B > 1,50; (Na+K)_A < 0,50; Ca_A < 0,50$ (Leake et al., 1997)

На классификационных диаграммах (Hawthorne et al., 2012), точки химических составов изученных амфиболов месторождения Лук Йен также попадают в подгруппу кальциевых амфиболов (Рисунок 28), с той разницей, что на этой диаграмме точки составов образуют менее линейные области, так как в осях диаграммы находятся те элементы, содержания которых в изучаемой выборке амфиболов варьируют в большей степени.

Согласно этой классификации, в шпинелевых геммологических группах образцов амфиболы по составу соответствуют паргаситу, магнезиогорнблендиту, а также тремолиту. Амфиболы из корундовых групп образцов по составу соответствуют саданагаиту.

Согласно обеим классификационным диаграммам названия амфиболов, шпинель-содержащих геммологических групп совпадают, а область амфиболов из корунд-содержащей группы более сдвинута в сторону саданагаита.

Амфиболы, характеризующиеся чистым тремолитовым составом представляют собой мелкозернистые вкрапления в минералах с высоким содержанием магния – в форстерите, в доломите и диопсиде. Этим объясняется их обособленное расположение на классификационной диаграмме.

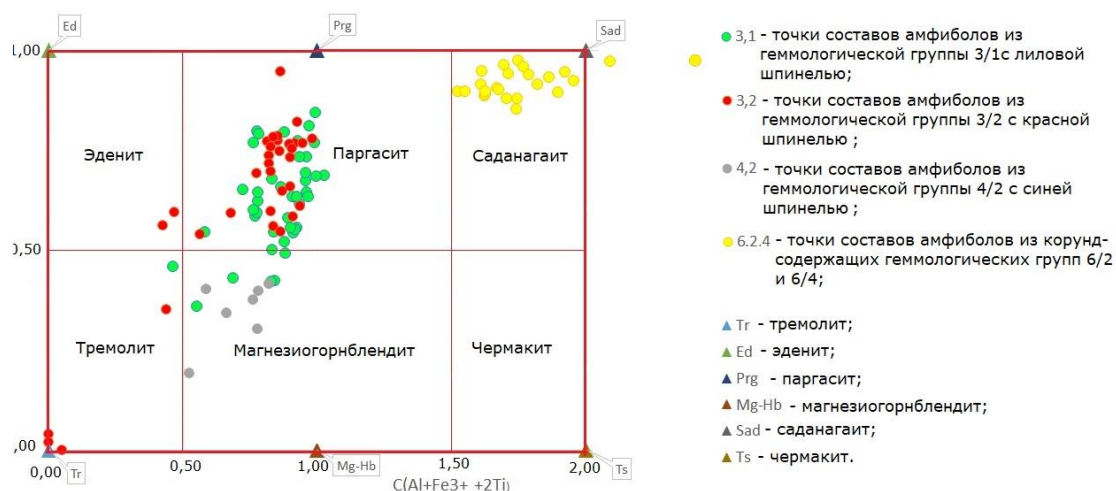


Рисунок 28 – Классификационная диаграмма амфиболов с параметрами $v(Ca+\sum M_{2+})/\sum V \geq 0,75$; $B Ca/\sum V \geq B \sum M^{2+}/V$ (Hawthorne et all., 2012))

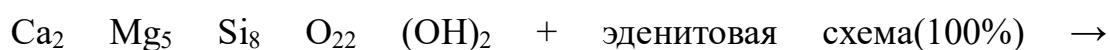
Составы изученных амфиболов описываются 2 изоморфными схемами, наложенными на тремолит, которые приводят при 100-процентной реализации (доле) к составам конечных членов изоморфных рядов, представленных в таблице 5.

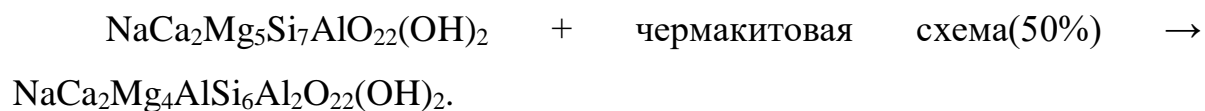
Таблица 5 – Крайние и конечные члены изоморфных рядов

№№ п/п	название	аббревиатура	формула
2	ЭДЕНИТ	Ed	$NaCa_2 Mg_5 (Al_1 Si_7) O_{22} (OH)_2$
4	ЧЕРМАКИТ	Ts	$Ca_2 (Mg_3 Al_2) (Al_2 Si_6) O_{22}(OH)_2$
6	ТРЕМОЛИТ	Tr	$Ca_2 Mg_5 Si_8 O_{22} (OH)_2$

1. Эденитовая схема изоморфизма: $Si_T \leftarrow Al_T + Na_A$;
2. Чермакитовая схема изоморфизма: $2Mg_C + 2Si_T \leftarrow 2Al_C + 2Al_T$;

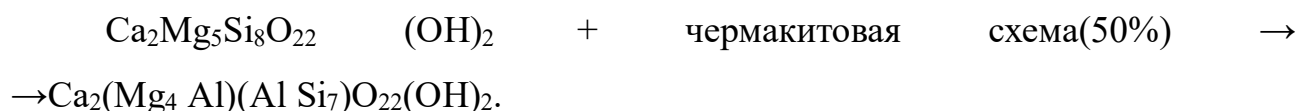
При выбранных изоморфных схемах стоит отметить, что кристаллохимическую формулу паргасита можно представить в виде наложения на тремолит эденитовой схемы изоморфизма, реализованной на 100% и чермакитовой схемы изоморфизма, реализованную на 50% ($2Mg_C / 2 + 2Si_T / 2 \leftarrow 2Al_C / 2 + 2Al_T / 2$):



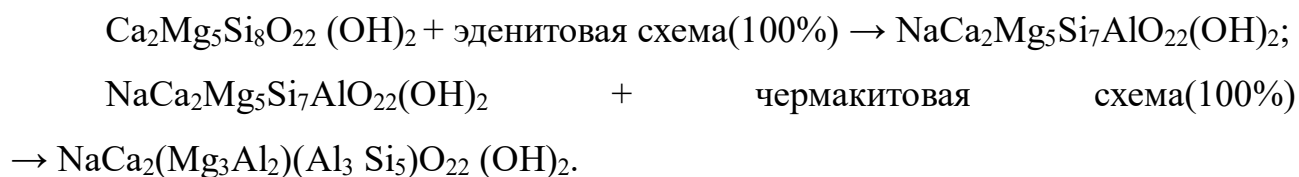


Из рисунка 29 видно, что точки, характеризующие состав амфиболов из шпинель-содержащих геммологических групп расположились на диаграмме отношения $\text{Al}_{\text{тетр}}$ к $\text{Al}_{\text{окт}}$ в виде растянутой области вдоль линии, отвечающей соотношению 2:1 (учитывая баланс зарядов, один атом заменяется двумя), что и отвечает эденитовой схеме изоморфизма. Чермакитовая же схема изоморфизма описывается отношением 1:1, реализуется лишь на половину, поэтому и область расположения точек на диаграмме сдвинута к этой линии намного в меньшей степени.

Кристаллохимическую формулу магнезиальной роговой обманки можно получить при наложении на формулу тремолита чермакитовой схемы изоморфизма, реализованную на 50%:



Кристаллографическая формула саданагаита получается при наложении 100% эденитовой и чермакитовой схем изоморфизма на формулу тремолита:



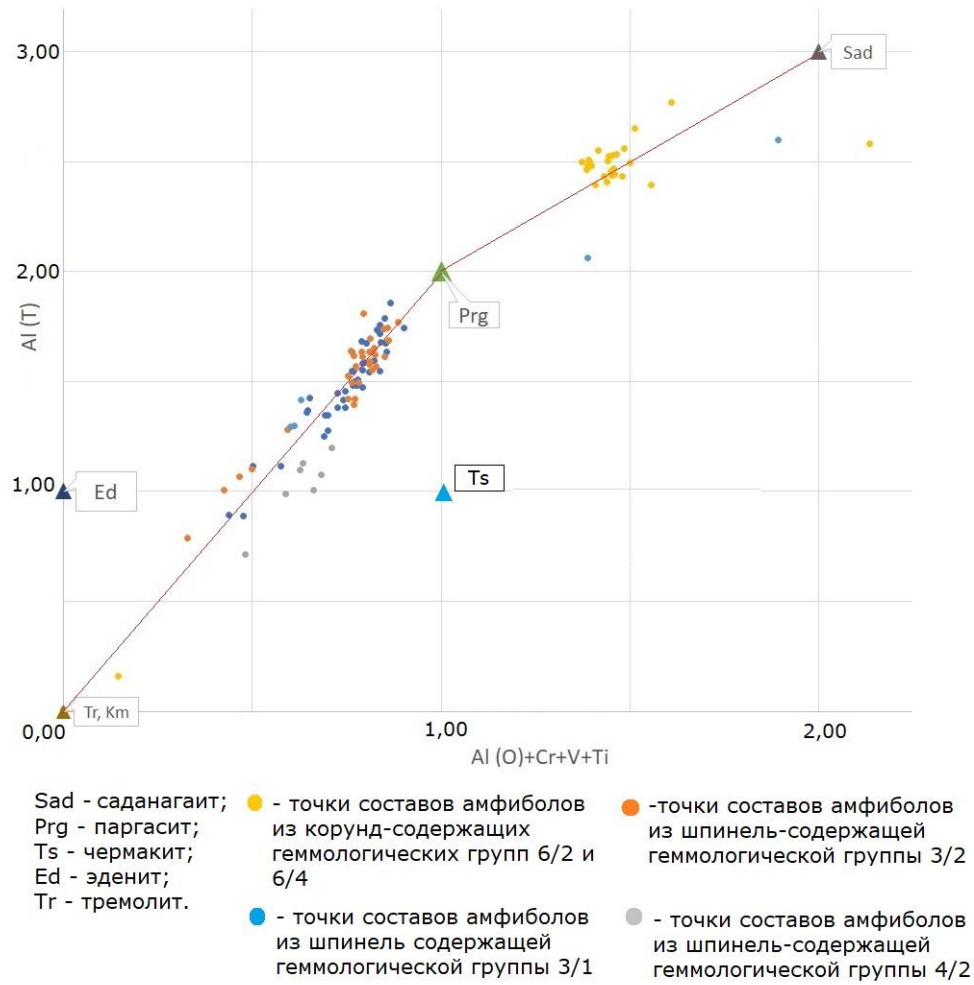


Рисунок 29 – Диаграмма отношения $Al_{тетр}$ к $Al_{окт}$ в составе амфиболов месторождения Лук Йен, Северный Вьетнам

Глава 4. Генезис корунд- и шпинель-содержащих мраморов месторождения

Как было показано в разделе Состояние изученности, основной причиной формирования мраморов месторождения Лук Йен и камнесамоцветной минерализации в них, являлся процесс регионального метаморфизма. При этом не вполне ясны остаются причины, которые привели к формированию в одних частях мраморного массива корундовой (рубиновой), а в других – благородной шпинелевой минерализации, которые различаются как по набору ассоциирующих минералов, так и по геологическому положению (стратиформное залегание в первом случае и разноориентированные линзы и гнезда во втором). Для выяснения этого вопроса нами был проведен парагенетический анализ минеральных парагенезисов различных геммологических групп мраморов в пределах месторождения, результаты которого представлены ниже.

4.1. Парагенетический анализ

Минералы корундового и шпинелевого парагенезисов можно нанести на диаграммы состав-парагенезис с помощью которых появляется возможность проследить, как сменяются фазы при переходе от одного парагенезиса к другому (Рисунок 31). Реальные точки составов корунд- и шпинель-содержащих мраморов нанесены на треугольную диаграмму, из которой видно, что составы корунд-содержащих мраморов характеризуются более высоким содержанием Al, в сравнении с составами шпинель-содержащих мраморов (Рисунок 30). Смена парагенезиса по приведенным ниже химическим реакциям происходит в каждой отдельной точке, то есть без изменения исходного состава породы.

На диаграммах выбраны инертные компоненты – Al, Mg, Si; избыточные компоненты – CaO, Na₂O, FeO; вполне подвижные компоненты – H₂O, CO₂. Точки составов минералов нанесены на диаграммы в соответствии с соотношением инертных компонентов в кристаллохимических формулах минералов.

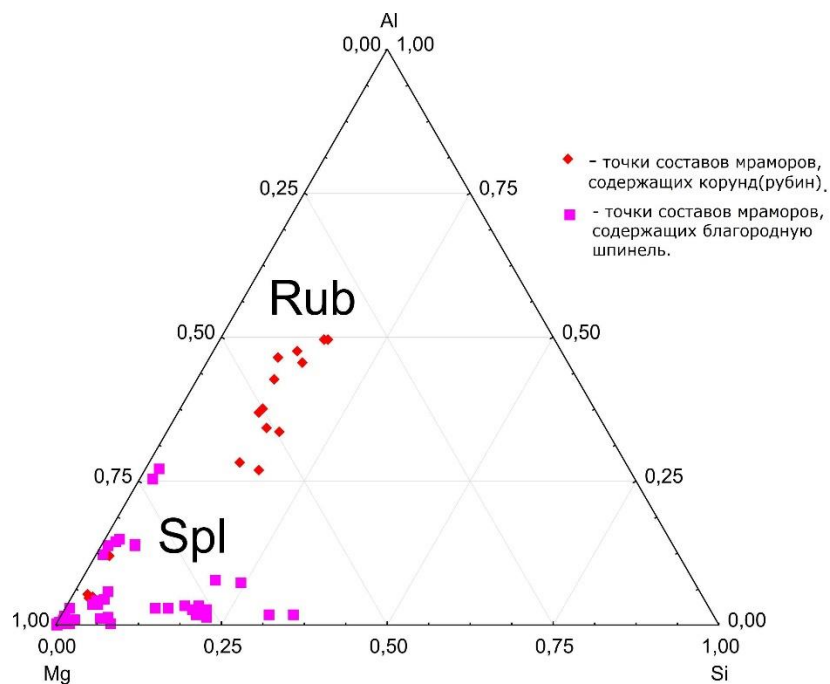


Рисунок 30 - Изображение точек составов корунд- и шпинель-содержащих мраморов месторождения Лук Йен на равностороннем треугольнике (Соколов П.Б., устное сообщение)

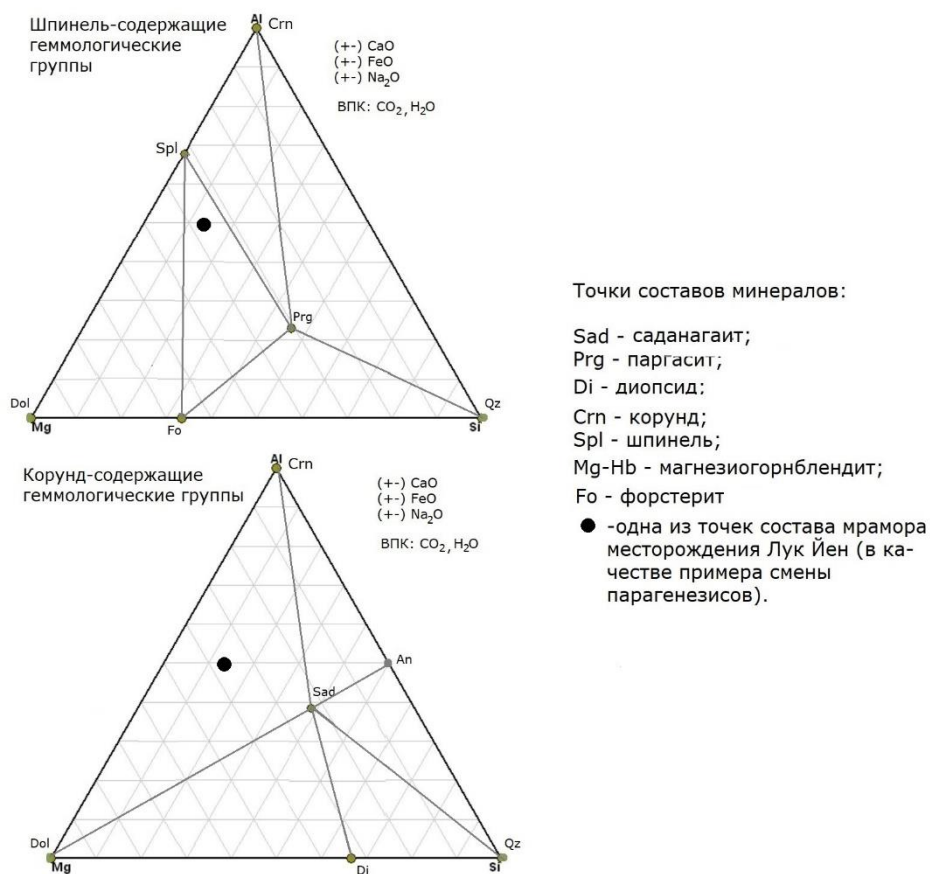
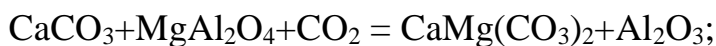


Рисунок 31 – Парагенетические ассоциации корундовых и шпинелевых геммологических групп, нанесенные на диаграммы состав-парагенезис

С помощью этих диаграмм были определены уравнения химических реакций, иллюстрирующих взаимосвязь между минералами различных парагенезисов (в данном случае - корундового и шпинелевого).

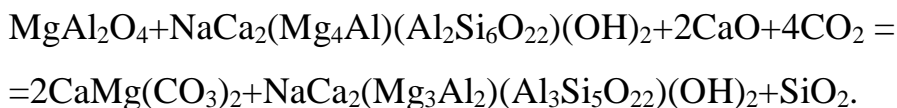
1. Шпинель+кальцит = доломит+корунд



2. Форстерит+кварц = диопсид



3. Шпинель+паргасит = доломит +саданагаит



Из уравнения (1) видно, что концентрация CO_2 влияет на смещение равновесия шпинель – корунд: при уменьшении концентрации углекислого газа равновесие смещается в сторону шпинели. Кроме того, смещение в сторону шпинели происходит при повышении температуры и давления, что видно из рис.31. (Berman, 1991).

При переходе от шпинелевого парагенезиса к корундовому происходит также изменение составов сопутствующих амфиболов. В парагенезисе со шпинелью наблюдаются амфиболы с более высоким содержанием магния (магнезиогорнблендит, паргасит, тремолит), а в парагенезисе с корундом – с более высоким содержанием алюминия (саданагаит). Такой переход от паргасита к саданагаиту иллюстрирует реакция (3).

Образование парагенезисов, включающих в себя шпинель с паргаситом или, в другом случае – корунд с саданагаитом, диктуется первоначальным составом породы, а также геологическими процессами, которые контролируются реакциями, приведенными в данном разделе. Как видно из рисунков 30 и 31, составы мраморов месторождения Лук Йен допускает возможность сосуществования корунда с паргаситом и шпинели с саданагаитом. Но так как в реальности мы этого не наблюдаем, то скорее всего процессы образования

парагенезисов определяется реакциями (1),(2),(3). При таких переходах от одного парагенезиса к другому соотношение инертных компонентов в породе не меняется, меняются фазы, составляющие парагенезис и количество этих фаз. Причина парагенетического перехода заключается в смещении равновесий, описанных реакциями (1),(2),(3).

Глава 5. Обсуждение результатов

5.1. Дискуссия

Как было показано ранее в соответствующих разделах, проявления корунда и шпинели в мраморах месторождения Лук Йен не встречаются совместно, а также характеризуются различным геологическим положением. С точки зрения геологических процессов это может быть описано следующим образом. Порода-протолит, вероятнее всего, не была однородна. Можно предположить, что она имела примеси глинистого состава, с различными соотношениями Al и Mg. Такими примесями могут быть глинистые минералы, например, каолинит (с высоким содержанием Al) и монмориллонит (с высоким содержанием Mg). Соответственно, протолитом мраморов месторождения Лук Йен мог быть известняк, содержащий в себе прослой глинистых минералов, или мергель, который по определению является осадочной глинисто- карбонатной породой.

В ходе метаморфизма образовались мрамора неоднородного состава: там, где присутствовали примеси монмориллонита (избыточное количество Mg) – наблюдается шпинель-содержащий парагенезис с паргаситами, тремолитами и магнезиогорнблендитами (амфиболами с высоким содержанием Mg), а где присутствовали примеси каолинита (избыточное количество Al) – парагенезис с корундом и саданагаитом (амфиболом с высоким содержанием Al).

В случае, когда равновесия, описываемые уравнениями (1), (2), (3), нарушаются, происходит смена парагенезисов. Как было показано в предыдущем разделе, факторами, влияющими на равновесие минеральных фаз могут служить изменение температуры или давления и изменение концентраций вполне подвижных компонентов в системе.

Из уравнения (1) видно, что смещение равновесия шпинель-корунд в сторону шпинели происходит при уменьшении концентрации CO_2 . Это возможно объяснить следующими геологическими процессами.

Первая заключается в том, что неоднородность состава мраморного массива кроме отличий в первоначальном составе проявляется в неравномерном

распределении органического вещества, а также в неравномерной пористости породы. Таким образом, состав (содержания таких вполне подвижных компонентов, как CO_2 , H_2O , Na_2O) количество порового раствора в разных областях массива не будут одинаковыми. В ходе метаморфизма мраморный массив может растрескиваться, и тогда в образованные трещины (как в зоны пониженного давления) начинает стремиться поровый раствор. В таком случае CO_2 может улетучиваться, и его концентрация снижается, смещая равновесие шпинель-корунд в сторону шпинели. Начинается перекристаллизация и перераспределение элементов исходного состава данной области мраморного массива между новым набором фаз. Корундовый парагенезис сменяется шпинелевым и вместе с тем происходит перекристаллизация амфиболов: саданагаит с доломитом переходят в паргасит со шпинелью.

Вторая гипотеза заключается в том, что трещины в мраморном массиве, куда стремится поровый раствор вызваны внедрением интрузий. Согласно работе (Garnier et al., 2008), мраморный массив действительно прорван гранитными дайками и пегматитами. Но при этом важно отметить, что отчетливой приуроченности камнесамоцветной минерализации к контактовым зонам интрузий в мраморах месторождения Лук Йен не отмечено.

Третьи предполагали, что шпинель- и корунд-содержащие области не были сформированы одновременно. Согласно работе (Garnier et al., 2008), шпинель-содержащие мрамора северного Вьетнама образовывались в условиях амфиболитовой фации метаморфизма ($T = 610$ до 790 °C и $P \sim 6$ кбар) на ее прогрессивной стадии. Датирование единичных зерен цирконов, находящихся в виде включений в шпинели из вьетнамских мраморов, показало, что возраст ее формирования составляет ~ 235 млн. лет (Garnier et al., 2008). В то же время изучение флюидных включений и датировки корундов (рубинов) свидетельствуют о том, что этот минерал образовался в результате ретроградного метаморфизма ($620 < T < 670$ °C и $2.6 < P < 3.3$ кбар) в районе 15-20 млн. лет назад. Последние данные хорошо согласуются с результатами наших исследований минерального состава мраморов месторождения и химического

состава мраморов месторождения и химического состава амфиболов из различных парагенезисов. Таким образом, мы склонны полагать, что камнесамоцветная минерализация на месторождении Лук Йен формировалась в два этапа: на первом кристаллизовалась шпинель в парагенезисе с паргаситом и магнезиогорнблендитом в пермское время в ходе прогрессивного метаморфизма, и только спустя несколько сотен миллионов лет в кайнозойе при реактивизации данной области в результате коллизионных процессов, равновесие смещается в сторону корунда и кристаллизации саданагаита.

5.2. *Поисковый признак*

В ходе данного исследования было установлено, что амфиболы месторождения Лук Йен в шпинелевых мраморах представлены паргаситом, магнезиогорнблендитом (магнезиальной роговой обманкой) и в редких случаях – тремолитом, а в корундовых мраморах – саданагаитом. Стало ясно, что на классификационной диаграмме точки, характеризующие состав амфиболов образуют две непересекающиеся области (Рисунок 28). Это явление можно использовать в качестве поисковой модели для рубинов и благородной шпинели. Поисковым признаком является отношение Mg/Al (w%), что хорошо видно из диаграммы на рисунке 32, так как по этому признаку амфиболы тоже делятся на две неперекрывающиеся группы. На примере анализов составов амфиболов в пределах имеющейся коллекции образцов, отношения Mg/Al (w%) варьируют от 1,4 до 5,3 в амфиболах из шпинелевого парагенезиса, и от 0,64 до 0,87 в амфиболах из корундового парагенезиса. Можно предположить, что если в химическом составе обнаруженного в мраморе амфибола отношение Mg/Al (w%) составляет более 1,4 то в парагенезисе с этим амфиболом следует ожидать благородную шпинель, если менее 1,4 – в парагенезисе с амфиболом следует ожидать рубин.

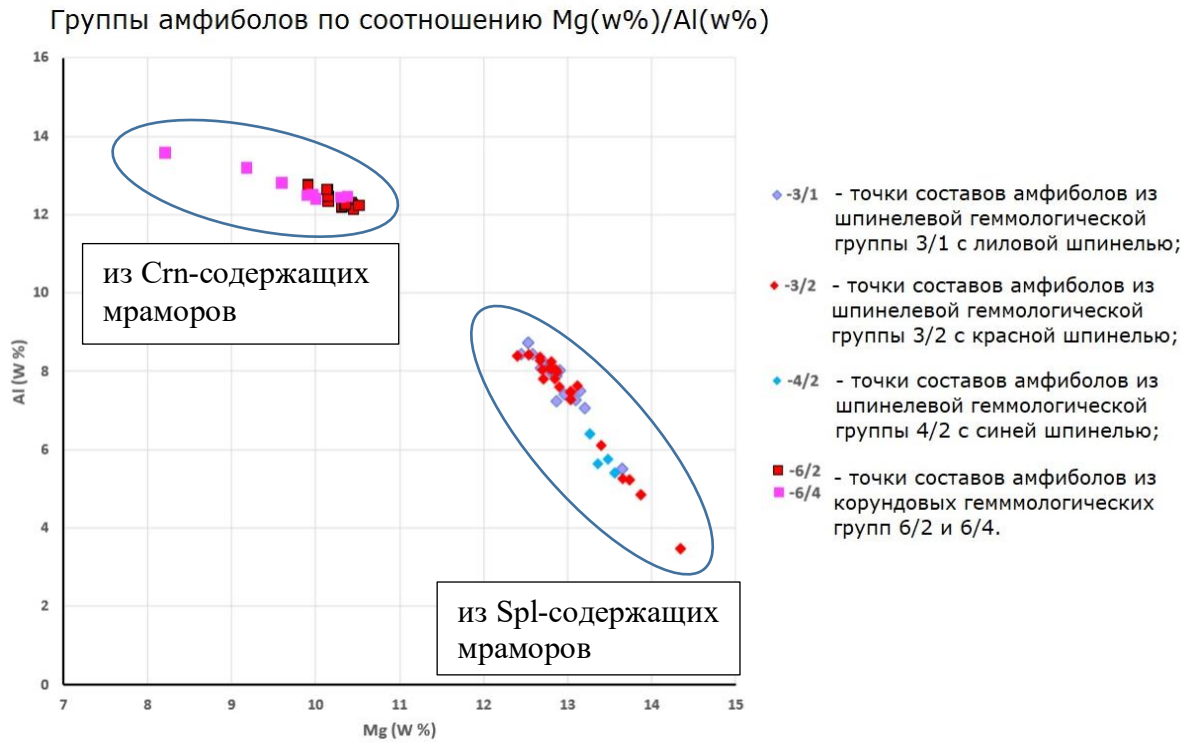


Рисунок 32 – Группы амфиболов по соотношению Mg(w%)/Al(w%): положение точек на координатной плоскости в осях Mg(w%) и Al(w%)

Заключение

В ходе проведенного исследования было выделено три морфологические разновидности амфиболов, ассоциирующих с рубинами и шпинелью.

Первая – светло-зеленые (геммологическая группа 3/1 с лиловой шпинелью) и изумрудные (геммологическая группа 3/2 с ярко-красной шпинелью) кристаллы длиннопризматического облика (0,3 – 4 см по удлинению). Амфиболы изумрудного цвета иногда находятся в сростании с кристаллами шпинели, в отличие от светло-зеленых, где сростаний обнаружено не было.

Вторая – бледные серо-зеленые амфиболы (геммологическая группа 4/2 с синей шпинелью), представляющие собой длиннопризматические идиоморфные кристаллы (длиной от долей мм до 1 см), часто в сростании с кристаллами синей шпинели.

Третья – ярко-зеленые кристаллы амфибола с длиннопризматическим обликом, достигающие по удлинению не более 1,5 см, часто наблюдаются в сростании с кристаллами корунда (геммологические группы 6/2, 6/4 в парагенезисе с корундом).

При помощи рентгеновского микроанализатора впервые было установлено, что по химическому составу амфиболы из шпинелевого и корундового парагенезисов образуют две неперекрывающиеся группы: со шпинелью ассоциируют паргасит, магнезиогорнблендит и тремолит, тогда как с корундом – саданагаит.

Проведенный парагенетический анализ позволил выявить взаимосвязь между минералами шпинель- и корунд-содержащих парагенезисов, а также причины, которые могут смещать равновесие между сосуществующими парагенезисами, в результате чего меняется и состав амфиболов. При этом фазы нового парагенезиса образуются в результате перераспределения компонентов исходного состава породы, без дополнительного привноса вещества.

Было установлено, что отношение Mg/Al (в вес.%) в химическом составе амфиболов может быть использовано как поисковый признак для оценки

потенциальной рубино- и шпинелленосности мраморов соседних районов.

Список литературы

1. Маракушев А.А., Бобров А.В., Перцев Н.Н., Феногенов А.Н. Основы кристаллооптики и породообразующие минералы – М: Научный Мир, 2000. – 316 с.
2. Брэгг, У. Кристаллическая структура минералов / У. Брэгг, Г. Кларингбулл. – М., Мир. 1967. – 390 с.
3. Киевленко Е.Я. (2001) [Геология драгоценных камней]. Москва , Ekost, 582 p.
4. К.А. Кукса, П.Б. Соколов, О.Ю. Мараховская, Г.А. Гуссиас, У. Браункомб. (2019): Минералогия, геохимия и вопросы генезиса благородной шпинели месторождения Лук Йен, Вьетнам. Минералогия, 5(3), 56-69.
5. Berman R.G. (1991): Thermobarometry using equilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. The Canadian Mineralogist, 29, 833-855.
6. Fallick A.E, Giuliani G., Rigaudier T., Boyce A.J., Pham V.L., Pardieu V. (2019): Remarkably uniform oxygen isotope systematics for co-existing pairs of gem-spinel and calcite in marble, with special reference to Vietnamese deposits. C.R. Geoscience, 351, 27-36.
7. Garnier V., Giuliani G., Maluski H., Ohnenstetter D., Phan Trong T., Hoang Quang V., Long Pham Van., Tich Vu Van., Schwarz D. (2002): Ar-Ar ages in phlogopites from marble-hosted ruby deposits in northern Vietnam: evidence for Cenozoic ruby formation. Chemical Geology, 188, 33-49.
8. Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Maluski H., Deloule E., Phan Trong T., Pham Van L., Hoang Quang V. (2005): Age and significance of ruby-bearing marble from the Red River shear zone, northern Vietnam. The Canadian Mineralogist, 43, 1315-1329.
9. Giuliani G., Dubessy J., Banks D., Hoang Quang Vinh, Lhomme T., Pironon J., Garnier V., Phan Trong T., Pam Vam L., Ohnenstetter D.,

- Schwartz D. (2003):CO₂-H₂S-COS-S₈_AlO(OH)-bearing fluid inclusions in ruby from marble-hosted deposits in Luc Yen area, North Vietnam. *Chemical Geology*, 194,167-185.
- 10.Giuliani G., Dubessy J., Banks A., Lhomme T., Ohnenstetter D. (2015):Fluid inclusions in rubi from Asian marble deposits: genetic implications. *Eur. J. Mineral.*
 - 11.Giuliani G.,Ohnenstetter D., Dubessy J., Banks D. (2008): Marble-hosted ruby deposits from Central and Southeast Asia: Towards a new genetic model. *Ore Geology Reviews*, 34, 169-191.
 - 12.Hawthorne F., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W., Martin R., Schumacher J., Welch M. (2012): Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, vol. 97, 2031-2048.
 - 13.Leake B., Wooley a., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Кривовичев В.Г., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the commission on new minerals and mineral names of the international mineralogical association (CNMMN IMA). *PROC. RMS*, 6, 82-102.
 - 14.Leake B., Wooley A., Birch W., Burke E.A., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C., Whittaker E.J.W. (2004): Nomenclature of Amphiboles: Additions and revisions to the international mineralogical associations amphibole nomenclature. *Zapiski VMO*, 4, 31-38.
 - 15.Scharer, U., Tapponnier, P., Lacassin, P.H., Leloup, P.H., Zhong, D., Ji, S., 1990. Intraplate tectonics in Asia: a precise age for large scale Miocene movement along the Ailao Shan–Red River shear zone, China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 97, 65–77.

16. Scharer, U., Zhang, L.S., Tapponnier, P., (1994). Duration of strike– slip movements in large shear-zones: the Red River belt, China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 126, 379–397.
17. Tapponnier P., Lacassin R., Leloup P.H., Scharer U., Zhong D., Liu X., Ji S., Zhang L., Zhong J. (1990) The Ailao Shan-Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343, 431-437.
18. Whitney, Evans (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Volume 95, 185–187.

Приложение

Приложение 1

Элемент	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1
	V-01-03	V-01-03	V-01-03	V-01-03	V-01-03	V-01-06	V-01-06	V-01-06	V-01-09	V-01-09
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Si	23,07	22,34	22,95	22,55	22,69	23,28	22,49	22,29	22,96	23,25
Ti	0,51	0,59	0,60	0,50	0,59	0,59	0,92	0,96	0,78	0,89
Al	7,07	7,76	7,43	7,46	7,62	7,95	8,18	8,41	7,38	7,21
Fe ^{общ}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	13,06	12,85	12,88	12,68	12,56	12,68	12,71	12,45	12,97	12,86
Ca	10,25	10,31	10,20	10,25	10,34	10,78	10,67	10,44	10,66	10,85
Na	1,55	1,81	1,65	1,64	1,71	1,75	1,80	1,88	1,41	1,31
K	-	0,18	0,16	0,18	0,19	0,18	0,29	0,27	0,16	0,16
V	-	-	-	0,25	0,00	0,00	0,17	0,21	0,16	0,14
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	1,05	-	0,65	0,83	0,73	0,94	0,00	0,88	0,70	0,85
O	43,44	44,17	43,47	43,66	43,58	41,80	42,67	42,14	42,81	42,47
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,55	0,63	0,57	0,58	0,59	0,58	0,61	0,63	0,48	0,45
K	0,00	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,05	0,03	0,03
Ca	0,05	0,05	0,01	0,03	-	-	0,03	-	0,07	0,05
сумма "А"	0,60	0,72	0,61	0,65	0,63	0,62	0,70	0,68	0,59	0,53
Ca	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	-	0,01	0,01	0,02	0,06	0,10	0,06	0,06	0,03	0,08
Mg	4,27	4,23	4,21	4,19	4,13	4,06	4,10	4,04	4,21	4,16
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	0,64	0,67	0,68	0,67	0,71	0,74	0,66	0,71	0,61	0,60
Ti ⁴⁺	0,08	0,10	0,10	0,08	0,10	0,10	0,15	0,16	0,13	0,15
V ³⁺	-	-	-	0,04	-	-	0,03	0,03	0,03	0,02
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,45	1,64	1,51	1,55	1,54	1,55	1,72	1,75	1,55	1,50
Si	6,55	6,36	6,49	6,45	6,46	6,45	6,28	6,25	6,45	6,50
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	1,56	2,00	1,73	1,65	1,69	1,60	1,98	1,62	1,71	1,65
F	0,44	0,00	0,27	0,35	0,31	0,38	0,00	0,36	0,29	0,35
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Заряды	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
сумма катионов	15,60	15,72	15,61	15,65	15,63	15,62	15,70	15,68	15,59	15,54

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 2

Элементы	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1
	V-01-09	V-01-09	V-01-09	V-11-02	V-11-02	V-11-02	V-11-02a	V-11-02a	V-11-02b	V-11-02b
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Si	25,13	23,22	23,57	23,98	23,65	23,54	24,22	22,94	23,94	23,97
Ti	-	0,78	0,44	0,87	1,04	0,99	0,87	0,86	0,70	0,86
Al	4,53	6,60	6,72	6,28	7,05	7,25	6,19	7,93	6,94	6,91
Fe	0,18	-	-	-	-	-	-	0,18	-	-
Mg	14,05	13,19	13,08	13,12	13,20	13,09	13,26	12,92	13,33	13,18
Ca	10,07	10,58	10,61	10,65	10,68	10,69	10,76	10,76	10,60	10,71
Na	1,03	1,38	1,29	1,00	1,36	1,46	0,88	1,47	1,29	1,26
K	-	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,15	0,12
V	-	-	-	-	-	-	-	0,14	-	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	45,01	44,12	44,31	44,10	43,02	42,98	43,83	42,63	43,06	42,98
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,36	0,48	0,44	0,34	0,46	0,49	0,30	0,50	0,43	0,43
K	-	0,03	-	-	-	-	-	0,03	0,03	0,02
Ca	0,05	0,07	0,07	0,04	0,04	0,03	0,06	0,07	0,04	0,02
сумма "А"	0,41	0,57	0,51	0,38	0,50	0,52	0,36	0,60	0,50	0,47
Ca	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	-	0,03	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02	0,01	0,05
Mg	4,54	4,32	4,27	4,25	4,22	4,19	4,27	4,14	4,26	4,20
Fe2	0,03	-	-	-	-	-	-	0,03	-	-
Al	0,44	0,52	0,63	0,56	0,58	0,61	0,55	0,65	0,61	0,61
Ti4	-	0,13	0,07	0,14	0,17	0,16	0,14	0,14	0,11	0,14
V3	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	0,90	1,42	1,35	1,28	1,45	1,48	1,25	1,63	1,38	1,38
Si	7,10	6,58	6,65	6,72	6,55	6,52	6,75	6,37	6,62	6,62
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Заряды	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
сумма катионов	15,41	15,57	15,51	15,38	15,50	15,52	15,36	15,60	15,50	15,47

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 3

N образца	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1
	V-11-02b	V-11-02b	V-11-02c	V-11-02c	V-11-02c	V-11-02c	V-11-02e	V-11-02e	V-11-02e	V-11-02e
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Si	23,80	22,95	23,17	22,85	23,01	23,46	23,33	23,98	23,10	22,81
Ti	0,79	0,90	0,77	0,71	0,85	0,84	0,89	0,88	0,90	0,81
Al	7,48	7,99	6,28	6,24	7,44	6,91	7,21	6,56	7,87	8,12
Fe			0,11		0,14					0,18
Mg	13,14	12,78	13,10	13,00	13,01	13,21	12,93	13,25	12,87	12,80
Ca	10,73	10,78	10,38	10,16	10,59	10,29	10,64	10,77	10,85	10,71
Na	1,52	1,49	1,17	1,17	1,38	1,28	1,35	1,30	1,51	1,56
K	-	0,19	0,11	0,11	-	-	0,17	-	-	0,21
V	-	0,25	0,10	-	-	-	0,12	-	-	0,32
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	0,65	-	-	-	-	-	-
O	42,53	42,65	44,74	45,11	43,56	44,00	43,37	43,26	42,89	42,48
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,51	0,51	0,41	0,42	0,47	0,44	0,46	0,44	0,51	0,53
K	-	0,04	0,02	0,02	-	-	0,03	-	-	0,04
Ca	0,02	0,05	0,08	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,06	0,06
сумма "А"	0,53	0,59	0,51	0,52	0,55	0,48	0,53	0,47	0,57	0,63
Ca	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	4,17	4,09	4,33	4,35	4,22	4,26	4,17	4,25	4,12	4,10
Al	0,66	0,67	0,50	0,53	0,63	0,60	0,61	0,55	0,68	0,67
Ti4	0,13	0,15	0,13	0,12	0,14	0,14	0,15	0,14	0,15	0,13
V3	-	0,04	0,02	-	-	-	0,02	-	-	0,05
Cr3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,47	1,64	1,37	1,36	1,55	1,42	1,48	1,35	1,59	1,67
Si	6,53	6,36	6,63	6,64	6,45	6,58	6,52	6,65	6,41	6,33
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	2,00	1,72	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
F	-	-	-	0,28	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов кат-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,53	15,59	15,51	15,51	15,56	15,48	15,53	15,47	15,57	15,63

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 4

№ образца	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1	3/1
	V-12-01	V-12-01	V-12-02a	V-12-02a	V-12-03	V-12-04	V-12-04	VM-37	VM-37	VM-37
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Si	22,60	22,50	25,76	22,00	21,85	21,94	22,25	23,88	21,56	24,86
Ti	0,83	0,96	0,34	0,93	0,92	0,77	0,74	0,41	0,52	0,70
Al	8,03	8,07	4,56	8,26	8,71	8,42	8,25	5,16	7,82	5,48
Fe	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,00	0,00
Mg	12,79	12,68	14,02	12,83	12,53	12,59	12,71	13,49	12,53	13,65
Ca	10,62	10,52	10,48	10,23	10,60	10,27	10,44	10,22	10,05	10,65
Na	1,85	1,67	1,06	1,75	2,17	2,03	1,97	1,03	1,49	1,07
K	0,29	0,24	-	-	0,18	0,23	0,27	0,20	0,39	0,24
V	-	-	-	-	0,15	0,20	0,14	-	-	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	0,83	-	-	0,00	0,94	-	-	0,84	-
O	42,98	42,53	43,60	43,99	42,88	42,44	43,21	45,48	44,73	43,35
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,63	0,57	0,36	0,61	0,75	0,70	0,68	0,36	0,53	0,36
K	0,06	0,05	-	-	0,04	0,05	0,06	0,04	0,08	0,05
Ca	0,02	0,03	-	0,08	0,03	0,03	0,02	0,07	0,09	0,01
сумма "А"	0,71	0,65	0,36	0,69	0,81	0,78	0,75	0,47	0,70	0,42
Ca	2,00	2,00	2,00	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	-	-	-	0,05	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0,06	0,04	0,03	-	0,06	0,01	0,04	-	-	0,06
Mg	4,14	4,12	4,47	4,16	4,07	4,12	4,13	4,48	4,21	4,37
Fe2	-	-	0,02	-	-	0,02	-	0,01	-	-
Al	0,67	0,68	0,42	0,68	0,69	0,69	0,68	0,43	0,70	0,46
Ti4	0,14	0,16	0,05	0,15	0,15	0,13	0,12	0,07	0,09	0,11
V3	-	-	-	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,67	1,68	0,89	1,76	1,86	1,79	1,73	1,12	1,68	1,12
Si	6,33	6,32	7,11	6,24	6,14	6,21	6,27	6,88	6,32	6,88
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	1,65	2,00	2,00	2,00	1,61	2,00	1,99	1,62	2,00
F	-	0,35	-	-	-	0,39	-	-	0,36	-
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов кат-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,71	15,65	15,36	15,68	15,81	15,78	15,76	15,47	15,70	15,42

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 5

N образца	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/1	3/1	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2
	VM-39	VM-39	V-01-01	V-01-01	V-01-10.2	V-01-10.2	V-11-01a	V-11-01a	V-11-01a	V-11-01b
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Si	22,85	22,85	22,26	22,60	22,35	22,32	22,55	22,56	22,61	21,75
Ti			0,68	0,57	0,43	0,62	0,37	0,51	0,36	0,55
Al	8,02	8,05	8,34	8,25	7,93	8,19	8,06	8,15	8,05	7,58
Fe	0,13	0,15			0,24	0,20				
Mg	12,90	12,83	12,67	12,67	12,82	12,69	12,80	12,75	12,78	12,58
Ca	10,52	10,63	10,47	10,57	10,18	10,53	10,46	10,52	10,49	10,13
Na	1,71	1,71	1,84	1,82	1,68	1,77	1,78	1,79	1,63	1,56
K	0,34	0,33	0,37	0,35	0,20	0,18	0,20	0,20	0,22	0,22
V	0,21	0,22	0,22	0,19						
Cr			0,13	0,18			0,12		0,14	
F	1,05	1,01	0,80	0,71			1,01			0,76
O	42,26	42,14	42,12	41,97	44,17	43,51	42,65	43,53	43,64	44,80
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,59	0,58	0,63	0,62	0,58	0,61	0,62	0,61	0,56	0,56
K	0,07	0,07	0,08	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
Ca	0,07	0,07	0,03	0,02	0,07	0,06	0,06	0,05	0,07	0,09
сумма "А"	0,73	0,72	0,74	0,71	0,70	0,71	0,72	0,70	0,68	0,70
Ca	2,00	2,00	2,00	2,00	1,96	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99
Mg					0,04					0,01
Fe2										
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca		0,02	0,03	0,05		0,02		0,03	0,01	
Mg	4,19	4,16	4,11	4,09	4,18	4,14	4,18	4,15	4,17	4,24
Fe2	0,02	0,02			0,03	0,03				
Al	0,76	0,76	0,69	0,71	0,72	0,71	0,73	0,74	0,74	0,67
Ti4			0,11	0,09	0,07	0,10	0,06	0,08	0,06	0,09
V3	0,03	0,03	0,03	0,03						
Cr3			0,02	0,03			0,02		0,02	
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,58	1,59	1,75	1,69	1,63	1,70	1,64	1,65	1,62	1,64
Si	6,42	6,41	6,25	6,31	6,37	6,30	6,36	6,35	6,38	6,36
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	1,57	1,56	1,65	1,68	2,00	2,00	1,58	2,00	1,98	1,66
F	0,43	0,42	0,33	0,29			0,42			0,33
Cl		0,02	0,02	0,03					0,02	0,02
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов катионов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,72	15,72	15,74	15,71	15,70	15,71	15,71	15,70	15,68	15,70

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съёмка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 6

N образца	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2
	V-11-01b	V-11-01b	V-11-01b	V-11-01b	V-11-01f.2	V-11-01f.2	V-11-01f.2	V-11-01f.2	V-11-01f.2	VM-41
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Si	22,18	28,94	22,84	23,01	23,20	23,28	28,56	28,67	22,80	23,69
Ti	0,41	-	-	0,16	0,27	0,44	-	-	0,36	0,45
Al	7,46	-	8,23	8,03	7,47	7,62	0,30	-	7,96	7,28
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	12,52	15,48	12,80	12,86	13,04	13,11	15,27	15,47	12,88	13,03
Ca	10,17	10,73	10,67	10,50	10,51	10,66	10,39	10,32	10,59	10,81
Na	1,75	-	1,82	1,78	1,56	1,63	-	-	1,86	1,42
K	0,19	-	0,15	0,14	0,18	0,21	-	-	0,21	0,18
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	0,15	-	-	0,22	0,23	-	-	-	0,15	-
F	-	-	-	-	0,71	-	-	-	0,79	-
O	45,18	44,84	43,37	43,19	42,71	42,94	45,48	45,54	42,30	43,06
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,62	-	0,62	0,61	0,54	0,55	-	-	0,64	0,48
K	0,04	-	0,03	0,03	0,04	0,04	-	-	0,04	0,04
Ca	0,04	0,02	0,06	0,04	0,06	0,05	-	0,01	0,04	0,04
сумма "А"	0,70	0,02	0,71	0,68	0,63	0,65	-	0,01	0,72	0,56
Ca	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,03	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,06
Mg	4,19	4,94	4,15	4,15	4,23	4,22	4,92	4,99	4,17	4,18
Fe ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	0,68	-	0,81	0,77	0,69	0,68	0,05	-	0,71	0,68
Ti ⁴	0,07	-	-	0,03	0,04	0,07	-	-	0,06	0,07
V ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr ³	0,02	-	-	0,03	0,03	-	-	-	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,57	0,01	1,59	1,57	1,50	1,52	0,04	0,00	1,61	1,42
Si	6,43	7,99	6,41	6,43	6,50	6,48	7,96	8,00	6,39	6,58
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	1,98	1,98	1,68	1,98	2,00	2,00	1,65	1,98
F	-	-	-	-	0,29	-	-	-	0,33	-
Cl	-	-	0,02	0,02	0,02	0,02	-	-	0,02	0,02
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов катионов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,70	15,02	15,72	15,68	15,63	15,65	15,00	15,01	15,72	15,55

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 7

N образца	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2
	VM-41	VM-42	VM-42	VM-42	VM-43	VM-43	VM-43	VM-45	VM-45	VM-60
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Si	23,80	23,63	23,42	22,98	22,30	21,74	21,76	23,23	22,95	24,65
Ti	0,43	0,56	0,78	0,92	0,40	0,46	0,58	0,52	0,59	0,00
Al	7,24	7,25	7,44	7,60	7,78	8,37	8,59	7,80	8,02	4,84
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	13,10	13,03	13,03	12,90	12,72	12,40	12,42	12,85	12,70	13,87
Ca	10,68	10,68	10,67	10,54	10,22	10,21	10,03	10,86	10,88	10,38
Na	1,36	1,37	1,37	1,44	1,78	1,82	1,93	1,51	1,55	1,45
K	-	-	0,20	0,19	0,49	0,48	0,50	0,17	0,16	-
V	-	-	-	0,16	-	-	-	0,21	0,16	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13	-
F	0,83	0,66	-	-	-	0,90	-	-	-	-
O	42,56	42,81	43,01	43,27	44,31	43,63	44,19	42,83	42,86	44,81
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,46	0,47	0,46	0,49	0,62	0,64	0,67	0,51	0,53	0,50
K			0,04	0,04	0,10	0,10	0,10	0,03	0,03	
Ca	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04		0,05	0,05	0,03
сумма "А"	0,51	0,51	0,54	0,57	0,75	0,78	0,78	0,60	0,61	0,53
Ca	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,06	0,07	0,03
Mg	4,20	4,19	4,18	4,17	4,21	4,13	4,11	4,12	4,08	4,55
Fe2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	0,70	0,68	0,65	0,63	0,70	0,77	0,79	0,70	0,71	0,43
Ti4	0,07	0,09	0,13	0,15	0,07	0,08	0,10	0,08	0,10	-
V3	-	-	-	0,02	-	-	-	0,03	0,03	-
Cr3	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,39	1,42	1,50	1,58	1,62	1,74	1,77	1,55	1,61	1,00
Si	6,61	6,58	6,50	6,42	6,38	6,26	6,23	6,45	6,39	7,00
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	1,66	1,73	1,98	2,00	2,00	1,62	2,00	2,00	2,00	2,00
F	0,34	0,27	-	-	-	0,38	-	-	-	-
Cl	-	-	0,02	-	-	0,00	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
сумма зарядов к-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,51	15,51	15,55	15,57	15,75	15,77	15,78	15,60	15,61	15,54

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 8

N образца	Шпинелевая геммологическая группа									
	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2
	VM-60	VM-60	VM-60	VM-60	VM-60	VM-27	VM-27	VM-28	VM-28	VM-34
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Si	24,45	24,39	23,80	25,86	21,42	25,48	25,02	24,81	26,86	24,78
Ti	-	0,39	0,52	0,67	0,41	0,00	0,00	0,58	0,26	0,60
Al	5,20	5,23	6,09	3,47	8,41	5,84	5,40	5,72	4,09	5,61
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,26
Mg	13,73	13,66	13,40	14,34	12,54	13,64	13,55	13,35	14,10	13,35
Ca	10,36	10,44	10,37	10,49	10,15	10,51	10,55	10,40	11,09	10,76
Na	1,60	1,39	1,66	1,03	2,28	0,96	0,88	0,77	0,52	0,75
K	-	-	-	-	0,30	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	44,66	44,50	44,16	44,14	44,49	43,58	44,59	44,37	43,08	43,88
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,55	0,48	0,57	0,35	0,81	0,32	0,30	0,26	0,17	0,26
K	-	-	-	-	0,06	-	-	-	-	-
Ca	0,02	0,03	0,01	-	0,04	0,01	0,05	0,02	0,01	0,06
сумма "А"	0,57	0,51	0,58	0,35	0,91	0,33	0,35	0,28	0,18	0,32
Ca	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0,04	0,04	0,04	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,10	0,04
Mg	4,50	4,46	4,37	4,62	4,19	4,33	4,39	4,30	4,42	4,30
Fe2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04
Al	0,47	0,43	0,51	0,22	0,72	0,66	0,59	0,59	0,44	0,53
Ti4	-	0,06	0,09	0,11	0,07	-	-	0,10	0,04	0,10
V3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,07	1,10	1,28	0,79	1,81	1,01	0,99	1,08	0,71	1,10
Si	6,93	6,90	6,72	7,21	6,19	6,99	7,01	6,92	7,29	6,90
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов к-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,58	15,51	15,59	15,35	15,91	15,33	15,35	15,28	15,18	15,32

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 9

N образца	Шп. гемм. гр.		Корнудовая геммологическая группа							
	4/2	4/2	6/2	6/2	6/2	6/2	6/2	6/2	6/2	6/2
	VM-34	VM-36	VM-46	VM-46	VM-47	VM-47	VM-48	VM-48	VM-48	VM-50
	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Si	24,85	24,66	19,62	19,47	19,35	19,23	19,28	19,09	19,45	19,73
Ti	0,66	0,46	0,96	1,06	0,85	0,88	1,25	1,20	1,34	0,83
Al	5,75	6,39	12,28	12,24	12,45	12,33	12,11	12,19	12,17	12,12
Fe	0,28	0,27	0,50	0,46	0,72	0,71	0,45	0,48	0,51	0,39
Mg	13,47	13,26	10,42	10,43	10,16	10,16	10,46	10,52	10,32	10,66
Ca	10,66	10,79	9,95	9,94	9,95	9,78	10,14	9,98	10,72	9,95
Na	0,88	0,88	2,40	2,40	2,35	2,35	2,46	2,45	2,33	2,51
K	-	-	0,56	0,58	0,65	0,68	0,51	0,57	0,57	0,42
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	0,29	0,30	0,21	0,17	0,39	0,30	0,35	0,50
F	-	-	1,66	1,68	1,61	1,48	1,85	1,54	1,59	1,85
O	43,44	43,28	41,35	41,44	41,70	42,24	41,11	41,70	40,65	41,05
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,30	0,29	0,77	0,77	0,77	0,76	0,81	0,83	0,78	0,81
K	-	-	0,12	0,12	0,13	0,14	0,10	0,12	0,12	0,09
Ca	0,05	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "А"	0,35	0,35	0,89	0,89	0,90	0,90	0,91	0,95	0,90	0,90
Na	-	-	0,07	0,07	0,06	0,07	0,05	0,03	0,03	0,06
Ca	2,00	2,00	1,93	1,93	1,94	1,93	1,95	1,97	1,97	1,94
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,02	0,03	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,04	0,16	0,04
Mg	4,31	4,23	3,43	3,45	3,37	3,40	3,46	3,50	3,38	3,50
Fe2	0,04	0,04	0,07	0,07	0,10	0,10	0,07	0,07	0,07	0,06
Al	0,53	0,64	1,23	1,21	1,28	1,28	1,13	1,14	1,11	1,19
Ti4	0,11	0,07	0,16	0,18	0,14	0,15	0,21	0,20	0,22	0,14
V3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr3	-	-	0,05	0,05	0,03	0,03	0,06	0,05	0,05	0,08
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	1,13	1,20	2,41	2,44	2,44	2,44	2,48	2,51	2,48	2,39
Si	6,87	6,80	5,59	5,56	5,56	5,56	5,52	5,49	5,52	5,61
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	2,00	2,00	1,30	1,29	1,32	1,37	1,22	1,35	1,33	1,22
F	-	-	0,70	0,71	0,68	0,63	0,78	0,65	0,67	0,78
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов катионов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,35	15,36	15,89	15,89	15,90	15,90	15,92	15,94	15,90	15,90

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 10

N образца	Корундовая геммологическая группа									
	6/2	6/2	6/2	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4
	VM-50	VM-50	VM-50	V-09-01d	V-09-01d	V-09-04	V-09-04	V-10-03	V-10-03	V-10-04
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Si	19,67	19,38	19,40	19,43	19,20	17,83	18,48	18,90	19,16	19,04
Ti	0,82	0,97	1,18	0,95	0,96	1,35	1,13	1,19	0,80	1,36
Al	12,73	12,22	12,60	12,43	12,45	13,58	13,18	12,81	12,49	12,49
Fe	0,61	0,46	0,59	1,18	1,15	3,87	2,67	1,89	1,42	1,61
Mg	9,91	10,36	10,14	10,29	10,38	8,20	9,18	9,60	9,96	9,90
Ca	9,68	10,04	10,07	10,20	10,08	9,68	9,82	9,91	9,58	9,82
Na	2,57	2,44	2,42	2,51	2,54	1,92	2,18	2,53	2,57	2,38
K	0,60	0,47	0,63	0,39	0,40	1,58	1,16	0,40	0,47	0,50
V	-	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	0,23	0,71	0,47	-	-	-	-	-	-	0,12
F	1,63	1,77	1,68	-	-	-	-	-	0,61	-
O	41,54	41,04	40,82	42,60	42,83	41,98	42,20	42,77	42,94	42,77
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов										
Na	0,73	0,80	0,75	0,86	0,88	0,64	0,73	0,84	0,84	0,79
K	0,12	0,10	0,13	0,08	0,08	0,33	0,24	0,08	0,10	0,10
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "А"	0,85	0,90	0,88	0,94	0,96	0,97	0,97	0,92	0,94	0,89
Na	0,16	0,05	0,09	0,02	0,01	0,05	0,04	0,05	0,07	0,05
Ca	1,84	1,95	1,91	1,98	1,99	1,95	1,96	1,95	1,93	1,95
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,09	0,06	0,09	0,06	0,03	0,04	0,03	0,05	0,01	0,03
Mg	3,26	3,42	3,33	3,39	3,44	2,78	3,07	3,19	3,33	3,29
Fe ₂	0,09	0,07	0,08	0,17	0,17	0,57	0,39	0,27	0,21	0,23
Al	1,38	1,16	1,23	1,23	1,21	1,38	1,32	1,28	1,31	1,21
Ti ₄	0,14	0,16	0,20	0,16	0,16	0,23	0,19	0,20	0,14	0,23
V ₃	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr ₃	0,04	0,11	0,07	-	-	-	-	-	-	0,02
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	2,39	2,47	2,49	2,46	2,50	2,77	2,65	2,56	2,45	2,53
Si	5,61	5,53	5,51	5,54	5,50	5,23	5,35	5,44	5,55	5,47
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ОН	1,31	1,25	1,30	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,74	2,00
F	0,69	0,75	0,70	-	-	-	-	-	0,26	-
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов к-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
сумма катионов	15,85	15,90	15,88	15,94	15,97	15,98	15,97	15,92	15,94	15,90

Примечание: Приведенные выше анализы были выполнены на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съёмка была проведена в РЦ «Геомодель» СПбГУ операторами Н.С. Власенко и В.В. Шиловских

Приложение 11

N образца	Корундовая геммологическая группа					
	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4
	V-10-04	V-10-04	V-10-04	V-10-04	V-10-04	V-10-04
	101	102	103	104	105	106
Si	19,04	18,56	18,58	18,64	18,69	19,21
Ti	1,15	1,03	1,42	0,98	1,24	0,98
Al	12,40	12,28	11,82	12,43	12,44	12,24
Fe	1,46	1,28	1,93	1,07	1,28	1,05
Mg	10,00	10,10	9,68	10,09	10,05	10,01
Ca	9,73	9,47	9,28	9,39	9,20	9,42
Na	2,44	2,47	2,54	2,53	2,49	2,58
K	0,45	0,49	0,49	0,42	0,48	0,38
V	-	-	-	-	-	-
Cr	0,16	0,21	-	-	-	0,33
F	0,65	-	-	-	-	-
O	42,52	44,11	44,26	44,46	44,13	43,80
Коэффициенты рассчитаны на 46 зарядов						
Na	0,82	0,87	0,84	0,87	0,83	0,80
K	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,08
Ca	-	-	-	-	-	-
сумма "А"	0,91	0,97	0,94	0,96	0,93	0,88
Na	0,04	0,02	0,08	0,04	0,06	0,11
Ca	1,96	1,95	1,92	1,93	1,89	1,89
Mg	-	0,03	-	0,03	0,05	-
сумма "В"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca	0,01	-	0,01	-	-	0,02
Mg	3,33	3,40	3,31	3,39	3,35	3,35
Fe2	0,21	0,19	0,29	0,16	0,19	0,15
Al	1,22	1,21	1,15	1,28	1,25	1,26
Ti4	0,20	0,18	0,25	0,17	0,21	0,17
V3	-	-	-	-	-	-
Cr3	0,02	0,03	-	-	-	0,05
сумма "С"	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Al	2,50	2,55	2,50	2,53	2,53	2,43
Si	5,50	5,45	5,50	5,47	5,47	5,57
сумма "Т"	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
O	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
OH	1,72	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
F	0,28	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-
сумма "W"	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Сумма зарядов кат-нов	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Сумма катионов	15,91	15,98	15,95	15,96	15,93	15,88