

Санкт-Петербургский государственный университет

**Чжун Фанюань**

**Выпускная квалификационная работа**

**Хризолит из различных месторождений мира**

Основная образовательная программа магистратуры

«Геология»

Профиль «Геммология и экспертиза камня»

Научный руководитель: к.г.-м. н.

доцент ПОНОМАРЕВА Наталья Игоревна

Рецензент: к.г.-м. н. ОЛЬХОВАЯ Елена Анатольевна

Санкт-Петербург

2018

<b>ВВЕДЕНИЕ.</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ХРИЗОЛИТЕ</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХРИЗОЛИТА</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА 3. ХРИЗОЛИТ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Хризолит Анголы</b>	<b>8</b>
3.1.1. Геологическая характеристика месторождения Катока (Ангола, Африка)	8
3.1.2. Химический состав хризолита Анголы.	9
3.1.3. Включения в хризолите Анголы	9
<b>3.2. Хризолит Мьянмы</b>	<b>11</b>
3.2.1. Геологическая характеристика месторождения района Бернардемё (Мьянма)	11
3.2.2. Химический состав хризолита из месторождения Пьяунг-гаунг	13
3.2.3. Включения в хризолите из месторождения Пьяунг-гаунг	16
<b>3.3. Хризолит Пакистана</b>	<b>18</b>
3.3.1. Состав хризолита месторождения Сапат Валей.	18
3. 3. 2. Включения в хризолите Пакистана	19
<b>3.4. Хризолит Северной Америки</b>	<b>21</b>
3.4.1. Геологическая характеристика месторождения Сан-Карлос (Аризона, США)	21
3.4.2. Химический состав хризолита из месторождения Аризона	23
3.4.3. Включения в хризолите месторождения Сан-Карлос Аризона)	23
<b>3.5. Хризолит Китая</b>	<b>27</b>
3.5.1. Геологическая характеристика месторождения Чжанзиакоу-Хуанхуа (Zhangjiakou- Xuanghua )	27
3.5.2. Химический состав хризолита из провинции Хэбэй	29
3.5.3. Включения в хризолитах из месторождения Китая	29
<b>3.6. Хризолит России. Месторождение Кугда.</b>	<b>32</b>
3.6.1. Геологическая характеристика месторождения Кугда (Россия).	32
3.6.2. Химический состав хризолита	33
3.6.3. Включения в хризолите	33
<b>3.7. Хризолит Ковдорского месторождения</b>	<b>36</b>
3.7.1. Геологическая характеристика месторождения Ковдор (Кольский п-ов)	36
3.7.2. Химический состав хризолита	37
3.7.3. Включения в хризолите Ковдорского месторождения	37

<b>ГЛАВА 4. ХРИЗОЛИТ ИЗ МЕТЕОРИТОВ</b>	<b>40</b>
<b>4.1. Химический состав оливинов из метеоритов</b>	<b>41</b>
<b>4.2. Включения в хризолите из палласитов</b>	<b>43</b>
<b>ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХРИЗОЛИТОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ</b>	<b>46</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>54</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.</b>	<b>55</b>

## **Введение.**

Магистерская работа посвящена изучению оливина (хризолита) земного и внеземного происхождения. Хризолит земного происхождения представлен образцами из различных месторождений мира (Мьянма, Россия, США, Пакистан, Китай, Ангола). Оливин внеземного происхождения: был изучен в образцах из метеоритов Сеймчан и Брагин. Автором работы исследовались оливины из коллекции кафедры минералогии (35 образцов), составленной при участии выпускниц кафедры минералогии Е.А. Золотарёвой (Килиной) и А.И. Дубининой, кроме того, каменный материал по месторождению Мьянмы и метеоритам был любезно предоставлен П.Б. Соколовым – президентом компании «ООО Соколов».

**Цель работы:** дать сравнительную характеристику хризолита различного происхождения

### **Задачи:**

– обобщить имеющиеся литературные данные по хризолиту земного и внеземного происхождения и дополнить результатами настоящих;

Для выполнения поставленных задач было сделано следующее:

– изучены литературные источники, посвященные хризолиту различного генезиса;  
– изготовлены двустороннеполированные пластинки (от 2x1 см до 1,5x3 см) из имеющихся образцов;

– сфотографированы и изучены образцы с помощью поляризационного микроскопа Leica DM4500 P, снабженного цифровой камерой Leica DFC 495;

– изучен химический состав хризолита;

– измерены параметры кристаллической решётки хризолита на монокристалльном дифрактометре Bruker Apex II;

– изучены включения в хризолите с помощью рамановского спектрометра HoribaLabRam HR800;

Полученные результаты по метеоритам были доложены на совещаниях Кратц-2017 в октябре 2017 и опубликованы.

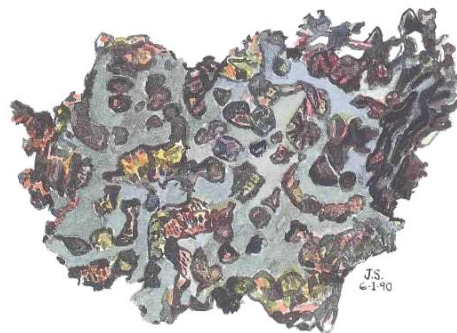
Автор выражает искреннюю благодарность П.Б. Соколову, В.Н. Бочарову, А.А. Золотарёву А.А. млад., Н.С. Власенко, С.Ю. Янсон, М.В. Никитиной за помощь и консультации в процессе выполнения данной работы, а также научному руководителю Н.И. Пономарёвой.

## Глава 1. Общие сведения о хризолите

Хризолит – прозрачная золотисто - зеленая или зеленая благородная разновидность оливина. За рубежом драгоценные разновидности оливина обычно именуются перидотом, в России – хризолитом (от греческого «хризос» – золото, «литос» – камень).



*Рисунок 1. «Ксенолитовые бомбы», содержащие ювелирный перидот, из базальтовых покровов месторождения Килбоурн-Хоул, (Fuhrbach, 1992)*



*Рисунок 2. Зарисовка палласита из Красноярска, содержащего вкрапленность оливина. Выполнена в 1820г. (Sincancas at, al 1992).*

Месторождение благородного оливина на о. Зебергет в Красном море было упомянуто Плинием в «Естественной истории» еще в 70 г. н. э. (Андерсон, 1996; Корнилов, Солодова, 1987; Буканов, 2008).

Крупные хризолиты всегда пользовались большой популярностью. Ограниченные кристаллы, реже кабошоны хризолита оправляют преимущественно в золото. Общепринятая форма огранки – бриллиантовая, в результате которой камень приобретает яркую игру. Наиболее ценятся прозрачные камни, равномерно окрашенные в золотисто-зеленый цвет. Типичные дефекты хризолитов: замутнения, трещины, включения магнетита или мелких чешуек слюды.

В минералогии оливинами называется ряд магнезиально-железистых силикатов, в котором конечный магнезиальный член - форстерит, а наиболее железистый - фаялит. Химическая формула оливина –  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$  (Бетехтин, 1961; Булах, 2002). В состав хризолита входят 40-50 % MgO, 5-20 % FeO, обычны примеси оксидов никеля и кобальта, реже марганца. Драгоценные разновидности представлены оливинами, богатыми магнием, у которых соотношение железистого и магниевого компонентов обычно составляет 1:5.

Оливин кристаллизуется в ромбической сингонии в ромбодипирамидальном виде симметрии. Он характеризуется двумя взаимно перпендикулярными направлениями спайности по пинакоидам. Оливин обладает тремя главными показателями преломления и является оптически двуосным,  $N_p = 1,653-1,645$  и  $N_g = 1,683-1,690$ . Дихроизм выражен слабо, дисперсия невелика. Плотность от 3,32 до 3,37 г/см<sup>3</sup>. Твёрдость соответствует 6-7 по шкале Мооса. Хорошо образованные кристаллы редки. Обычно он образует зерна неправильной и изометричной формы. Цвет хризолита зеленый с различными оттенками – золотистым, желтоватым, фиолетовым, травяным, табачным, бурым. Установлено, что зеленая окраска минерала вызвана закисным железом, а ее яркость и интенсивность обусловлены присутствием ионов никеля.

Месторождения хризолита относятся к магматическому классу (кимберлиты, базальты, основные ультрамафиты, щелочно-ультраосновные породы) и к пневматолитово-гидротермальному (альпинотипные ультрабазиты) (Киевленко и др., 1982).

Оливин является важнейшим породообразующим минералом кимберлитов и глубинных ксенолитов ультраосновных пород, поэтому месторождения, связанные с алмазоносными кимберлитами, являются наиболее надежным источником получения ювелирного хризолита, поскольку его добыча ведется попутно с алмазами.

Хризолит из основных ультрамафитовых пород и альпинотипных гипербазитов отличаются высоким качеством. Приурочен он в основном к серпентинизированным дунитам, перидотитам и гипербазитам. В последних хризолит содержится в рассекающих их антигоритовых и хризолитовых прожилках и линзах. Самое значительное месторождение хризолита в гипербазитах находится на о. Зебергет (Сент-Джонс) в Красном море, вблизи Африканского побережья Египта. Благородный оливин встречается в виде прекрасных бездефектных кристаллов с однородной темной желтовато – зеленой окраской, благодаря которой изделия из этого камня получили название «вечерних изумрудов».

Месторождения, связанные с базальтами, считают малоперспективными из-за трудностей извлечения кристаллов из крепких вмещающих пород, однако как источник образования россыпей он имеет большое значение. Месторождения ювелирного хризолита в базальтах, а также связанные с ними россыпи разрабатываются только в США.

Помимо хризолита земного происхождения, известны оливины (хризолиты) внеземного – из метеоритов. Ещё в XVIII веке описаны железокремнистые метеориты – палласиты, содержащие вкрапленники хризолита (Sincancas at. al 1992).

## Глава 2. Методы исследования хризолита

**Сканирующая электронная микроскопия (SEM).** Для изучения состава исследуемых образцов хризолита были изготовлены плоско-полированные пластинки. Исследование состава образцов проводилось Н.С. Власенко в Научном Парке СПбГУ, РЦ «Геомодель» на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S3400N с энергодисперсионным спектрометром Oxford X Max-20. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20кВ, ток 1,5 нА, экспозиция на точку 30 сек.. В качестве стандартов использовались аттестованные природные и синтетические материалы. Перед проведением исследования поверхность полированных образцов напылялась углеродом.

Детальные исследования минералов и микроанализ присутствующих фаз проводились на электронном микроскопе Hitachi™ 3000 в РЦ Микроскопии и микроанализа под руководством С.Ю. Янсон.

**Рентгенодифракционные методы исследования.** Определение параметров структуры хризолита выполнено А.А.Золотарёвым млад. в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» методом рентгеноструктурного анализа на монокристалльном дифрактометре Bruker Apex II, оснащённом плоским детектором отражённых рентгеновских лучей типа CCD.

**Рамановская спектроскопия для изучения включений.** Изучение зёрен хризолита, а также включений в них проведено в плоско полированных пластинках с помощью поляризационного микроскопа Leica DM4500 P, снабжённого цифровой камерой Leica DFC 495 при 10- и 20- кратном увеличении объектива.

Исследования состава включений выполнены в РЦ Геомодель В.Н. Бочаровым на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 при 50-кратном увеличении объектива. Регистрация спектров комбинационного рассеяния выполнена в спектральном диапазоне 4000-100 см<sup>-1</sup>. Источником возбуждения служил аргоновый лазер 514,5 нм с мощностью 1-50мВт. Калибровка прибора осуществлялась по Si-эталону (520,7 см<sup>-1</sup>). Использовалась дифракционная решетка 1800 ш/мм, диаметр конфокального отверстия 300 мкм. Время накопления данных от 2 до 10 сек, с количеством повторов от 2 до 15.

## Глава 3. Хризолит из различных месторождений.

### 3.1. Хризолит Анголы

Исследованный в данной работе хризолит Анголы представляет собой обломки кристаллов зеленовато-бурого цвета (рис. 3), извлеченные из кимберлитов месторождения Катока (Ангола, Африка)



Рисунок 3. Обломок кристалла хризолита.  
Образец А-1. Размер 2 см.

#### 3.1.1. Геологическая характеристика месторождения Катока (Ангола, Африка)

Хризолит Анголы установлен в кимберлитах и добывается попутно с алмазами в алмазоносном районе Лунда, расположенном в пределах в пределах архейского кратона Касаи. Кимберлитовые трубки приурочены к узлам пересечения двух систем глубинных разломов СВ и СЗ направлений. Внедрение кимберлитовых интрузий датируется ранним мелом (К1). К меловому периоду сформировались и радиально-кольцевые структуры разного порядка. К наиболее крупной, 200 км в диаметре. Сауримской структуре приурочено кимберлитовое месторождение Катока (рис. 4), которое имеет размеры 915×990 м и площадь – 63,6 Га (Зинченко, 2015)

Оливин в кимберлитах Анголы приурочен к серпентинизированным магматическим брекчиям и представлен угловатыми порфирокластами (рис.5) (Зинченко, 2015), где он, ассоциирует с флогопитом, железо-оксидными фазами чёрного и бурого цвета, имеющими обычно шаровидную или каплевидную форму, пиропом, хромдиопсидом, цирконом, рутилом, апатитом, перовскитом, хромшпинелидами, магнетитом, серпентином. Как правило, оливин замещён *серпентином*, а неизменённые его зёрна характерны лишь для пород диатремы, залегающих на глубинах более 300 м (Зинченко, 2015).





Рисунок 4. Кимберлитовая трубка Катока (Зинченко, 2015)

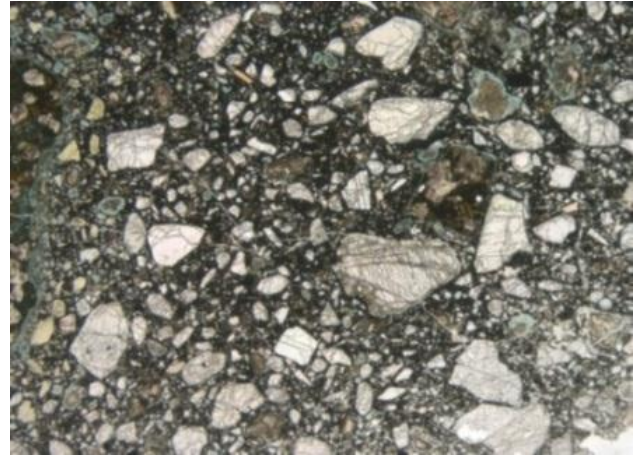


Рисунок 5. Магматическая брекчия, сложенная серпентином и порфирокластами оливина (Зинченко, 2015).

### 3.1.2. Химический состав хризолита Анголы.

По данным микронзондового анализа (табл. 1) в хризолите Анголы содержится от 41,3 до 46,08 MgO и в среднем 15,34 вес,% FeO. Из элементов – примесей в хризолите установлены марганец, кальций и никель, содержание которых варьируют соответственно: от 0,13 до 0,28 вес,% MnO, 0,01- 0,17 вес,% CaO и 0-0,24 вес,% NiO/

Как известно (Саранчина, Шинкарев, 1967), магнезиальность оливина (Mg#) является важным параметром для его характеристики. Определяется она по формуле:

$$\text{Mg\#} = [\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})] \cdot 100\%,$$

где Mg и Fe<sup>2+</sup> соответствуют атомным единицам этих компонентов в минерале (коэффициентам в его кристаллохимической формуле). Средняя магнезиальность хризолита Анголы, рассчитанная по 13 анализам, соответствует 84%.

### 3.1.3. Включения в хризолите Анголы

В имеющихся у автора небольших обломках кристаллов хризолита удалось установить лишь чёрные остроугольные включения пластинчатой формы (рис. 6). По данным рамановской спектроскопии – это железосодержащие фазы. Ранее (Зинченко, 2015) было отмечено присутствие включений в гранате и клинопироксене из трубки Катока, которые характеризовались амёбообразным очертанием, были локализованы по границе зёрен и названы им сфероиды состава - Fe,Ni,Cu(O,S).

Таблица 1

## Состав оливинов Анголы

№№ проб	Содержание компонентов, мас.%						
	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO	FeO	NiO	Сумма
Ан-1	46,08	40,21	0,17	0,24	13,93	Н.о.	100,63
Ан-2	45,85	39,82	0,21	0,25	13,89	Н.о.	98,78
Ан-3	45,98	40,29	0,16	0,00	13,57	Н.о.	97,29
Ан-4	45,65	39,61	0,18	0,26	13,69	Н.о.	99,38
Ан-5	46,11	39,91	0,19	Н.о.	13,79	Н.о.	97,77
Ан-6	45,98	40,06	Н. о,	0,28	13,66	Н.о.	96,43
Ан-7	46,08	39,43	0,17	0,26	14,05	Н.о.	96,25
Ан-8	45,68	39,50	0,15	0,23	13,81	Н.о.	99,37
Z-1	38,9	38,2	0,01	0,27	22,8	0,09	100,27
Z-2	41,3	38,6	0,01	0,28	19,6	0,09	99,88
Z-3	45,7	39,7	0,03	0,14	14	0,15	99,72
Z-4	43,7	39,3	Н.о.	0,13	16,7	0,24	100,07
Z-5	43,7	40	Н.о.	0,19	16	0,08	99,97
Ан-сред.	44,67	39,59	0,10	0,19	15,34	0,05	99,94
<b>σ</b>	0,65	0,18	0,02	0,03	0,82	0,03	0,04
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле (для Ан - сред)</i>							
	Mg	Si	Ca	Mn	Fe	Ni	
	1,675	0,996	0,003	0,004	0,323	0,001	
Mg#*100	<b>84%</b>						

Примечание. Анализы Ан-1 – Ан-8 данные автора; Z-1 – Z-5 данные В.Н.Зинченко (2015); Ан-средн. Среднее значение из 13; **σ** - отклонение от среднего; Mg# =Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.; Н. о. – не обнаружено

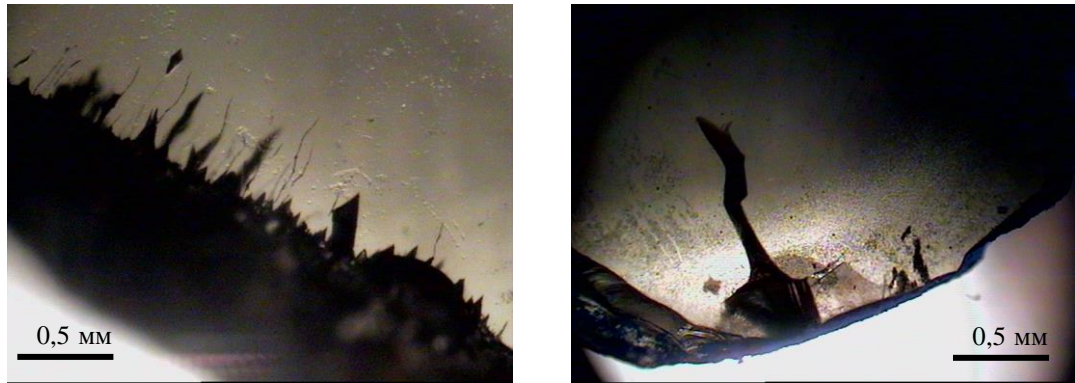


Рисунок 6. Железосодержащие фазы в хризолите Анголы обр. 6.

## 3.2. Хризолит Мьянмы

### 3.2.1. Геологическая характеристика месторождения района Бернардмё (Мьянма)

Хризолит на территории Мьянмы найден на месторождении Пьяунг-гаунг в районе Бернардмё (Themelis, 2008), расположенном в 25 км к северу от Могока (рис. 7).

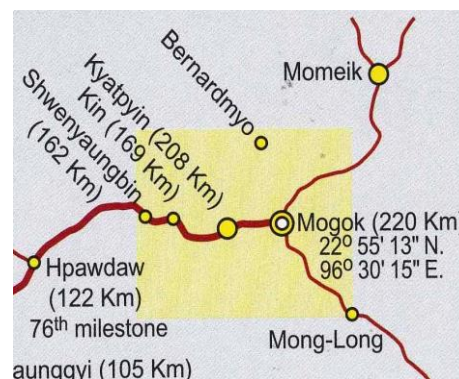


Рисунок 7. Схема расположения района Бернардмё относительно Могока (Мьянма) (Themelis, 2008)

Территория района Бернардмё (Themelis, 2008) сложена гнейсами: гранат силлиманитовыми, чередующимися с гранат - биотитовыми (рис. 8). Кроме этого, здесь присутствуют карбонатно-силикатные породы, содержащие диопсид, скаполит, форстерит, графит и сфен. В гранат-силлиманитовых гнейсах установлены выходы лейкогранитов, сиенитов и серпентинизированные тела дунит – перидотитов..

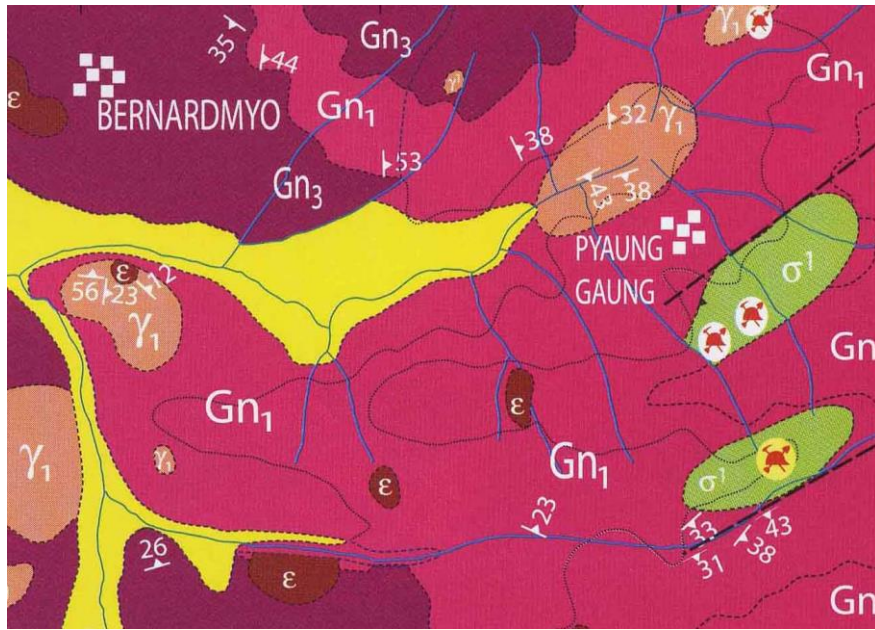


Рисунок 8. Геологическая карта района Бернардмё (Themelis, 2008)

Легенда к карте на рисунке 8.

	Аллювий	
	Лейкогранит. Сильно выветрившиеся крупнозернистые гранитные породы.	
	Дунит, перидотит и серпентин	
	Сиенит. Кварцсодержащие щелочные сиениты, щелочно-полевошпатовые сиениты с сапфиром	
	Карбонатно-силикатные породы.	
	Гранат-силлиманитовые гнейсы, чередующиеся с гранат - биотитовыми гнейсами.	
	Старые месторождения	
		Действующие месторождения



Хризолит на месторождении Пьяунг-гаунг приурочен к серпентинизированным дунитам, где он образует вкрапленность размером до 3-5 мм (рис,9), а иногда гнёзда. Выделения его обычно имеют неправильную форму. Кристаллы встречаются довольно редко, размер, как правило, не превышает 1 см, (рис.10) (Themelis, 2008)

В ассоциации с хризолитом установлены следующие минералы: диопсид, флогопит, калиевый полевой шпат, плагиоклаз, серпентин.

### 3.2.2. Химический состав хризолита из месторождения Пьяунг-гаунг

Визуально в образцах трудно установить различия между отдельными зёрнами хризолита, но, судя по составу, на месторождении можно выделить, как минимум две его разновидности – условно выделим хризолит I и II.

По данным микрозондового анализа (табл 2) хризолит I характеризуется заметно более высоким содержанием магния и пониженным количеством железа: MgO варьирует от 49 до 52 вес.%, FeO изменяется в интервале от 5 до 9 вес%, В хризолите I, в целом, элементы – примеси отсутствуют, за исключением двух точек, в которых установлен никель, содержание его варьирует в пределах 0,47 – 0,49 вес.%.

В хризолите II содержание железа заметно выше и соответствует в среднем 11,5 вес.%; соответственно количества магния ниже, чем в хризолите I: MgO колеблется от 47 до 48,5 вес.%. В этих же пробах отмечено практически постоянное присутствие марганца: содержание MnO варьирует от 0,37 до 0,53 вес.%.

Рассчитанные магнезиальности хризолита приведены в табл.1. Средняя величина Mg# хризолита I равна 92,4%, а для хризолита II она заметно ниже и соответствует 88,4%.

## Состав хризолит I из месторождения Пьяунг-гаунг

№№ проб	Содержание компонентов, мас. %						
	MgO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	NiO	Сумма	Mg#*100%
М-1	52,47	42,05	Н. о.	5,01	Н. о.	99,53	94
М-2	52,18	41,71	Н. о.	6,11	Н. о.	100	94
М-3	51,18	41,50	Н. о.	7,32	Н. о.	100	93
М-4	51,22	41,08	Н. о.	7,69	Н. о.	100	92
М-5	51,19	41,03	Н. о.	7,78	Н. о.	100	92
М-6	50,51	41,48	Н. о.	8,18	Н. о.	100,17	92
М-7	49,47	40,36	Н. о.	9,25	Н. о.	99,08	90
М-I-сред,	51,17	41,32	Н. о.	7,34	Н. о.	99,83	92
σ	0,35	0,17	Н. о.	0,48	Н. о.		
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле (для М-I - сред)</i>							
Mg		Si			Fe		
1,849		1,00			0,149		

Примечание. М-I-средн. – среднее значение из 7; σ - отклонение от среднего; Mg# = Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.; Н. о. – не обнаружено

## Состав хризолит II из месторождения Пьяунг-гаунг

№№ проб	Содержание компонентов. мас.%					
	MgO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Сумма	Mg#*100
М-8	48,25	40,27	10,26	0,42	99,2	89,44
М-9	48,22	39,8	10,72	0,49	99,23	89,34
М-10	48,26	40,65	10,87	Н. о.	99,78	88,91
М-11	47,99	40,5	10,93	0,4	99,82	88,78
М-12	47,4	40,25	10,97	0,37	98,99	88,67
М-13	48,38	40,8	11,03	0,48	100,69	88,51
М-14	47,44	39,76	11,08	0,53	98,81	88,66
М-15	48,2	40,38	11,68	Н. о.	100,26	88,03
М-16	48,69	37,13	12,71	Н. о.	98,53	87,22
М II -сред.	48,09	39,95	11,14	0,30	99,48	88,5
$\sigma$	0,13	0,35	0,22	0,07		
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле ( для М II - сред)</i>						
Mg	Si		Fe		Mn	
1,779	0,992		0,231		0,006	

Примечание. М II-средн. – среднее значение из 9;  $\sigma$  - отклонение от среднего;  $Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$ , где Mg и Fe в атом ед.; Н. о. – не обнаружено

На рис. 11 показана обратная корреляционная зависимость между содержанием оксида кремния и магниальностью хризолита.

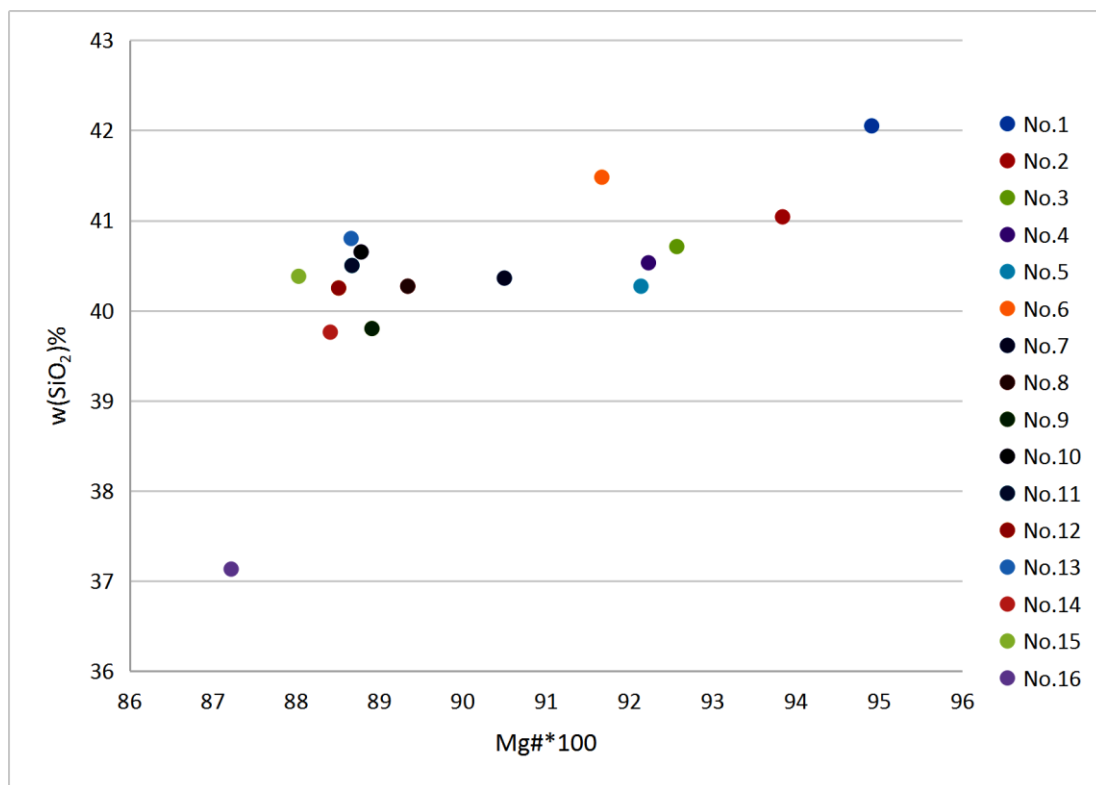


Рисунок 11. Обратная корреляционная зависимость между содержанием оксида кремния в хризолите и его магниальностью (Mg#). Точки соответствуют номерам образцов в табл. 2 и 3

### 3.2.3. Включения в хризолите из месторождения Пьяунг-гаунг

В хризолитах из месторождения Пьяунг-гаунг с помощью рамановской спектроскопии были обнаружены следующие включения:

- включения типа «лист кувшинки» – хромит в виде непрозрачных, октаэдрических кристаллов, часто окруженных дисковидными трещинами, заполненными флюидными включениями и напоминающими «отпечатки пальцев» (рис. 12);
- кристаллы хромита (рис.13);
- плёнки оксидов железа (рис. 14);
- кристаллы флогопита и геденбергита (рис. 15).

Кроме того, Т. Темелис (Themelis, 2008) наблюдал в хризолите Мьянмы бесцветные, призматические кристаллы апатита и красновато-бурые шестигранные пластинки биотита.



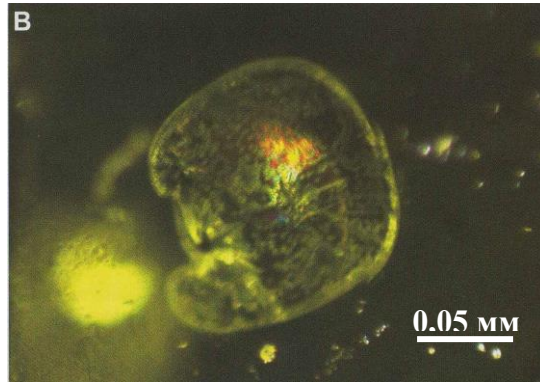


Рисунок 12 . Включение типа «лист кувшинки» (Themelis, 2008)

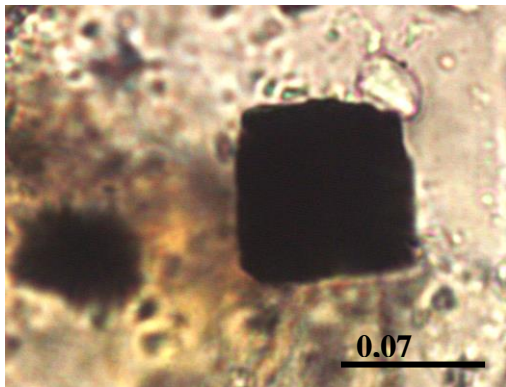


Рисунок 13 Кристалл хромита в хризолите. Образец 526-8.

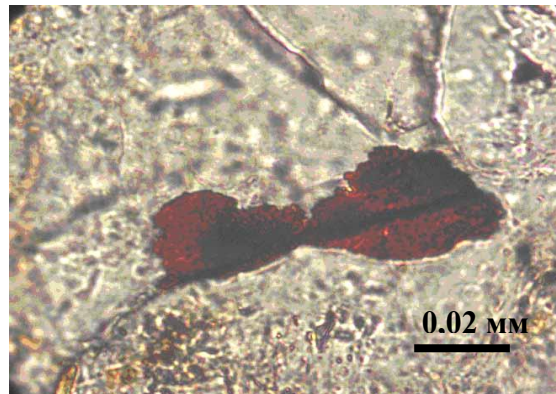


Рисунок 14 Плёнки оксидов железа в хризолите Образец. № 526-8-1

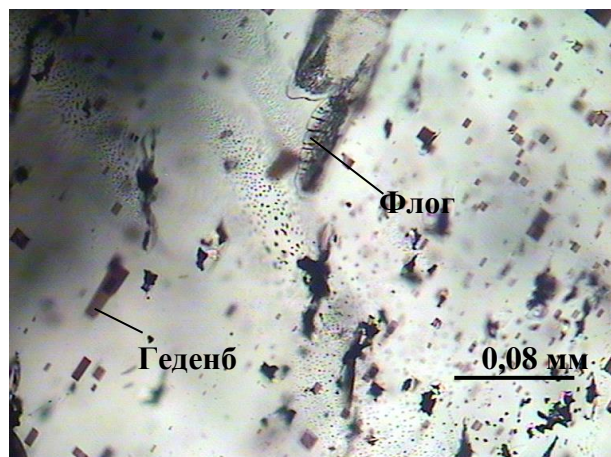


Рисунок 15. Кристаллы геденбергита (Геденб), флогопита (Флог) и флюидные включения в хризолите. Образец 526-9.

### 3.3. Хризолит Пакистана

Изученные образцы хризолита – это огранки и обломки прозрачных, светло-зелёных его кристаллов из месторождения Сапат Вaley (Sapat Valley, Пакистан). Хризолит из этого месторождения практически не содержит включений.

Месторождение Сапат Вaley находится недалеко от Сапат Нала (Sapat Nala), в долине Сапат (Sapat) в округе Мансехре, в Северо-Западной Пограничной провинции

Парагенизис оливина с палыгорскитом, тальком и Mg-содержащим карбонатом, а также присутствующий здесь магнетит, свидетельствуют о том, что месторождение приурочено к серпентинированным перидотитам, (Hammer, 2004).

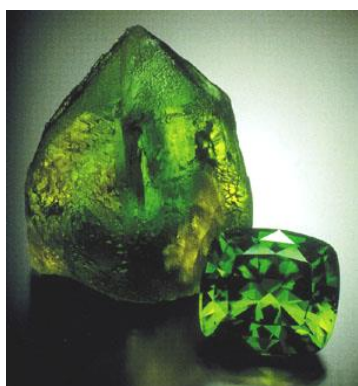


Рисунок 16. Кристалл оливина 5,1 см и 64,57 карат (Сапат Вaley, Пакистан). Камень из коллекции Лауры и Уэйн Томпсон; фото Джеффа Сквилла (Hammer, 2004).

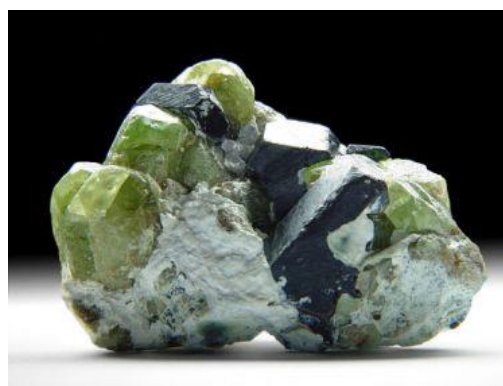


Рисунок 17. Кристаллы перидота и магнетита из месторождения Сапат Вaley, Пакистан (Hammer, 2004).

Оливин по составу соответствует форстериту (содержит всего лишь 5-10% фаялитового компонента) и представлен хорошо образованными кристаллами, размер которых может достигать 10 сантиметров. Края кристаллов обычно выглядят округлыми (рис.16 и 17). Цвет его варьирует от желто-зеленого до интенсивно-зелёного. Непрозрачный оливин имеет оливково-зеленый цвет.

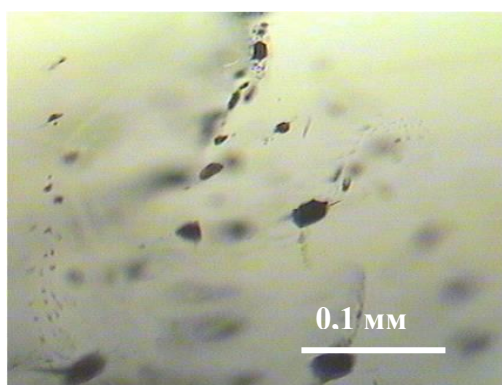
#### 3.3.1. Состав хризолита месторождения Сапат Вaley.

По данным микронзондового анализа хризолит месторождения Сапат Вaley содержит: MgO от 48,23 до 52,19 вес.%, FeO – от 4,53 до 10,21 вес.%. Элементы-примеси в нём представлены никелем, марганцем, кальцием, содержания которых варьируют в пределах (вес.,%): NiO 0,28 – 0,49; MnO 0,11 – 0,19; CaO 0,01 – 0,08.

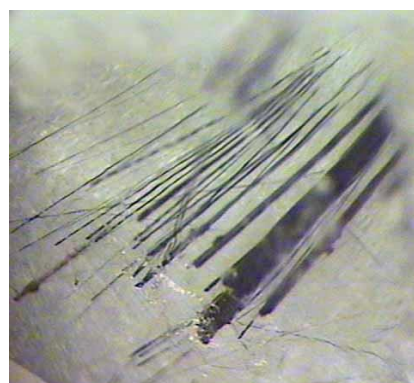
В единичных случаях обнаружены такие элементы-примеси, как титан и хром, которые присутствуют в незначительных количествах. Рассчитанная магнезиальность хризолита приведены в табл.4, и соответствует 92%.

### 3. 3. 2. Включения в хризолите Пакистана

В хризолите месторождения Сапат Вaley наблюдаются минеральные включения, которые представлены хромитом (рис.18), а также людвигитом и вонсенитом (рис. 19), что согласуется с литературными данными (Peretti , Gübelin,1996).



*Рисунок 18. Кристаллы хромита в хризолитах Пакистана. Образец 14-1.*



*Рисунок 19. Кристаллы вонсенита в хризолите Пакистана. Размер огранки 3,5 мм. Образец 14-2.*

## Состав хризолитов из месторождения Сапат Вaley (Пакистан)

№№обр	Содержания компонентов в вес %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Сумма
П-0	42,67	0,02	0,00	5,12	0,12	51,77	0,00	0,29	99,99
П-1	42,63	0,00	0,00	4,53	0,20	52,19	0,01	0,44	100
П-2	42,31	0,00	0,00	5,70	0,14	51,43	0,04	0,38	100
П-3	41,41	0,02	0,00	8,49	0,15	49,57	0,01	0,35	100
П-4	41,54	0,00	0,07	8,40	0,15	49,53	0,04	0,28	100,01
П-5	41,47	0,00	0,01	8,39	0,17	49,67	0,00	0,29	100
П-6	41,14	0,01	0,05	9,15	0,17	49,01	0,00	0,47	100
П-7	40,95	0,01	0,00	10,21	0,19	48,23	0,04	0,37	100
П-8	41,48	0,03	0,00	9,30	0,11	48,61	0,02	0,44	99,99
П-9	41,43	0,00	0,00	8,26	0,11	49,69	0,08	0,43	100
<b>П-сред</b>	41,70	0,009	0,013	7,755	0,151	49,97	0,024	0,374	100
<b>σ</b>	0,18	0	0	0,58	0,01	0,4	0,01	0,02	
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле для П-сред</i>									
Si	Fe		Mn	Mg	Ca	Ni			
1,012	0,157		0,003	1,807	0,001	0,007			
Mg#	0,92								

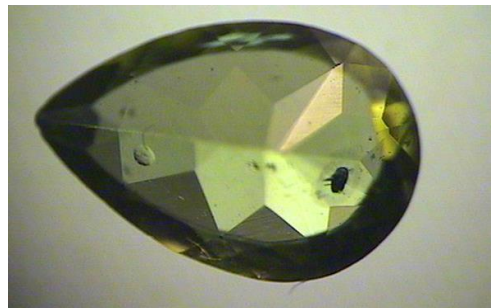
Примечание. Анализы П-0 –П-9 – данные А.А. Золотарёва и соавт. (2003); П сред -среднее, значение из 10;  $\sigma$  - отклонение от среднего;  $Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$ , где Mg и Fe в атом ед

### 3.4. Хризолит Северной Америки

Месторождения ювелирного хризолита в базальтах, а также связанные с ними россыпи разрабатываются только в США.



*Рисунок 20. Обломок кристалла хризолита из месторождения Сан-Карлос (Аризона, США). Образец 18.*



*Рисунок 21. Огранка хризолита из месторождения Сан-Карлос, шт. Аризона, США. Обр. №8*

Месторождение *Сан-Карлос* приурочено к базальтам лавового потока, а два других — *Буэлл-Парк* и *Килбоурн-Хоул* — к вулканическим жерлам. Оливин (хризолит) встречается в виде мелких и крупных бесформенных зерен или зернистых агрегатов. Бездефектные зерна редки, поэтому в ограненном виде масса большинства камней не превышает 2 каратов (Koivula, 1981; Fuhrbach, 1992)..

#### 3.4.1. Геологическая характеристика месторождения Сан-Карлос (Аризона, США)

Месторождение Сан-Карлос расположено в шт. Аризона в 4 км юго-западнее одноименного индейского поселения. Оно связано с базальтами, слагающими плоскую столовую возвышенность, представляющую собой останцы крупного лавового покрова площадью около 8,5 км<sup>2</sup>, известную под названием Перидот - Меза. Главная фаза эффузивной деятельности датируется плиоценом, Массивные базальты мощностью 3-30 м залегают на туфах, алевролитах и галечниках. Содержание хризолита в базальтах 25-40 %. Хризолит большей частью прочно зацементирован в базальтах,



*Рисунок 22. Месторождение Килбоурн-Хоул (шт Нью-Мексико), приуроченное к жерлу потухшего вулкана. Площадь его составляет 7 км<sup>2</sup>, (Fuhrbach, 1992 )*

извлечь его можно лишь с помощью взрывных работ или кувалды, что приводит к растрескиванию зерен. Встречается он и в виде мелких и крупных бесформенных зерен или грубозернистых скоплений, окруженных тонкой оболочкой губчатого базальта, и тогда извлекается сравнительно легко,

Хризолит, извлеченный из оливиновых бомб в базальтах, представляет собой обломки кристаллов (рис.20). В них встречаются прозрачные участки до 2 см, из которых получают огранённые камни (рис.21), в среднем около 5 кар, изредка до 35 кар (Буканов, 2008).

Подавляющая часть ювелирного хризолита на месторождении Сан-Карлос получена из россыпей, образовавшихся в результате выветривания хризолитоносных базальтов (рис. 22). Бездефектные зерна редки, поэтому в ограненном виде масса большинства камней не превышает 2 каратов.

Аризонский хризолит имеет широкую цветовую гамму – от бледно-зелёных до ярко- и тёмно-зелёных тонов и от коричневых оттенков до чистого коричневого цвета (Буканов, 2008).

### **3.4.2. Химический состав хризолита из месторождения Аризона**

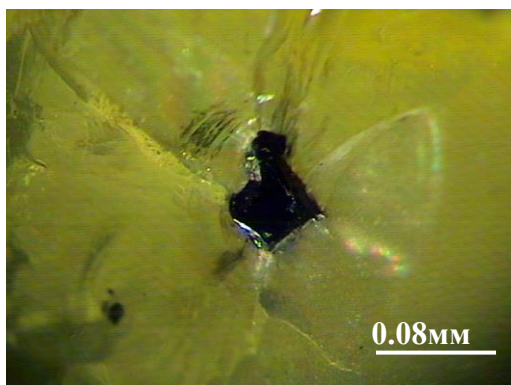
По данным микрозондового анализа хризолит месторождения Сан-Карлос содержит: MgO от 46,37 до 49,54 вес.%, FeO – от 8,98 до 12,59 вес%. В нём установлены никель, кальций, марганец, содержания которых варьируют соответственно (вес.%): 0,34 – 0,58 NiO; 0,03-0,14 CaO; 0,06-0,18 MnO. Такие элементы-примеси, как титан, хром, иногда присутствуют в незначительных количествах.

Рассчитанная магнезиальность хризолита приведены в табл.5, и соответствует 89%.

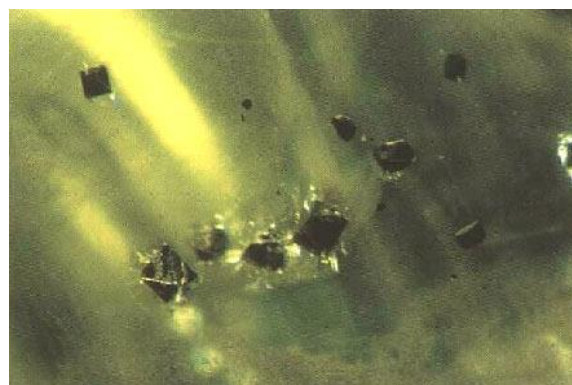
### **3.4.3. Включения в хризолите месторождения Сан-Карлос Аризона)**

Для хризолита месторождения Сан-Карлос характерны в основном минеральные включения, представленные хромитом (рис. 23,24), хромовой шпинелью (рис. 25, 26), рутилом (рис. 27), оксидными плёнками (рис.28).

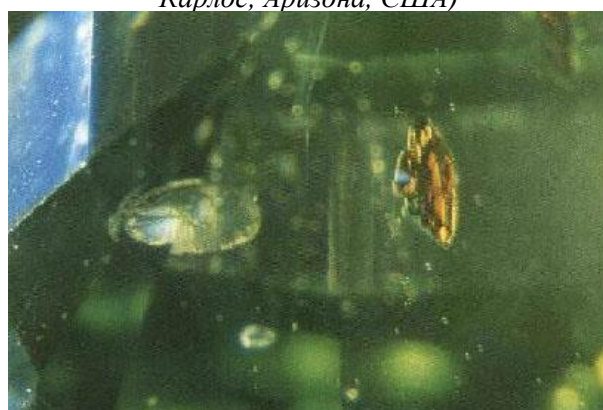
Флюидные включения: наблюдаются в трещинах, окружающих кристаллики хромита. Дисковидные трещины напоминают «лист кувшинки», в центре которого всегда находится кристалл хромита (рис. 29-32).



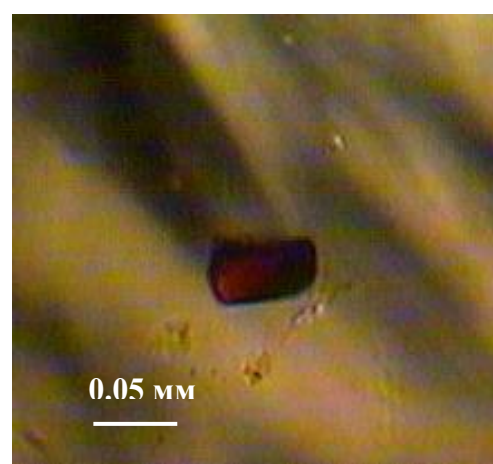
*Рисунок 23. Черные октаэдрические кристаллы хромита в перидоте (образец 18-1). (Сан Карлос, Аризона, США)*



*Рисунок 24. Кристаллы хромита в перидоте (Gübelin, Koivula, 1996). Ширина картинка 1 мм.*



*Рисунок 25. Хромовая шпинель красно-коричневого цвета в перидоте (Gübelin, Koivula, 1996). Ширина картинка 1 мм.*



*Рисунок 26. Включения хромовой шпинели в хризолите. Образец 17-1*



**Состав хризолита Аризоны по данным микронзондового анализа**

№№обр	Содержания компонентов в вес %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Сумма
*А-1	41,10	0,03	0,03	9,57	0,06	48,55	0,08	0,58	99,42
*А-2	41,41	0,00	0,00	8,98	0,10	48,97	0,03	0,51	99,49
*А-3	40,35	0,00	0,07	12,59	0,18	46,37	0,10	0,34	100
*А-4	40,86	0,02	0,00	10,81	0,14	47,62	0,09	0,46	100
*А-5	40,78	0,00	0,06	11,43	0,16	47,11	0,12	0,34	100
*А-6	40,75	0,00	0,02	11,73	0,16	46,78	0,14	0,41	99,99
Ариз-8	40,4	Н,о,	Н,о,	9,52	Н,о,	49,45	0,14	0,49	100
Ариз-5	40,61	Н,о,	Н,о,	9,44	Н,о,	49,54	Н,о,	0,41	100
Ариз I	40,78	0,01	0,03	10,51	0,10	48,04	0,07	0,44	99,98
<b>σ</b>	0,12	0	0,005	0,43	0,03	0,41	0,02	0,03	
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле для Ариз I</i>									
	1,00	0	0	0,22	0	1,76	0	0,01	
Mg#	0,89								
Примечание. Анализы Ариз-5 и 8 – данные автора; *А-1 – *А-6 данные А.А. Золотарёва и соавт. (2003); Ариз I -среднее, значение из 8; <b>σ</b> - отклонение от среднего; Mg# =Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.; Н. о. – не обнаружено									

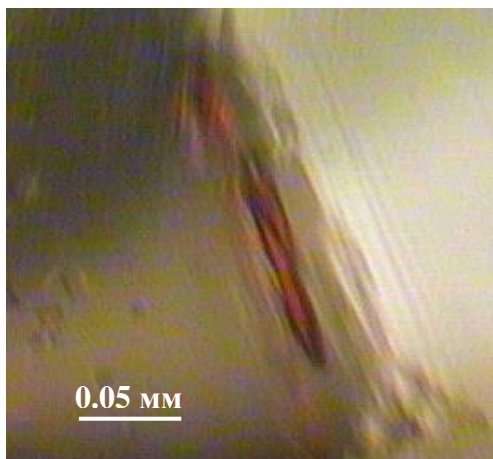


Рисунок 27. Включение рутила в хризолите образец №18-1

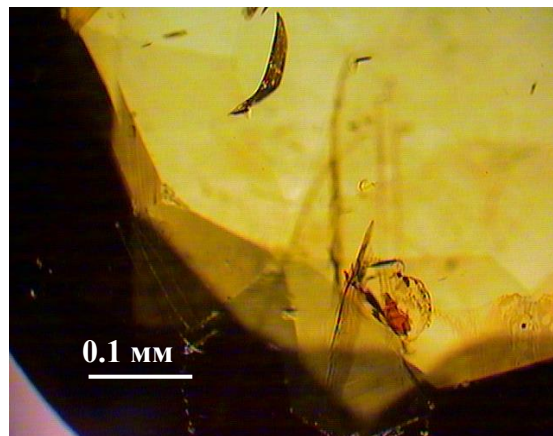


Рисунок 28. Включения оксидных плёнок вокруг шпинели (красное зерно) образец №1.

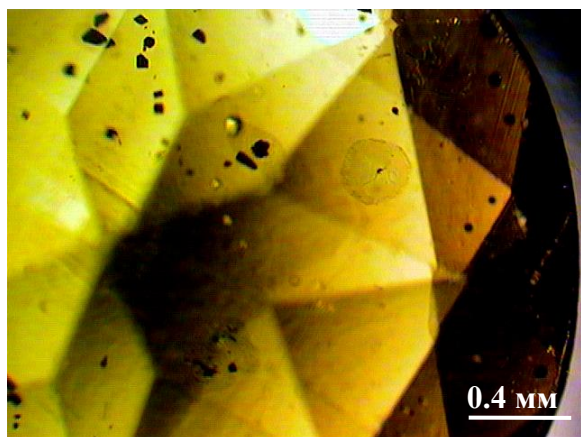


Рисунок 29. Включения хромита, окружённые дисковидными трещинами. Образец №2

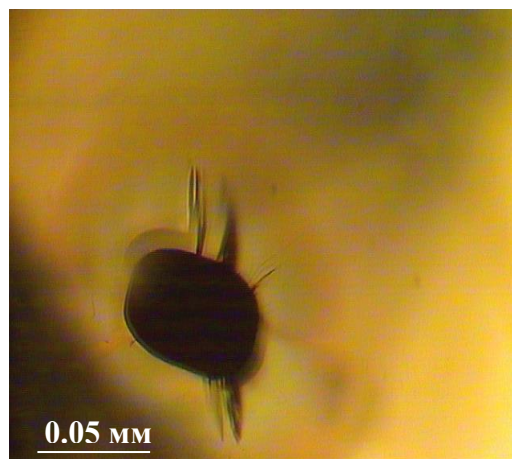


Рисунок 30. Хромит, окружённый трещинами. Образец 18-2.



Рисунок 31. Включение хромита в центре «листа кувшинки» (Gübelin, Koivula, 1996)



Рисунок 32. Включения хромита, окружённого дисковидной трещиной в виде «листа кувшинки». Образец 18-1.

### 3.5. Хризолит Китая

#### 3.5.1. Геологическая характеристика месторождения Чжанзиакоу-Хуанхуа (Zhangjiakou- Xuanghua )

В 1979 году в Китайской Народной Республике в провинции Хэбэй около города Дамапинь(Damaping), в 150 км к северо-западу от Пекина было найдено месторождение перидота высокого качества - Чжанзиакоу-Хуанхуа (Zhangjiakou - Xuanghua ) (Koivula, Fryer , 1986). Перидот приурочен к щелочным базальтовым лавовым потокам, которые установлены в Северном Китае и являются продуктом извержения вулкана в миоцене (24,5 -13,6 млн. лет) (Liu, 1992).

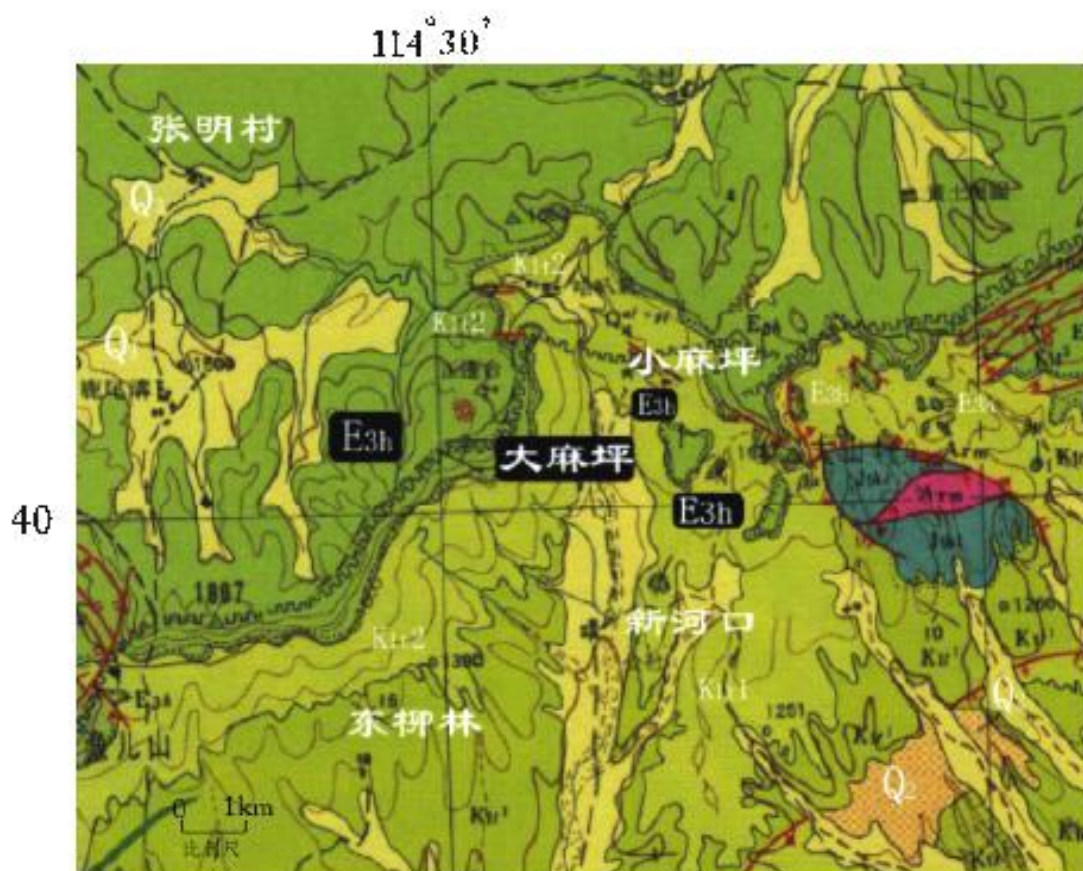
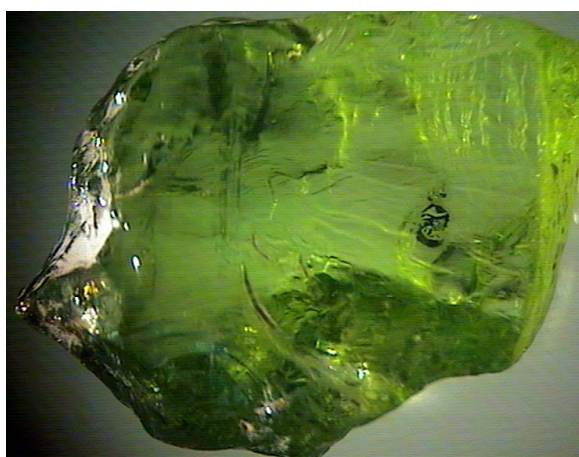


Рисунок 33. Геологическая карта района месторождения хризолита Чжанзиакоу-Хуанхуа в провинции Хэбэй вблизи города Дамапинь (Damaping) (по данным бюро геологической геодезии и картографии, 1966).

Легенда к карте на рисунке 33

	Город Дамапинь (Damaping)
	Коричневая, серо-черная глина, песчаная почва, галечник.
	Пласт красно - коричневого галечника, содержит гравий, глину. Пористый оливковый базальт, темно-серый оливковый базальт.
	Формация Ханнуоба. Серо-черный, коричневый оливковый базальт, средние и верхние части, смешанные с красной, серо-голубой глиной.
	Глинистый алевролит сверху. Верхняя часть - красно-коричневая песчано - глинистая порода, конгломерат, Нижняя часть - коричневый конгломерат, смешанный с глинистой породой и песчаником.
	Красно-коричневый, серо-коричневый, жёлтый конгломерат, содержащий песчано - глинистую породу.

Перидот из месторождения провинции Хэбэй по геммологическим свойствам практически идентичен хризолиту из месторождения Сан-Карлос (Аризона, США). Для него также не характерны только отдельные обломки кристаллов до 2 см в диаметре и до 25 карат весом, которые могут быть использованы как геммологическое сырьё.



*Рисунок 34. Обломок кристалла хризолита из месторождения Чжанзиакоу-Хуанхуа (Китай). Обр.9. Размер образца 1 см.*



*Рисунок 35. Обломок кристалла хризолита с включениями. Обр.30. Размер образца 1 см.*

### 3.5.2. Химический состав хризолита из провинции Хэбэй

По данным микронзондового анализа хризолит из месторождения провинции Хэбэй содержит (в вес.%): MgO от 49,50 до 50,84; FeO от 8,41 до 11,21 (табл. 6) Из элементов-примесей в нём установлены: никель, марганец, кальций, хром, содержания которых варьируют соответственно (в вес.%): NiO 0,30 – 0,48; MnO 0,05 – 0,27; CaO 0,05 – 0,16; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01 – 0,13.

Рассчитанная магнезиальность хризолита приведена в табл.6. Она соответствует 91%.

### 3.5.3. Включения в хризолитах из месторождения Китая

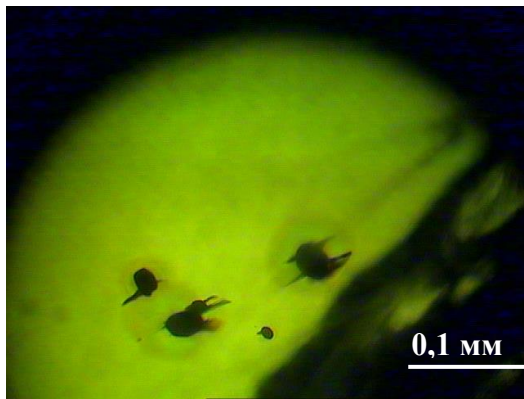
В хризолитах из месторождения провинции Хэбэй наблюдаются минеральные включения, представленные хромитом (рис.36, 37), биотитом (рис 38), хромдиопсидом (рис. 39), Довольно часто вокруг кристалликов хромита наблюдаются дисковидные полости, заполненные флюидными включениями, напоминающие лист кувшинки (рис 40).

Кроме того, в хризолите выявлены ламели магнетита – параллельные тонкие чёрные пластинки. По-видимому, это проявление структур распада в хризолите по аналогии с описанными ламелями шпинели в клинопироксене (Алифирова и др., 2008).

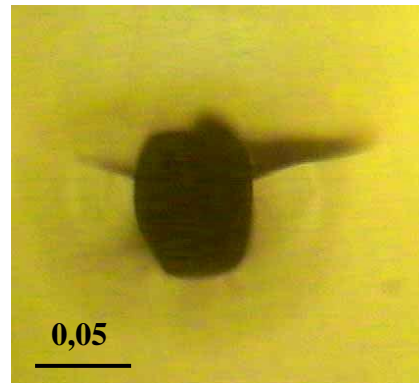
## Состав хризолита из месторождения Чжанзиакоу-Хуанхуа провинции Хэбэй (КНР)

№обр	Содержания компонентов в вес %											
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na <sub>2</sub> O	CoO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	сумма
К-1	41,1	0,02	0,02	8,69	0,11	49,55	0,08	0,3	Н. о.	Н. о.	Н. о.	99,87
К-2	41,18	Н. о.	Н. о.	8,41	0,1	50,78	0,02	0,39	Н. о.	Н. о.	0,01	100,88
К-3	41,0	Н. о.	0,01	8,52	0,16	50,84	0,03	0,39	0,02	Н. о.	Н. о.	100,95
К-4	42,45	Н. о.	0,13	8,79	0,27	48,78	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0,04	100,42
К-5	41,06	0,06	0,03	9,0	0,11	49,94	0,02	0,41	Н. о.	Н. о.	0,02	100,63
К-6	41,09	Н. о.	0,06	9,26	0,09	50,0	0,05	0,34	0,02	Н. о.	0,01	100,89
К-7	41,18	0,03	0,06	8,64	0,05	50,52	0,04	0,38	0,04	Н. о.	Н. о.	100,9
К-8	41,40	0,03	0,04	8,79	0,09	49,07	0,04	0,46	Н. о.	0,09	Н. о.	100,01
К-9	41,65	Н. о.	0,01	8,88	0,15	48,84	0,05	0,41	Н. о.	Н. о.	Н. о.	99,99
К-10	41,28	Н. о.	Н. о.	9,06	0,15	48,93	0,08	0,48	Н. о.	0,02	Н. о.	100
К-11	40,77	Н. о.	0,04	11,21	0,19	47,22	0,16	0,39	Н. о.	0,02	Н. о.	100
<b>К-ср</b>	41,29	0,01	0,04	9,02	0,13	49,50	0,05	0,36	0,00	0,01	0	100,41
<b>σ</b>	0,13	0	0	0,22	0	0,31	0,01	0,04	0,13	0	0	
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле для К-ср</i>												
Si	Fe			Mn		Mg		Ca			Ni	
1,000	0,184			0,003		1,795		0,001			0,008	
Mg#	0,91											

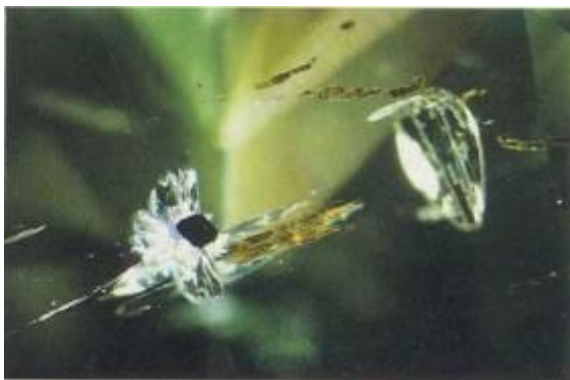
Примечание. Обр. К-1- К-7: данные лаборатория министерства образования Пекинского университета, ЖуЗияминь; Обр. К-8- К-11: данные А.А. Золотарёва и соавт, (2003); **К-ср** – среднее значение из 11; **σ** - отклонение от среднего; Mg# =Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.; Н. о. – не обнаружено



*Рисунок .36 Включения хромита в хризолите Китая. Образец 1*



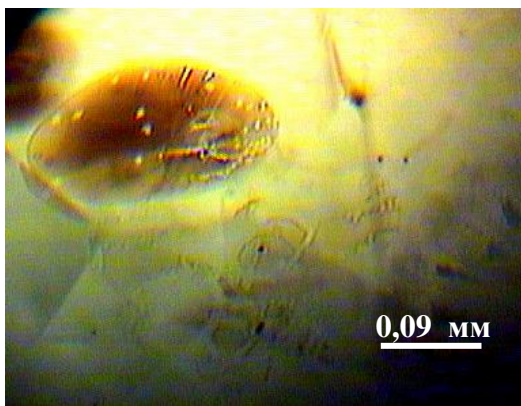
*Рисунок .37 Кристалл хромита в хризолите Китая. Образец 1*



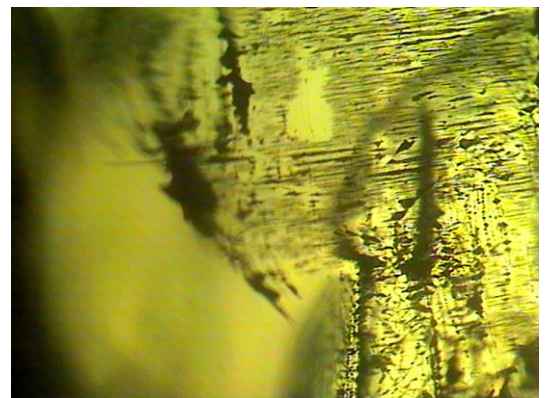
*Рисунок 38. Включения хромита (черное) и биотита (коричневое) (Koivula, Fryer, 1986)*



*Рисунок 39. Включение хромдиопсида в перидоте (Koivula, Fryer, 1986)*



*Рисунок 40. Включения типа «лист кувшинки» в хризолитах Китая. Образец 35.*



*Рисунок 41. Предположительно – структуры распада в хризолите (Китай). Чёрные ламели – магнетит. Обр.30.*

### 3.6. Хризолит России. Месторождение Кугда.

В России месторождения хризолита приурочены к сложным интрузивам ультраосновного - щелочного состава. Они известны на севере Красноярского края (Кугда) и на Кольском полуострове (Ковдор).

#### 3.6.1. Геологическая характеристика месторождения Кугда (Россия).

Кугдинское месторождение расположено в Красноярском крае в 200 км южнее пос. Хатынга в Кугдинском массиве ультраосновных - щелочных пород и карбонатитов.

Состав жильных и линзовидных тел в основном клиногумит – серпофит – флогопит - оливиновый. В центре жил и линз в рыхлой тонкозернистой оливин - слюдистой массе и находятся скопления хризолита, ассоциирующего с флогопитом, серпофитом, клиногумитом и кальцитом.

Массив залегает среди дислоцированных палеозойских пород чехла Сибирской платформы. Возраст его предположительно триасовый. Форма Кугдинского массива овальная, площадь около 17 км<sup>2</sup>. В его строении участвуют оливиниты, перидотиты и пироксениты, мелилитовые породы, мельтейгиты, оливинсодержащие якупирангиты, ийолиты, нефелиновые сиениты, карбонатиты и различные метасоматические образования в виде хризотиловых и флогопитовых жил. Оливиниты занимают более половины площади массива. Среди них преобладают рудные разновидности, к которым и приурочены хризолитоносные жилы. Форма хризолитоносных тел жильная, реже линзовидная. Мощность жил и прожилков от нескольких сантиметров до 1,5 м, длина 70 - 80 м. Состав жильных и линзовидных тел в основном клиногумит – серпофит – флогопит - оливиновый. Размеры скоплений хризолита от нескольких сантиметров в поперечнике до 0,5х0,75х2,5 м. Хризолит в скоплениях постепенно сменяется жильным оливином, который представляет собой сплошную зернистую массу, состоящую из остроугольных обломков размером от 2х2х3 до 7х10х15 мм, обычный их размер 3х5х5 мм. Цвет кугдинских хризолитов зеленый с желтоватым и оливковым оттенком (рис. 42). Содержание хризолита в жилах Кугдинского месторождения 10-16 г/м<sup>3</sup> (Киевленко и др. 1982).



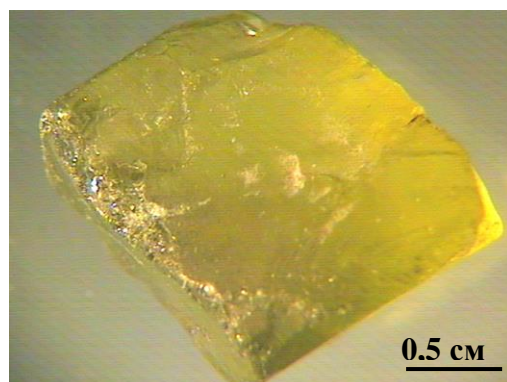


Рисунок 42. Хризолит из месторождения Кугда. Образец 24-1.

### 3.6.2. Химический состав хризолита

По данным микрозондового анализа (табл. 7) в хризолите месторождения Кугда содержится от 46,57 до 48,77 MgO и от 9,97 до 11,67 вес.% FeO. Из элементов – примесей в хризолите установлены марганец, содержание которого варьирует: от 0,39 до 0,53 вес. % MnO. По данным А.А. Золотарёва и соавт. (2003) в хризолите Кугдинского месторождения присутствуют хром, кальций, никель, содержания которых соответствуют (вес. %): 0,01-0,04 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,04-0,16 CaO и 0,39 - 0,46 NiO.

Средняя магниальность хризолита, рассчитанная по 7 анализам, соответствует 89%,

### 3.6.3. Включения в хризолите

В хризолитах месторождения Кугда наблюдаются многочисленные минеральные и флюидные включения.

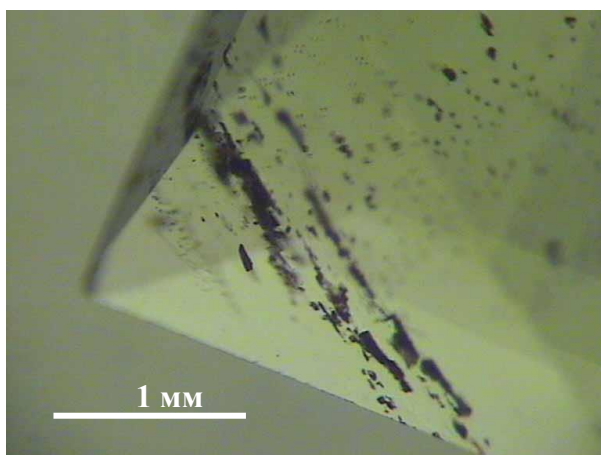


Рисунок 43. Включения магнетита в хризолите Кугдинского месторождения Образец 24-2.

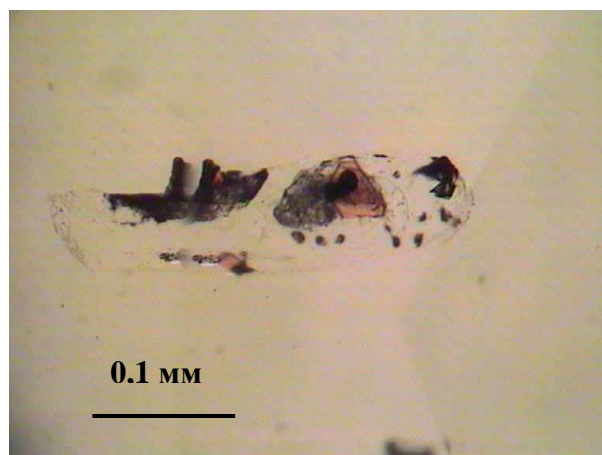


Рисунок 44. Включения оксида железа и хромовой шпинели в хризолите. Образец 24-2.

## Состав хризолита из месторождения Кугда (Россия)

№№ образцов	Содержание компонентов, мас.%,						Mg#*100 в %
	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO	FeO	Сумма	
Куг-1	48,38	40,8	Н.о.	0,48	11,03	100,69	89
Куг-2	47,24	40,12	Н.о.	0,39	11,08	98,84	88
Куг-3	47,44	39,76	Н.о.	0,53	11,08	98,81	88
Куг-4	47,4	40,25	Н.о.	0,37	10,97	98,98	88
Куг-5	47,05	40,08	Н.о.	0,42	11,67	99,22	88
Куг-6	46,57	39,5	0,18	0,48	11,43	98,17	88
Куг-7	48,77	40,83	Н.о.	0,43	9,97	100,0	90
<b>Куг-средн.</b>	47,55	40,01	Н.о.	0,44	10,99	98,99	89
$\sigma$	0,27	0,16	Н.о.	0,02	0,22	0,27	
<i>Кристаллохимическая формула хризолита для Куг-средн.</i>							
$(Mg_{1,77} Fe_{0,22} Mn_{0,01})SiO_4$							

Примечание, Куг -средн, Среднее значение из 7;  $\sigma$  - отклонение от среднего; Mg# =Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед. Н.о.- не обнаружено

В хризолитах Кугдинского месторождения наблюдаются включения в виде волосовидных цепочек кристалликов магнетита (рис. 45), сохраняющих ориентировку тонких ламелей. По аналогии с описанными структурами распада в клинопироксене (Алиферова, Похиленко, 2008), можно предположить, что в хризолите Кугдинского месторождения также имеют место структуры распада твёрдого раствора. Цепочки-«включения» приурочены как к краевым, так и центральным частям зёрен хризолита. В центральной части зерен хризолита кристаллики в цепочках укрупняются (рис. 46) и, перекристаллизовываясь, превращаются в зерна-«включения» (рис. 47, 48).

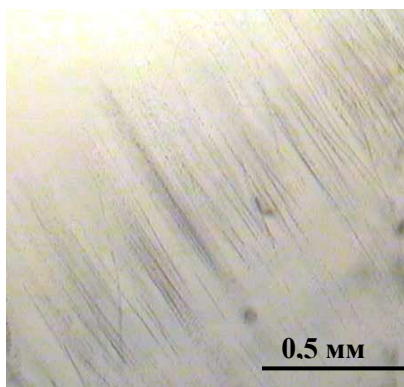


Рисунок 45. Волосовидные цепочки кристаллов магнетита в хризолите. Образец 1-1.

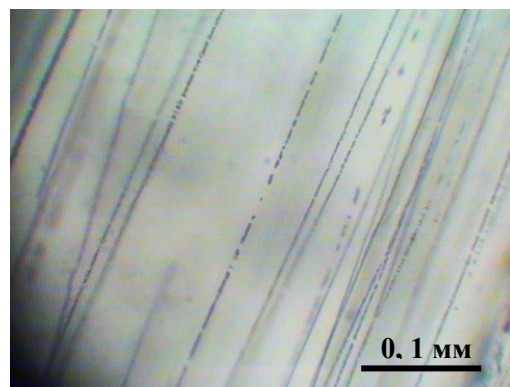

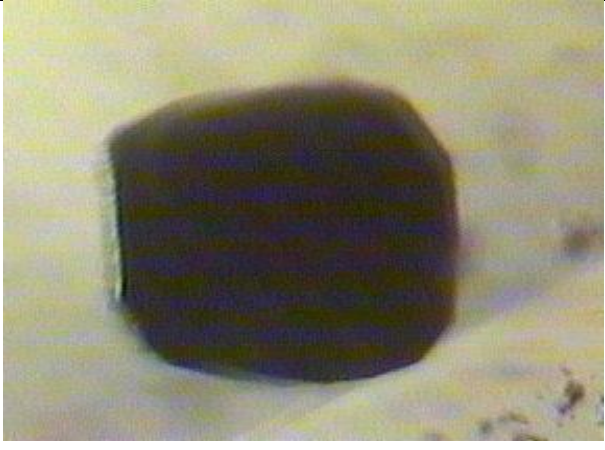
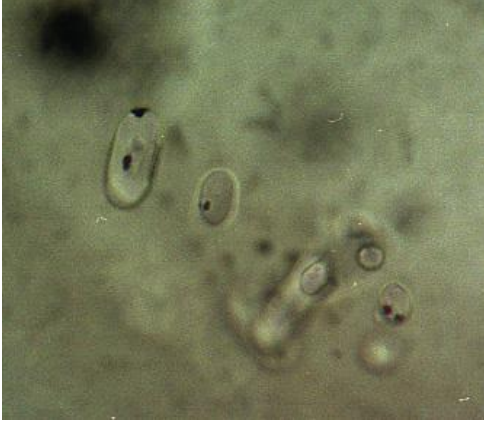
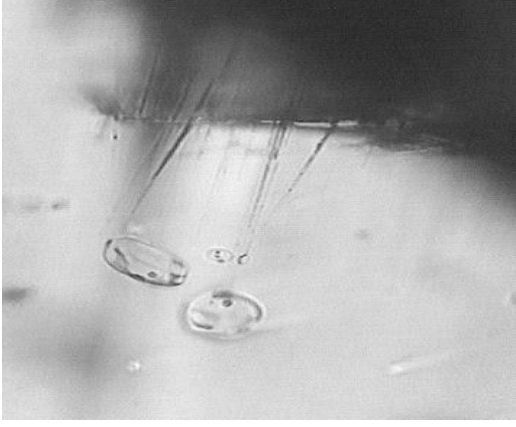


Рисунок 46. Цепочки кристаллов – структуры распада магнетита в хризолите. Образец 1-1.

	
<p><i>Рисунок 47. Укрупнённые кристаллы магнетита в центре зерна хризолита</i></p>	<p><i>Рисунок 48. Кристалл магнетита в хризолите. Размер включения 0,08 мм.</i></p>
	
<p><i>Рисунок 49. Затвердевшие расплавные включения в хризолите (Соколов и др., 2002). Размер включения 0,04 мм.</i></p>	<p><i>Рисунок 50. Затвердевшие расплавные включения в хризолите. Размер включения 0,04 мм. (Соколов и др., 2002).</i></p>

Флюидные включения (первичные и вторичные) представлены раскристаллизованными затвердевшими включениями расплавов (рис. 49, 50).

Первичные включения встречаются по одиночке и небольшими группами, обладают округлой или короткостолбчатой формой. Вторичные расплавные включения, приуроченные к прямолинейным и искривленным микротрещинам, наличие которых вызывает помутнение (так называемая «вуаль»). Эти включения имеют уплощенную форму, содержат темную фазу, окруженную белой сахаровидной каймой (Соколов и др., 2002).

### 3.7. Хризолит Ковдорского месторождения.

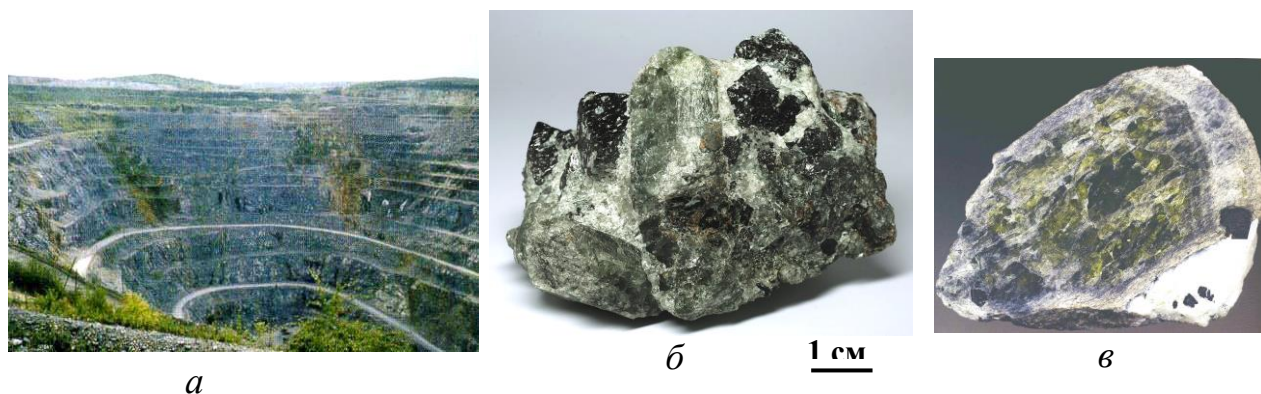


Рисунок 51. Ковдорское месторождение: а – флогопитовый карьер; б – друза форстерита и магнетита; в – кристалл хризолита 16x10 см из флогопитового комплекса пород. (Иванюк и др., 2002)

#### 3.7.1. Геологическая характеристика месторождения Ковдор (Кольский п-ов)

В Ковдорском флогопитовом месторождении хризолит известен с 60-х годов. Однако сведения носили эпизодический характер. Лишь в последние годы в результате проведения разведочно-эксплуатационных работ установлено значительное распространение хризолита.

Ковдорское месторождение флогопита связано с массивом среднепалеозойских ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов (рис. 51 а). В обширном поле мелко- и среднезернистых флогопит – диопсид – форстеритовых пород встречаются отдельные линзовидные, жиллообразные тела крупнокристаллических флогопит–диопсид–форстеритовых пород с промышленным флогопитом.

Главные минералы флогопитовой залежи: оливин, магнетит (рис.51 б), диопсид, флогопит и на верхних горизонтах месторождений – апатит. Оливин широко распространён и присутствует во всех минеральных зонах, где представлен двумя генетическими разновидностями: ранней – магматической и поздней гидротермальной. Магматический оливин слагает реликтовые участки интрузивных оливинов, встречающихся в флогопитоносных породах, а гидротермальный, представленный магниальной разновидностью (форстеритом), входит в состав флогопитоносных пород и является результатом гидротермального преобразования магматического оливина (Афанасьев, 2011).

Хризолит встречается в магматических породах (оливинитах) и в метасоматических породах флогопитовой залежи, но только последний представляет практический интерес. Наиболее эффектные образцы этого минерала найдены в пределах

северного борта железорудного карьера и в кальцит-апатитовых жилах флогопитового месторождения в ассоциации с апатитом, тетраферрифлогопитом, магнетитом (рис. 51 б) (Иванюк и др.2002). Здесь форстерит образует крупные (до 15 см) дипирамидально-призматические кристаллы зеленовато-серого цвета, вкрапленные вместе с блестящими октаэдрами магнетита в плотный белый кальцит или салатно-зелёный апатит. Изредка попадаются двойники этого минерала, Кристаллы форстерита внутри часто оказываются сложенными прозрачным бутылочно-зелёным хризолитом (рис. 51 в)

В зональном хризолите железистость составляет в светлой зоне 6,7% и возрастает в темной зоне до 11,4% (Соколов и др., 2002). С уменьшением содержания железа закономерно уменьшаются показатели преломления и плотность.

### **3.7.2. Химический состав хризолита**

Визуально в имеющихся у автора образцах хризолита из Ковдорского месторождения трудно установить различия между отдельными обломками его кристаллов, но, судя по данным микрозондового анализа (табл. 8), можно выделить две его разновидности – условно выделим хризолит I и II.

Хризолит I характеризуется заметно более высоким содержанием железа и пониженным количеством магния (в вес.%): от 14,87 до 15,42 FeO и 44,45-45,05 MgO. Элементы – примеси в хризолите I, в целом, отсутствуют, за исключением марганца, содержание которого соответствует 0,41 – 0,43 вес.%.

В хризолите II содержание железа заметно ниже и варьирует в интервале 8,79 – 9,25 вес.%; соответственно количества магния выше, чем в хризолите I: MgO колеблется от 49,42 до 49,86 вес. %. В этих же пробах отмечено практически постоянное присутствие марганца и кальция, концентрации которых колеблются соответственно (вес. %): от 0,38 – 0,53 MnO и 0,15 – 0,24 CaO (табл. 8).

Рассчитанные магнезиальности хризолита приведены в табл.8. Средняя величина Mg# хризолита I равна 84%, а для хризолита II она заметно выше и соответствует 91%.

### **3.7.3. Включения в хризолите Ковдорского месторождения**

В хризолите Ковдорского массива установлены как минеральные, так и многофазовые раскристаллизованные включения расплава. В качестве минеральных включений встречаются тетраферрифлогопит и магнетит, игольчатый амфибол тремолит-рихтеритового состава (Соколов и др., 2002), а также апатит, образующий призматические кристаллы (рис. 51, 52).

Таблица 8

## Состав хризолита из Ковдорского месторождения

№№ образцов	Содержание компонентов, мас. %					
	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO	FeO	Сумма
<b>Состав хризолита I</b>						
Ковд-1	45,05	40,04	Н. о.	0,4	15,42	100,91
Ковд-2	44,45	39,13	Н. о.	0,41	14,87	98,86
Ковд-3	45,1	39,67	Н. о.	0,43	14,87	100,3
Ковд-сред	<b>44,87</b>	<b>39,61</b>	Н. о.	<b>0,41</b>	<b>15,05</b>	<b>99,95</b>
$\sigma$	0,17	0,22		0,01	0,14	
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле (для КовдI-сред)</i>						
	Mg	Si	Ca	Mn	Fe	
	1,682	0,996	0,000	0,009	0,317	
Mg#*100	84%					
<b>Состав хризолита II</b>						
Ковд-4	49,58	40,81	0,16	0,53	8,91	99,80
Ковд-5	49,50	40,74	0,24	0,38	8,79	99,50
Ковд-6	49,55	40,85	0,16	0,51	8,92	99,87
Ковд-7	49,86	40,61	0,00	0,46	9,05	99,98
Ковд-8	49,67	40,74	0,19	0,44	8,96	99,74
Ковд-9	49,65	40,58	0,18	0,42	9,17	99,82
Ковд-10	49,76	40,69	0,21	0,48	8,86	99,80
Ковд-11	49,51	40,72	0,23	0,43	9,11	99,82
Ковд-12	49,71	40,76	0,15	0,41	8,97	99,97
Ковд-13	49,45	40,65	0,17	0,44	9,27	99,94
Ковд-14	49,42	40,69	0,20	0,44	9,25	99,84
Ковд-15	49,63	40,51	0,17	0,49	9,19	99,85
Ковд-сред	<b>49,61</b>	<b>40,70</b>	<b>0,17</b>	<b>0,45</b>	<b>9,04</b>	<b>99,97</b>
$\sigma$	0,13	0,10	0,01	0,01	0,05	
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле (для КовдII-сред)</i>						
	Mg	Si	Ca	Mn	Fe	
	1,809	0,996	0,004	0,009	0,185	
Mg#*100	91%					

Примечание. Ковд I-сред, – среднее значение из 3; Ковд II-сред, – среднее значение из 12;  $\sigma$  - отклонение от среднего; Mg# =Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.; Н. о. – не обнаружено

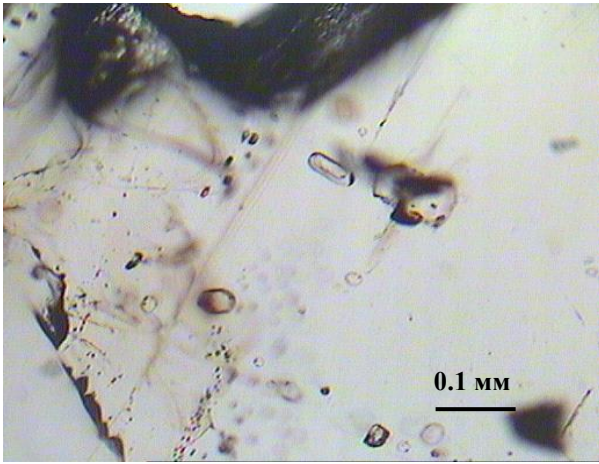


Рисунок 52. Включение апатита в хризолите Ковдора. Образец 4.

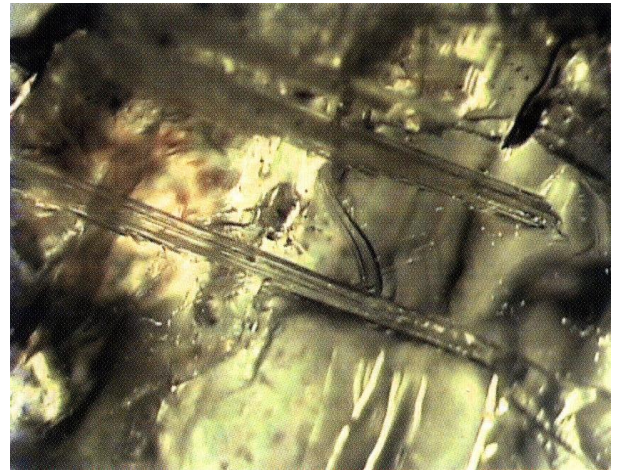


Рисунок 53. Игольчатые включения амфибола в хризолите Ковдора (Соколов и др., 2002).  
Ширина картинка 0,7 мм.

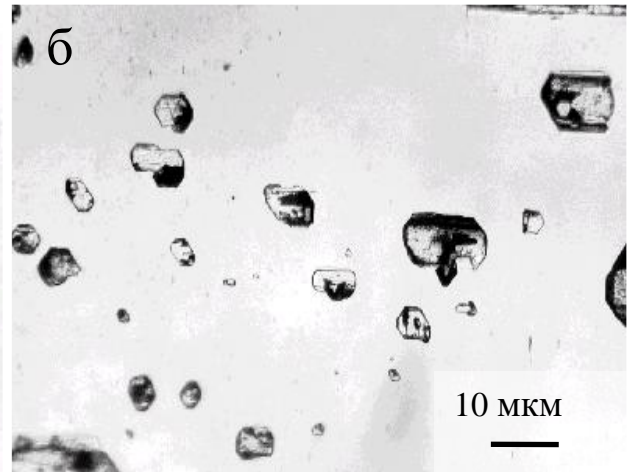
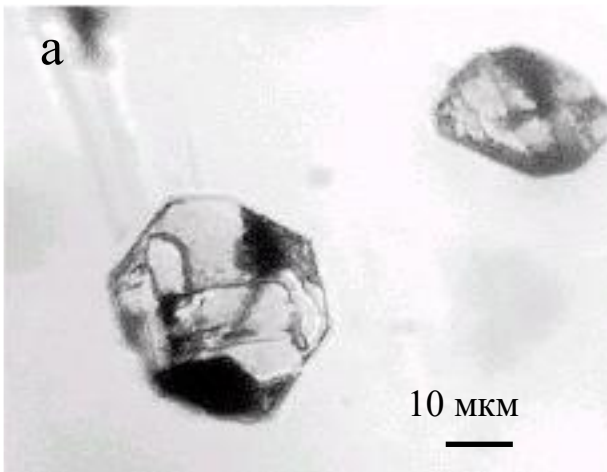
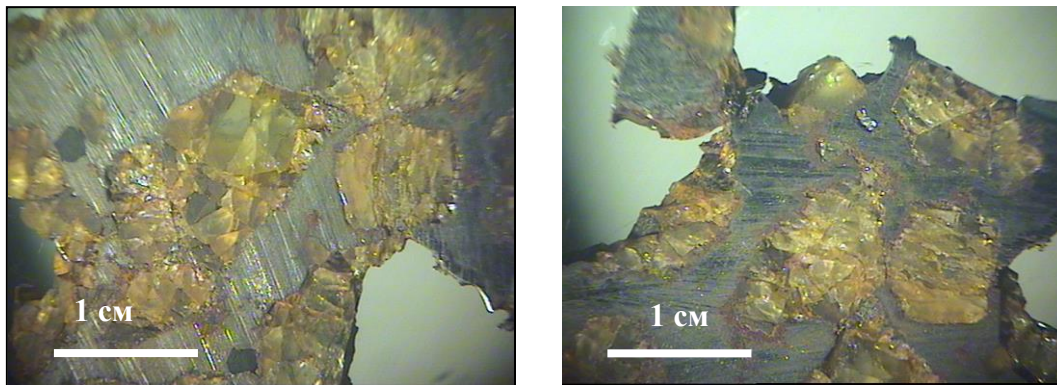


Рисунок 54. Расплавные включения в хризолите из Ковдорского флогопитового месторождения: а) первичные; б) вторичные. (Соколов и др., 2002)

Среди флюидных включений выделяются расплавные первичные (единичные) и вторичные, локализующиеся вдоль плоскостей, трассирующих поздние микротрещины в минерале, и образующие в хризолите “вуали” (рис. 53, 54) (Соколов и др., 2002, Ярмишко, 2005). Полости включений изометричные или слабо удлинённые. Первичные включения, более крупные, достигают 50–60 мкм в поперечнике. Затвердевшие расплавные включения, как правило, раскристаллизованы, содержат агрегат дочерних фаз, среди которых постоянно наблюдается тетраферрифлогопит, форстерит, доломит, шортит, магнетит. (Соколов и др., 2002)

#### Глава 4. Хризолит из метеоритов

Каменно-железные метеориты, известные как палласиты, содержат желтовато-зеленые оливины (рис 55), которые очень похожи на их земные аналоги.



*Рисунок 55. Желтовато-зелёные вкрапления оливина в железе метеорита (палласита). Образец 77-1.*

Цвет хризолита в палласитах варьирует от зеленовато-желтого до желтовато-зеленого и по тону от светлого до умеренно-темного. В основном он прозрачный, но в зависимости от изобилия включений - просвечивающий. По сравнению с перидотами земного происхождения он менее яркий. Однако, только в начале 20-го века были сделаны первые огранки из палласитового оливина (Sincancas et al, 1992).

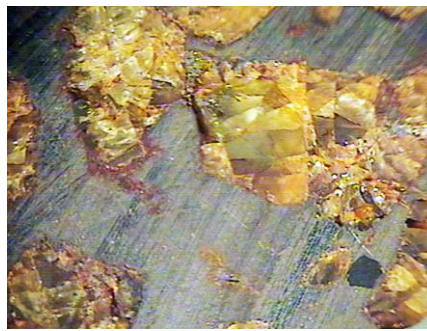
**Метеорит Сеймчан** впервые был обнаружен геологом Ф.А. Медниковым в июле 1967г. в русле ручья, притока реки Ясчаная, в Магаданской области (Качалин, 2011). Это был образец весом в 300 кг. Второй образец весом 51 кг был найден в 20м, от первого И.Х.Марковым с помощью миноискателя в октябре 1967г. Первый образец, точный вес которого составил 272,3 кг, был направлен в Комитет по метеоритам АН СССР г. Москва, второй образец поступил в Геологический музей северо-восточного геологического управления. Сначала метеорит классифицировали как железный (Iron ПЕ-Ом) (рис.56), и только 30 лет спустя новые находки образцов этого метеорита позволили переклассифицировать в более редкий – железокаменный метеорит – палласит (Pallasite PMG), содержащий помимо сплавов железа и никеля – камасита и таэнита, зёрна оливина (хризолита) (рис. 57).

**Метеорит Брагин** также является железокаменным метеоритом (палласитом) (рис.58), фрагменты которого находили с 1807 по 1968 гг. (впервые у села Капоренка, далее у Крюки и Колыбань Брагинского района Гомельской области Белоруссии).





*Рисунок 56. Фрагмент метеорита Сеймчан, Фото Д.М. Качалина (Качалин, 2011)*



*Рисунок 57. Зёрна хризолита в метеорите Сеймчан, Образец 77-1. Ширина картинки 3 см.*



*Рисунок 58. Фрагмент метеорита Брагин. Светлые зерна – оливин. Образец Б-1. Размер образца 1 см.*

Всего обнаружено 13 экземпляров фрагментов общим весом около 853 кг (примерно), сохранилось 724 кг. Они хранятся в коллекции Академии Наук.

#### **4.1. Химический состав оливинов из метеоритов**

Палласиты в основном состоит из оливина и металла. По данным микрозондового анализа в оливине из метеорита Сеймчан установлено в среднем  $48,34 \pm 0,24$  вес% MgO и в  $11,11 \pm 0,05$  вес% FeO (табл. 9). Из элементов-примесей присутствует постоянно марганец, содержание которого соответствует в среднем  $0,33 \pm 0,015$  вес%. Магнезиальность оливина (Mg #) равна 89%, железистость – 11%.

Оливин из метеорита Брагин содержит от 47,54 до 47,93 вес.% MgO, в среднем  $11,80 \pm 0,10$  вес% FeO и практически не содержит элементов-примесей (табл. 10). Магнезиальность оливина (Mg #) равна 88%, железистость – 12%.

Ранее установлено (Wasson, 1985), что значения железистости палласитов обычно лежат в интервале: Fe# =11-14. Полученные значения для оливина (из Сеймчана и Брагина) попадают в этот интервал.

## Состав оливина из метеорита Сеймчан

№№ образцов	Содержание компонентов, вес. %					
	MgO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Сумма	Mg#*100
С-1	48,22	40,48	0,33	10,97	100,00	89%
С-2	48,25	40,20	0,28	11,28	100,00	
С-3	48,39	40,49	0,35	11,20	100,43	Fe#*100
С-4	48,52	40,15	0,35	10,97	100,00	11%
С-средн	48,34	40,33	0,33	11,11	100,11	
σ	0,24	0,21	0,015	0,05		
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле для С-ср</i>						
Mg	Si		Mn		Fe	
1,78	0,99		0,01		0,23	

Примечание. С-средн. – среднее значение из 4; σ - отклонение от среднего; Mg# = Mg/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.

## Состав оливина из метеорита Брагин

№№ образцов	Содержание компонентов, мас.%					
	MgO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Сумма	Mg#*100
Б-1	48,08	40,28	Н.о.	11,65	100,00	88%
Б-2	47,93	40,52	Н.о.	11,55	100,00	
Б-3	47,54	40,38	Н.о.	12,08	100,00	Fe#*100
Б-4	47,62	40,48	0,38	11,90	100,00	12%
Б-средн	47,79	40,41	0,00	11,80	100,00	
$\sigma$	0,11	0,05	0,00	0,10		
<i>Коэффициенты в кристаллохимической формуле для Б-средн</i>						
Mg	Si		Mn		Fe	
1,760	0,998		0,01		0,244	

Примечание. С-средн.—среднее значение из 4;  $\sigma$  - отклонение от среднего; Mg# = Mg/(Mg+Fe), Fe # = Fe/(Mg+Fe), где Mg и Fe в атом ед.

## 4.2. Включения в хризолите из палласитов

Включения в хризолитах из палласитов видны даже при небольшом увеличении, Микроскопическое исследование оливина (хризолита) из метеоритов позволило выявить большое количество твёрдых включений (рис.59-64): это металлические частицы, (в виде пластинок, иголок чёрного цвета), оксиды железа в виде многочисленных оранжево-красных пятен и плёнок. Игольчатые включения не установленного состава. Такие же неидентифицированные включения были отмечены ранее (Sinkankas et.al., 1992) (рис. 65, 66). Поэтому эти включения могут считаться диагностическими для палласитовых хризолитов. Наиболее характерными включениями для этих хризолитов являются частички окисленного железа метеоритного происхождения (рис. 67-69).

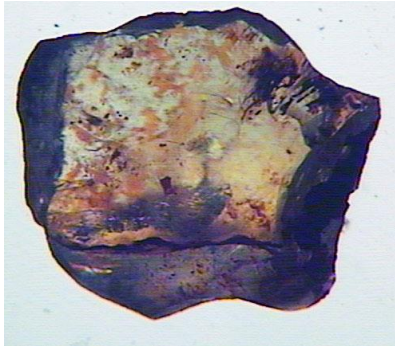


Рисунок 59. Включения оксидов железа в оливине метеорита Сеймчан. Оранжево-красные плёнки – лимонит Образец 77-2  
Размер зерна 0,5 см.

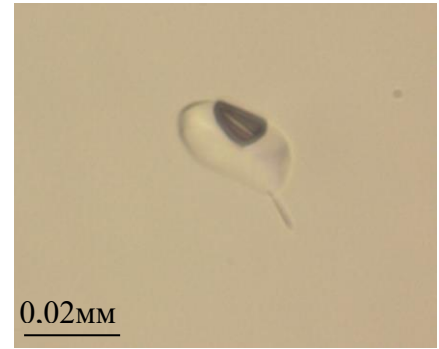


Рисунок 60. Комбинированное включение в оливине: стеклоподобное вещество, прилипшее к частичке железа в метеорите Сеймчан. Образец 77-1.

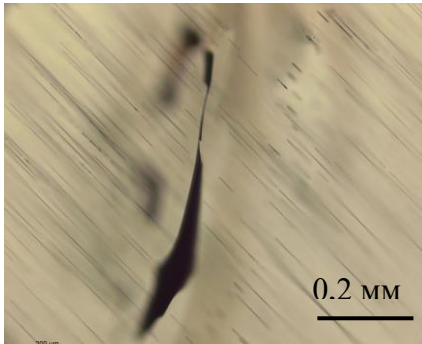


Рисунок 61. Тонкие параллельные трубочки в метеорите Сеймчан. Образец 77-1..

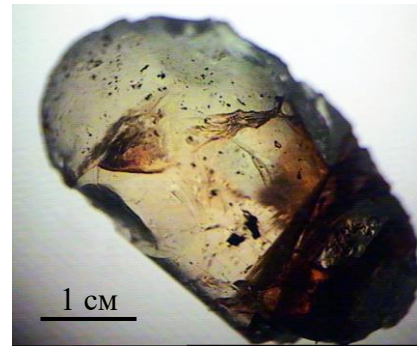


Рисунок 62. Красно-коричневые ржавые пятна - результат окисления частичек железа в метеорите Брагин. Образец Б-2

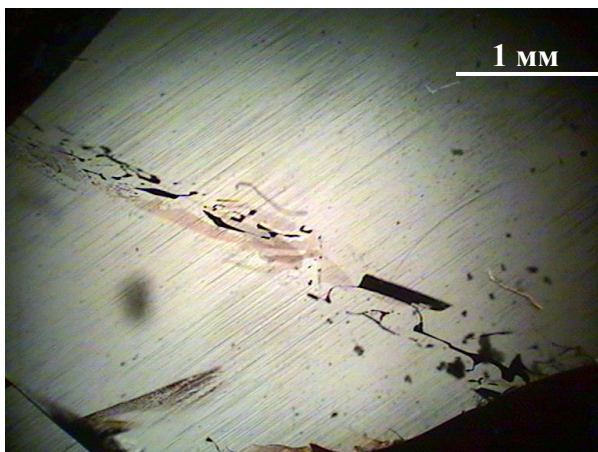


Рисунок 63. Частички железа в хризолите из метеорита (образец 77-3-2)

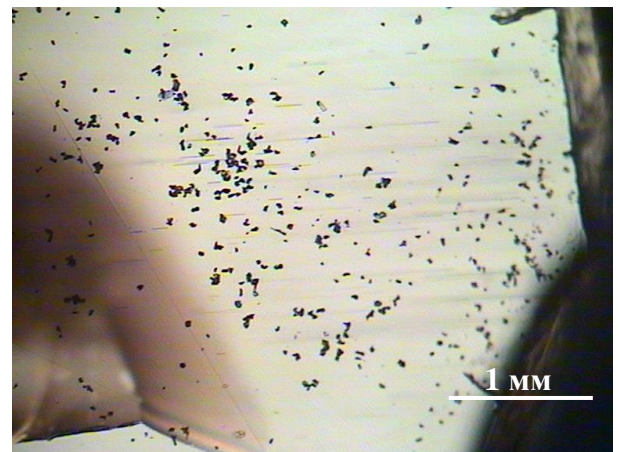
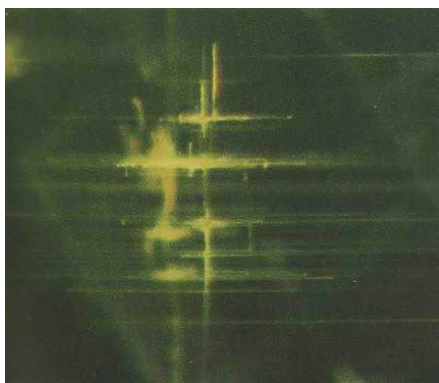
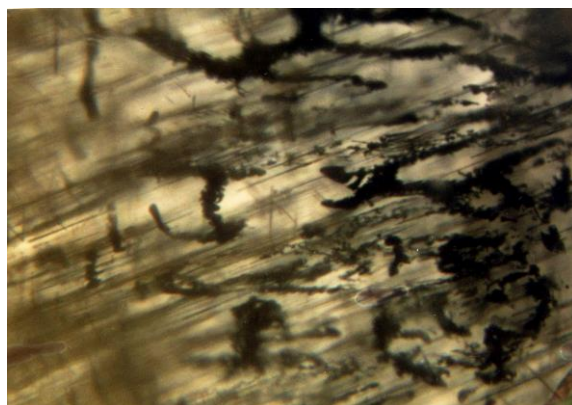


Рисунок 64. Частички железа в хризолите из метеорита (образец 77-3-2)



*Рисунок 65. Все перидоты палласитов содержат включения неизвестного материала, ориентированного в плоскости под углом в  $90^\circ$ , (Sinkankas at. al. 1992)*



*Рисунок 66. Включения неизвестного материала в виде иголок и дендриты оксидов железа. Образец 77.*



*Рисунок 67. Красно-коричневые ржавые пятна, ориентированные вдоль трещины, (Sinkankas at. al., 1992)*



*Рисунок 68. Красно-коричневые ржавые пятна, ориентированные вдоль трещины, в скрещенных николях, (Sinkankas at. al., 1992)*



*Рисунок. 69. Округлые металлические частички 0,6 мм в диаметре материнского метеорита. Перидот в 1,39 карат (Sinkankas at. al. 1992)*

## Глава 5. Сравнительная характеристика хризолитов различного происхождения

Исследованные хризолиты представляют собой образцы внеземного (метеориты) и земного происхождения из разных месторождений магматического класса, различного генетического типа. Сравнение их составов (табл. 10) показывает, что они в целом мало отличаются по содержанию основных компонентов - магния и железа, которые варьируют (вес%): 44,67 - 51,17 MgO и 7,34-15,34 FeO. При этом наименьшие содержания магния и самые высокие железа отмечены в образцах хризолита Анголы, магнизиальность его соответствует 84%. Наиболее высокие концентрации магния и наименьшие количества железа установлены в хризолитах Мьянмы (для хризолита I). Магнизиальность его соответствует 92%. Составы всех остальных изученных автором хризолитов земного и внеземного происхождения занимают промежуточное положение, по магнизиальности все они относятся к минеральному виду форстериту.

Среди элементов-примесей в хризолитах отмечены марганец, кальций и никель. Марганец варьирует от 0,10 до 0,44 вес.%, при этом наименьшие его содержания установлены в образцах из Аризоны, а повышенные его количества характерны для месторождений России – 0,44-0,45 вес.%. Содержание никеля колеблется от 0,05 до 0,44 вес.%. Причём, в хризолитах России никель вообще не обнаружен, а наименьшие его содержания характерны для хризолитов Анголы - 0,05 вес.% NiO. Повышенные содержания никеля установлены в хризолитах Аризоны. Количество кальция в хризолитах низкое и варьирует от 0,10 до 0,19 вес.%. Наибольшие его содержания отмечены в образцах Ковдорского месторождения.

Как показано А.А Золотаревым и др. (2003), хризолиты США, Пакистана, Китая и России характеризуются достаточно узкими вариациями основного оттенка: от желтовато-зеленого до желто-зеленого - зелено-желтого, и изменение основного оттенка и тона хризолитов зависит от количества в них железа.

Для выявления влияния содержания магния и железа на структурное состояние хризолитов были определены параметры элементарной ячейки и прослежена зависимость их от химического состава. Полученные значения параметров элементарных ячеек оливинов разных месторождений приведены в табл. 11.

## Средние содержания компонентов в хризолите из различных месторождений.

Происхождение хризолита (класс, тип месторождения)			Страна, месторождение	Разновидность хризолита	Содержание компонентов, вес. %						Mg# %	
					MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO	FeO	NiO		Сумма
Магматический класс	Генетический тип	Кимберлиты	Ангола		44,67±0,65	39,59±0,18	0,10±0,02	0,19±0,03	15,34±0,82	0,05±0,03	99,94	84
		Ультраосновные породы - дуниты	Мьянма	I	51,17±0,35	41,32±0,17	Н. о.	Н. о.	7,34±0,48	Н. о.	99,83	92
				II	48,09±0,13	39,95±0,35	Н. о.	0,30±0,07	11,14±0,22	Н. о.	99,48	88
			Пакистан		49,97±0,4	41,70±0,18	0,02±0,01	0,15±0,01	7,75±0,58	0,37±0,02	100,00	92
		Базальты	Аризона		48,04±0,41	40,78±0,12	0,07±0,02	0,10±0,03	10,51±0,43	0,44±0,03	99,98	89
			Китай		49,50±0,31	41,29±0,13	0,05±0,01	0,13±0,02	9,02±0,22	0,36±0,04	100,41	91
		Ультраосновные щелочные породы	Россия, Кугда		47,55±0,27	40,01±0,16	Н. о.	0,44±0,02	10,99±0,22	Н. о.	98,99	89
			Россия, Ковдор	I	44,87±0,17	39,61±0,22	Н. о.	0,41±0,01	15,05±0,14	Н. о.	99,95	84
				II	49,61±0,13	40,70±0,10	0,17±0,01	0,45±0,01	9,04±0,05	Н. о.	99,97	91
		Метеориты			Сеймчан		48,34±0,24	40,33±0,21	Н. о.	0,33±0,02	11,11±0,09	Н. о.
Брагин					47,79±0,11	40,41±0,05	Н. о.	Н. о.	11,80±0,10	Н. о.	100,00	88

Таблица 11

**Параметры элементарных ячеек оливинов разных местонахождений**

местонахождение		<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å <sup>3</sup>
1	Ангола	4,7864(13)	10,249(3)		293,21(14)
2	Мьянма-1	4,7542(14)	10,248(6)	6,017(4)	294,3(3)
3	Мьянма-2	4,773(3)	10,199(3)	5,9689(17)	289,41(15)
4	*Пакистан	4,744(2)	10,202(3)	5,993(2)	290,0(1)
5	*Аризона	4,7594(8)	10,212(2)	6,003(1)	291,78(9)
6	*Китай	4,7513(7)	10,204(2)	5,9978(7)	290,78(7)
7	Кугда	4,753(3)	10,206(5)	5,988(3)	290,5(2)
8	Ковдор	4,7646(11)	10,243(3)	5,9964(14)	292,64(12)
9	*Сеймчан	4,7568(7)	10,211(1)	5,9860(9)	290,74(7)
10	Брагин	4,7646(2)	10,2337(4)	5,9967(3)	292,40(2)
PDF#01-080-1636		4,762	10,225	5,992	291,74

Примечание. \* данные Е.А.Килиной (2009)

Как видно в таблице 11, параметры элементарных ячеек разных «земных» оливинов и оливинов из метеоритов Сеймчан и Брагин примерно одинаковы. Наибольшее значение параметра *a* характерно для хризолита Анголы, наименьшее у хризолита Пакистана.

На рис. 70 представлена корреляция параметров *a* элементарной ячейки оливина и содержание магния в нём.



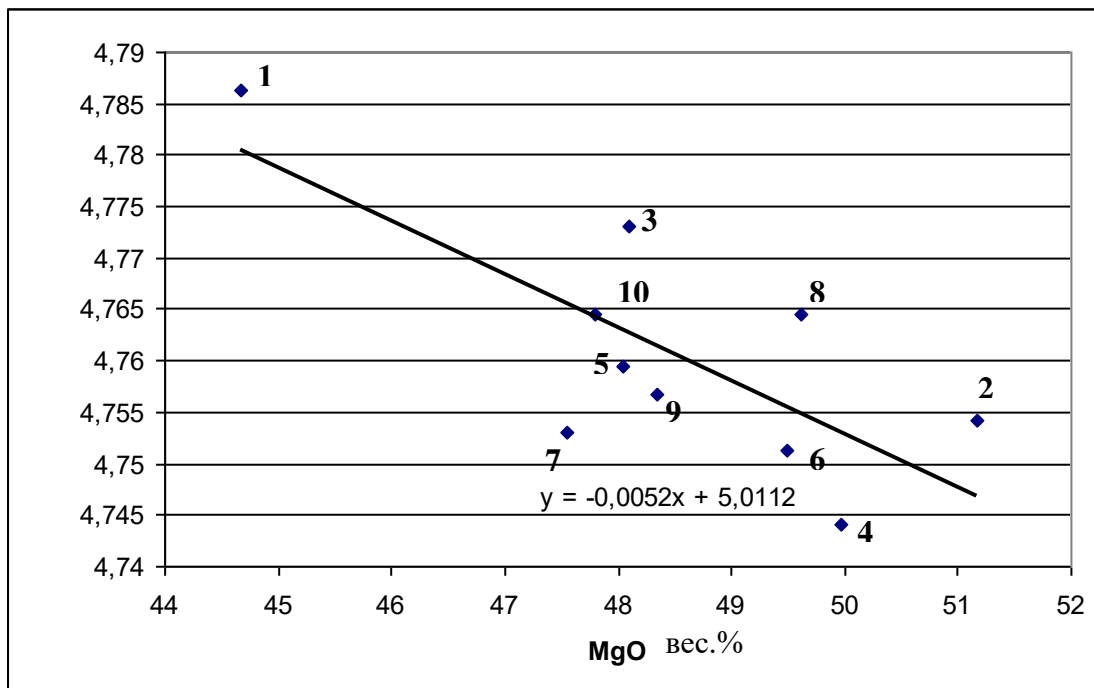


Рис. 70. Обратная корреляция между содержанием магния и параметром *a*.  
Цифры соответствуют номерам анализов в табл. 11.

Как показано ранее (Золотарёв и др., 2003), хризолиты Пакистана, России, США, Китая практически не различаются по оптическим характеристикам. Несколько ниже, чем у остальных, показатели преломления хризолитов Китая, приведенные в статье Дж. Койвулы и соавтора (Koivula, Fryer, 1986).

Показатели преломления хризолитов приведены в табл. 12. Как было показано ранее (Золотарёв и др., 2003), для хризолита России, Китая, Пакистана, США устанавливается достаточно хорошая корреляционная зависимость между величиной показателей преломления и содержанием железа. Так, наименьшее содержания железа установлено в хризолите Пакистана – 7,75 вес.% (табл. 12), и показатель преломления  $N_g$  тоже несколько ниже, чем у остальных образцов. У оливинов из метеоритов показатель  $N_g$  заметно выше, чем у остальных исследованных образцов, но по содержанию железа они близки к образцам из Аризоны и Кугды. Таким образом, по этим параметрам – по составу и оптическим характеристикам – хризолиты земного и внеземного происхождения различаются незначительно.

## Сравнительная характеристика хризолита по показателям преломления.

Страна, месторождение, № образца	Ng	Np	Содержание FeO, вес%
<b>Хризолиты из различных месторождений</b>			
<b>Пакистан (среднее)</b>	<b>1,686**</b>	<b>1,648**</b>	<b>7,75±0,58</b>
Светло-зелёный №:14	1,680	1,642	
Светло-зелёный №:27	1,683	1,649	
<b>США, Аризона</b>	<b>1,690**</b>	<b>1,652**</b>	<b>10,51± 0,43</b>
Жёлто-зелёный №:6	1,682	1,643	
Серо-зелёный №:7	1,680	1,655	
Серо-зелёный №:8	1,678	1,644	
Буровато-зелёный №18-1	1,681	1,650	
Буровато-зелёный №:18-2	1,672	1,631	
Зелёный №:19-1	1,669	1,636	
Зелёный №:19-2	1,662	1,631	
<b>Китай провинция Хэбей</b>	<b>1,689**</b>	<b>1,650**</b>	<b>9,02± 0,22</b>
Тёмно-зелёный №:9	1,689	1,651	
Насыщено-зелёный №16-1	1,690	1,649	
Насыщено-зелёный №:16-2	1,693	1,649	
Светло-зелёный	1,670*	1,653*	
<b>Россия, Кугда</b>	<b>1,692**</b>	<b>1,656**</b>	<b>10,99± 0,22</b>
золотисто-зелёный №:2	1,695	1,658	
золотисто-зелёный №:3	1,690	1,656	
Жёлто-зелёный №:24-2	1,696	1,657	
<b>Метеориты</b>			
	1,703	1,649	
***Сеймчан	1,705	1,651	11,11±0,01
***Брагин	1,708	1,646	11,80±0,10

Примечание. Определения показателей преломления исследуемых образцов выполнены А.С.Власовым.; \*- данные из статьи Koivula J. I. , Fryer C. W (1986); \*\*- средние значения Ng и Np из работы Золотарёва и др., (2003); \*\*\* определения показателей преломления выполнены Е.А. Килиной (2009).

Наиболее отчетливо все изученные оливины различаются по содержащимся в них включениям. Как известно, изучение включений является неразрушающим методом диагностики драгоценного камня и позволяет для природного минерала установить генетический тип, а иногда и его месторождение. Наиболее типичные включения для изученных хризолитов представлены в табл. 13.

В хризолите Анголы, приуроченном к кимберлитам, отмечены остроугольные пластинчатые железосодержащие фазы.

В хризолитах из месторождений, приуроченных к перидотит-дунитам (Мьянмы и Пакистана) обнаружены следующие включения.

В хризолитах из Мьянмы наблюдаются:

- биотит - красновато-бурые шестигранные псевдогексагональные пластинчатые кристаллы;
- хромит, часто окруженный дисковидными трещинами, напоминающими «лист кувшинки»;
- энстатит - коричневые, вытянутые призматические кристаллы, имеющий сильный плеохроизм;
- геденбергит в виде темно-коричневых прямоугольных пластинок;
- апатит и карбонаты, образующие бесцветные, призматические кристаллы;
- плёнки оксидов железа - изогнутые, угловатые коричневато-желтоватые пятна.

Для хризолита Пакистана характерны включения людвигита и вонсенита.

В хризолите из базальтов США, Аризоны и Китая наиболее характерны:

- кристаллики хромита, хромовой шпинели, хромдиопсида, оксидные плёнки.

Довольно часто вокруг кристалликов хромита наблюдаются дисковидные полости, заполненные флюидными включениями, напоминающие лист кувшинки.

Для хризолитов Китая, кроме того, характерны включения ламелей магнетита, представляющих структуры распада.

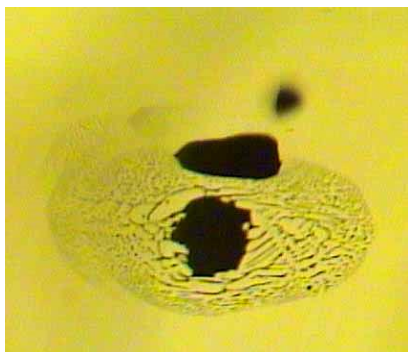
В хризолитах России установлены затвердевшие раскристаллизованные расплавные включения. Это позволяет относить хризолиты Кугды и Ковдора к магматическому классу (Соколов и др., 2002), а не к пневмтолитово-гидротермальному (Киевленко и др., 1982)

Кристаллические включения апатита и амфибола и раскристаллизованные расплавные включения, можно рассматривать как важный диагностический признак, позволяющий отличить ковдорские образцы от всех остальных (Соколов и др., 2002).

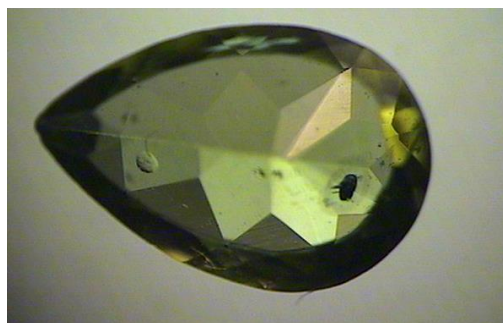
Хризолиты из палласитов выделяются повышенным количеством металлических включений.

Таблица 13

**Типичные включения в хризолите различного происхождения**



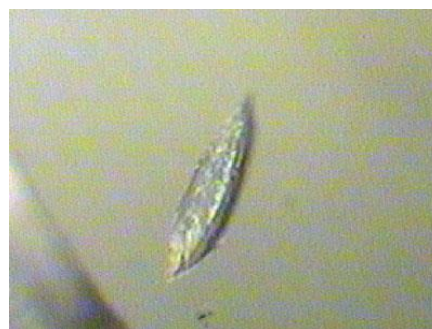
*Включение хромита, окружённое дисковидной трещиной. Китай*



*Включение хромита. Сан-Карлос, шт. Аризона, США*



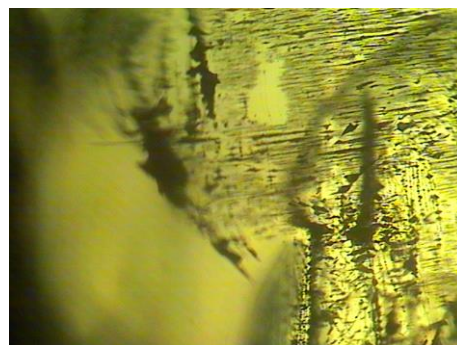
*Включения типа «листья кипариса» в хризолитах (Аризона).*




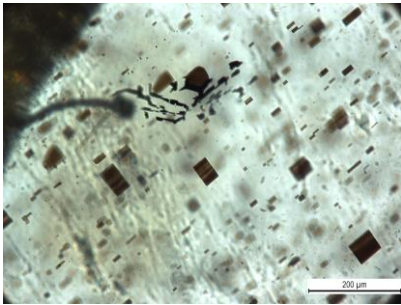
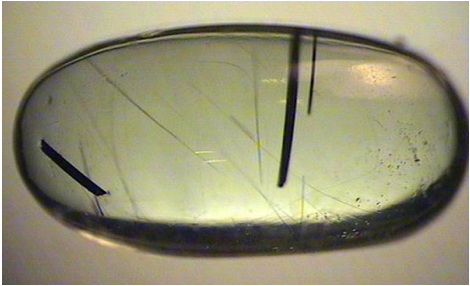

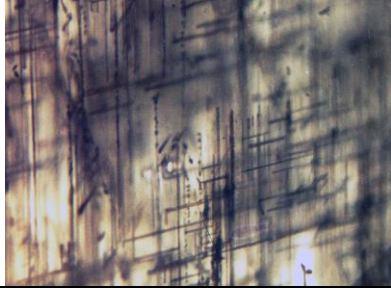

*Кристалл шортита ( $\text{Na}_2\text{Ca}_2[\text{CO}_3]_3$ ) в хризолите (Аризона).*



*Структуры распада в виде цепочек кристалликов магнетита в хризолите Кугды, Россия*



*Структуры распада: ламели магнетита в хризолите Китая*

	
<p><i>Включения биотита в перидоте Мьянмы (Бирмы). (Gübelin, Koivula, 1996)</i></p>	<p><i>Пластинки геденбергита в хризолите Мьянмы</i></p>
	
<p><i>Людвигит в хризолите Сапат Валея, Пакистан</i></p>	<p><i>Флюидные включения в перидоте. (Gübelin, Koivula, 1996).</i></p>
	
<p><i>Включения неизвестного материала в метеорите.</i></p>	<p><i>. Частички железа в хризолите из метеорита Сеймчан</i></p>

## Заключение

Все изученные хризолиты как земного, так и внеземного происхождения характеризуются близким химическим составом. Магнезиальность их колеблется в интервале 84-92%. Наименьшие значения её характерны для хризолитов Анголы, а максимальные для образцов из Мьянмы. Оливины из метеоритов занимают промежуточное положение. Поскольку химический состав изученных хризолитов мало различается, то и оптические свойства близки. Структурные параметры также практически не различаются. Можно отметить обратную корреляционную зависимость между величиной параметра  $a$  и содержанием магния в минерале: хризолит Анголы, характеризуется пониженным содержанием магния (44, 67 вес.% MgO) и наиболее высоким значением параметра  $a$  (4,7864 Å).

Отчётливые различия между хризолитами выявлены при изучении включений. Именно по включениям можно определить генетический класс месторождений. Так, затвердевшие расплавные включения в хризолитах Кугды и Ковдора позволяют отнести их к магматическому классу, а не к пневматолитово-гидротермальному, как это было ранее.

Включения в хризолитах земного происхождения – это кристаллики минералов (биотита, хромита, хромдиоксида и др.), в то время как включения в оливинах из метеоритов представлены металлическими частицами, оксидами в виде пятен, либо включениями неизвестного материала, образующего волосовидные пересекающиеся иглы.

## Список литературы.

- Алифиров Т.А., Похиленко Л.Н.* Особенности распада твёрдых растворов в пироксенах мантийных пород. RMS DPI 2008-2-3-0
- Андерсон Б.* Определение драгоценных камней / пер. с англ. Л. В. Булгака, М. Герфанова, М. Федькина; под ред. Л. В. Булгака. – М.: Мир камня, 1996. – 456 с.
- Афанасьев Б.В.* Минеральные ресурсы щёлочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. С.-Петербург, 2011. 224 с.
- Бетехтин А.Г.* Минералогия. М.: Изд-во геол.литер., 1950. 956 с.
- Буканов В.В.* Драгоценные камни. СПб. 2008. 385 с.
- Булах А.Г.* Руководство и таблицы для расчета формул минералов. Недра, М.:1967. 143 с.
- Булах А.Г.* Общая минералогия: СПб.: Изд-во С.-Петерб.ун-та, 2002, 356 с.
- Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г.* Классификация, формулы и структуры минералов: Учеб. Пособие. -СПб.: Изд-во С.-Петерб.ун-та, 2003, -152 с.
- Зинченко В.Н.* Месторождения алмазов из кимберлитов северо-востока Анголы// Автореферат докт дисс. С.-Петербург.. 2015. 34 с.
- Золотарев А.А., Буйко А.К., Буйко А.А., Овчинников Н.О.* Особенности химического состава и оптических свойств хризолита // Вестник геммологии. М.: 2003. Вып. 2. С.10-15.
- Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А.* Ковдор. Апатиты, 2002. 326 с.
- Качалин Д.М.* . На Колыму за метеоритом Сеймчан//Родная старина. М.:2011. № 1. С.53-59.
- Киевленко Е.Я., Сенкевич Н.Н., Гаврилов А.П.* Геология месторождений драгоценных камней. М., Недра, 1982, 279 с.
- Килина Е.А.* Ювелирные оливины различного генезиса: особенности химического состава, кристаллической структуры и свойств. Магистерская дисс. СПбГУ. 2009.
- Корнилов Н.И., Солодова Ю.П.* Ювелирные камни. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987, 282 с.

*Саранчина Г.М., Шинкарев Н.Ф.* Петрография магматических и метаморфических пород. Л.: Недра, 1967. - 324 с.

:*Смит Г.* Драгоценные камни. М.: Изд-во Мир, 1980. 594с.

*Соколов С.В., Ярмишко С.А., Фёдоров А.В.* Ювелирный хризолит с новыми типами включений // Вестник геммологии, 2002. № 39(6) С. 49-54.

*Соколов С.В., Чистякова Н.И., Ярмишко С.А.* Включения в хризолите флогопитового месторождения массива Ковдор (Кольский п-ов)//Геологическое изучение и использование недр, Геоинформцентр, М.: 2003. Вып.4, -С. 26-37.

*Ярмишко С. А.* Геммологические особенности и генезис хризолитов месторождений Ковдор и Кугда.//Автореферат дисс. - Москва, 2005. - 23 с. :

*Buseck P.* Pallasite meteorites - mineralogy, petrology and geochemistry. 1976

*Gubelin E.J., Koivula J.I.* (1986) Photoatlas of Inclusions in Gemstones, ABC Edition, Zurich, Switzerland: ABC Edition, 1986. – 585 p.

*Fuhrbach J.* Kilbourne Hole peridot // Gem & Gemology. – 1992.– Vol. 28, № 1. – P. 16–27.

*Hammer V. M.F.* The Many Shades of Pakistan's Green Gemstones./Pakistan. 2008. 64-72

*Koivula J. I. , Fryer C. W.* The gemological characteristics of chinese peridot.// Gem & Gemology 1986. Vol.22. 1. Pp.38-40.

*Koivula J.I.* San Carlos Peridot // Gem & Gemology, Winter, 1981. Pp.123-135.

*Liu Ruoxin* Chronology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in China (in Chinese)// Beijing: Seismological Press. 1992. Pp. 366–391

*Milisenda C.C., Bank H., Henn A.* Peridot aus Pakistan // Z. Dt. Gemmol. Ges. 44/2/3. 1995.

*Peretti A. , Giubelin E.J.* New inclusions in Pakistan peridot: Vonsenite-Ludwigite needles// Jewel Siam . 1996 6/6: Pp.68-69.

*Sinkankas J., Koivula J.I., Becker G.* Peridot as an Interplanetary Gemstone// Gem & Gemology 1992. Vol.28. 1. Pp.43-51.



*Themelis T.* Gems and Mines of Mogok. Bangkok: Private Ed. Ted Themelis, 2008, 352 p.

*Wasson J. T.*) Meteorites: Their Record of the Early SolarSystem History// Freeman, New York. 1985. 165 p.

**Публикации:**

*Чжун Фанюань, Е.А.Золотарева, В.Н. Бочаров, Н.С. Власенко, А.А. Золотарев, Н.И. Пономарева, С.Ю. Янсон.* Хризолит из метеоритов//Сборник материалов XXVIII Молодёжной научной конференции памяти К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии», КРАТЦ-2017, Санкт-Петербург 2017, с. 127-129.