

## Закономерности образования прозрачной шпинели с месторождения Кухилал, Юго-Западный Памир

На месторождении Кухилал выделены две группы кристаллов шпинели: полногранные и безгранные. Последние представляют прозрачное кристаллосырьё. Установлено, что предпосылками образования безгранных прозрачных шпинелей послужило формирование реакционных минералов (гидроталькита и Mg-хлорита) в форме оболочек между форстеритом и шпинелью. Эти оболочки явились началом образования магалов. Они рассматриваются как биметасоматические минеральные ассоциации, возникшие в контактах кристаллов шпинели и форстерита. Выявлено, что новообразованные минералы (гидроталькит, Mg-хлорит, серпентин, брусит и др.) благодаря своим пластичным свойствам сохранили реликты хрупкой шпинели от тектонических деформаций альпийского орогенеза. Гидроталькит-хлоритовой части магалов обязано сохранение прозрачной шпинели. Предлагается рассматривать магалы как рудные тела ювелирной шпинели.

Приводятся микронзондовые и рентгеноструктурные анализы шпинели, форстерита, гидроталькита, хлорита и серпентина.

*Ключевые слова:* Кухилал, шпинель, форстерит, хлорит, гидроталькит, серпентин, брусит.

ЛИТВИНЕНКО АНДРЕЙ КИМОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, ak11954@yandex.ru

РОМАНОВА ЕКАТЕРИНА ИВАНОВНА, eiromanova@hotmail.com

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва

## Patterns of transparent spinel formation at Kukhilal deposit, south-western Pamir

A. K. LITVINENKO, E. I. ROMANOVA

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow

Two groups of spinel crystals, holohedral and anhedral, were recognized at Kukhilal deposit. The latter are transparent raw crystals. It was found that anhedral transparent spinels formed due to reaction minerals (hydrotalcite and Mg chlorite) formation as envelopes between forsterite and spinel. These envelopes generated magals. They are viewed as bimetasomatic mineral associations produced in contacts of spinel and forsterite crystals. It was found that neogenic minerals (hydrotalcite, Mg chlorite, serpentine, brucite, etc.) preserved fragile spinel relics from Alpine orogenesis tectonic deformations due to their ductility. Transparent spinel was preserved in hydrotalcite-chlorite magal part. Magals are proposed to be regarded as jewelry spinel orebodies.

Microprobe and X-ray structural analyses of spinel, forsterite, hydrotalcite, chlorite and serpentine are presented.

*Key words:* Kukhilal, spinel, forsterite, chlorite, hydrotalcite, serpentine, brucite.

**Постановка задачи.** Кухилал – крупное коренное месторождение благородной шпинели, клиногумита, форстерита и талька. Оно находится на Юго-Западном Памире, в Горно-Бадахшанской автономной области Республики Таджикистан. Тектоническая позиция, минеральные ассоциации, *PT*-условия образования месторождения рассмотрены ранее [6, 9, 10].

Постановка исследовательской задачи базировалась на двух главных минералогических особенностях шпинели с месторождения Кухилал.

1. Шпинель представлена отдельными кристаллами от долей миллиметров до 18 см и агрегатами до нескольких десятков сантиметров в поперечнике, от светло-розового, розового и тёмно-розового, редко красного цветов. Она локализована в белых форстеритовых, реже в светло-серых энстатитовых скарнах и в меньшем количестве в магнезитовых и доломитовых мраморах [8]. В форстеритовых скарнах наблюдаются залежи пирита и пирротина до первых десятков см в поперечнике, которые также вмещают

друзовидные срастания кристаллов розовой и тёмно-розовой шпинели до 5 см по ребру. Данная шпинель представляет собой непрозрачное, не ювелирное кристаллосырьё. Непрозрачность обусловлена большим количеством трещин. Эти кристаллы обладают хорошо сформированными гранями, острыми рёбрами и вершинами. Их можно определить как «плоскогранные» (рис. 1).

2. Прозрачная шпинель встречается редко. Для неё характерно почти полное отсутствие кристалломорфологических элементов: граней, рёбер и вершин. Шпинель имеет изометричную или уплощённую форму обломков с матовой поверхностью. Эту разновидность шпинели можно определить как безгранную (рис. 2).

Установление генетических закономерностей образования прозрачной, безгранной шпинели составляет главную задачу исследования. Она решалась на основе анализа кристалломорфологических признаков шпинели и определения её ранних и поздних парагенезисов.

**Материалы и методы исследования.** В работе исследовались образцы форстеритовых скарнов со шпинелью, отобранные с пятого участка в полевых сезонах 2009 и 2012 годов. Основу исследований составили морфологический и парагенетический анализы. Минеральный состав определялся методом рентгенофазового анализа на приборе ДРОН-3 М (аналитик А. В. Фёдоров, МГРИ им. Серго Орджоникидзе). Химический состав минералов исследовался методом микрорентгеноспектрального анализа на приборе «Самеса» SX 100 в режиме съёмки 15 kV, 30 nA (аналитик Н. Н. Кононова, ГЕОХИ РАН). Определение химических составов магалов проводилось



**Рис. 1. Октаэдрический кристалл шпинели со слабо развитыми гранями куба в крупнозернистом агрегате форстерита с графитом:**

на гранях октаэдра – фрагменты плёнок графита и многочисленные линии трещин



**Рис. 2. Безгранный кристалл шпинели со слоями растворения:** тёмный агрегат – пирротин, светло-серый – хлорит, белый – гидроталькит; образец из музея «Самоцветы», г. Москва

при помощи рентгеноспектрального флуоресцентного спектрометра AXIOS Advanced с рентгеновской трубкой, оснащённой Rh анодом, мощностью 3 kW, сканирующим каналом по Соллеру с кристаллами-анализаторами и детонирующим устройством, состоящим из проточного и запаянного счётчиков и сцинтиллярного детектора (аналитик Т. Г. Кузьмина, ГЕОХИ РАН).

**Морфология и парагенезис плоскогранных кристаллов.** Шпинель встречается в виде одиночных кристаллов и сростков. На кристаллах в основном проявлены грани октаэдра, в значительно меньшей степени выражены грани куба и ромбододекаэдра. Грани кристаллов блестящие, часто с фигурами травления. Кристаллы бывают искажены: удлинены по оси второго порядка (рис. 3). Среди них наблюдаются простые двойники по шпинелевому закону с плоскостью двойникования по (111).

Кристаллы шпинели представляют собой непрозрачные, полупрозрачные в тонких сколах индивиды (см. рисунки 1, 3). В них редко встречаются твёрдые включения: апатит, циркон, форстерит, графит, бадделит, а также неустановленный минерал с высоким содержанием Zr, Y, V и U. Малые количества твёрдых включений являются типоморфной особенностью шпинели [10].

В шпинели часто наблюдаются многочисленные разнонаправленные трещины, а периферия некоторых кристаллов осложнена ортогональной системой тонких, длиной 0,5–2 мм, трещинок, делающих её непрозрачной.



Рис. 3. Сильно удлинённый кристалл шпинели, в агрегате доломита, форстерита и клиногумита

В хорошо образованных кристаллах на гранях октаэдра отмечаются скульптуры растворения в виде вогнутых округлённых треугольников глубиной до 1 мм, слоёв, лёгкой ряби, ступенчатости и желобков (рис. 4). Наши данные по кристалломорфологии шпинели не противоречат опубликованным исследованиям [5], которыми установлено, что 85% кристаллов имеют октаэдрическую форму, а 15% осложнены гранями ромбододекаэдра.

Ровные, зеркальные поверхности граней покрыты желобками глубиной до 2 мм, шириной до 1,5 мм и длиной до 2,5 см на фоне углублённых тригонов (см. рис. 4). Желобки являются расширенным выходом трещин на поверхность шпинели. Их дно бывает

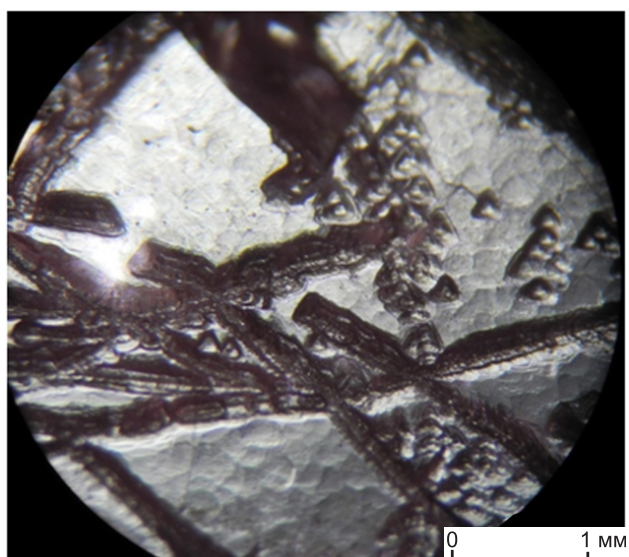


Рис. 4. Грань октаэдра шпинели с тригонами и желобками травления:

желобки маркируют выходы трещин на поверхность

покрыто плёнкой оксидов железа. На сильно трещиноватых участках желобки образуют густую сеть. Между пересекающимися трещинами расположены прозрачные монообласти ювелирного качества размером 3–5 мм в поперечнике.

Особенностями химического состава шпинели являются низкое содержание FeO от 0,14 до 0,6 и в некоторых зёрнах высокие значения  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{V}_2\text{O}_5$  соответственно до 0,57 и 0,45 мас. % (см. таблицы 1, 2).

Кристаллы шпинели внутри форстеритового агрегата во многих случаях покрыты двумя тонкими мономинеральными оболочками (рис. 5). Первая, со стороны шпинели, образована параллельно-волокнистым или мелко-среднезернистым, часто чешуйчатым белым плотным гидроталькитом. Её толщина составляет от десятых долей до 5 мм. Она толще рядом с трещинами на шпинели. Оболочка гидроталькита плотно облекает шпинель, и на ней отпечатаны морфологические элементы поверхности последней. Оболочки гидроталькита вокруг шпинели были выявлены ранее [7].

Его рентгенограмма характеризуется следующими межплоскостными расстояниями в Å: 7,87 (100), 3,91 (60), 2,59 (40), 2,31 (25).

Главными элементами в составе гидроталькита являются MgO – 46 и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 33 мас.%, анионная часть представлена  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . В нём также установлены невысокие содержания FeO,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и NiO соответственно до 0,34, 0,12, 0,20 и 0,02 мас. % (см. табл. 1).

Вторая оболочка образована бесцветными чешуйками магнезиального хлорита (клинохлора) размером от долей до 3 мм. В крупных скоплениях он представляет собой плотный однородный агрегат белого цвета с жирным опаловидным блеском. С внешней стороны оболочка хлорита контактирует с форстеритом, замещая его, а часто и шпинель по периферии (см. рис. 5).

Межплоскостные расстояния на рентгенограмме хлорита, в Å, совпадают с эталоном клинохлора: 14,16 (60), 7,10 (100), 4,74 (60), 3,55 (80), 2,84 (55), 2,03 (16).

Главными элементами в его составе являются (в %): MgO – 32–35,  $\text{SiO}_2$  – 27–31 и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 20–26. В нём также установлены (в мас. %): FeO – до 0,26,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – до 1,17,  $\text{V}_2\text{O}_5$  – до 0,45, NiO – до 0,05, F – до 0,59 (см. таблицы 1, 2).

Шпинель с оболочками локализуется в сильно трещиноватом, белом форстеритовом агрегате. Его зёрна варьируют в размерах от долей до 10 мм, достигая 5 см в поперечнике. Форстерит наблюдается в виде обломков различной формы (угловатых, окатанных, плоских и изометричных) в серпентиновом и карбонатном матриксе, образуя пойкилобластовую структуру или однородную массу с гранобластовой структурой. Некоторые сохранившиеся фрагменты

1. Химические составы (в мас.%) и кристаллохимические формулы шпинели, форстерита, серпентина, гидроталькита и хлорита

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Сумма
Шпинель													
1	0,03	0,01	69,29	0,05	0,25	–	28,21	0,07	0,02	0,04	0,45	н.о.	98,42
2	0,05	–	72,22	–	0,14	0,01	29,02	–	0,02	0,11	0,03	н.о.	101,60
3	0,04	–	71,59	0,02	0,60	0,01	28,67	0,01	–	0,57	0,02	0,02	101,55
Форстерит													
1	42,58	0,02	0,04	0,08	0,28	0,03	57,17	0,08	0,02	–	0,08	0,01	100,39
2	41,92	0,02	0,02	–	0,30	0,03	57,62	0,07	0,04	0,05	0,12	0,02	100,21
3	43,83	0,01	0,02	0,01	0,52	–	58,19	–	–	0,01	0,04	0,02	102,65
Серпентин													
1	42,59	0,02	0,11	0,03	0,22	0,14	40,88	0,03	0,01	0,21	0,03	н.о.	84,27
2	41,95	–	0,72	0,05	0,04	0,04	40,37	0,01	0,01	0,32	–	н.о.	83,51
Гидроталькит													
1	0,04	–	32,29	0,01	0,34	0,09	46,19	0,01	–	0,12	0,15	0,02	79,26
2	0,05	–	33,36	0,06	0,09	0,06	46,61	–	0,01	0,05	0,20	н.о.	80,49
Хлорит													
1	30,17	0,07	20,45	0,01	0,06	0,24	32,83	0,16	0,14	1,17	0,41	н.о.	86,05
2	30,58	0,06	21,16	–	0,07	–	34,92	0,05	0,04	0,07	0,13	0,05	87,50
3	31,04	0,09	20,68	–	0,03	0,04	34,37	0,06	0,09	0,08	0,45	н.о.	87,07
4	26,84	0,04	26,48	–	0,26	0,03	32,37	0,17	–	0,07	0,04	н.о.	86,30

Примечание. н.о. – химический элемент не определялся, «–» – химический элемент не обнаружен; в хлоритах 1, 2, 3 установлен F соответственно 0,34, 0,37 и 0,14 мас.%.

кристаллов форстерита ограничены зеркальными гранями, представляя кристаллы. В них по трещинам развиваются тонкие зональные жилки мощностью до нескольких миллиметров. Осевая часть сложена серпентином, а краевая – хлоритом. В форстерите, не связанном пространственно со шпинелью, по трещинам развивается только серпентин.

Химической особенностью форстерита являются (в мас.%): низкие значения FeO до 0,52, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 0,05, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 0,12, NiO – до 0,02 (см. таблицы 1, 2).

Серпентин в многочисленных жилках, секущих форстерит, белого цвета и легко диагностируется в шлифах. Его межплоскостные расстояния на рентгенограмме, в Å: 7,31 (100), 4,55 (50), 3,65 (80), 2,10 (40). Особенностью его химического состава являются низкое содержание FeO – 0,22 и высокое Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,32 мас.% (см. таблицы 1, 2).

Белый цвет форстерита, гидроталькита, хлорита и серпентина, скрывая структурные признаки минералов, придаёт магнезиальным скарнам однородность.

Представленные выше морфологические детали шпинели (см. рисунки 2, 4, 5) указывают на растворение её поверхности. Результатом этого является образование гидроталькита и магнезиального хлорита в форме оболочек, обрамляющих шпинель. Они наблюдаются между зёрнами шпинели и форстерита. Очевидно, что первичный парагенезис шпинели с форстеритом в определённый момент геологического времени стал неравновесным. Между ними произошла обменная реакция и их периферические части были замещены гидроталькитом и магнезиальным хлоритом (см. рис. 5). Это получило отражение в химическом составе новообразованных минералов

2. Кристаллохимические формулы минералов

№ п/п	Минералы
Шпинель рассчитана на 3 катиона	
1	$Mg_{1,00}(Al_{1,98}Fe^{3+}_{0,01}V_{0,01})O_4$
2	$Mg_{1,00}Al_{2,00}O_4$
3	$Mg_{1,00}(Al_{1,98}Fe^{3+}_{0,01}Cr_{0,01})_{2,00}O_4$
Форстерит рассчитан на 3 катиона	
1	$(Mg_{1,99}Fe^{2+}_{0,01})_{2,00}Si_{1,00}O_4$
2	$(Mg_{1,99}Fe^{2+}_{0,01})_{2,00}Si_{1,00}O_4$
3	$(Mg_{1,99}Fe^{2+}_{0,01})_{2,00}Si_{1,00}O_4$
Серпентин рассчитан на 5 катионов	
1	$(Mg_{2,86}Fe^{2+}_{0,01}Al_{0,01}Cr_{0,01})_{2,89}Si_{2,00}[O_{4,80}(OH)_{0,20}]_{5,00}(OH)_{4,00}$
2	$(Mg_{2,87}Al_{0,04})_{2,91}Si_{2,00}[O_{4,86}(OH)_{0,14}]_{5,00}(OH)_{4,00}$
Гидроталькит рассчитан на 6 катионов, по [4]	
1	$[Mg_{3,85}Fe^{2+}_{0,02}Al_{2,13}(OH)_{12} \cdot (CO_3^{2-})_{1,13}(H_2O)_3]$
2	$[Mg_{3,83}Al_{2,17}(OH)_{12}] \cdot (CO_3^{2-})_{1,17}(H_2O)_3$
Хлорит рассчитан на 5 катионов	
1	$(Mg_{2,35}Al_{0,61}Cr_{0,03}V_{0,01})_{3,00}(Si_{1,45}Al_{0,55})_{2,00}O_5(O_{0,05}OH_{3,95})_{4,00}$
2	$(Mg_{2,42}Al_{0,58})_{3,00}(Si_{1,42}Al_{0,58})_{2,00}O_5OH_{4,00}$
3	$(Mg_{2,39}Al_{0,59}V_{0,02})_{3,00}(Si_{1,45}Al_{0,55})_{2,00}O_5(O_{0,06}OH_{3,94})_{4,00}$
4	$(Mg_{2,26}Fe^{2+}_{0,01}Al_{0,73})_{3,00}(Si_{1,26}Al_{0,74})_{2,00}(O_{4,99}O_{0,01})_{5,00}OH_{4,00}$

из оболочек. Основой их состава явилось вещество шпинели и форстерита, а также привнесённые летучие элементы (см. таблицы 1, 2).

**Морфология и парагенезис безгранных кристаллов.** Внутри форстеритовых скарнов хаотично размещаются скопления белых, мягких пород, которые вмещают «безгранные» кристаллы прозрачной шпинели. Эти породы имеют разнообразную форму: от эллипсоидной с резкими контактами до шарообразной с ответвлениями и изолированными участками, похожими на жилы, карманы, гнёзда с нечёткими, размытыми границами. Размеры этих тел состав-

ляют до одного метра в поперечнике. Наибольший объём прозрачной шпинели, по данным разведки, сконцентрирован на пятом участке. В настоящее время на нём проводятся добычные работы экспедицией «Чамаст».

Ювелирная шпинель локализуется только внутри белой, мягкой породы, которая в XI в. получила название магал [1]. После длительного забвения магалы и вместе с ними ювелирная шпинель были обнаружены советскими геологами в конце 1960-х годов (Памирская ГРЭ) при проведении подземных горных выработок.

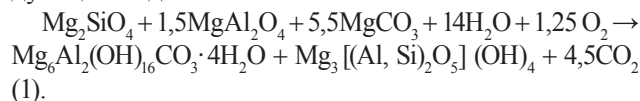
Магалы можно определить как рудное тело ювелирной шпинели. Они представляют основной интерес при отработке месторождения на ювелирную шпинель, содержание которой может достигать 295 карат/м<sup>3</sup> [3].

Магалы белого цвета, имеют лепидобластовую, с фрагментами гранобластовой структуру, разнородную, пористую текстуру и являются жирными на ощупь. В их строении главную роль играют магнезиальный хлорит и гидроталькит средне-крупночешуйчатой формы, отмечаются тальк, серпентин, брусит, а также установленные нами нордстрандит и гиббсит (водные оксиды алюминия), мейкснерит (водосодержащий оксид магния и алюминия), доломит и этрингит (водный сульфат кальция).

Шпинель в магалах характеризуется отсутствием граней и рёбер (рис. 6), имеет матовую поверхность, всегда прозрачная, иногда с редкими трещинами. Размеры безгранных (прозрачных) кристаллов варьируют от первых мм до 10 см в поперечнике (см. рис. 2).

Магалы представляют результат максимального развития процесса реакционного взаимодействия между шпинелью и форстеритом, который привёл к её частичному растворению с полной потерей граней и рёбер.

Их можно рассматривать как результат реакции между шпинелью и форстеритом. Гидроталькит и хлорит являются новообразованным парагенезисом вместо более раннего: шпинель + форстерит. Образование этой ассоциации может быть описано реакцией: форстерит + 1,5 шпинели + 5,5 магнезита + + 14 воды = гидроталькит + магнезиальный хлорит + + 5,5 углекислоты. Её можно воспроизвести в следующем виде:



Она по *PT*-условиям может быть сопоставлена с моновариантным равновесием [11]: энстатит + форстерит + шпинель = магнезиальный хлорит. Данная минеральная ассоциация редко наблюдается на месторождении [6, 7].

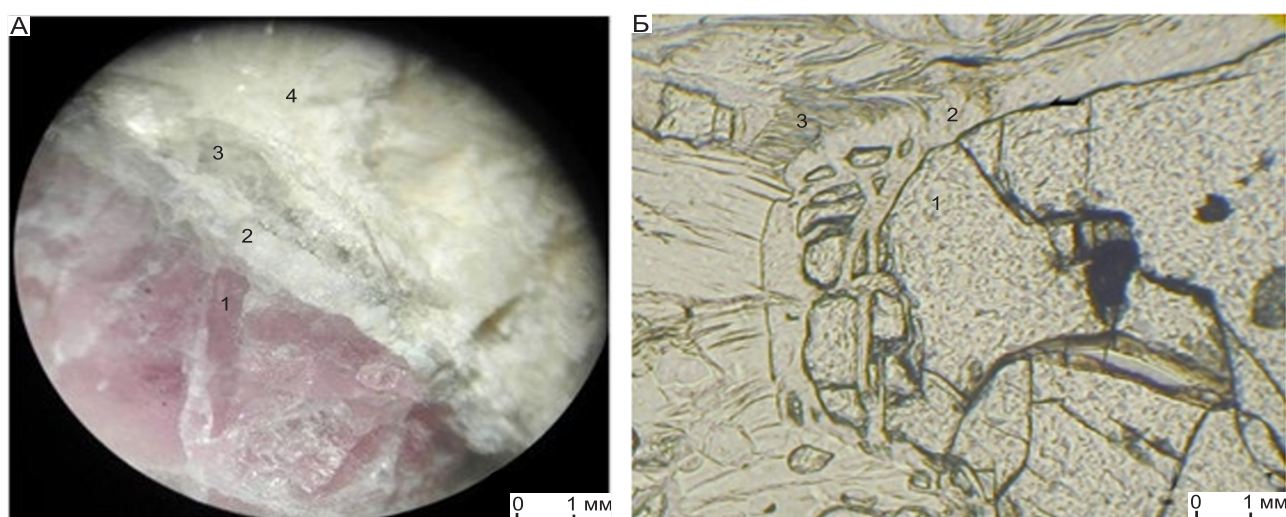


Рис. 5. Оболочки вокруг кристаллов шпинели:

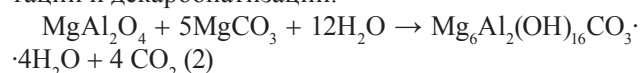
А – под бинокляром в отражённом свете; Б – шлиф: 1 – шпинель, 2 – гидроталькит, 3 – хлорит, 4 – серпентинизированный форстерит

**Генезис прозрачной шпинели.** Шпинель – один из самых ранних минералов месторождения Кухилал [8]. Она сформировалась в первый цикл регионального метаморфизма, соответствующий гранулитовой фации. Значения *PT*-условий лежат в контуре А (рис. 7). Крупные полногранные кристаллы шпинели первоначально, вполне вероятно, были прозрачными. Тектонические деформации, сопровождавшие второй метаморфический цикл (диафторез амфиболитовой фации по гранулитовой), создали «паутину» трещин, нарушивших прозрачность самоцвета. Этот цикл протекал в *PT*-условиях амфиболитовой фации. Их величины оконтурены полем Б (см. рис. 7), к которому приурочено возникновение неравновесных физико-химических условий между шпинелью и форстеритом. Этому способствовали метаморфогенные растворы, которые легко мигрировали по возникшим трещинам, способствуя растворению минералов.

Началом процесса растворения можно считать скульптуры в форме борозд, треугольников и слоёв растворения на гранях кристаллов. Дальнейшее его развитие привело к возникновению двух оболочек, сложенных соответственно гидроталькитом и магнезиальным хлоритом. Их образование было одновременным, поэтому моновариантную линию III (см. рис. 7) можно скоррелировать с вышеприведённой реакцией (1).

По трещинам внутри раздробленных кристаллов шпинели происходило её замещение гидротальки-

том, которое, вероятно, протекало по реакции гидратации и декарбонатизации:

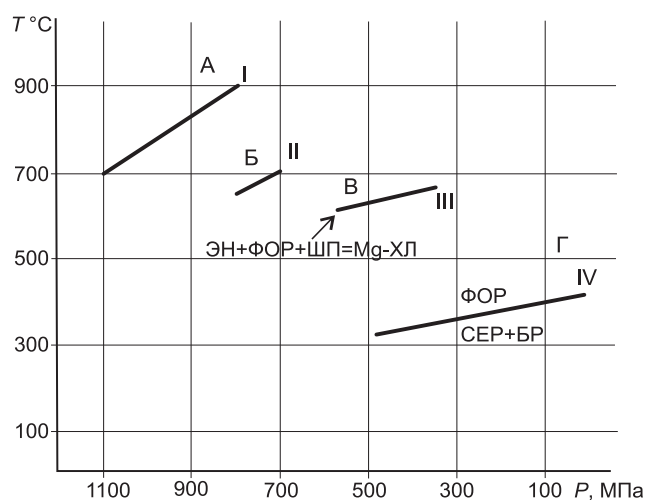


Результаты приведённых реакций (1) и (2), наблюдаемых в штуфах и шлифах, свидетельствуют о двух обстановках образования гидроталькита: первая – в контактах шпинели с форстеритом, вторая – по трещинам внутри шпинели.



Рис. 6. Образец магала:

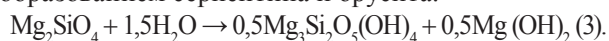
безгранные кристаллы шпинели в гидроталькит-хлоритовом агрегате



**Рис. 7. Термодинамические условия образования и развития минеральных ассоциаций месторождения Кухилал:**

I–II – верхние границы метаморфических циклов, по [2]: I – первого, II – второго; III–IV – моновариантные равновесия, по [11]: III – энстатит + форстерит + шпинель = форстерит = серпентин + брусит, при давлении воды 0,3 МПа; ЭН – энстатит, ФОР – форстерит, ШП – шпинель, Mg-ХЛ – магнезиальный хлорит, СЕР – серпентин, БР – брусит; А, Б, В, Г – поля формирования минералов: А, Б – полногранных кристаллов шпинели, В, Г – магалов с безгранной, прозрачной шпинелью

Замещение форстерита серпентином произошло позже образования гидроталькита и хлорита (см. рис. 7). Оно протекало по реакции гидратации с образованием серпентина и брусита:



Анализируя составы анионных групп гидроталькита и хлорита (см. таблицы 1, 2), можно предположить состав минералообразующих растворов, который определяли  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , F и Cl. Последние два

элемента определены в апатите в количестве соответственно 1,4 и 2,3, а в клиногумите и флогопите установлен фтор соответственно 4,4 и 1,6 мас.%.  
 В составе магалов были определены S – 4,49 и Cl – 0,84 мас.% (табл. 3). Эти химические элементы также можно включить в состав флюидов. Их высокая активность привела к описанным выше реакциям в устойчивых к растворению минералах магнезиальных скарнов. Исследования водных вытяжек и фазового состава газовой-жидких включений в этих минералах показал хлоридный состав [12, 13]. Мы его можем расширить сульфатным, уголекислотным, фторным и гидроксильным компонентами.

Образование оболочек вокруг шпинели (см. рис. 5) явилось началом формирования магалов (см. рис. 6). Многочисленные трещины в шпинели, форстерите и других минералах способствовали этому, облегчая движение метаморфогенных растворов. Их вещество также послужило основой для образования новых минералов.

Замещение шпинели и форстерита представляет собой звено в многоцикличной и многоэтапной эволюции месторождения. Его началом явилось образование шпинель-форстеритового парагенезиса, значения *P-T*-условий которого локализуются в поле А – первый цикл, гранулитовая фация (см. рис. 7). Значения *P-T* параметров поля Б коррелируются со вторым циклом регионального метаморфизма. Появление гидроталькит-хлоритовых оболочек происходило в третьем цикле метаморфизма, обусловленном альпийским орогенезом, который привёл к тектоническим деформациям, создавшим в минералах сложную систему трещин. Пластичные и упругие минералы магалов (гидроталькит, хлорит, тальк, серпентин, брусит и др.) сохранили от деформаций реликты нерастворившихся кристаллов шпинели. Благодаря маглам тектонические движения не повредили шпинелевое кристаллосырьё и была сохранена первичная прозрачность. Минералообразующие процессы этого

### 3. Химический состав магалов (в мас.%)

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	Zn	Ga	Cs	Ba	Ni	Сумма
1	3,56	–	35,19	5,22	–	–	–	–	51,27	–	–	0,81	0,59	–	–	–	–	–	0,60	97,24
2	11,39	–	26,46	0,22	0,03	0,52	0,13	0,36	54,94	0,10	–	0,08	4,49	0,84	0,03	0,02	0,21	0,07	–	99,89

Примечание. «–» – химический элемент не обнаружен.

метаморфического цикла протекали в *PT*-условиях ниже линии III в контурах полей В, Г. Существенного разрушающего воздействия на шпинель они не имели.

Образование минералов в магалах соответствует значениям *PT*-условий в контурах полей В и Г (см. рис. 7): В – начало образования, Г – завершение. Граница между ними имеет условный характер и проведена на основе значений моновариантного равновесия: форстерит = серпентин + брусит [11]. Эта минеральная ассоциация широко проявлена на месторождении.

По представленным материалам можно сделать следующие **выводы**.

1. На месторождении Кухилал выделяются две группы кристаллов шпинели: плоскогранные и безгранные. Первая представлена непрозрачными, сильно-трещиноватыми индивидами и сростками, а вторая – прозрачным, ювелирным кристаллосырём.

2. Формирование гидроталькита и Mg-хлорита в форме оболочек вокруг шпинели явилось началом образования магалов.

3. Магалы можно рассматривать как реакционно-метасоматические минеральные ассоциации, возникшие в контактах кристаллов полногранной шпинели и форстерита.

4. Новообразованные минералы – гидроталькит, Mg-хлорит, серпентин, брусит и др. – благодаря своим пластичным свойствам сохранили реликты твёрдой, но хрупкой шпинели от тектонических деформаций альпийского орогенеза.

5. Магалы можно рассматривать как рудные тела ювелирной шпинели. Они представляют главный интерес для горняков при отработке месторождения на ювелирную шпинель.

6. Плоскогранные формы кристаллов шпинели являются более ранними по сравнению с кривогранными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бируни А. Р.* Собрание сведений для познания драгоценностей. – Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 518 с.
2. *Буданов В. И., Буданова К. Т.* Геолого-петрологическая характеристика обнажённого кристаллического фундамента // Земная кора и верхняя мантия Таджикистана. – Душанбе: Дониш, 1981. – С. 56–112.
3. *Гуревич Я. А.* Особенности геологического строения и разведки месторождений благородной шпинели Кухи-Лал (ЮЗ Памир) // Геология, поиски и разведка месторождений цветных камней Таджикистана. – Душанбе, 1987. – С. 17–20.
4. *Житова Е. С.* Кристаллохимия природных слоистых двойных гидроксидов // Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб: СПб. гос. ун-т, 2016. – 289 с.
5. *Калачёв В. Н., Дорохова Г. И.* Сравнительная кристалломорфология шпинели из форстеритового скарна месторождения Кухи-Лал (ЮЗ Памир) // ЗВМО. – 1991. – Ч. СХХ, № 2. – С. 73–78.
6. *Киселёв В. И., Буданов В. И.* Месторождения докембрийской магнезиально-скарновой формации Юго-Западного Памира. – Душанбе: Дониш, 1986. – 222 с.
7. *Колесникова Т. А.* Благородная шпинель, клиногумит и манассеит месторождения Кухилал (Памир) // Драгоценные и цветные камни. – М.: Наука, 1980. – С. 181–198.
8. *Литвиненко А. К.* Генетическая позиция благородной шпинели в магнезиальных скарнах Юго-Западного Памира // ЗВМО. – 2003. – Ч. СХХХII, № 1. – С. 76–81.
9. *Литвиненко А. К.* Нуристан-Южнопамирская провинция докембрийских самоцветов. – Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 4. – С. 305–312.
10. *Литвиненко А. К., Романова Е. И.* Роль пустот в образовании кристаллов на месторождении благородной шпинели Кухи-Лал, Юго-Западный Памир // Отечественная геология. – 2020. – № 1. – С. 80–87.
11. *Маракушев А. А.* Термодинамика метаморфической гидратации минералов. – М.: Наука, 1968. – 198 с.
12. *Морозов С. А., Гуревич Я. А.* О физико-химических условиях образования месторождения благородной шпинели Кухилал на Памире // ДАН ТаджССР. – 1973. – Т. 16, № 3. – С. 47–50.
13. *Файзиёв А. Р., Эльназаров С. А.* Термобарохимические условия формирования Кухилальского месторождения благородной шпинели // Известия АН Республики Таджикистан Отделение физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. – 2013. – № 1(150). – С. 99–106.

### REFERENCES

1. *Biruni A. R.* Sobraniye svedeniy dlya poznaniya dragotsennostey [Collection of information for the knowledge of jewelry]. Leningrad, AN SSSR publ., 1963, 518 p. (In Russ.)
2. *Budanov V. I., Budanova K. T.* Geologo-petrologicheskaya kharakteristika obnazhonnoy kristallicheskogo fundamenta [Geological and petrological characteristics of the exposed crystalline basement]. Zemnaya kora i verkhnyaya mantiya Tadjikistana, Dushanbe, Donish publ., 1981, P. 56–112. (In Russ.)
3. *Gurevich Ya. A.* Osobennosti geologicheskogo stroeniya i razvedki mestorozhdeniy blagorodnoy shpineli Kukhi-Lal (YUZ Pamiir) [Features of the geological structure and exploration of deposits of the noble spinel Kuhi-Lal (South-West Pamiir)]. Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdeniy tsvetnykh kamney Tadjikistana, Dushanbe, 1987, P. 17–20. (In Russ.)
4. *Zhitova Ye. S.* Kristallokhiimiya prirodnykh sloistykh dvoynykh gidroksidov [Crystal chemistry of natural layered double hydroxides]. Dis. ... kand. geol.-min. nauk. St. Petersburg, SPb-gos. un-t publ., 2016, 289 p. (In Russ.)
5. *Kalachov V. N., Dorokhova G. I.* Sravnitel'naya kristallogomorfologiya shpineli iz forsteritovogo skarna mestorozh-

- deniya Kukhilal (YUZ Pamir) [Comparative crystallo-morphology of spinel from forsterite skarn of the Kukhilal deposit (southwestern Pamir)]. ZVMO, 1991, Ch. CXX, No. 2. P. 73–78. (In Russ.)
6. *Kiselov V. I., Budanov V. I.* Mestorozhdeniya dokembriyskoy magnezialno-skarnovoy formatsii Yugo-Zapadnogo Pamira [Deposits of the Precambrian magnesian-skarn formation of the Southwestern Pamirs]. Dushanbe, Donish publ., 1986, 222 p. (In Russ.)
  7. *Kolesnikova T. A.* Blagorodnaya shpinel, klinogumit i manasseit mestorozhdeniya Kukhi-Lal (Pamir) [Noble spinel, clinohumite and manasseite of the Kuhl-Lal deposit (Pamir)]. Dragotsennyye i tsvetnyye kamni, Moscow, Nauka publ., 1980, P. 181–198. (In Russ.)
  8. *Litvinenko A. K.* Geneticheskaya pozitsiya blagorodnoy shpineli v magnezialnykh skarnakh Yugo-Zapadnogo Pamira [Genetic position of noble spinel in magnesian skarns of the Southwestern Pamirs]. ZVMO publ., 2003, Ch. CXXXII, No. 1, P. 76 – 81. (In Russ.)
  9. *Litvinenko A. K.* Nuristan-Yuzhnopamirskaya provintsiya dokembriyskikh samotsvetov [Nuristan-South Pamir province of Precambrian gems]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 2004, V. 46, No. 4, P. 305–312. (In Russ.)
  10. *Litvinenko A. K., Romanova Ye. I.* Rol pustot v obrazovanii kristallov na mestorozhdenii blagorodnoy shpineli Kukhi-Lal, Yugo-Zapadnyy Pamir [The role of voids in the formation of crystals at the Kukhi-Lal noble spinel deposit, Southwest Pamir]. Otechestvennaya geologiya, 2020, No. 1, P. 80–87. (In Russ.)
  11. *Marakushev A. A.* Termodinamika metamorficheskoy gidratatsii mineralov [Thermodynamics of metamorphic hydration of minerals]. Moscow, Nauka publ., 1968, 198 p. (In Russ.)
  12. *Morozov S. A., Gurevich Ya. A.* O fiziko-khimicheskikh usloviyakh obrazovaniya mestorozhdeniya blagorodnoy shpineli Kukhilal na Pamire [On the physicochemical conditions of the formation of the Kukhilal noble spinel deposit in the Pamirs]. DAN TadzhSSR publ., 1973, V. 16, No. 3, P. 47–50. (In Russ.)
  13. *Fayziyev A. R., Elnazarov S. A.* Termobarokhimicheskiye usloviya formirovaniya Kukhilalskogo mestorozhdeniya blagorodnoy shpineli [Thermobarochemical conditions of the formation of the Kuhlilalsky deposit of noble spinel]. Izvestiya AN Respubliki Tadzhikistan Otdeleniye fiz.-mat., khim., geol. i tekhn. Nauk, 2013, No. 1(150), P. 99–106. (In Russ.)

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.