

И. И. КОМОВ, Б. С. ГОРОБЕЦ

## НЕКОТОРЫЕ ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АКЦЕССОРНОГО АПАТИТА ИЗ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ И ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД ПАМИРА И УРАЛА

В литературе почти отсутствуют сведения о составе и свойствах акцессорного апатита из гидротермальных хрусталеносных кварцевых жил и сопровождающих их гидротермально измененных пород. Ниже приводятся данные по изучению апатита в искусственных шлихах, полученных из проб (весом 5—10 кг) хрусталеносного кварца и вмещающих пород из месторождений Памира и Приполярного Урала.

Гидротермальные хрусталеносные кварцевые жилы на территории Западного Памира (Ванч-Язгулемская зона) развиты преимущественно среди древних верхнепротерозойских пород, представленных кварцитами. В гранитоидах кварцевые жилы встречаются реже, главным образом в зонах метасоматической альбитизации, а также в апикальных частях интрузивных массивов. В отличие от Ванч-Язгулемского района в пределах Сарезско-Пшартского антиклинория (Восточный Памир) кварцевые жилы встречаются в породах различного литологического состава: в кварцитах, амфиболитах, сланцах.

Кварцевые жилы Приполярного Урала развиты среди кварцитов, кристаллических сланцев верхнепротерозойского возраста; нередко наблюдается тесная пространственная связь кварцевых жил с дайками амфиболитов. Средние размеры хрусталеносных жил Памира и Урала составляют 10—15 м в длину при мощности 1—2 м.

*Апатит* — довольно широко распространенный минерал хрусталеносных зон Памира и Урала. Он встречается в кварцевых жилах, гидротермально измененных породах (зоны серицитизации, хлоритизации, карбонатизации) и в гнездах (табл. 1). Наиболее высокие его концентрации характерны для кварцевых жил и измененных пород Восточного Памира. Морфологические и физические свойства апатитов Памира и Урала приведены в табл. 2. Габитус кристаллов в хрусталеносных зонах Памира преимущественно гексагональный призматический, реже гексагональный дипирамидально-призматический. Кристаллы представлены комбинацией призмы  $(10\bar{1}0)$  и третьего пинакоида  $(0001)$ . Лучше всего развита грань  $(10\bar{1}0)$  и реже грань  $(1011)$ . Встречаются призмы с бипирамидальными окончаниями  $(1011)$ . Кроме того, отмечены обломки призматических кристаллов, а также зерна неправильной формы. В кварцевых жилах Урала кристаллы имеют пластинчатый и таблитчатый облик с развитием граней пинакоида. Отношение сторон (ширины к длине) у кристаллов апатита колеблется от 1:1 до 1:3 (коротко- и длинностолбчатые кристаллы). Отметим, что в кристаллах апатита из гидротермально измененных (серицитизированных) кварцитов около жил хорошо развиты грани дипирамид.

По внешнему облику резко отличаются апатиты из кварцевых жил Восточного Памира и Урала. В них грани пинакоида становятся габитусными, и кристаллы принимают таблитчатый облик. Таблички имеют шестиугольные очертания. Преобладают короткопризматические кристаллы, у которых отношение ширины к длине изменяется от 1:1 до 1:2. В таблитчатых апатитах отношение ширины к длине достигает 4:1. На гранях кристаллов отмечена мелкая штриховка. Размер кри-

Таблица 1

Содержание апатита (г/г), частота его встречаемости (%) в кварцевых жилах, вмещающих породы и выполнении гнезд на Памире и Приполярном Урале

Участок	Кварцевые жилы			Вмещающие породы						Выполнение гнезд		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<u>Памир</u>												
Мионо-Дара	35	15	1	0,3	10	45					140	
	80	70	40	80	90	100					63	
Лянгар	5	3	0,1	20	50	200					24	
	100	15	3	80	90	100					100	
Дальнее	1		0,1		2	105						
	100		10		95	100						
Шумное	170			24	63	180					980	
	100			90	90	100					100	
Барнавадж	26				40	110					2	
	100				100	100					33	
Джауваси	12			18	45	150					0,5	
	100			40	81	90					66	
Зор Ярчи Чак	130	20	2	—	120	180	90	700	20		13	540
	100	95	10		80	100	100	100	80		100	100
<u>Урал</u>												
Желанное	1	1	—	0,5	4						1	
	100	60		80	90						100	
Додо	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
	80											85
Пуйва	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25
		70										70
Маньхобею	—	1	—	—	—	—	—	62	—		180	
		60						90			90	

*Примечание.* В числителе — содержание минерала, в знаменателе — частота его встречаемости. 1 — хрусталоносный кварц; 2 — нехрусталоносный кварц; 3 — кристаллы кварца; 4 — кварциты неизменные; 5 — кварциты измененные; 6 — кварциты сильно измененные; 7 — мраморы; 8 — амфиболиты; 9 — слюдяные сланцы; 10, 11, 12 — гнездовые выполнения: с серицитом, хлоритом, каолином соответственно. Прочерк означает, что апатит не обнаружен.

сталлов апатита из кварцевых жил и измененных пород Западного Памира составляет от 0,05 до 0,8 мм. В кварцевых жилах Урала размеры кристалла апатита достигают 1—2 мм, иногда до 50 мм, поверхность граней ровная, гладкая, блестящая. Обычно апатиты из кварцевых жил и измененных пород бесцветные, прозрачные, иногда водяно-прозрачные, реже молочно-белые полупрозрачные (из жил Восточного Памира), встречаются бледно-зеленые и голубовато-синие разновидности (Приполярный Урал). Показатели преломления апатитов:  $N_0=1,638$ ;  $N_e=1,631$  (из жил);  $N_0=1,636$ ;  $N_e=1,629$  (из кварцитов).

Для кристаллов апатита характерно растворение зерен, их регенерация и повторное зарождение. Растворение связано с наложенными процессами; с увеличением интенсивности растворения ребра призмы кристаллов сглаживаются. Следы естественного травления (коррозия граней) особенно типичны для кристаллов апатита из гидротермально измененных кварцитов.

В апатитах отмечены твердые минеральные включения: рутил, циркон, сфен. Апатиты ассоциируют с ильменитом, брукитом, аксинитом, альбитом, кальцитом. Наличие высоких концентраций апатита в гидро-

Таблица 2

## Морфологические и физические особенности апатита Памира и Урала

Участок	Породы	Морфологические особенности	Окраска, прозрачность, блеск	Отношение сторон (ширины к длине)
Памир Мионо-Дара	Кварциты	Гексагонально-призматические кристаллы, удлиненные и короткостолбчатые. Обычно они представлены комбинацией призмы ( $10\bar{1}0$ ) и пинакоида (0001)	Бесцветные, прозрачные со стеклянным блеском	1:1, 1:2, 1:3
	Измененные кварциты	Зерна неправильной формы, округлые, размером 0,05—0,3 мм		
Лянгар	Жильный кварц	Гексагональные призматические короткостолбчатые кристаллы Округлые удлиненные зерна размером 0,05—0,5 мм	Бесцветные, прозрачные, блеск стеклянный	1:1, 1:2
	Измененные кварциты	Гексагональные призматические кристаллы с преобладающим развитием граней призмы ( $10\bar{1}0$ ) и пинакоида (0001). Встречаются единичные формы призм с бипирамидальными оконечностями ( $10\bar{1}1$ ). Поверхность зерен гладкая, блестящая. Обломки призматических кристаллов. Округлые удлиненные зерна (0,02—0,1 мм) с ямчатой поверхностью	Водянопрозрачные, бесцветные, блеск стеклянный	1:1,5
Дальнее	Кварц	Округлые зерна размером 0,02—0,1 мм. Короткостолбчатые гексагонально-призматические кристаллы	Бесцветные	1:2
Джауваси	Жильный кварц	Гексагонально-призматические кристаллы, грани ( $10\bar{1}0$ ) с пинакоидальными окончаниями (0001). Поверхность граней гладкая, блестящая. Округлые угловатые зерна	Бесцветные, водянопрозрачные, блеск стеклянный	1:2
	Кварциты	Призматические кристаллы гексагонального габитуса. Развиты грани призмы ( $10\bar{1}0$ ) и пинакоида (0001)	Бесцветные	1:1,5
Барнавадж	Кварциты	Гексагонально-призматические короткостолбчатые. Они представлены комбинацией призмы ( $10\bar{1}0$ ) и третьего пинакоида (0001), комбинацией призмы ( $10\bar{1}0$ ) с дипирамидой ( $10\bar{1}1$ ). Поверхность зерен ровная	Бесцветные, прозрачные	1:1
Шумное	Кварц	Короткостолбчатые гексагонально-призматические кристаллы	Бесцветные, прозрачные	1:1,5

Таблица 2 (окончание)

Участок	Породы	Морфологические особенности	Окраска, прозрачность, блеск	Отношение сторон (ширины к длине)
Зор Ярчи Чак	Кварц жильный	Гексагонально-призматические короткостолбчатые кристаллы. Обычно они представлены комбинацией призмы (1010) и пинакоида (0001)	Бесцветные, прозрачные	1:1,5
		Удлиненно-призматические кристаллы с хорошо развитой гранью (1010). На поверхности кристаллов мелкая штриховка	Бесцветные, молочно-белые, блеск матовый с перламутровым оттенком, местами шелковистый	1:2,5
Приполярный Урал	Кварц-анкеритовые жилы	Таблитчатые кристаллы с короткими гранями (1011) и (1010) и наиболее развитым пинакоидом (0001)	Бесцветные, прозрачные, блеск стеклянный	3:1
		Желанное, Додо	Кварцевые жилы	Пластинчатый и таблитчатый облик с развитием граней пинакоида. Иногда грани призмы покрыты вертикальной штриховкой

термально измененных породах около гнезд (зоны серицитизации и хлоритизации), его включения в кристаллах кварца свидетельствуют о формировании и переотложении этого минерала в период хрусталеобразования. Таким образом, апатит, являясь характерным минералом хрусталоносных кварцевых жил, продолжал свой рост почти до конца кристаллизации кристаллов кварца.

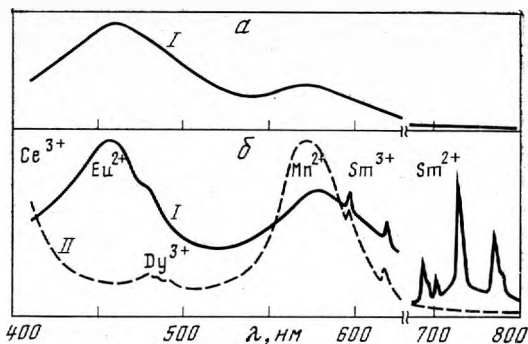
Отмеченная выше изменчивость форм кристаллов апатита связана с относительной степенью развития пинакоидальных граней. Известно, что относительный размер последних увеличивается с понижением температуры минералообразования, при этом подавляется величина дипирамидальных граней [1]. По данному признаку можно разделить апатиты изученных нами регионов на две группы: более высокотемпературные (apatиты Западного Памира) и низкотемпературные (с Восточного Памира и Урала).

С целью изучения распределения изоморфных примесей лантаноидов и марганца в качестве типоморфного признака в апатитах из кварцевых жил и вмещающих пород Памира и Урала были исследованы спектры фотолюминесценции 90 образцов этого минерала. Природа примесных центров свечения определялась на основе изученных ранее синтетических эталонов апатита с марганцем и лантаноидами, что позволило установить в спектрах фотолюминесценции следующие редкоземельные центры:  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  [2—5] (а также в последний период:  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  [6]).

Апатиты из кварцевых жил и гидротермально измененных кварцитов Западного Памира люминесцируют 26 образцов из 33; минерал из кварцевых жил Восточного Памира люминесцирует в 4 случаях из 7, апатиты из вмещающих эти жилы амфиболитов люминесцируют в 6 случаях из 10; апатиты из кварцевых жил Приполярного Урала люминесцируют в 22 случаях из 40. Выделены два резко различных типа спектров фотолюминесценции.

Рис. 1. Спектры фотолюминесценции апатита в видимой области при 77° К

а — апатит из кварцевых жил Приполярного Урала;  
б — апатит из вмещающих пород (кварцитов) Западного Памира (I) и из амфиболитов Восточного Памира (II)



**Тип. I.** Апатиты из гидротермальных кварцевых жил и из около-жильно измененных пород обладают, как правило, голубым свечением при 300° К и беловато-сиреневым при 77° К. В памирских апатитах сильно люминесцируют  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Sm}^{2+}$ , слабее  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  и иногда  $\text{Mn}^{2+}$ . По их люминесценции сделаны следующие порядковые оценки содержания этих примесей в апатитах:  $\text{Eu} \leq 10^{-3}\%$ ,  $\text{Sm} \sim 10^{-1}\%$ ,  $\text{Dy}$  и  $\text{Mn} \sim 10^{-2} - 10^{-1}\%$ . Сильное свечение одновременно  $\text{Eu}^{2+}$  и  $\text{Sm}^{2+}$  свидетельствует о том, что причиной восстановления  $\text{TR}^{3+} \rightarrow \text{TR}^{2+}$  в решетке апатита был радиоактивный фон. Это подтверждается присутствием циркона и монацита в изученных месторождениях Западного Памира. В уральских апатитах голубая люминесценция обусловлена  $\text{Eu}^{2+}$ . В этом случае восстановление  $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$  происходило во время кристаллизации апатита за счет пониженного окислительно-восстановительного потенциала среды минералообразования. Самарий в этих апатитах присутствует лишь в форме  $\text{Sm}^{3+}$ . Известно, что восстановление его в природе до  $\text{Sm}^{2+}$  происходит исключительно радиационным путем: энергия ионизации  $\text{Sm}^{2+}$  до  $\text{Sm}^{3+}$  в ионной кристаллической решетке составляет примерно 2,4 эВ, тогда как у  $\text{Eu}^{2+}$  она примерно в два раза выше [7]. Следовательно, апатит в месторождениях Приполярного Урала<sup>1</sup> не подвергся заметному воздействию ионизирующей (в данном случае «восстанавливающей») радиации.

**Тип. II.** Совершенно иной типичный спектр фотолюминесценции имели апатиты из амфиболитов, которые являются вмещающими по отношению к кварцевым жилам породами на Восточном Памире. Их свечение фиолетово-розовое, его цвет не изменяется при понижении температуры опыта до 77° К. Главные люминесцирующие центры:  $\text{Ce}^{3+}$  (в ультрафиолетовой — фиолетовой области) и  $\text{Mn}^{2+}$  с  $\text{Sm}^{3+}$  (в оранжево-красной области).  $\text{Eu}^{2+}$  и  $\text{Sm}^{2+}$  отсутствуют, что связано с пониженным фоном радиации в амфиболитах. Такого же типа спектр наблюдался ранее у апатита из амфиболитов месторождения Куся (Центральный Урал) [5]. Это подтверждает тот факт, что в спектрах люминесценции отражается региональный типоморфизм апатитов. Порядковые оценки примесей-люминогенов в апатитах из амфиболитов:  $\text{Ce}$  и  $\text{Mn} \sim 10^{-1}\%$ ,  $\text{Sm}$  и  $\text{Dy} \sim 10^{-2} - 10^{-1}\%$ ,  $\text{Eu} \leq 10^{-4}\%$ .

Приведенные на рис. 1 спектры люминесценции типов I и II отличаются от типичных спектров люминесценции апатитов из других типов горных пород [5] прежде всего по относительному вкладу каждого из перечисленных центров свечения апатита. Таким образом, по люминесценции апатита можно судить о присутствии в его решетке катионных примесей определенного состава и рассматривать это физическое свойство как типоморфное.

<sup>1</sup> Образцы апатитов с Приполярного Урала частично были представлены коллекцией Е. М. Мельниковой.

Содержание редкоземельных элементов в апатитах определялось рентгеноспектральным методом (табл. 3). В апатитах Памира установлены р.з.э. разнообразного состава, а суммарное содержание  $TR_2O_3$  существенно изменяется. Оно наибольшее (до 4,5%) в апатите из измененных пород (зон серицитизации) Западного Памира, среднее — в апатитах из амфиболитов и наименьшее в минерале из кварцевых жил. Большая часть апатитов обладает селективным цериевым составом р.з.э., причем относительные содержания церия максимальны в кристаллах из амфиболитов и кварцевых жил Восточного Памира. Максимальные содержания иттриевой подгруппы р.з.э. и иттрия характерны для апатитов из кварцевых жил Западного Памира.

Таблица 3  
Состав редких земель в (вс. %) апатите,

Вещающие породы	La	Ce	Pr+Nd	$\Sigma Ce$	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	$\Sigma Y_1$	Er	Tu	Yb	$\Sigma Y_2$	Y	$\Sigma TR_2O_3$
Кварциты гидротермально измененные, Памир (6)	15,5	25,1	30,0	70,6	—	—	3,9	3,8	9,2	1,2	18,1	2,0	1,5	3,0	6,5	4,8	4,50
Кварцевые жилы, Западный Памир (5)	4,4	46,4	37,0	87,8	—	—	—	—	2,0	0,6	2,6	0,6	1,2	0,4	2,2	7,4	0,36
Амфиболиты, Восточный Памир (6)	2,0	39,5	35,0	76,5	10,0	5,0	—	—	1,1	2,0	18,1	0,5	0,2	0,4	1,1	4,3	0,55

Примечание. Анализы выполнены в ИМГРЭ. Точность 5—10%, чувствительность — 0,05%. В скобках указано количество определений.

Наличие тория в апатитах обуславливает появление плеохроичных дворигов вокруг включений апатита в серицитах. Торий характерен для апатитов из кварцитов. Указанный признак отмечается не всегда, он позволяет выделить разновидности апатита, обогащенные радиоактивными элементами.

Апатиты ранних стадий минерализации содержат большие количества р.з.э., чем апатиты поздних стадий. Вероятно, основная масса р.з.э. выделилась в начальные стадии процесса минералообразования, что подтверждает выводы работы [8]. Наряду с уменьшением суммарного содержания р.з.э. отмечается четкая дифференциация их по трем подгруппам:  $\Sigma_{Ce} = La + Ce + Pr + Nd$ ;  $\Sigma_{Y_1} = Sm + Eu + Gd + Tb + Dy + Ho$ ;  $\Sigma_{Y_2} = Er + Tu + Yb$  (табл. 3). В апатитах из кварцевых жил преобладает  $\Sigma_{Ce}$ . Некоторые разновидности апатита из амфиболитов содержат примеси существенно иттриевой подгруппы  $Y_1$  с преобладанием самария. В апатитах Западного Памира отмечена большая роль  $Y_2$ -подгруппы по сравнению с апатитами из амфиболитов в основном за счет повышения содержания иттербия. Последний наряду с иттрием является характерным элементом и для других минералов Западного Памира.

Постоянными элементами-примесями в апатитах являются, по данным спектральных анализов 70 проб, Mn, Sr, Ba, Ga, Y, Yb, Tl, Zr, Hf (табл. 4). Наблюдается обогащение апатитов Западного Памира торием, а апатитов Восточного Памира — церием. Апатиты были также проанализированы химически на четыре элемента: лантан, церий, цирконий, гафний. Оказалось, что в апатитах из измененных пород содержится больше лантана и гафния, чем в этом минерале из кварцевых жил. Оценка содержания марганца и церия по спектрам люминесценции в целом сопоставима с результатами спектральных и химических анализов, поэтому можно рекомендовать люминесцентный метод для экспрессных

Таблица 4

## Элементы-примеси в апатитах (результаты полуколичественного спектрального анализа)

Регион	Элементы (тыс.%)													
	Mn	Sr	Ba	Ga	Y	Yb	Ce	La	Th	Nb	Be	Tl	Zr	Hf
Западный Памир (27)	120	8	50	30	15	4	10	54	13	3	0,07	2	140	37
Восточный Памир (4б)	100	54	160	0,5	7	1	60	18	—	3	2	7	100	7

определений порядковых значений содержаний Mn и некоторых р. з. э. в микронавесках апатита.

Установленные типоморфные особенности апатита, в частности основные закономерности распределения в нем редких земель, могут быть использованы при поисках и оценке хрусталеносных кварцевых жил.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фишман М. В., Рыкин Н. П., Голдин Б. А., Калинин Е. П. Минералогия. Типоморфизм и генезис акцессорных минералов изверженных пород Севера Урала и Тимана. Л., «Наука», 1968.
2. Горобец Б. С. О люминесценции апатита, активированного редкоземельными элементами.— Опт. и спектроскопия, 1968, т. 25, вып. 2.
3. Таращан А. Н., Марфунин А. С. О природе люминесценции апатитов.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1969, № 3.
4. Горобец Б. С., Портнов А. М. Расшифровка спектров люминесценции апатитов из различных месторождений.— В кн.: Новые данные о минералах СССР, вып. 20. «Наука», 1971.
5. Портнов А. М., Горобец Б. С. Люминесценция апатита из различных типов горных пород.— Докл. АН СССР, 1969, 184, № 1.
6. Кузнецов Г. В., Таращан А. Н. Центры излучения в природных апатитах.— В кн.: Конституция и свойства минералов, 1975, вып. 9.
7. Архангельская В. А., Киселева М. Н., Шрайбер В. М. Потенциалы термической ионизации двухвалентных редких земель в кристаллах типа флюорита.— Физика твердого тела, 1969, 11, № 4.
8. Туровский С. Д., Усманов У. У., Николаева А. В. Распределение редких земель в ряду последовательно кристаллизующихся минералов.— Докл. АН СССР, 1968, 178, № 5.