

УДК 548.736.6

КАЛЬКУРМОЛИТ: НОВЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ И СТРОЕНИИ МИНЕРАЛА

Г.А. Сидоренко

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья, Москва, vims@df.ru

Н.И. Чистякова

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья, Москва, vims@df.ru

Н.В. Чуканов

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, chukanov@icp.ac.ru

И.С. Наумова

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья, Москва, vims@df.ru

В.А. Рассулов

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья, Москва, vims@df.ru

Впервые на основе микронзондовых анализов образцов из Казахстана (Кызыл-Сай) и Армении (Каджаран) дана корректная кристаллохимическая формула калькурмолита $(Ca,Na)_2(UO_2)_3Mo_2(O,OH)_{11} \cdot nH_2O$. Дифрактометрические оценены параметры моноклинной элементарной ячейки: $a = 16.30 \pm 0.03 \text{ \AA}$, $b = 25.49 \pm 0.05 \text{ \AA}$, $c = 19.50 \pm 0.06 \text{ \AA}$, $\beta = 90^\circ 07'$. Впервые получены инфракрасные спектры и спектры лазерной люминесценции двух названных находок минерала, показавшие идентичность, стабильность и диагностичность характеристик минерального вида. В ходе исследования выявлены микро-текстурно-структурные особенности калькурмолита, препятствующие изучению кристаллической структуры минерала. Показано образование калькурмолита путем псевдоморфного замещения уранофана.

В статье 2 таблицы, 8 рисунков и список литературы из 14 названий

Появление в арсенале минералогических исследований новых методов, ранее недоступных по разрешающей способности и более надежных и точных в оценке тех или иных характеристик минералов, в том числе состава, свойств, реального строения, кристаллических структур и др., ведет к необходимости в ряде случаев проведения ревизионных и дополнительных исследований как минеральных видов и разновидностей, так и членов серий твердых растворов. Экспериментальные данные, полученные на новом уровне, нередко меняют наши, казавшиеся установившимися, представления о том или ином минеральном виде, его строении и составе. Примерами могут служить минералы урана, обнаруживающие в таких случаях не только кристаллохимические особенности, ранее упущенные или недоступные, но и определенные некорректности в их характеристиках, требующие прямого исправления в справочных данных (Сидоренко и др., 2003).

Особое внимание требуется при применении современных методов исследования к таким сложным минеральным объектам как калькурмолит, который трактуется о как минерал определённого состава, то как изоморфный ряд под названием «кальциево-натриевые уранилмолибдаты» (Скворцова, и др., 1969). Судя по имеющимся публикациям, морфологически чрезвычайно разнообразие калькурмолиты фактически не имеют даже более или менее надежной кристаллохимической формулы. Калькурмолит как мине-

ральный вид не проходил обычной процедуры апробации в Комиссии ММА по новым минералам и названиям минералов. Само название **калькурмолит** не было предложено первооткрывателями этого минерала и впервые появилось в печати в дополнениях по группе кальций-натриевых уранилмолибдатов, сделанных А.С. Поваренных к русскому переводу Минералогических таблиц Х. Штрунца (1962).

Впервые рассматриваемый минерал был описан Л.С. Рудницкой в 1955 году в зоне окисления Каджаранского рудного поля (Каванский район, Армения) под предварительным названием **каджаранит** (Рекон, 1998; Черников, 1971), однако, дабы не раскрывать географию месторождения, в публикации в трудах Женевского совещания по мирному использованию атомной энергии (1959, с. 161) минерал появился как «**кальциевый молибдат урана**». По первым данным микрохимического анализа, Л.С. Рудницкая характеризует состав этого минерала формулой $Ca(UO_2)_3(MoO_4)_3(OH)_2 \cdot 8H_2O$.

Вторую находку кальциевого ураномолибдата из зоны окисления уранового месторождения Казахстана кратко описывает О.В. Федоров в 1963 г, давая формулу $Ca(UO_2)_3(MoO_4)_3(OH)_2 \cdot 11H_2O$, отличающуюся от формулы Л.С. Рудницкой только количеством молекул воды на формульную единицу.

Первая полная сводка данных о калькурмолите под названием «кальциево-натриевые ураномолибдаты» из месторождений СССР

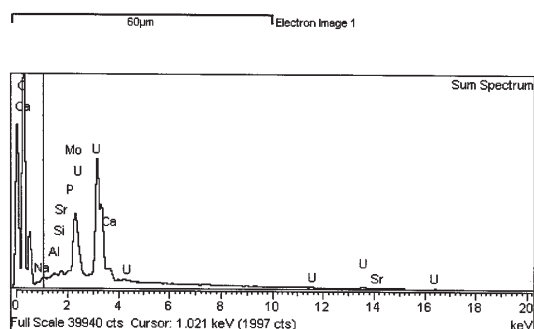
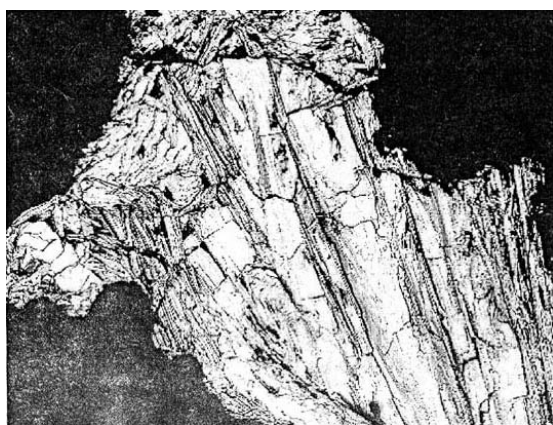


Рис. 1. Внутренняя пучкообразная текстура внешне монокристалльного (массивного, сплошного) калькурмолита и его суммарный спектр элементного состава, обнаруживающий как доминирующие элементы U и Mo



Рис. 2. Пучкообразная форма выделения калькурмолита, подобная представленной на рис. 1, в теснейшей ассоциации с уранофаном (белые кристаллики) и фосфатом стронция (ураноцирцит)

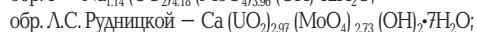
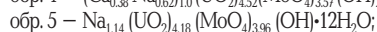
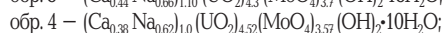
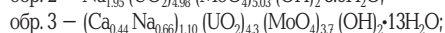
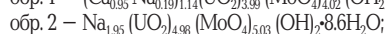
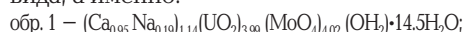
опубликована в 1969 году (Скворцова и др., 1969), после чего новых данных об этих минералах долгое время не появлялось. Однако в статье о тегчонгите (Chen Zhanggu *et al.*, 1986) отмечена тесная ассоциация названного минерала с калькурмолитом, а в 1992 году минерал обнаружен в Рабьяке (Франция) и проведено его «сопоставление с калькурмолитом из Советского Союза» с оговоркой, что образец из Франции является худшим для исследования материалом (Deliens, 1992).

К.В. Скворцова и Е.В. Копченова (Скворцова и др., 1969) исследовали серию кальциево-натриевых ураномолибдатов, связанных с зонами окисления Кызыл-Сая, привлекая к обзору данные Л.С. Рудницкой и О.В. Федорова.

Достаточно полная характеристика условий образования, парагенетических ассоциаций, морфологического многообразия, химического состава, оптических свойств, рентгенографических характеристик с приведением результатов доступных в то время методов исследования сведены в упомянутой работе Скворцовой с соавторами (1969). При этом авторы отмечали теснейшую ассоциацию ураномолибдатов с другими минералами уранила и учитывали это при пересчете данных микрохимического анализа фактически фазово гетерогенного вещества на кристаллохимические формулы.

Предложенные в статье формулы чрезвычайно пестры и не могут вызвать ни удовлетворения, ни малейшей уверенности в их соответствии истинному составу калькурмолитов.

За давностью сводной публикации целесообразно напомнить кристаллохимические формулы, рассчитанные в работе (Скворцова и др., 1969) по данным микрохимических анализов калькурмолита (в авторском определении — кальциево-натриевых ураномолибдатов) с учетом примесей уранофана или «β-уранотила» без предложения общей кристаллохимической формулы для калькурмолита как минерального вида, а именно:



Из этих формул следует, что величина отношения U:Mo в них лежит в пределах от 0,99 до 1,27, а количество натрия, каль-

ция и воды широко варьирует. Наиболее существенным представляется некоторое непостоянство величины $U:Mo$, так как именно соотношение $[UO_2]$ и анионообразующего комплекса является определяющим в формируемых ими кристаллических структурах уранильных минералов (Сидоренко, 1978). Именно этот факт послужил основанием для ревизии состава и одновременно проведения дополнительных исследований калькурмолита как каджаранского, так и кызылсайского, с использованием новых методических, технических и аппаратных возможностей.

В настоящей работе были исследованы образцы из коллекций минералов и пород, содержащих ураномолибдаты, которые изучались ранее К.В. Скворцовой и Е.В. Копченовой и оставлены одному из авторов данной работы. Основной задачей являлось исследование химического состава натриево-кальциевых ураномолибдатов и соотношения основных минералообразующих элементов — урана, молибдена, кальция, натрия, а также исследования кристаллической структуры калькурмолита. Выполнение этой задачи осложняется отсутствием совершенных кристаллов и синтетических аналогов уранилмолибдатов кальция и натрия. Следует отметить, что при изучении системы $K-U-Mo$, где K — катион (щелочной и щелочноземельный элементы) синтезировать аналог калькурмолита не удалось (Спицын и др., 1981).

Методы исследования

Изучение элементного состава и морфологических особенностей минерала проводилось на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 (JEON, Япония), оснащённом энергодисперсионной системой Inca Energy 400 (Oxford Instruments, Великобритания). Химический состав определялся кристалл — дифракционным методом при напряжении 20 кВ и токе зонда 10 нА. В качестве образцов сравнения использовали UO_2 , MoO_3 , диопсид (Ca), альбит (Na).

Порошковые рентгенограммы образцов были получены на дифрактометре АДП-1 с использованием монохроматического $CuK\alpha_1$ -излучения.

Инфракрасные спектры калькурмолита регистрировали по стандартной методике таблетирования с бромистым калием на спектрофотометре SPECORD 75 IR в диапазоне частот $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$. В качестве эталонов использовали полистирол и газообразный аммиак.

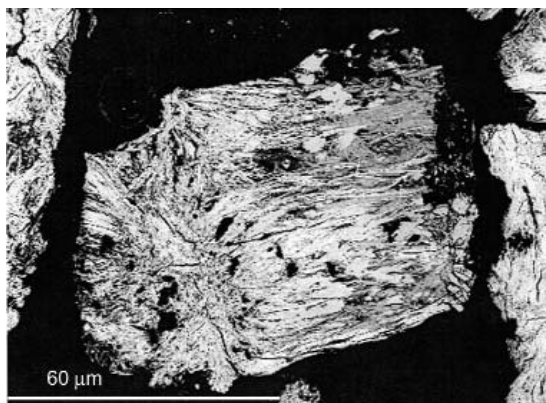


Рис. 3. «Кристаллит» калькурмолита, сплошь построенный волокнами и лейстами минерала, между которыми выделяются зерна уранофана (светлый)

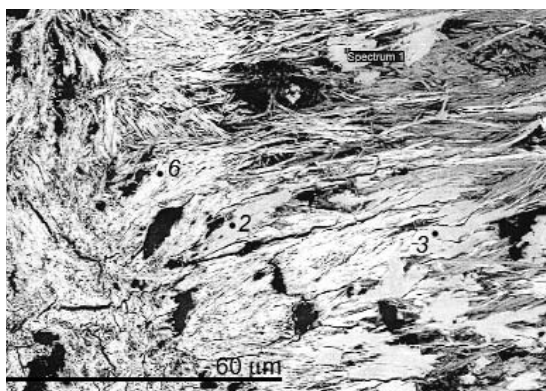


Рис. 4. Фрагмент рис. 3 с несколько большим увеличением, межволоконные включения уранофана более чётки и подтверждены элементным анализом



Рис. 5. Гетерогенное строение зерна калькурмолита, в котором преобладают кристаллы уранофана различной степени измененности (на рисунке наиболее совершенные — белые (1), менее совершенные — светло-серые (2) и еще более измененные — серые (3)); по периферии зерна развивается волокнистый калькурмолит

Таблица 1. Результаты микрозондового анализа калькурмолитов (мас. %) Казахстана и Армении и пересчета его на соотношения основных минералообразующих элементов

Место-рождение	№ анализа	Na ₂ O	CaO	MoO ₃	UO ₃	Сумма	Атомные количества				Формульные коэффициенты			
							Na	Ca	Mo	U	Na	Ca	Mo	U
Казахстан														
(Кызыл-Сай)	1	0.6	6.1	20.9	64.4	92.0	0.0194	0.1088	0.1453	0.2252	0.13	0.75	1	1.55
	2	0.6	5.8	21.5	63.9	91.8	0.0194	0.1034	0.1493	0.2233	0.13	0.69	1	1.50
	3	0.9	5.6	20.9	64.1	91.5	0.0290	0.0999	0.1454	0.2240	0.20	0.69	1	1.54
Армения														
(Каджаран)	4	0.7	5.8	20.6	62.2	89.3	0.0225	0.1034	0.1430	0.2173	0.16	0.72	1	1.52
	5	0.5	5.4	20.4	61.3	87.6	0.0161	0.0962	0.1415	0.2144	0.11	0.68	1	1.52
	6	1.0	5.5	20.7	61.2	88.4	0.03223	0.0981	0.1438	0.2152	0.22	0.68	1	1.50
Среднее значение		0.72	5.7	20.8	62.85	90.07	0.0231	0.1016	0.1447	0.2199	0.16	0.70	1	1.52

Примечание: расчет формульных коэффициентов проведен, исходя из его значения для Mo=1

Измерение люминесцентных свойств проводилось на комплексе, собранном на базе микроскопа — спектрофотометра МСФУ-312. Источник возбуждения люминесценции — лазер на молекулярном азоте ($\lambda_{\text{изл}} = 337.1$ нм). Способ измерения — однолучевой, с использованием в качестве измерительного прибора персонального компьютера с установленной платой счетчика для применения метода счета фотонов и модуля управления шаговым двигателем привода дифракционной решетки.

Комплекс предназначен для регистрации спектров люминесценции различных микрообъектов размером порядка 50 мкм, а также микроучастков макрообъектов в поляризованном и неполяризованном свете в спектральном интервале 250 — 1200 нм при комнатной температуре и при температуре жидкого азота.

Результаты исследования калькурмолита

Просмотр под бинокляром мономинеральных фракций калькурмолитов из Казахстана и Армении выявил прозрачные желтые кристаллиты размером в доли миллиметра, кристаллографически далекие от совершенства в сравнении с ассоциирующими с ними игольчатками уранофана. Эти кристаллиты позволяли надеяться на их монокристаллическую структуру минерала. До сих пор калькурмолит характеризовался набором межплоскостных расстояний, полученных по четким дифрактограммам, и не вполне убедительными параметрами элементарной ячейки, ориентировочно моноклинной. Однако точечной дифракционной картины не удалось получить даже при использовании синхротронного излучения.

Объяснение этому факту дали исследования в отраженных электронах и в характеристическом излучении, которые выявили реальное строение кристаллитов, являющихся микрогетерогенной системой, в которой выделяются пучки или спутанные в клубок лейсты и кристаллики — как игольчатые, ортогональные, так и не имеющие кристаллографических очертаний. Для внешне гомогенных прозрачных образований такое текстурно-структурное строение столь необычно и разнообразно, что заслуживает ряда иллюстраций. Так рисунки 1 — 4 представляют внутреннюю пучкообразную текстуру внешне монокристалльного (массивного, сплошного) калькурмолита и его суммарный спектр элементного состава, обнаруживающий как доминирующие элементы U и Mo и очень низкие содержания примесных элементов (As, Si, P, Sr). В том же кристаллите калькурмолита в теснейшей ассоциации наблюдается уранофан и фосфат стронция (ураноцирцит). Отдельные кристаллиты калькурмолита сплошь состоят из спутанных волокон и лейст минерала, между которыми выделяются зерна уранофана. Можно предположить, что мы имеем псевдоморфозу калькурмолита по силикату урана.

В отдельных зернах калькурмолита преобладают включения кристаллов уранофана различной степени измененности, о чем свидетельствует отличие их по отражательной способности; по периферии зерна развивается волокнистый калькурмолит (рис. 5). Процесс замещения уранофана калькурмолитом, упомянутый выше как предположение, наглядно демонстрируется в пределах одного кристаллита в отраженных электронах и в характеристическом излучении (рис. 6).

Состав калькурмолита Кызыл-Сая и Каджарана изучен **методом локального рентге-**

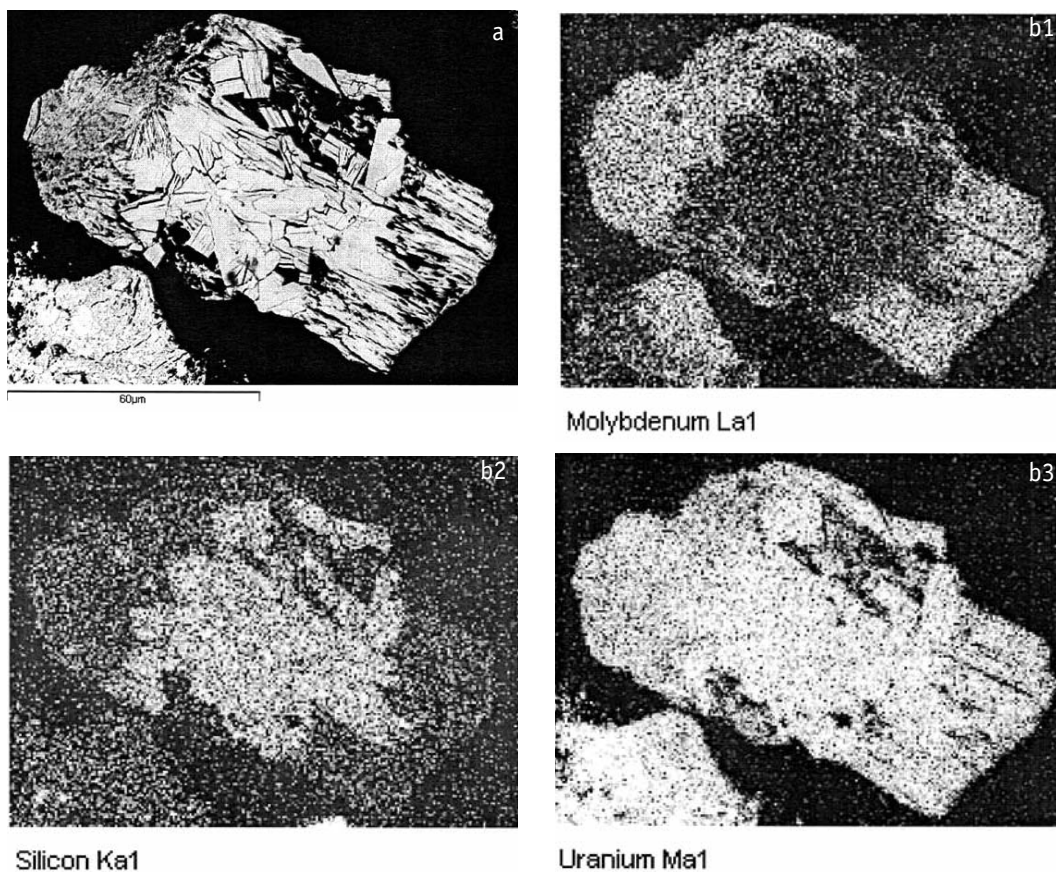


Рис. 6. Псевдокристаллит калькурмолита, демонстрирующий процесс замещения уранофана молибдатом уранила: а - в отраженных электронах; b1,b2,b3 - в характеристическом излучении

носпектрального анализа. Результаты количественного анализа на минералообразующие элементы с учетом включений уранофана представлены в таблице 1. В той же таблице даны рассчитанные по результатам анализа атомные количества содержащихся элементов и их соотношения (при расчете принято за единицу количество Mo). Сумма оксидов — менее 90%, что связано с высокой гидратированностью минерала, который (по разности от суммы 100) содержит более 10% воды, в том числе в форме гидроксида (см. ниже).

Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что в составе калькурмолита:

- 1) соотношение $[UO_2]^{2+}:(MoO_4)^{2-} = 3:2$, что создает $[U-Mo]^{2+}$ комплексы, для связывания которых в 3-х мерную структуру требуются дополнительные ионы;
- 2) присутствие дополнительных ионов Ca и Na требует компенсации валентности, что может достигаться вхождением в минерал

ионов гидроксила, количество которого определяется суммой дополнительных катионов и их зарядом;

- 3) дополнительные катионы представлены преимущественно Ca при постоянном присутствии натрия с относительно постоянным соотношением близким (но неравным) к 3:1.

На основании данных по химическому составу для образцов из Кызыл-Сая и Каджарана формула калькурмолита могла бы быть представлена в следующем общем виде: $(Ca_{1-x}Na_x)_2(UO_2)_3(MoO_4)_2(OH)_{6-x}nH_2O$, где значение «x» не превышает 0.3. Содержание воды высоко, но трудно определяемо при микрозондовом анализе микрогетерогенных «кристаллитов».

Порошковые рентгенодифракционные картины калькурмолита в различных морфологических проявлениях (от тонких «кристаллитов» до массивных, плотных образований) аналогичны и характеризуются рефлексами двух типов: острыми и несколько более

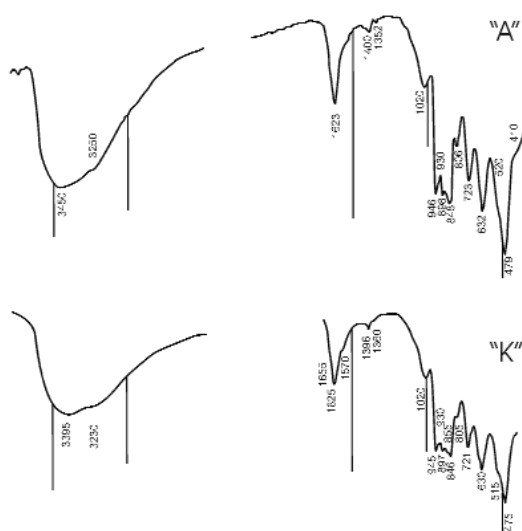


Рис. 7. Инфракрасные спектры калькурмолита Казахстана («К») и Армении («А»)

широкими на средних значениях 2θ до размытых на углах более 50° , что может свидетельствовать о нарушении трехмерного упорядочения кристаллической структуры (таблица 2). Следствием этого является определенный разброс значений межплоскостных расстояний, выявляемый при сопоставлении данных для двух морфологических разновидностей калькурмолита Казахстана и образцов из Армении, и их отклонение от расчетных данных. Последние получены с использованием размера моноклинной элементарной ячейки, и их значения практически (в пределах точности замеров углов отражения) идентичны по трем представленным образцам минерала. В отдельных пробах проявляется примесь уранофана. Дифракционных картин монокристаллов получить не удалось.

Инфракрасные спектры поглощения, впервые полученные для калькурмолитов Кызыл-Сая и Каджарана, идентичны как по положениям полос, так и по их относительной интенсивности (рис. 7). В области О-Н-валентных колебаний присутствует сильная широкая полоса с максимумом при $3390 - 3450 \text{ см}^{-1}$ и плечом при $3225 - 3250 \text{ см}^{-1}$, обусловленная преимущественно колебаниями молекул воды. Принадлежность большей части связей О-Н молекулярной воде, а не гидроксильным группам, подтверждается присутствием в спектре довольно сильной полосы НОН-деформационных колебаний при 1622 см^{-1} с плечом при 1570 см^{-1} (наличие последнего го-

Таблица 2. Значения межплоскостных расстояний калькурмолита

hkl	Казахстан		Армения		Расчетное		
	Образец I	Образец II					
012			9.156	5	9.099	10	9.12
102	8.377	50	8.393	12			8.43
201	7.762	100	7.775	100	7.762	100	7.76
060					4.25	3	4.25
061, 204	4.179	16	4.183	6			4.183
134, -214	4.125	13					4.129
005, -224	3.965	34	3.974	14	3.994	8	3.976
153, 420	3.87	32	3.883	34	3.883	29	3.883
412, -333	3.745	8					3.745
063, 170	3.562	3	3.551	7	3.556	6	3.556
613, -163	3.474	5	3.485	6	3.490	2	3.477
346, 500	3.264	10	3.264	11	3.260	8	3.26
080, 064	3.202	20	3.202	24	3.202	17	3.205
081, 073	3.138	6	3.119	8	3.121	5	3.119
226, 120	2.953	5					2.957
540, -282	2.84	7	2.836	5	2.844	4	2.84
542	2.78	10					2.781
364, -551	2.725	8			2.722	3	2.72
137, 620	2.644	11	2.663	3	2.666	3	2.658
630	2.581	5	2.594	5	2.591	5	2.588
383, 60-3	2.509	3					2.507
4-72, 185	2.439	8					2.44
-701	2.315	3					2.313
493, 058	2.209	3	2.203	4	2.189	3	2.199
-1122	2.059	12					2.06
715, 329			1.998	5	1.993	3	1.988
3120,							
665, 832	1.987	8	1.970	6	1.966	3	1.979
-73-5					1.946	3	1.946
1125, -3115	1.869	5	1.870	4	1.872	3	1.871
198	1.834	3	1.837	5	1.838	3	1.836
825					1.789	3	1.788
890	1.652	6	1.654	5			1.654
4135	1.609	3	1.591	4			1.609
(+ дополнительные слабые диффузные рефлексы)							
a	16.3 ± 0.03	16.30 ± 0.003	16.31 ± 0.03				16.3
b	25.49 ± 0.05	25.47 ± 0.05	25.50 ± 0.06				25.5
c	19.506 ± 0.06	19.50 ± 0.05	19.50 ± 0.06				19.5
β	90.17	90.06	90				90
V	8104	8095	8110				8105

ворит о том, что вода в структуре калькурмолита разнотипная). Свободные ОН-группы, которым в ИК-спектре отвечали бы узкие полосы в диапазоне $3500 - 3700 \text{ см}^{-1}$, в калькурмолите отсутствуют, хотя нельзя исключать присутствия небольшого количества гидроксильных групп, образующих довольно прочные водородные связи (типа связи вода-вода).

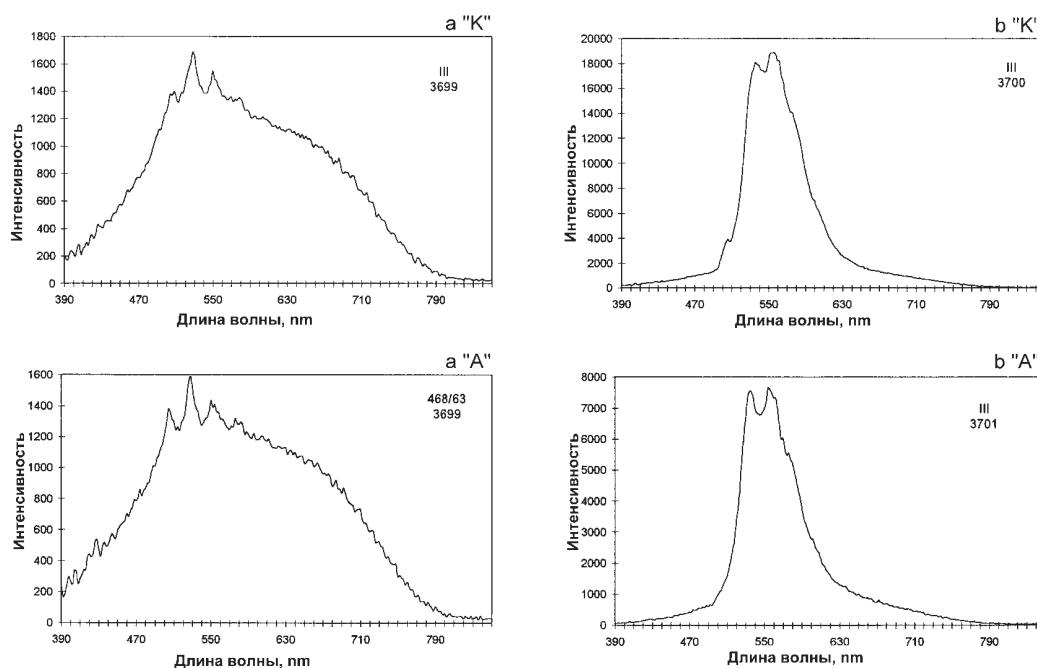


Рис. 8. Спектры лазерной люминесценции калькурмолита Казахстана («К») и Армении («А»): а - при комнатной температуре; б - при температуре жидкого азота

В ИК-спектре калькурмолита присутствуют две слабые узкие полосы — при $1396 - 1400$ и при $1352 - 1360 \text{ см}^{-1}$. Во всех изученных образцах эти полосы имеют одинаковые интенсивности, что исключает их принадлежность к примеси карбонатного минерала. Более вероятной представляется обусловленность этих полос колебаниями иона H^+ , не образующего прочных ковалентных связей с кислородом.

Группа сильных полос при 946 (с плечом 930), 898 и 848 см^{-1} относится к антисимметричным валентным колебаниям иона UO_2^{2-} , занимающего разные позиции в структуре минерала. Полосы при 723 , 632 и 479 см^{-1} относятся к валентным колебаниям связей молибден-кислород в октаэдрах MoO_6 , причём последняя полоса — наиболее сильная в спектре калькурмолита.

Важно отметить, что тетраэдрических анионов MoO_4^{2-} в структуре калькурмолита, согласно данным ИК-спектроскопии, нет. Известно, что максимум наиболее интенсивной полосы Mo-O-валентных колебаний в инфракрасных спектрах мономолибдатов лежит в диапазоне $\nu_{\text{max}} = 770 - 820 \text{ см}^{-1}$. В качестве примеров можно привести повеллит ($\nu_{\text{max}} = 805 \text{ см}^{-1}$), вульфенит ($\nu_{\text{max}} = 778 \text{ см}^{-1}$), шениксит ($\nu_{\text{max}} = 797 \text{ см}^{-1}$) и т.д. Конденсация тетраэдров всегда приводит к ещё большему

возрастанию частоты валентных колебаний. В то же время уранилмолибденовые соединения с оксидной структурой характеризуются значительно более низкими частотами Mo-O-валентных колебаний. Так, для умохоита, в структуре которого присутствуют цепочки вершинно-связанных октаэдров MoO_6 , величина $\nu_{\text{max}} = 593 \text{ см}^{-1}$. Для иригинита, в котором пары рёберно-связанных октаэдров MoO_6 образуют цепочки, соединяясь через общие вершины октаэдров в соседних парах, величина $\nu_{\text{max}} = 539 \text{ см}^{-1}$. В случае калькурмолита $\nu_{\text{max}} = 479 \text{ см}^{-1}$, что позволяет с уверенностью относить этот минерал к классу водных оксидов или гидроксидов, а не к классу молибдатов.

На основании данных ИКС может быть предложена, как наиболее общая, следующая форма записи кристаллохимической формулы калькурмолита, не противоречащая результатам исследований химического состава и требованиям баланса валентностей: $(\text{Ca}_{2-x}\text{Na}(\text{UO}_2)_3\text{Mo}_2\text{O}_{11-x}(\text{OH})_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$. С учётом реальных составов образцов из двух месторождений, $x = 0.3$ и формула минералов приобретает вид: $(\text{Ca}_{1.7}\text{Na}_{0.3})(\text{UO}_2)_3\text{Mo}_2\text{O}_{10.7}\text{OH}_{0.3} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, которая, однако, требует подтверждения решением кристаллической структуры минерала.

Дополнительную информацию о калькурмолите дают результаты изучения его спект-

ров люминесценции. В имеющейся минералогической литературе (Горобец, Рогожин, 2001) отмечается, что при комнатной температуре при возбуждении «ламповым» ультрафиолетовым пучком калькурмолит не люминесцирует. Лишь помещенные в жидкий азот кристаллы калькурмолита под ультрафиолетовым излучением обнаруживают желтое свечение. Однако применение в качестве источника возбуждения лазера ЛГИ-505 позволило впервые зарегистрировать спектр люминесценции калькурмолита при комнатной температуре (рис. 8).

При комнатной температуре под действием высокоинтенсивного излучения лазера кристаллы калькурмолита люминесцируют крайне неравномерно — основная часть зеленоватым цветом и с ярко-зелеными зонами, типичными для уранила, что связано с фазовой микрогетерогенностью объекта. При этом наблюдается фотодеструкция центров люминесценции: через 10–20 секунд цвет люминесценции становится грязно-зеленым, ярко-зеленые зоны уранофана выцветают менее интенсивно, появляются зоны с желтой люминесценцией собственно калькурмолита.

При температуре жидкого азота спектры более четки, отмечается расщепление полос на зеленую ($\lambda \sim 530$ нм) — уранофановую и желтую ($\lambda \sim 550$ нм) — калькурмолитовую составляющие, что показывает рис. 8.

Заключение

Исследования калькурмолита (минерала, относимого к кальций-натриевым ураномолибдатам) комплексом современных методов на образцах из Каджарана (Армения) и Кызыл-Сая (Казахстан) показали:

1. При кажущейся однородности прозрачных зерен минерала как визуально, так и под оптическим микроскопом, фактически они представляют собой совокупность, как правило, лейстовидных или спутанно волокнистых кристаллитов, образующихся в результате псевдоморфных замещений молибдатом уранофана.

2. По результатам микрозондовых анализов и данных ИК-спектроскопии, состав калькурмолитов отражает кристаллохимическая формула $(Ca, Na)_2(UO_2)_3Mo_2(O,OH)_{11} \cdot nH_2O$, где величина n может достигать значения 10–15, т.е. минерал сильно гидратирован, а содержание Na не превышает значения 0.6 ат. ед. на формулу.

3) Чисто кальциевые или чисто натриевые образования не встречены.

4) Размеры элементарных ячеек, ИК-спектры калькурмолита Армении и Казахстана аналогичны и характерны для минерального вида, как и их спектры лазерной люминесценции, что свидетельствует о стабильности свойств и состава минерального вида калькурмолит, за исключением некоторых вариаций степени гидратированности, не влияющей на структурные характеристики (параметры моноклинной элементарной ячейки) и обусловленной относительно слабо связанной молекулярной водой.

Литература

- Горобец Б.С., Рогожин А.А. Спектры люминесценции минералов. Справочник. М.: ВИМС, Минеральное сырье. **2001**. № 11.
- Рудницкая Л.С. Кальциевый молибдат урана. Ядерное горючее и реакторные металлы. **1959**. Т. 3. С. 160–161.
- Сигоренко Г.А. Кристаллохимия минералов урана. М.: Атомиздат, **1978**. 216 с.
- Сигоренко Г.А., Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Чистякова Н.С., Баринова А.В. Умохит: новые данные о минералогии и кристаллохимии //ЗВМО. **2003**. №3. С. 73–80.
- Скворцова К.В., Копченова Е.В., Сигоренко Г.А., Кузнецова Н.Н., Дара А.Д., Рыбакова Л.И. Кальций-натриевые ураномолибдаты //ЗВМО. **1969**. Вып. 6. С. 679–688.
- Спицын В.Н., Табаченко В.В., Ковба Л.М., Сережкин В.Н. Кристаллические структуры молибдатуранилатов магния и цинка //ДАН СССР. **1981**. Т. 256. № 4. С. 888–891.
- Федоров О.В. Вторая находка кальциевого молибдата урана в СССР //ЗВМО. **1963**. Вып. 4. С. 464–465.
- Черников А.А. Зона гипергенеза урановых месторождений. Докторская диссертация. М.: ВИМС. **1971**. 352 с.
- Штрунц Х. Минералогические таблицы. М.: Гос. науч.-тех. изд. литературы по горному делу. **1962**. 532 с.
- Chen Zhangru, Luo Keding, Tan Falan, Zhang Yi, Ji Xiaofa. Tengchongitt, a new mineral of hydrated calcium uranyl molybdate //Kexue Tongbao. **1986**. Vol. 31. P. 396–401 (Amer. Miner. **1988**. Vol. 73. P. 195–196).
- Deliens M. Etude comparative des calcurmолites de Rabtjac (Lodeve, Herault, France) et de l'Union Sovietique //Ann. Soc. Geol. Belg. Vol. 115 (Fascicule 1). **1992**. P. 91–97.
- Pekov I.V. Minerals first discovered on the territory of the former Soviet Union. Moscow: Ocean Pictures, **1998**. 370 p.