



Электронная версия доступна на сайте  
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)

Минералогический музей  
 имени А.Е. Ферсмана РАН

Новые данные о минералах, том 56, вып. 2 (2022), 39–50

НДМ

## Браннерит с Восточного Памира

Паутов Л.А.<sup>1</sup>, Мираков М.А.<sup>1</sup>, Карпенко В.Ю.<sup>1</sup>, Махмадшариф С.<sup>2</sup>,  
 Шодибеков М.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, pla58@mail.ru

<sup>2</sup>Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН РТ, Душанбе

В правом борту долины реки Кукурт на Восточном Памире (ГБАО, Таджикистан) найден кристалл браннерита  $UTi_2O_6$  массой 44.5 г. Минерал метамиктный. После прокаливания дает рентгенограмму смеси браннерита, рутила и  $U_3O_8$ . Химический состав браннерита (среднее по 10 микронзондовым анализам) рассчитывается на формулу ( $O = 6$ ):  $(U^{+4}_{0.68} U^{+6}_{0.13} Y_{0.07} Th_{0.05} Ce_{0.01} Gd_{0.01} Dy_{0.01} Yb_{0.01} Ca_{0.01})_{0.98} (Ti_{1.89} Fe^{+3}_{0.13})_{2.02} O_6$ . Плотность 5.40(5) г/см<sup>3</sup>. В отраженном свете светло-серый с умеренной отражательной способностью (приведен спектр отражения). Минерал изотропен в силу своей метамиктности. Рефлексы в воздухе красно-коричневые. Микротвердость VHN 674. Приведены рамановские спектры браннерита и продуктов его изменения. Кратко описаны продукты замещения браннерита.

**Ключевые слова:** браннерит, метамиктный минерал, уран, Кукурт, Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан, Восточный Памир.

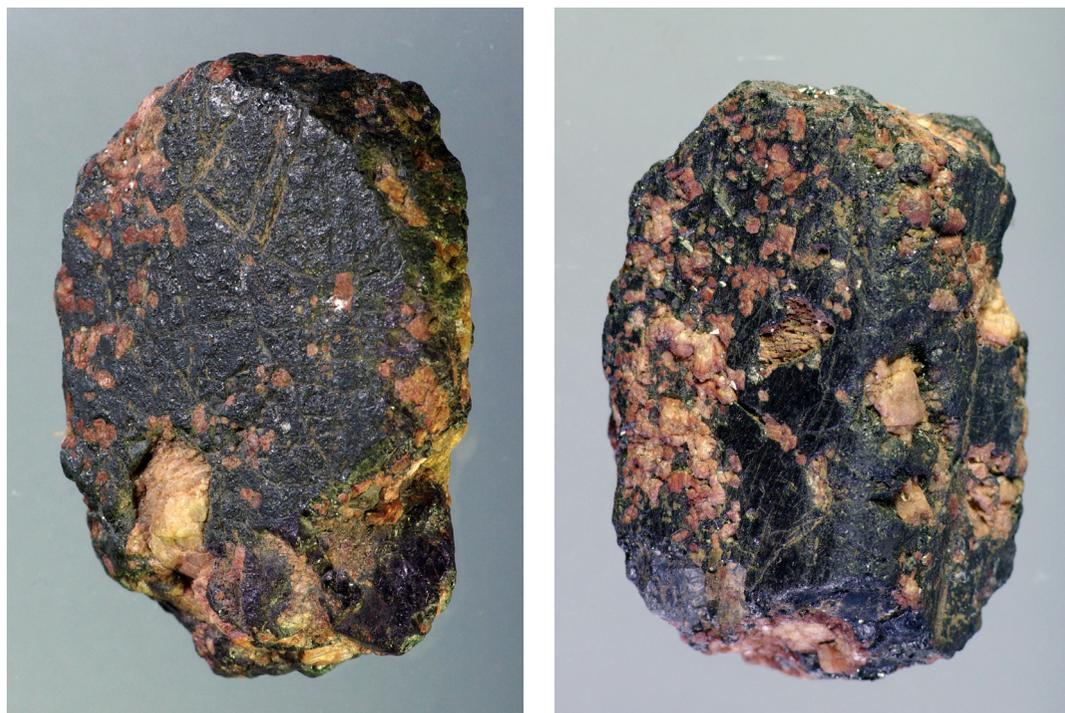
### Введение

В конце полевого сезона в 2019 г. на Восточном Памире (ГБАО, Таджикистан), в осыпи на правом борту р. Кукурт, был найден крупный плохо сформированный кристалл браннерита  $UTi_2O_6$ . К сожалению, ухудшение погоды не позволило провести поиски коренного проявления урановой минерализации. Два обстоятельства стимулировало написание данной заметки: в доступной литературе нам не удалось найти описание браннерита с Памира, и, возможно, это первая аналитически подтвержденная находка этого минерала на Памире, второе обстоятельство – несмотря на то, что браннерит не считается очень редким минералом и в ряде месторождений урана является важным рудным минералом, находки крупных кристаллов браннерита довольно редки. Отметим, что в некоторых публикациях о находках браннерита диагностика минерала базируется только на результатах микронзондовых анализов, что не может быть убедительным, так как по элементному составу браннерит нельзя отличить от уранполикраза.

Долина реки Кукурт, на правом борту которой был найден браннерит, прорезает породы мускольского метаморфического комплекса, а в верховьях – зорбурлюкские гнейсограниты. В обоих бортах долины обнажаются многочисленные тела гранитных миароловых пегматитов, несущих редкометальную и камнесамоцветную минерализацию. Становление пегматитов связывают с неогеновыми лейкогранитами шатпутского комплекса (Дмитриев, 1982; Дюфур и др., 2007).

### Описание браннерита из долины р. Кукурт на Восточном Памире

Найденный кристалл браннерита имеет толстотаблитчатый облик (рис. 1) при размерах 35 × 25 × 15 мм. Масса кристалла 44.5 г. На поверхности кристалла браннерита присутствуют многочисленные вросстки альбита, имеющие индукционные поверхности совместного роста с браннеритом. На сколах браннерит обнаруживает смоляно-черный цвет, раковистый излом и сильный смоляной



**Рис. 1.** Кристалл браннерита с вростками ожелезненного альбита из долины р. Кукурта (Восточный Памир, ГБАО, Таджикистан). Вид одного и того же кристалла с двух сторон. Размер кристалла в наибольшем измерении 35 мм.

блеск. Плотность браннерита с включениями альбита определялась гидростатическим взвешиванием кристалла в воде и составила  $5.30(1) \text{ г/см}^3$ . Учет вростков альбита приводит к плотности браннерита с Кукурта к значению  $5.40(5) \text{ г/см}^3$ , что совпадает с плотностью браннерита (от 4.5 до  $5.43 \text{ г/см}^3$ ), указанной при первом описании минерала (Hess, Wells, 1920).

Несколько небольших частиц браннерита (менее 1 мм в поперечнике, чтобы повреждения образца были минимальны) было отобрано для исследований от найденного кристалла. Половина отобранных частиц использована для рентгеновского изучения, а половина – монтирована в эпоксидную смолу Еророху 154, отшлифована и отполирована для изучения оптических свойств, микротвердости, определения элементного состава и получения КР-спектров. Браннерит легко принимает хорошую полировку.

В отраженном свете браннерит светло-серый с умеренной отражательной способностью. Минерал изотропен в силу своей метамиктности, что подтверждается и рентгеновскими методами. Рефлексы в воздухе красно-коричневые, наблюдаются редко. Спектр отражения минерала, представленный на рис. 2, получен на микроскопе-спектрофотометре UMSP-50 фирмы Opton по стандарту SiC

той же фирмы. Спектр отражения браннерита с Кукурта имеет нормальный тип при незначительной дисперсии. Несколько более низкая отражательная способность, от 14.5 до 15% для 546 нм, приводится для браннерита из Раджастан (Murthy et al., 1996).

Микротвердость браннерита, измеренная на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г, составила VHN 674 (среднее по 6 замерам), что близко к микротвердости браннерита VHN от 588 до 688 из Индии (Murthy et al., 1996).

В исходном состоянии браннерит с Кукурта рентгеноаморфен. Для подтверждения диагностики минерала рентгеновским методом браннерит был прокален с целью восстановления кристаллического состояния. Для этого несколько частиц минерала в кварцевой микропробирке были помещены в кварцевый бюкс с хорошо притертой крышкой, наполненный металлической медью, и прокалены в муфельной печи при  $900^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. После прокаливания цвет минерала изменился со смоляно-черного на темно-коричневый. Рентгеновская дифрактограмма продуктов прокаливания минерала снята на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с программно-аппаратной системой управления Gldif на трубке с Cu-анодом и Ni-фильтром. Скорость съемки – 1 градус/

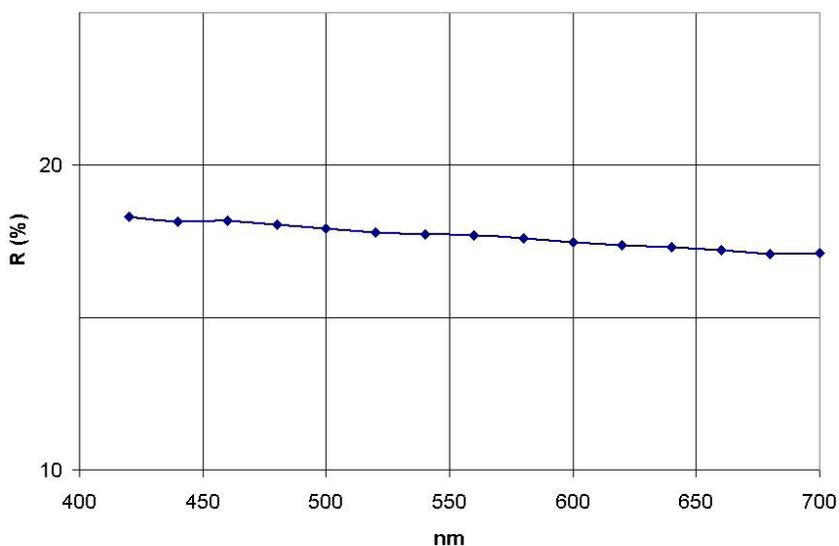


Рис. 2. Спектр отражения браннерита с Восточного Памира.

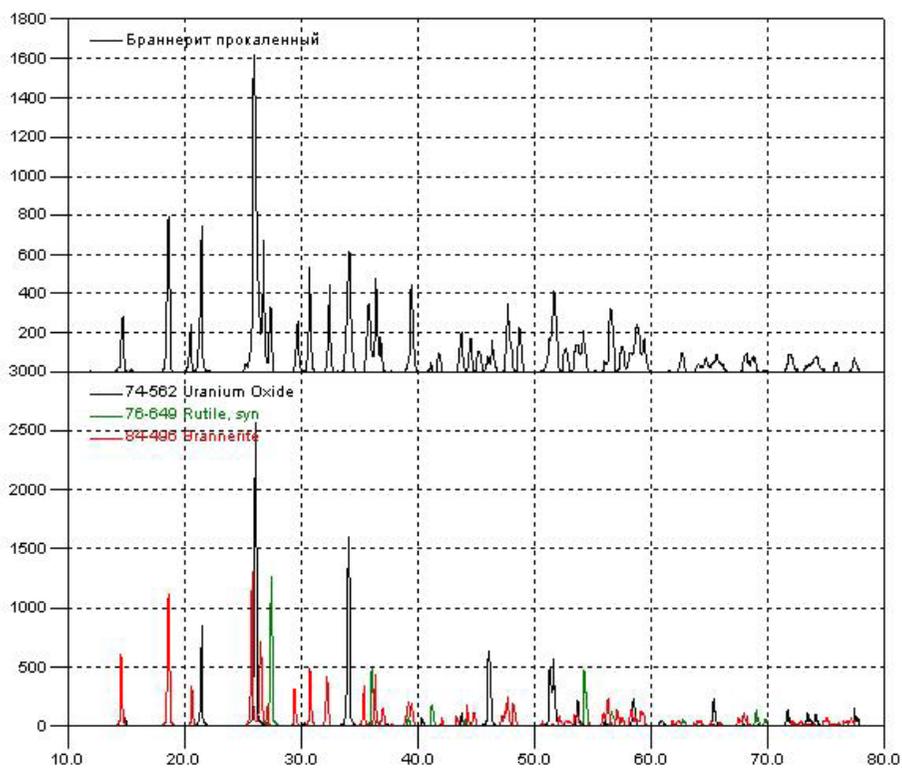


Рис. 3. Рентгеновская порошковая диаграмма продуктов прокаливания браннерита на Си-излучении (верхний спектр) в сравнении с эталонными порошковыми диаграммами браннерита, рутила и  $U_3O_8$  (нижние спектры).

Таблица 1. Рентгеновские порошковые данные для браннерита и продуктов его прокаливания

Браннерит прокаленный, Кукурт, В. Памир, Таджикистан		Браннерит прокаленный, Джидинское м-ние, Бурятия, Россия*		Браннерит PDF 84-496		Рутил PDF 76-318		U3O8 PDF 74-562	
d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I
6.01	17	6.04	15	6.0595	43.7			5.9080	3
4.752	48	4.73	50	4.7525	80.9				
4.318	15	4.30	17	4.2928	25.2				
4.138	45	4.13	38					4.1360	64
3.424	100	3.41	100	3.4516	100			3.4110	100
3.326	42	3.32	46	3.3567	55.4				
				3.2869	12.6				
3.253	21					3.2528	100		
3.004	18	3.015	19	3.0298	25.6			2.9540	1.1
2.907	35	2.915	45	2.9022	40.3				
2.759	29	2.758	41	2.7758	35.2				
2.627	38	2.621	42					2.6315	67.4
		2.598	20						
2.508	22	2.509	38	2.5347	29.1	2.4924	43.1		
2.464	31	2.455	45	2.4704	37.3				
2.437	11	2.433	17	2.4265	12.9			2.4039	0.8
				2.3763	1.3				
				2.3082	6.6				
2.280	29	2.274	38	2.2958	17.2	2.3001	6.3		
				2.2794	16.1			2.2330	3.5
				2.1464	7.3				
				2.0847	7.9				
2.192	3					2.1914	16.9		
2.158	7	2.156	11						
2.068	14			2.0463	16.3	2.0572	5.9	2.0680	10.1
2.033	13	2.013	21	2.0198	10.9				
2.003	8	2.012	16						
1.973	6							1.9693	21.3
1.955	11	1.950	18					1.9649	15.1
								1.9519	0.6
				1.9243	8				
				1.9132	10.2				
1.904	23	1.906	38	1.9051	21.5				
1.867	18	1.862	32	1.8849	17.3				
				1.7998	3.5				
1.767	26	1.765	27	1.7713	1.9			1.7781	22.7
				1.7521	8.4			1.7684	25
1.736	10	1.735	18	1.7346	4.6				
				1.7258	4				
				1.7122	9				

Таблица 1. Продолжение

1.708	10	1.702	21	1.7057	8.2			1.7055	10.2
1.690	15			1.6783	2.3	1.6903	45.7	1.6941	0.6
1.663	2	1.659	10	1.6435	11.3				
1.626	22	1.621	30	1.6352	6.8	1.6264	12.8	1.6386	1.8
				1.6320	19.3				
				1.6119	13.3				
1.601	10	1.609	19	1.6004	6.9				
1.585	6			1.5842	3.3				
				1.5807	12				
1.570	16			1.5716	8.6			1.5767	11.9
				1.5626	8.7				
				1.5597	7				
1.555	11			1.5559	6				
				1.5149	0.5			1.5234	2.2
				1.4987	3.9			1.5173	1.7
1.483	8			1.4885	5.3	1.4827	6.4		
				1.4767	0.9			1.4770	0.4
				1.4599	2.5				
				1.4540	2				
1.453	3			1.4511	4.2	1.4547	5.8		
1.440	5			1.4472	2.6				
				1.4309	3.9				
1.422	5			1.4163	3.3	1.4260	0.4	1.4261	11.5
				1.3864	7.3			1.3910	0.5
				1.3780	5.7				
1.376	6			1.3738	3.4			1.3787	1.6
1.364	5					1.3621	14		
						1.3492	7.3	1.3554	0.8
				1.3496	0.7			1.3426	0.1
1.313	7			1.3091	4.9			1.3158	7

Примечание. \* Образец FMM\_1\_67310 Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН.

Продукты прокаливания при 1100 °С на воздухе метамиктного браннерита – смесь браннерита с  $U_3O_8$  (Кривоконова, 1972).

мин, внутренний стандарт – Si. Результаты расчета рентгеновской дифрактограммы приведены в табл. 1, а общий вид дифрактограммы в сравнении с порошкограммами браннерита, рутила и  $U_3O_8$  из базы JCPDS представлены на рис. 3. Как видно из приведенных результатов, продукты прокаливания метамиктного браннерита из Кукурта состоят из смеси кристаллического браннерита и оксидов титана и урана, что является характерным для продуктов прокаливания метамиктного браннерита из различных месторождений (Кривоконова, 1972).

Химический состав браннерита с Восточного Памира изучался на рентгеновском микроанализаторе JСХА-733 JEOL в лаборатории Минералогического

музея им. А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва) с помощью энергодисперсионного Si(Li)-детектора с ультратонким окном ATW2 и системой анализа INCA Energy 350 при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 1 нА. В качестве стандартов использовались:  $UO_2$  – (U M),  $ThO_2$  – (Th M),  $Fe_2O_3$  – (Fe K),  $Y_2O_3$  – (Y L),  $PbTiO_3$  – (Ti K, Pb M),  $LaPO_4$  – (La L),  $CePO_4$  – (Ce L),  $PrPO_4$  – (Pr L),  $NdPO_4$  – (Nd L),  $GdPO_4$  – (Gd L),  $DyPO_4$  – (Dy L),  $Ho_2O_3$  – (Ho L),  $Er_2O_3$  – (Er L),  $YbPO_4$  – (Yb M), волластонит – (Ca K). Период набора спектров – 100 с живого времени. Диаметр электронного зонда при анализе составлял 1–5 мкм. Поправки на матричные эффекты вводились методом ХРР. Результаты анализов и расчета формул минерала с Памира приведены

Таблица 2. Химический состав (мас.%) браннерита с Восточного Памира

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
UO <sub>2</sub> *	42.17	40.98	42.11	48.17	45.20	45.73	44.74	44.17	44.06	47.87	44.13
UO <sub>3</sub> *	8.94	9.79	8.92	8.06	8.21	8.30	8.12	8.94	9.06	6.95	8.94
ThO <sub>2</sub>	3.99	4.48	4.10	2.03	3.37	3.33	3.27	3.66	3.82	2.64	3.47
TiO <sub>2</sub>	36.76	36.93	35.93	35.03	35.89	36.10	35.76	36.07	36.28	36.91	36.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.10	2.22	1.99	2.71	2.49	2.36	2.59	2.09	2.19	2.21	2.30
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.16	2.28	2.38	1.14	1.66	1.79	1.49	1.68	1.51	1.63	1.77
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.10	0.40	<0.10	0.26	<0.10	<0.10	0.50	<0.10	0.74	<0.10	0.19
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69	0.70	0.38	<0.10	0.68	0.37	<0.10	0.40	0.87	0.13	0.42
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.10	0.18	<0.10	<0.10	0.24	0.36	<0.10	<0.10	<0.10	0.18	0.10
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.10	0.19	0.13	0.28	0.37	0.56	<0.10	0.12	0.28	<0.10	0.19
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.72	<0.10	<0.10	<0.10	0.24	<0.10	0.62	0.32	0.35	0.38	0.26
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.39	0.34	1.00	0.34	0.18	0.21	0.74	0.36	0.53	0.37	0.45
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.10	0.30	0.43	0.39	<0.10	<0.10	<0.10	0.21	<0.10	0.18	0.15
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.10	<0.10	0.50	<0.10	0.16	0.54	<0.10	<0.10	0.64	0.17	0.20
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.61	0.42	<0.10	0.45	0.58	0.38	0.51	<0.10	0.38	0.36
PbO	<0.10	0.32	<0.10	0.19	<0.10	<0.10	<0.10	0.15	<0.10	<0.10	0.07
CaO	0.19	0.10	0.11	0.07	0.04	<0.10	<0.10	0.28	0.15	<0.10	0.09
Сумма	98.36	99.82	98.40	98.67	99.17	100.23	98.22	98.97	100.48	100.00	99.26
UO <sub>2</sub> общ	50.61	50.22	50.53	55.78	52.94	53.57	52.41	52.61	52.61	54.43	52.57
Коэффициенты атомов в формуле при расчете на O = 6											
#U4+	0.65	0.62	0.65	0.76	0.70	0.70	0.70	0.68	0.67	0.73	0.68
#U6+	0.13	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.10	0.13
#Th4+	0.06	0.07	0.07	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05
#Ca2+	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01
#Y3+	0.08	0.08	0.09	0.04	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
#La3+	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
#Ce3+	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01
#Pr3+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#Nd3+	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
#Gd3+	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
#Dy3+	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
#Ho3+	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#Er3+	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
#Yb3+	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
#Pb2+	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ A	0.99	0.99	1.01	1.00	0.99	0.99	0.98	0.99	1.01	0.96	0.98
#Ti4+	1.91	1.90	1.89	1.86	1.88	1.89	1.89	1.89	1.88	1.92	1.89
#Fe3+	0.10	0.11	0.10	0.14	0.13	0.12	0.13	0.12	0.11	0.12	0.13
Σ B	2.01	2.01	1.99	2.00	2.01	2.01	2.02	2.01	1.99	2.04	2.02

Примечание. \* Содержания UO<sub>2</sub> и UO<sub>3</sub> вычислены из баланса зарядов в предположении, что все железо имеет степень окисления 3+.

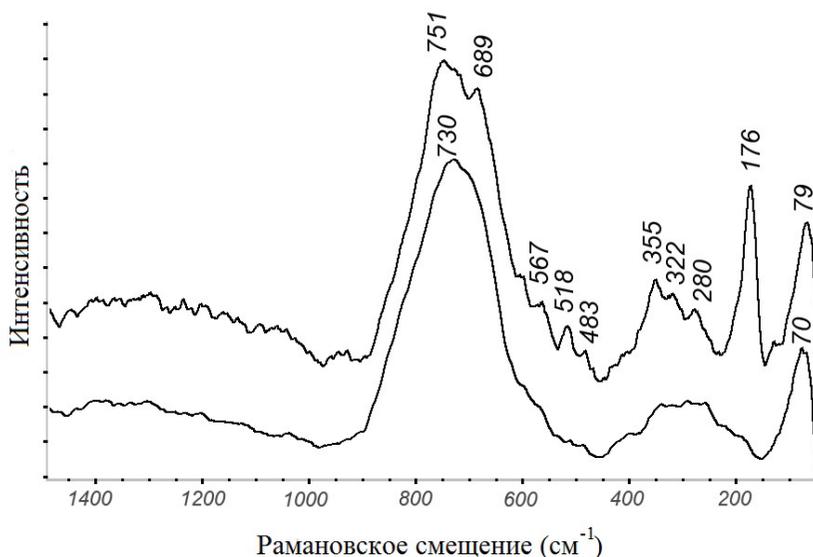


Рис. 4. Рамановские спектры браннерита с Восточного Памира. Верхний спектр получен с участка измененного браннерита, нижний спектр – с участка браннерита без видимых следов замещения минерала.

в табл. 2. Из подавляющего большинства местонахождений браннерит метамиктен, как и в нашем случае, и в нем обычно часть U(IV) окислена до U(VI) (Hess, Wells, 1920; Повилайтис, 1961 и др.) или U(VI), U(V) (Colella et al., 2005), могут присутствовать гидроксил и вода, железо может быть как Fe(III), так и Fe(II) (Hess, Wells, 1920; Кривоконьва, 1972; Murthy et. al., 1996; Юдинцев и др., 2016). Так как мы не определяли уран и железо в разных степенях окисления и не проверяли наличие воды в составе минерала (для таких определений необходимо бы было отобрать не менее 5–10 мг, что сказалось бы на сохранности единственного кристалла), расчет кристаллохимической формулы браннерита выполнен по кислородному методу с пониманием условности такого расчета, а соотношение U(IV)/U(VI) определено по балансу зарядов.

С полированных препаратов браннерита для различных участков были получены спектры комбинационного рассеяния на рамановском микроспектрометре Thermo DXR2xi с конфокальным микроскопом (рис. 4). Параметры съемки: твердотельный лазер с длиной волны 780 нм, мощность лазера 15 мВт (при 50% мощности), дифракционная решетка 800 линий/мм, время сканирования 10 с, количество сканов 20, спектральный диапазон регистрации 3400–50 см<sup>-1</sup>, разрешение 1 см<sup>-1</sup>,

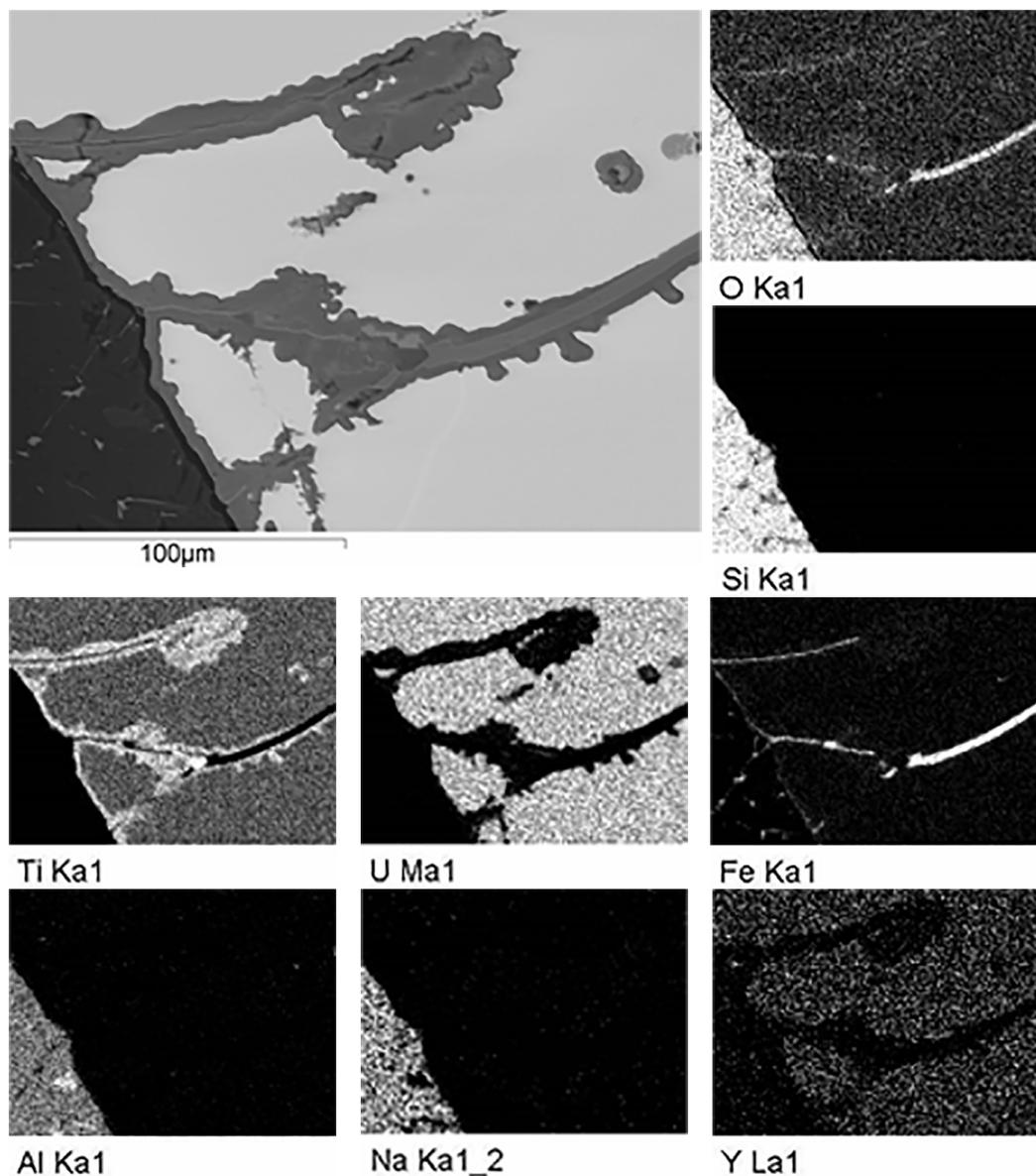
калибровка проведена по стандартному образцу кремния. За последние годы в связи с возрастающим интересом к ядерному сырью появилось довольно много работ, посвященных рамановской спектроскопии браннерита (Frost et al., 2011, Zhang et al., 2013, Tugiani et al., 2020, и др.). Набор полос в спектрах зачастую различается как по положению, так и по интенсивностям, что связано, на наш взгляд, во-первых, с тем, что диагностика браннерита без использования рентгеновских методов не является однозначной, поскольку при том же составе минерал может оказаться уранополикразом, во-вторых, на характер спектра оказывает существенное влияние степень метамиктности и интенсивность вторичных изменений минерала. Предлагаемая ниже расшифровка рамановских спектров основана в основном на данных Р. Фроста, опубликовавшего целый ряд работ, посвященных рамановской спектроскопии уран-титановых минералов (Frost, 2011; Frost, Jagannadha, 2011a,b, и многие другие).

Наиболее интенсивная и широкая полоса в спектрах браннерита с Памира (700–950 см<sup>-1</sup> с максимумом 740–750 см<sup>-1</sup>) отвечает симметричным валентным колебаниям (UO<sub>2</sub>)<sup>2+</sup>-группировок, полоса (плечо) в районе 690 см<sup>-1</sup> соответствует Ti–O симметричным валентным колебаниям. Полосы в диапазоне 600–220 см<sup>-1</sup> отвечают деформаци-

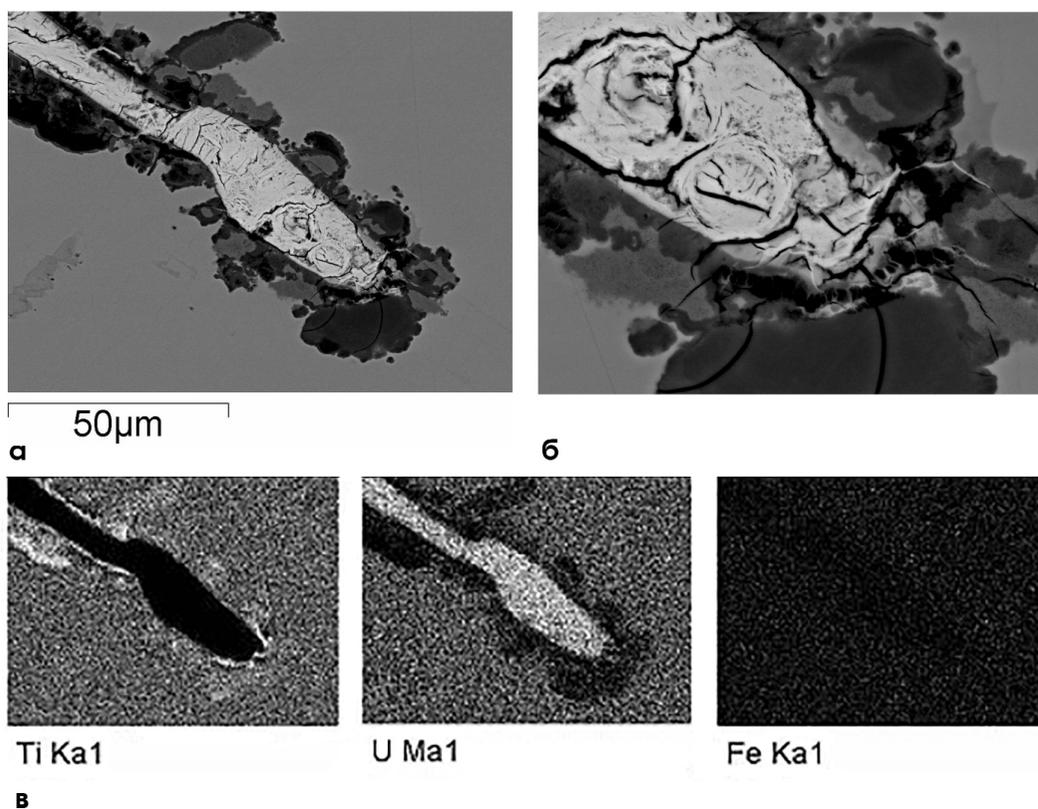
онным колебаниям связей U–O. Помимо этого, широкую полосу в диапазоне 260–280 см<sup>-1</sup> относят к симметричным валентным колебаниям связей O–Ti–O как характерную для титанатов со структурой браннерита (Zhang et al., 2013).

Более длинноволновые колебания (менее 200 см<sup>-1</sup>) связаны с колебаниями решетки. Обращает на себя внимание полоса 170–180 см<sup>-1</sup>, которая проявляется в неизменном браннерите в

виде очень небольшого плеча, но достаточно интенсивна для измененных участков браннерита с Памира (рис. 4). Следует отметить, что эта полоса с различной степенью интенсивности и разбросом в диапазоне 160–190 см<sup>-1</sup> имеется во многих из опубликованных спектров браннерита и разные авторы по-разному интерпретируют ее, связывая как с деформационными вращательными колебаниями (UO<sub>2</sub>)<sup>2+</sup>-группировок, так и с деформационными



**Рис. 5.** Прожилковидные зоны изменения браннерита с В. Памира около трещин и контакта с альбитом. Верхний левый снимок – изображение полированного препарата в режиме BSE. Светло-серое – браннерит, серое – продукты изменения браннерита, темно-серое в левой нижней части снимка – альбит. Остальные снимки – рентгеновские карты распределения элементов, указанных под снимками (приведены символы элементов и аналитические рентгеновские линии).



**Рис. 6.** Изменения браннерита вдоль трещины. Осевая зона сложена оксидами урана, по ее периферии наблюдается обеднение ураном и обогащение титаном. а – изображение в режиме BSE, светло-серое – оксиды урана, серое – браннерит, темно-серое – продукты изменения браннерита; б – фрагмент предыдущего снимка; в – рентгеновские карты распределения элементов, указанных под снимками (приведены символы элементов и аналитические рентгеновские линии).

колебаниями связей O–Ti–O (Frost, Jagannadha, 2011a, Zhang et al., 2013). Вполне вероятно, что положение и интенсивность этой полосы могут быть связаны как с различной степенью метамиктности браннерита, так и с возможной фазовой неоднородностью изученных образцов.

Браннерит с Кукурта довольно слабо изменен: продукты замещения вдоль трещин и контактов с альбитом составляют менее 5% площади просмотренных шлифов. Мы не ставили задачу изучить характер изменений браннерита и по этой причине приведем только некоторые самые первые наблюдения. Можно выделить несколько типов изменения браннерита. Наиболее распространены зоны выноса урана, иттрия и обогащение титаном вдоль трещин в браннерите (рис. 5). Нередко в таких прожилковидных зонах изменения осевая часть выполнена гематитом. Другие зоны

изменения браннерита вдоль трещин также характеризуются обогащением титаном и обеднение ураном, но осевые части таких зон резко обогащены ураном и сложены сферолитовыми агрегатами предположительно настурана (рис. 6). Кроме зон изменения вдоль трещин, встречаются в браннерите сферолиты желто-коричневого цвета, сложенные недиагностированными оксидами титана (рис. 7). Близкие по облику и элементному составу образования в браннерите описывает М.М. Повилайтис (1961). Сравнение состава сферолитов в нашем браннерите с желтыми продуктами изменения браннерита из Бурятии приведено в табл. 3. Рентгеновская порошкограмма вторичных продуктов изменения браннерита из Бурятии близка к рентгенограмме анатаза (Повилайтис, 1961). Рамановский спектр сферолита в браннерите с Памира в сравнении со спектром анатаза приведены на рис. 8.

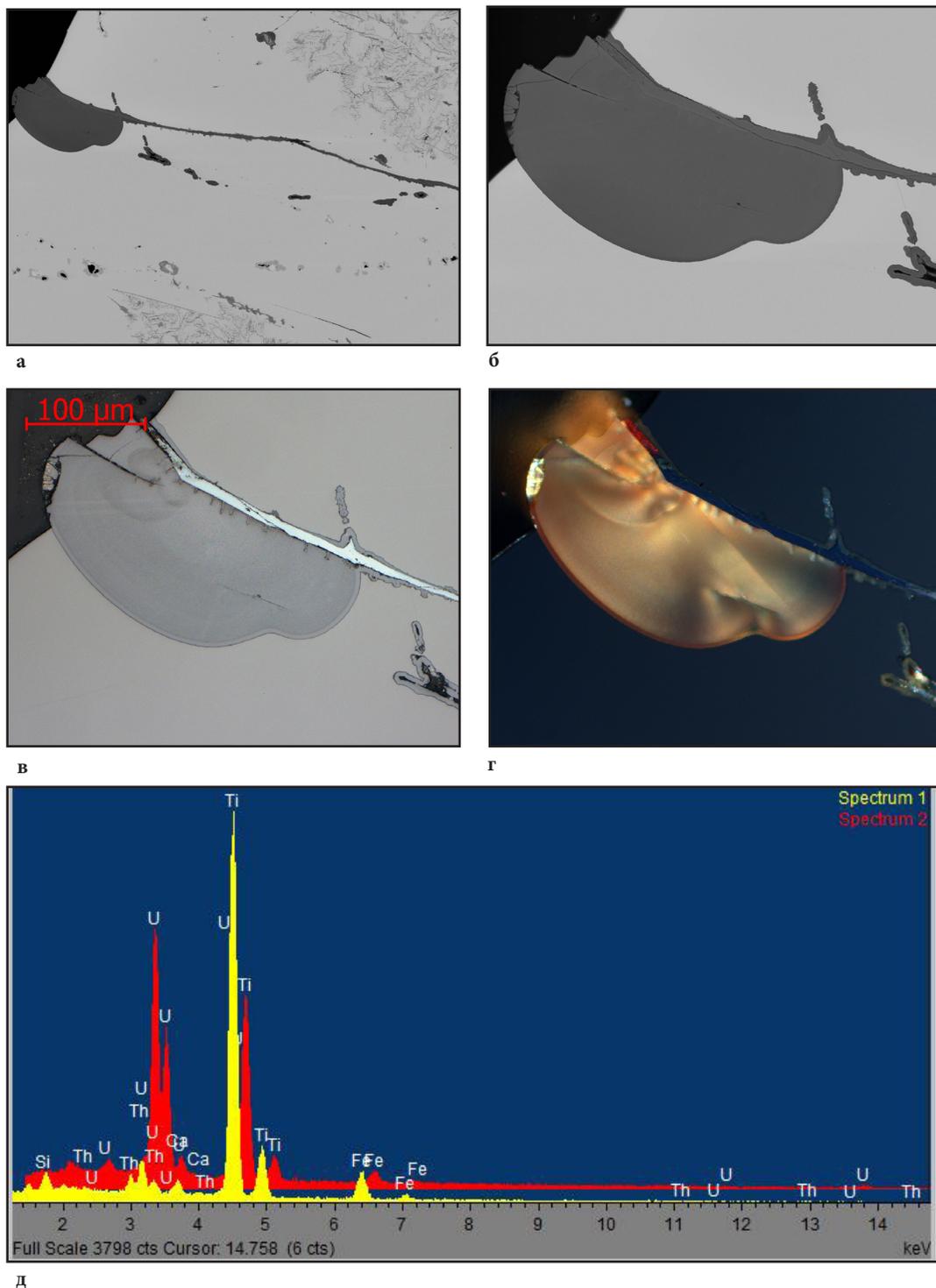


Рис. 7. Сферолиты богатой титаном фазы (фаз), приуроченной к трещинам в браннерите с В. Памира: а и б – вид полированного шлифа браннерита в режиме BSE, в и г – вид участка шлифа, показанного на рисунке (б) в отраженном свете при одном николе (левый снимок) и в скрещенных николях (правый снимок), трещина в браннерите выполнена гематитом; д – сравнение энергодисперсионных спектров браннерита (красный) и фазы, слагающей сферолиты в браннерите (желтый).

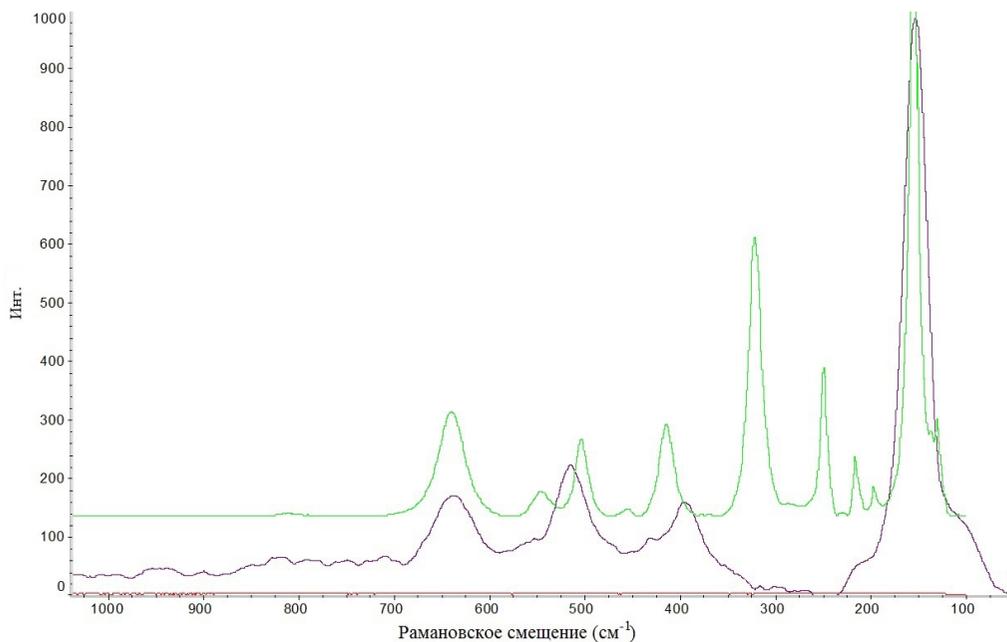


Рис. 8. Рамановский спектр центральной части сферолита в браннерите (фиолетовый). Для сравнения приведен спектр брукита (зеленый).

Таблица 3. Химический состав (мас.%) продуктов изменения браннерита

Компонент	1	2
SiO <sub>2</sub>	1.36	0.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.79	2.30
WO <sub>3</sub>	1.11	
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.65	2.52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.57	
TiO <sub>2</sub>	66.34	66.14
ZrO <sub>2</sub>	0.23	
ThO <sub>2</sub>	3.82	4.98
UO <sub>3</sub>	5.81	
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>		2.82
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.39	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.94	8.45
FeO		1.19
PbO	0.55	0.20
CaO	1.24	1.20
MgO		0.16
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>		4.73
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>		1.82
Сумма	90.99	98.93

Примечание. 1 – химический состав сферолита в браннерите с Кукурта, показанного на рис. 7.

2 – состав вторичных продуктов изменения браннерита из Бурятии. Аналитик М.Е. Казакова (Повилайтис, 1961).

## Основные результаты

В долине реки Кукурт на Восточном Памире найден относительно крупный (более 3 см в наибольшем измерении) кристалл браннерита. Вероятно, это первая подтвержденная аналитическими методами находка браннерита на Памире.

Низкие содержания свинца (PbO < 0.1 мас.%), слабое замещение браннерита вторичными продуктами говорят с большой вероятностью о молодом возрасте урановой минерализации в долине Кукурта и возможной связи ее с неогеновыми лейкогранитами шатпутского комплекса. Особенности элементного состава браннерита с Памира в свете типохимизма минерала (Turvani et al., 2020) не позволяют сколько-нибудь определенно отнести его к продуктам гидротермального или пегматитового процесса. Есть все основания надеяться, что генезис урановой минерализации с браннеритом (или хотя бы приуроченность браннерита к пегматитам или гидротермалитам) в долине Кукурта будет в обозримое время решен прямым методом – обнаружением в ходе полевых работ коренного проявления браннерита.

## Благодарности

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ Ф.К. Рахими, П. Аминзода, Р.У. Сабирову, Р.Д. Бахтдавлатова и А.Р. Файзиева.

## Список литературы:

- Дмитриев Э.А. Генетические типы камнесамоцветной минерализации Центрального Памира // Доклады АН СССР. Геология. 1982. Т. 266. № 3. С. 691–694.
- Дюфур М.С., Кольцов А.Б., Золотарев А.А., Кузнецов А.Б. Корундсодержащие метасоматиты Центрального Памира // Петрология. 2007. Т. 15. № 2. С. 160–177.
- Кривоконева Г.К. Новые данные о поведении метамиктного браннерита в процессе термообработки // ЗВМО. 1972. Вып. 5. С. 254–267.
- Повилайтис М.М. Новые данные о браннерите // Труды Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана АН СССР. 1961. Вып. 12. С. 64–79.
- Юдинцев С.В., Стефановский С.В., Никольский М.С., Стефановская О.И., Никонов Б.С. Браннерит,  $UTi_2O_6$ : кристаллохимия, синтез, свойства, применение для иммобилизации актинидных отходов // Радиохимия. 2016. Т. 58. № 4. С. 289–301.
- Colella M., Lumpkin G. R., Zhang Z., Buck E. C., Smith K.L. Determination of the uranium valence state in the brannerite structure using EELS, XPS, and EDX // Physics and chemistry of minerals. 2005. Vol. 32. № 1. P. 52–64.
- Frost R. Raman spectroscopic study of the uranyl titanate mineral holfertite  $CaxU_{2-x}Ti(O_{8-x}OH_{4x}) \cdot 3H_2O$  and the lack of metamictization adiation // Radiation Effects and Defects in Solids. 2011. Vol. 166. № 1. P. 24–29.
- Frost R., Jagannadha B. Raman spectroscopic study of the uranyl titanate mineral brannerite  $(U,Ca,Y,Ce)_2(Ti,Fe)_2O_6$ : effect of metamictization // Journal of Raman Spectroscopy. 2011a. Vol. 42(4). P. 691–695.
- Frost R., Jagannadha B. The effect of metamictization on the Raman spectroscopy of the uranyl titanate mineral davidite  $(La,Ce)(Y,U,Fe)(Ti,Fe)_{20}(O,OH)_{38}$  // Radiation Effects and Defects in Solids. 2011b. Vol. 166(2). P. 131–136.
- Hess F.L., Wells R.C. Brannerite, a new uranium mineral // Journal of the Franklin Institute. 1920. Vol. 189. P. 225–237.
- Murthy K.V.R., Manjunath Y.S., Murthy G.V.G.K., Nayeem M.A., Parthasarathy T.N. Physical, optical and chemical characterization of brannerite from the Ladikabas area, Sikar district, Rajasthan // Journal of the geological Society of India. 1996. Vol. 47. № 2. P. 259–262.
- Turuani M., Choulet F., Eglinger A., Goncalves P., Machault J., Mercadier J., Seydoux-Guillaume A.-M., Reynaud S., Baron F., Beaufort D., Batonneau Y., Gouy S., Mesbah A., Szenknect S., Dacheux N., Chapon V., Pagel M. Geochemical fingerprints of brannerite ( $UTi_2O_6$ ): an integrated study // Mineralogical Magazine. 2020. Vol. 84. № 2. P. 313–334.
- Zhang Y., Karatchevtseva I., Qin M., Middleburgh S.C., Lumpkin G.R. Raman spectroscopic study of natural and synthetic brannerite // Journal of nuclear materials. 2013. Vol. 437. P. 149–153.