



## Тапиаит из Чаувайского рудного поля – вторая находка в мире

Карпенко В.Ю.<sup>1</sup>, Паутов Л.А.<sup>1,2</sup>, Агаханов А.А.<sup>1</sup>, Мираков М.А.<sup>1</sup>,  
 Сийдра О.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, [mineralab@mail.ru](mailto:mineralab@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт минералогии УрО РАН, Миасс

<sup>3</sup>Институт наук о Земле, СПбГУ, Санкт-Петербург

На Au-месторождении Обдиля в пределах Чаувайского рудного поля (Кыргызстан) вскрыта мышьяковая минерализация, в составе которой встречен тапиаит  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , до этого известный лишь на месторождении Хоте (Jote Mine, Чили). Минерализация приурочена к карбонатным толщам толубайской свиты ( $\text{C}_1\text{--C}_2$ ) и представлена аурипигментом, реальгаром, владимирином, мансфельдитом, талмесситом, высококальциевыми представителями серии фармакоалюмита–фармакосидерита, рентгеноаморфными К–Са–Fe–Al–арсенатами. Тапиаит формирует агрегаты белых с шелковистым блеском радиально-лучистых образований (100–250 мкм), сложенных уплощенно-призматическими, брусковидными кристаллами с гранями {10T}, {101} и {232} (?). Длина отдельных кристаллов 10–50 мкм, обычные двойники. Минерал оптически двусный положительный. Кристаллы тапиаита имеют прямое угасание относительно удлинения,  $n_p = 1.578(2)$ ,  $n_g = 1.609(2)$ , плеохроизм отсутствует. Химический состав центральной (центр) и краевой (кр) частей радиально-лучистых агрегатов несколько отличается по сумме (микронзонд, вес.%; центр/кр):  $\text{As}_2\text{O}_5$  45.42/43.39,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  0.06/0.32,  $\text{SiO}_2$  0.02/0.09,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  9.82/9.64,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.19/0.02,  $\text{CaO}$  27.17/26.44,  $\text{SO}_3$  0.13/0.00, сумма (без  $\text{H}_2\text{O}$ ) 82.83/79.90;  $\text{H}_2\text{O}$  по разности 17.17/20.10. Пересчет на 11 атомов (Ca+Al+Fe+As+S) приводит к формуле  $\text{Ca}_{4.95}\text{Al}_{1.97}\text{Fe}_{0.02}[\text{As}_{4.03}\text{S}_{0.02}\text{O}_{16}](\text{OH})_{4.17} \cdot 7.65\text{H}_2\text{O}$  для центральной части сферолитоподобных агрегатов и  $\text{Ca}_{4.98}\text{Al}_{2.00}[\text{As}_{3.99}\text{Sb}_{0.02}\text{Si}_{0.02}\text{O}_{16}](\text{OH})_{4.09} \cdot 9.74\text{H}_2\text{O}$  для краевой. Обсуждаются возможные причины более высоких сумм анализов по сравнению с тапиаитом с места первого описания. Приведена рентгеновская порошкограмма тапиаита, для монокристалла (пространственная группа  $P2_1/n$ ), получены параметры элементарной ячейки  $a = 16.03(1)$ ,  $b = 5.81(2)$ ,  $c = 16.32(2)$  Å,  $\beta = 116.7(2)^\circ$ ,  $Z = 2$ . Для тапиаита из Обдиля и Хоте приведены рамановские спектры. Образование тапиаита может быть связано с приповерхностной разгрузкой вод, обогащенных As, а также с процессами изменения первичных As-минералов.

**Ключевые слова:** тапиаит, арсенаты, мышьяк, Чаувай, Кыргызстан.

### Введение

При изучении арсенатной минерализации одного из участков золоторудного месторождения Обдиля, расположенного в пределах Чаувайского рудного поля (Кыргызстан), нами был встречен редкий арсенат – тапиаит  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , впервые описанный на руднике Хоте в провинции Копиапо, Чили (Kampf

et al., 2015). Сведений об иных находках этого минерала в других регионах мы не обнаружили.

Чаувайское рудное поле, расположенное в южном обрамлении Ферганской впадины, известно с давних времен. Здесь располагается одно из крупнейших ртутных месторождений Средней Азии – Чаувайское (в настоящее время принадле-



Рис. 1. Вид на дорогу и отвалы расчистки площадки под разведочную скважину на участке Обдиля, в которых была встречена арсенатная минерализация. Внизу видна долина р. Чаувай и одноименный поселок.

жит Кадамджайскому району Баткенской области Республики Кыргызстан). Упоминания о добыче ртути в этом районе относятся еще к X веку (Сауков, 1932б). Новый период освоения Чаува связан с попутными изысканиями Ферганской радиовой экспедиции 1914 г., инициатором которых выступил Д.И. Щербаков, а позже – с работами Академии наук 1925–1926 гг., проводившимися под научным руководством Минералогического музея АН СССР, а также работами Памирской (Таджикско-Памирской) экспедиции (Щербаков, 1926, 1931; Щербаков, Соседко, 1928; Сауков, 1931, 1932а,б; Москвин, 1933). В геологическом отношении район характеризуется чешуйчато-надвиговой тектоникой, обусловившей формирование толщ алайского структурного комплекса. Толщи разбиты системой крутопадающих разломов субширотного и северо-восточного простирания и сопровождаются зонами гидротермально измененных пород с ртутной, сурьмяной, мышьяковой, флюоритовой минерализацией с повышенными содержаниями Tl, Ga, Se, Ge, In (Белов, 1989). В.Ю. Волгин, российский минералог, внесший огромный вклад в изучение минералогии ртути Средней Азии, изучая с коллегами зональность Чаувайского рудного поля, отметил развитие низкотемпературных мышьяковых и галхитовых руд на западных флангах Чаува, куда попадает также и Обдиля, в отличие от центральной и восточной частей, где развито более высокотемпературное киноварное и антимонит-киноварное (с блеклыми рудами) оруденение (Волгин и др., 1981, 1985). В начале 1990-х гг. работами Южно-Киргизской ГРЭ на участке Обдиля было установлено золотое оруденение (Рогальский, 1992), что обусловило проведение дальнейших разведочных работ на золото. В процессе расчистки площадки под бурение на одном из участков месторождения в 2009 году среди ниже-среднекаменноугольных карбонатных толщ и среднекаменноугольных олистостромовых отложений толубайской свиты

была вскрыта зона с развитием реальгар-аурипигментовой минерализации (рис. 1). В отвалах расчистки, помимо аурипигмента и реальгара, нами был встречен целый ряд арсенатов: владимирит  $\text{Ca}_4(\text{AsO}_4)_2(\text{AsO}_2\text{OH})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , мансфельдит  $\text{Al}(\text{AsO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , талмессит  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , высококальциевые представители серии фармакоалюмита–фармакосидерита, рентгеноаморфные K-Ca-Fe-Al-арсенаты, здесь же был встречен и тапиит (Агаханов и др., 2015; Карпенко и др., 2016). Для сравнения отметим, что в Чили тапиит был встречен в гидротермальной низкотемпературной кварц-альбит-микроклиновой жиле, локализованной в вулканогенной толще, несущей Cu-As-Ag-минерализацию, в тесной ассоциации с мансфельдитом, скородитом, конихальцитом, жотеитом, фармакоалюмитом и фармакосидеритом (Kampf et al., 2015).

### Методы исследования

Экспрессная диагностика арсенатов, ассоциирующих с тапиитом, выполнена методом EPMA EDS на сканирующем электронном микроскопе Camscan 4D с управляющей системой ISIS. Химический состав тапиита изучался на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-733 Superprobe (JEOL), укомплектованном энергодисперсионным спектрометром с ультратонким окном ATW2 и управляющей системой INCA Energy 450, при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1 нА. Для анализа использованы следующие стандартные образцы:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Al),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Fe), волластонит std (Ca), MgO (Mg), InAs (As),  $\text{AgSbS}_2$  (Sb),  $\text{SiO}_2$  (Si). Диагностика тапиита и ассоциирующих минералов подтверждена также методами рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-2.0, CuK $\alpha$ -излучение; фотометрическая регистрация – СгK $\alpha$ -излучение, V-фильтр, камера РКУ-86). Для монокристаллической съемки использовался рентгеновский дифрактометр Bruker Kappa APEX DUO с микрофокусной рентгеновской трубкой Mo-I $\mu$ S

( $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$ ), работающей при 50 кВ и 0.6 мА.

Спектры комбинационного рассеяния получены на рамановском микроспектрометре Thermo Scientific DXR2xi с конфокальным микроскопом при следующих параметрах съемки: твердотельный лазер с длиной волны 532 нм, мощность лазера 5 мВт (50%-ная мощность), дифракционная решетка 400 линий/мм, время сканирования 2.0 сек, количество сканов 30, спектральный диапазон регистрации 6000–50  $\text{см}^{-1}$ , разрешение 2  $\text{см}^{-1}$ , калибровка проведена по стандартному образцу кремния.

### Описание тапиаита. Физические свойства

Тапиаит вместе с другими арсенатами был обнаружен в пестрых массах, сложенных тонкозернистыми агрегатами гипса, кварца, алунита и упомянутых выше арсенатов. Макроскопические образцы, в которых встречен тапиаит, представлены буровато-рыжими агрегатами с белыми пятнами и прожилками, главными арсенатами в которых являются талмессит и владимирит, другие же арсенаты, в том числе и тапиаит, присутствуют в подчиненном количестве (рис. 2а). Цвет корок обусловлен присутствием минералов фармакосидерит–фармакоалюмитового ряда с переменным содержанием железа. Местами они слагают плотные кристаллические массы, а местами – губчатые рыхловатые агрегаты. Распространены также полупрозрачные стекловатые опаловидные образования желтовато-светло-коричневого, темно-коричневого цветов Са-Fe-Al-As-состава. Они, как правило, рентгеноаморфны либо дают слабые линии, соответствующие минералам группы фармакосидерита.

Кристаллы тапиаита в сростаниях образуют радиально-лучистые агрегаты диаметром 100–250 мкм белого цвета с шелковистым блеском. Они тесно ассоциируют с владимиритом, нарастая на его бесцветные полупрозрачные кристаллы (рис. 2б), которые, в свою очередь, образуют радиально-лучистые агрегаты диаметром до 1 см и более (Агаханов и др., 2015). Сферолитоподобные агрегаты тапиаита нарастают на мелкокристаллические ноздреватые массы желтовато-коричневого цвета, сложенные высококальциевым аналогом фармакоалюмита, а также на гипсовые корки, оказываясь иногда «законсервированными» в них.

Детализация морфологии радиально-лучистых агрегатов тапиаита представлена на рис. 3 и 4. Минерал образует бесцветные прозрачные удлиненно-призматические, таблитчатые кристаллы длиной 10–50 мкм. Наряду с уплощенно-призматическими нередки также и брусковидные кристаллы. Гониометрическое изучение их из-за крайне малого размера оказалось затруднено. По-



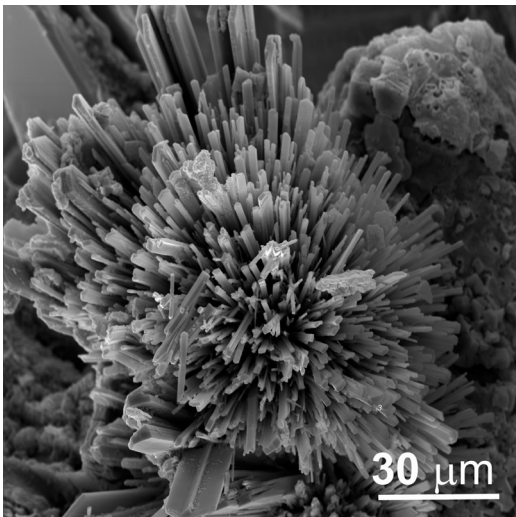
(а)



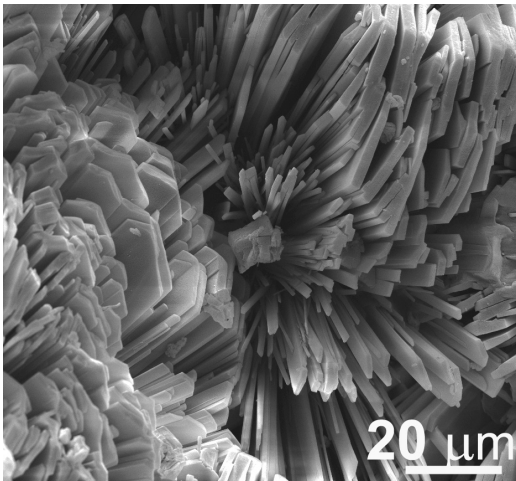
(б)

**Рис. 2.** Характерный образец с арсенатами, содержащий тапиаит: а – общий вид образца (4×5.5 см), цифрами обозначены: 1 – корки и сферолитоподобные агрегаты тапиаита, 2 – владимирит, 3 – гипс, 4 – агрегативные скопления арсенатов, представленные талмесситом, минералами ряда фармакоалюмит–фармакосидерит, аморфными Са-Fe-Al-арсенатами; б – детализация участка: радиально-лучистые агрегаты тапиаита в ассоциации с владимиритом (полупрозрачные призматические кристаллы), гипсом и арсенатами ряда фармакоалюмит–фармакосидерит (коричневые массы). Ширина поля зрения 4 мм.

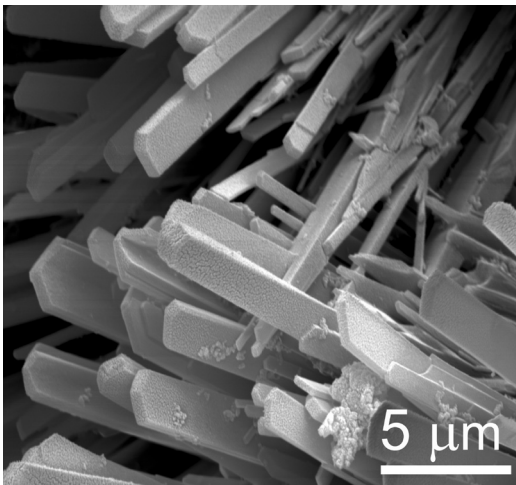
скольку внешне по морфологии кристаллы очень близки к таковым из Чили (Kampf et al., 2015), это было взято за основу для последующих построений. Наиболее развитой является форма  $\{10\bar{T}\}$ , менее развиты  $\{101\}$  и  $\{hkl\}$ . Для нескольких кристаллов с хорошо выраженными контурами под микроскопом были измерены межреберные углы А и В (рис. 5); они оказались равными 130(1)° и 115(1)° соответственно и отличаются как от расчетных, так и измеренных значений для аналогичных углов тапиаита из Чили, которые составляют 112.2° и 124.2°, что существенно выходит за пределы ошибок измерения. Для формы  $\{hkl\}$ , развитой в кристаллах из Обдиля, наиболее вероятным является индекс  $\{232\}$  (либо близкий к нему, где  $h = l$ ), с расчетными углами А и В, составляющими



(a)

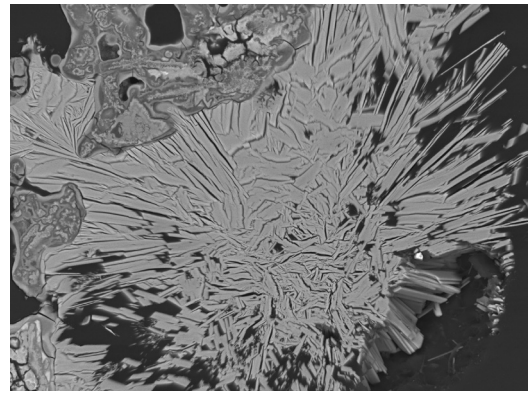


(б)

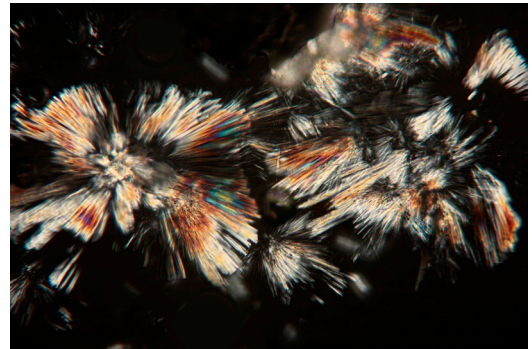


(в)

Рис. 3. Радиально-лучистый агрегат тапиаита (а) и его фрагменты с различной степенью детализации (б, в).



(a)



(б)

Рис. 4. Радиально-лучистые агрегаты тапиаита (в эпокисидной смоле): а – режим BSE, в верхней левой половине наблюдаются почковидные аморфные массы арсенатов Ca-Al-Fe; отдельные хорошо оформленные кристаллы периферии агрегата тапиаита дают первую группу составов (табл. 1), участки центральной части – вторую группу; б – прозрачно-полированный шлиф: комбинация проходящий и отраженный свет, николи +, ширина поля зрения 0.65 мм.

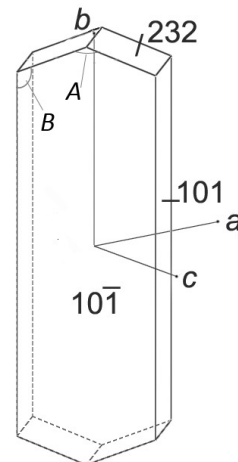


Рис. 5. Кристалл тапиаита в нестандартной ориентировке. А и В – межреберные углы (пояснения в тексте).

131.8° и 113.8° соответственно. Изредка наблюдаются двойниковые Г-образные и крестообразные сростки с плоскостью двойникования, параллельной удлинению кристалла. Тапиаит оптически двусный положительный, кристаллы его имеют прямое угасание относительно удлинения,  $n_p = 1.578(2)$ ,  $n_g = 1.609(2)$ , плеохроизм отсутствует.

## Химический состав

Химический состав тапиаита, а также ассоциирующих минералов изучен электронно-зондовым методом в прозрачно-полированном шлифе. Для

**Таблица 1.** Химический состав тапиаита из Обдия (Кыргызстан) (1, 2) и Jota Mine, Чили (3, 4) (вес.%)

Компоненты	1	2	3	4
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	43.39	45.42	41.75	40.98
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.32	0.06	0.00	0.09
SiO <sub>2</sub>	0.09	0.02	0.00	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.64	9.82	9.88	10.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.19	0.00	0.19
CaO	26.44	27.17	25.10	24.96
CuO	0.00	0.00	0.00	0.73
SO <sub>3</sub>	0.00	0.13	0.00	–
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.09
H <sub>2</sub> O*	20.10	17.17	23.27	23.46
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.58
Расчет формулы на сумму катионов = 11 ф.е.				
Ca <sup>+2</sup>	4.98	4.95	4.90	4.83
Cu <sup>+2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.10
Al <sup>+3</sup>	2.00	1.97	2.12	2.14
Fe <sup>+3</sup>	0.00	0.02	0.00	0.03
As <sup>+5</sup>	3.99	4.03	3.98	3.87
Sb <sup>+5</sup>	0.02	0.00	0.00	0.01
Si <sup>+4</sup>	0.02	0.00	0.00	–
S <sup>+6</sup>	0.00	0.02	0.00	–
ОН <sup>-**</sup>	4.09	4.17	4.07	3.77
H <sub>2</sub> O***	9.74	7.65	12.11	12.24

Примечания. 1 – анализы краевых частей сферолитоподобных агрегатов, 2 – анализы центральных частей агрегатов; 1–3 – наши данные, 4 – Kampf et al., 2015.

\* Расчет H<sub>2</sub>O для анализов 1–3 по разнице.

\*\* Расчет OH<sup>-</sup> по балансу зарядов.

\*\*\* Расчет H<sub>2</sub>O (молекулярной) по разнице после вычитания гидроксильной воды из общей.

сравнительной характеристики в этот же препарат был помещен и проанализирован тапиаит с места первого описания (образец ФММ\_1\_95854 музея). Полученные анализы тапиаита из Киргизии разбиваются на две группы (табл. 1): к первой группе относятся анализы, полученные для центральных участков сферолитоподобных агрегатов кристаллов, ко второй – для краевых участков периферической части. Первая группа анализов отличается в целом несколько более высокой суммой, чем вторая. Из-за малого количества вещества мы не смогли выполнить прямое определение воды в минерале, потому количество ее было принято по разности. В анализах обращают на себя внимание две особенности:

- суммы анализов для минерала из Обдия в среднем оказываются на 3–6 вес.% больше, чем таковые для минерала с места первого описания;

- состав тапиаита из Обдия оказывается гораздо более близок к стехиометрическому, нежели из Хоте, причем отклонение от стехиометрии наблюдается не только при пересчете выполненных нами анализов музейного материала, но и в анализах у авторов первого описания тапиаита (Kampf et al., 2015), что связано, очевидно, не с аналитическими ошибками, а с особенностями материала непосредственно из данного объекта. Возможные причины этого обсуждаются в конце статьи.

## Рентгеновские данные

Порошкограмма тапиаита, полученная фотометодом, приведена в табл. 2. Обращает внимание наличие большинства расчетных отражений в экспериментальных данных, в отличие от таковых для тапиаита с места первого описания (например, (303), (402), (213) и ряд других). Параметры элементарной ячейки минерала и пространственная группа были определены на очень тонком кристалле тапиаита призматического облика (2×2×4 мкм). Полученные результаты: пр.гр. P2<sub>1</sub>/n, a = 16.03(1) Å, b = 5.81(2) Å, c = 16.32(2) Å, β = 116.7(2)°, Z = 2 – очень хорошо согласуются с таковыми для чилийского тапиаита (Kampf et al., 2015).

## Рамановская спектроскопия

Для тапиаита из Обдия и Хоте (образец ФММ\_1\_95854 музея) были получены КР-спектры, обзорные спектры и их детализированные участки приведены на рис. 6. Отметим, что спектры обоих образцов тапиаита практически идентичны. Обобщая имеющиеся в литературе данные по спектрам комбинационного рассеяния различных водных арсенатов Ca и Al (Frost et al., 2013; Kampf et al., 2013; Makreski et al., 2018), полученные нами спектры можно проинтерпретировать следующим образом. Слабовыраженные широкие полосы в диапазоне 2800–3500 см<sup>-1</sup> и небольшой пик в области

Таблица 2. Межплоскостные расстояния тапаиита из Обдиля (1) и Jote Mine (2)

1*		2 (изм.)		2 (расч.)		hkl	
$I/I_0$	$d/n, \text{Å}$	$I/I_0$	$d/n, \text{Å}$	$I/I_0$	$d/n, \text{Å}$		
100	13.8	100	13.91	100	13.779	0	1
38	8.50	12	8.55	12	8.494	1	0 1
4	7.93				8.007	0	1
19	7.31	17	7.23	9	7.303	0	0 2
23	7.18			10	7.160	2	0 0
11	6.88			4	6.890	0	2
13	5.37	22	5.39	5	5.365	0	1 1
				5	5.350	1	1 0
3	5.03				5.294	0	1
6	4.70			4	4.709	1	2
		33	4.64	3	4.680	1	1
20	4.58			6	4.593	0	3
4	4.50				4.492	2	1 0
3	4.26				4.247	2	0 2
9	4.08				4.084	1	0 3
				3	4.034	3	0 1
8	4.01			2	4.000	0	2
7	3.95	42	3.952	6	3.948	1	3
				5	3.901	1	1
15	3.90			6	3.895	1	3
				5	3.867	1	2
9	3.44	3	3.441	3	3.445	0	4
9	3.33			7	3.330	1	4
16	3.29	35	3.29	6	3.289	1	2
				9	3.284	1	4
8	3.24			8	3.235	1	1
3	3.20				3.200	2	6
6	3.15			3	3.153	0	5
13	3.09	12	3.084	5	3.085	0	1
				3	3.082	0	1
8	3.05			5	3.042	4	1 0
5	2.913				2.917	2	1 3
22	2.832	39	2.823	15	2.832	3	0 3
9	2.807			6	2.810	1	5
14	2.776			7	2.777	1	3
		15	2.753	4	2.767	1	5

Таблица 2. Продолжение

4	2.738			7	2.731	1	2	1
3	2.723			4	2.720		1	1
				2	2.660		2	2
<b>6</b>	<b>2.645</b>	5	2.657	1	2.647		0	2
				2	2.640	1	0	5
5	2.602	3	2.611	2	2.606	0	1	5
2	2.569			2	2.599	5	0	1
1	2.514	2	2.506	1	2.509	2	1	4
2	2.495			2	2.491	4	1	2
1	2.359			2	2.355		2	4
<b>5</b>	<b>2.339</b>	10	2.343	2	2.340		2	2
				2	2.338		2	4
				2	2.336		0	7
7	2.297	4	2.301	3	2.297		0	6
				2	2.289		0	3
3	2.216	5	2.214	4	2.211		2	4
1	2.168	9	2.137	1	2.137		1	7
				1	2.133		2	3
				1	2.131	4	2	1
5	2.128			1	2.127		1	3
1	2.091				2.092	5	0	3
1	2.009			3	2.004	2	2	4
3	1.998	12	2.0000	3	1.995	4	2	2
				1	1.994	4	1	4
				1	1.992		2	5
2	1.816				1.816	2	3	1
<b>5</b>	<b>1.806</b>	15	1.8070	2	1.807		3	3
				1	1.804		3	2
				2	1.802		0	9
1	1.794			2	1.788	0	3	3
<b>6</b>	1.766			2	1.764		2	7
				3	1.763		0	3
3	1.754	12	1.7555	1	1.752	2	3	2
				2	1.752		2	5
3	1.743			2	1.741	0	1	8
3	1.724			1	1.722		0	8
3	1.713			1	1.717	2	1	7
		7	1.7117	2	1.7100	4	2	4
				2	1.7097		1	0

Таблица 2. Продолжение

2	1.668			3	1.6649	2	8
				1	1.6504	3	5
				1	1.651	1	2
3	1.646	12	1.6493	3	1.6444	2	4
				1	1.6416	2	8
				1	1.6416	3	5
				1	1.619	8	1
		6	1.6142	1	1.6173	2	2
2	1.610			1	1.6120	1	2
				2	1.6060	0	3
				1	1.6050	2	0
		6	1.5999	1	1.6023	2	8
1	1.5961			1	1.5963	5	3
				2	1.593	7	2
1	1.5855			1	1.5915	2	6
				1	1.556	1	9
		5	1.5463	1	1.550	1	8
3	1.5461			1	1.5462	2	1
				1	1.5427	0	2

Примечание. \* Жирным шрифтом выделены отражения, участвовавшие в уточнении параметров ячейки (расчет методом наименьших квадратов):  $a = 16.03(2)$ ,  $b = 5.77(1)$ ,  $c = 16.35(3)$  Å,  $\beta = 116.7(1)$ ,  $V = 1351(3)$  Å<sup>3</sup>; серыми тонами объединены расчетные отражения и соответствующие им экспериментальные данные, полученные для тапиайта с места первого описания (Kampf et al., 2015).

3635–3650 см<sup>-1</sup> соответствуют валентным колебаниям H<sub>2</sub>O и OH-групп соответственно, интенсивные полосы 817 и 856 см<sup>-1</sup> соответствуют валентным колебаниям групп (AsO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>, диапазон 410–600 см<sup>-1</sup> – мода F2( $\nu_4$ ) – соответствует частично как деформационным колебаниям групп (AsO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>, так и валентным колебаниям Al–O. Небольшие по интенсивности полосы в диапазоне 250–3300 см<sup>-1</sup> отвечают, вероятнее всего, валентным колебаниям Ca–O, но в этой области могут проявляться и деформационные колебания (AsO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup> – мода E( $\nu_2$ ). Полосы в области ниже 250 см<sup>-1</sup> связаны с акустическими модами с участием трансляционных и либрационных колебаний (AsO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>.

## Выводы и обсуждения

Находка тапиайта является, по всей вероятности, второй в мире и привносит новые данные в топоминералогии региона. Обобщая полученные аналитические данные, можно сделать предположения о причинах различий в химическом составе тапиайта из Кыргызстана и Чили. Одной из таковых может быть, к примеру, присутствие в

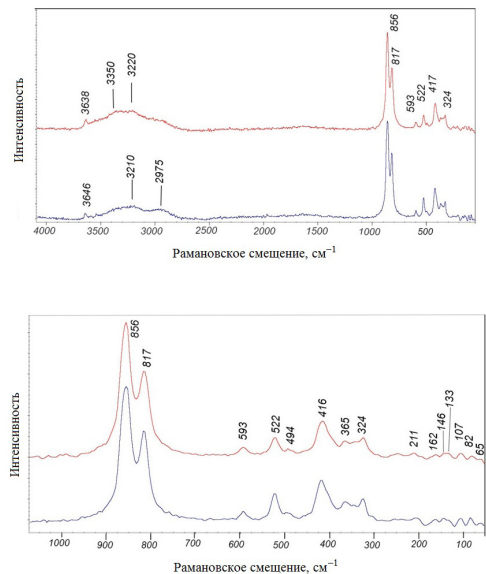


Рис. 6. Рамановские спектры тапиайта из Обдиля (верхний, красный) и Jote Mine (синий, нижний): а – обзорный спектр, б – детализация области 50–1050 см<sup>-1</sup>.



чилийском материале малого количества аморфной фазы в виде Са-Al водного арсената, которая не проявляется на порошкограмме, равно как и на спектрах комбинационного рассеяния, но при этом несколько нарушает стехиометрию соединения. Поскольку полученные нами результаты химического состава практически полностью воспроизводят таковые для первого описания, то это предположение мы считаем одним из вполне вероятных. Не исключается также и возможность частичной дегидратации вещества при электронно-зондовом анализе, но это причина, вероятно, определяется больше характером вещества с конкретного объекта.

В заключение отметим, что образование тапиита, равно как и ассоциирующих с ним арсенатов, в большей степени может быть связано с

приповерхностной разгрузкой вод, обогащенных мышьяком, а также и с процессами изменения первичных минералов мышьяка.

Изученный образец тапиита передан в коллекцию Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН.

## Благодарности

Авторы благодарят В.С. Гурского, В.В. Смирнова, Б. Токтогулова, К.Э. Ибраева, А.А. Архангельского за помощь в организации и проведении полевых работ, А.В. Быстрова, В.А. Муфтахова, С. Махмадшарифа – за помощь в полевых сборах и анализе материала, а также рецензентов – Е.В. Белогуб и Н.В. Чуканова – за ценные советы и замечания, которые во многом помогли улучшить статью.

## Список литературы:

Агаханов А.А., Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Сийдра О.И. О новой находке владимирита  $\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  из необычной арсенатной минерализации Чауваия (Киргизия) // в сб. Онтогенез, филогения, система минералогии. Материалы всероссийской конференции, Миасс, 5–9 октября, 2015 г. Миасс: Институт минералогии УрО РАН. С. 49–53.

Белов С.Н., Аксенов В.А., Аксененко В.В. Государственная геологическая карта СССР (масштаб 1:50 000). Южно-Ферганский ртутно-сурьмяный пояс. Туркестано-Алайская группа листов (объяснительная записка). Ош. 1989. 302 с.

Волгин В.Ю., Баринкова Н.Ю., Иванов В.С. Галхаитовые руды на месторождении Чаувай // В сб.: Геология и вещественный состав ртутных и сурьмяных месторождений. М.: ИМГРЭ, 1981. С. 57–65.

Волгин В.Ю., Баринкова Н.Ю., Иванов В.С. Распределение минеральных ассоциаций в пределах Чаувайского рудного поля // В сб.: Минералого-геохимические особенности ртутных и сурьмяных месторождений. М.: ИМГРЭ, 1985. С. 8–12.

Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Агаханов А.А., Сийдра О.И. Об арсенатной минерализации одного из участков Чауваия (Киргизия) // Материалы международной научной конференции, посвященной 300-летию Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН. 21–24 ноября 2016 г. М.: Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, 2016. С. 71–73.

Москвин А.В. Чаувайское сурьмяно-ртутное месторождение // Памирская экспедиция 1931 г. Л., 1933. Вып. 1(16). С. 83–149.

Рогальский В.В. Золотоносность сурьмяно-ртутных месторождений юга Кыргызстана. Отчет Туркестано-Алайской ГПП о результатах поисковых работ 1988–1992 гг. Ош: ЮКГЭ, 1992.

Сауков А.А. Опробование и анализы руд Хайдаркана и Чауваия // Памирская экспедиция 1928 года. Труды экспедиции. В. 7: Геология и геохимия. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1931. С. 53–64.

Сауков А.А. Чаувайское месторождение // Памирская экспедиция 1930 г. Тр. экспедиции. Вып. III (13). Полезные ископаемые. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1932а. С. 19–32.

Сауков А.А. Хайдарканское ртутно-сурьмяное месторождение // Памирская экспедиция 1930 г. Тр. экспедиции. Вып. III (13). Полезные ископаемые. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1932б. С. 33–86.

Щербаков Д.И. Новые данные о месторождении киновари и антимонита в Южной Фергана // Докл. АН СССР. 1926. Сер. А. Август. С. 153–156.

Щербаков Д.И. К геохимии Алайского хребта // Памирская экспедиция 1928 года. Труды экспедиции. В. 7: Геология и геохимия. Л.: Изд-во академии наук СССР, 1931. С. 1–52.

Щербаков Д.И., Соседко А.Ф. Работы Южно-Ферганской экспедиции по изучению сурьмяно-ртутных месторождений // Докл. АН СССР. 1928. Сер. А. С. 181–186.

Frost R.L., Xi Y., Pogson R.E., Scholz R. A vibrational spectroscopic study of philipsbornite  $\text{PbAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -molecular structural implications and relationship to the crandallite subgroup arsenates // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2013. V. 104. P. 257–261.

Kampf A.R., Mills S. J., Housley R.M., Rossman G.R., Nash B.P., Dini M., Jenkins R.A. Joteite,  $\text{Ca}_2\text{CuAl}[\text{AsO}_4][\text{AsO}_3(\text{OH})]_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , a new arsenate with a sheet structure and unconnected acid arsenate groups // Mineral. Mag. 2013. V. 77(6). P. 2811–2823.

Kampf A.R., Mills S.J., Nash B.P., Dini M. and Donoso A.A.M. Tapiaita,  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , a new mineral from the Jote mine, Tierra Amarilla, Chile // Mineral. Mag. 2015. V. 79(2). P. 345–354.

Makreski P., Todorov J., Makrievski V., Pejov L., Jovanovski G. // Vibrational spectra of the rare-occurring complex hydrogen arsenate minerals pharmacolite, picroparmacolite, and vladimirite: Dominance of Raman over IR spectroscopy to discriminate arsenate and hydrogen arsenate units // Raman Spectroscopy. 2018. V. 49(4). P. 747–763.