

## НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

УДК 549.753.1

© Д. чл. Н. В. ЧУКАНОВ, \* д. чл. И. В. ПЕКОВ, \*\* А. Е. ЗАДОВ\*\*\*

АТТИКАИТ  $\text{Ca}_3\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  — НОВЫЙ МИНЕРАЛ<sup>1</sup>N. V. CHUKANOV, I. V. PEKOV, A. E. ZADOV. АТТИКАИТЕ,  $\text{Ca}_3\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  
A NEW MINERAL\* Институт проблем химической физики РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка;  
e-mail: chukanov@icp.ac.ru

\*\* Московский государственный университет, 119899, Москва, Воробьевы горы

\*\*\* НПО «Регенератор», 127018, Москва, 3 Проезд Марьиной Рощи, д. 40

A new mineral attikaite has been found in association with arsenocrandallite, arsenogoyazite, conichalcite, olivenite, philipsbornite, azurite, malachite, carminite, beudantite, goethite, quartz and allophane in the Christiana mine No 132, Kamareza, Lavrion District, Attiki Prefecture (Attika), Greece. The mineral is named after the place of its finding. It forms spheroid aggregates (up to 0.3 mm diameter) consisting of thin flexible crystals up to  $3 \times 30 \times 80 \mu\text{m}$ . Its color is light blue to greenish-blue, streak pale blue. Mohs' hardness 2—2 1/2. Cleavage is perfect mica-like on {001}.  $D_{\text{meas}} = 3.2$  (2) (by heavy liquids),  $D_{\text{calc}} = 3.356 \text{ g/cm}^3$ . Wavenumbers of absorption bands in the IR spectrum are ( $\text{cm}^{-1}$ ; sh — shoulder; w — weak band): 3525sh, 3425, 3180, 1642, 1120w, 1070w, 1035w, 900sh, 874, 833, 820, 690w, 645w, 600sh, 555, 486, 458, 397. Attikaite is optically biaxial, negative;  $\alpha = 1.642$  (2),  $\beta = \gamma = 1.644$  (2) ( $X = c$ );  $2V_{\text{meas}} = 10$  (8)°,  $2V_{\text{calc}} = 0$ °. Microscopically colorless, non-pleochroic. Chemical composition (mean of 4 point electron microprobe analyses, wt %) is: MgO 0.17, CaO 17.48, FeO 0.12, CuO 16.28,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  10.61,  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.89,  $\text{As}_2\text{O}_5$  45.45,  $\text{SO}_3$  1.39,  $\text{H}_2\text{O}$  (by difference) 7.61, total sum 100.00 %. The empirical formula, based on  $(\text{O, OH, H}_2\text{O})_{22}$ :  $\text{Ca}_{2.94}\text{Cu}_{1.93}\text{Al}_{1.97}\text{Mg}_{0.04}\text{Fe}_{0.02}^{2+}[(\text{As}_{3.74}\text{S}_{0.16}\text{P}_{0.12})\Sigma_{4.02}\text{O}_{16.08}](\text{OH})_{3.87} \cdot 2.05\text{H}_2\text{O}$ . The idealized formula is  $\text{Ca}_3\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Attikaite is orthorhombic, space group *Pban*, *Pbam* or *Pba2*;  $a = 10.01$  (1) Å,  $b = 8.199$  (5) Å,  $c = 22.78$  (1) Å,  $V = 1870$  (3) Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$ . 30—35 min heating of attikaite at 128—140 °C results in disappearance of the  $\text{H}_2\text{O}$  bands in IR spectrum (with the OH group band remaining unchanged), weight loss of 4.3 % (which approximately corresponds to two  $\text{H}_2\text{O}$  molecules per formula) and lowering of the  $c$  parameter from 22.78 to 18.77 Å. The strongest reflections of the powder diffraction pattern [ $d$ , Å ( $I$ , %) ( $hkl$ )] are: 22.8 (100) (001), 11.36 (60) (002), 5.01 (90) (200), 3.38 (50) (123, 205), 2.780 (70) (026), 2.682 (30) (126), 2.503 (50) (400), 2.292 (20) (404). The holotype specimen is deposited in Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia (reg. No 3435/1).

Исследованиями последних лет было выявлено целое семейство природных арсенатов меди, структуры которых содержат кластеры из четырех или пяти реберно-связанных полиэдров  $\text{CuO}_5$ , имеющих конфигурацию искаженных квадратных пирамид (Cooper e. a., 1999; Cooper, Hawthorne, 2000; Зубкова и др., 2003; Zubkova e. a., 2004, 2005; Pushcharovsky e. a., 2004; Sarp, Černý, 2004). Авторами настоящей публикации изучен близкий к членам этого семейства по физическим свойствам, ИК-спектру и рентгеновским характеристикам новый минерал **аттикаит**, найденный Х. Снинашечком на руднике Христиана № 132 месторождения Лаурион (Лаврион), находящегося в префектуре Аттика, Греция (Christiana mine No 132, Kamareza, Lavrion District, Attika Prefecture, Greece). Он назван по месту находки (префектура, полуостров) и хорошо известная историческая область Аттика; греческая транскрипция *Аттикі*).

<sup>1</sup> Новый минерал аттикаит и его название одобрены Комиссией по новым минералам и названиям минералов РМО 30 марта 2006 г. Утверждены Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 1 июля 2006 г., IMA No 2006-017.

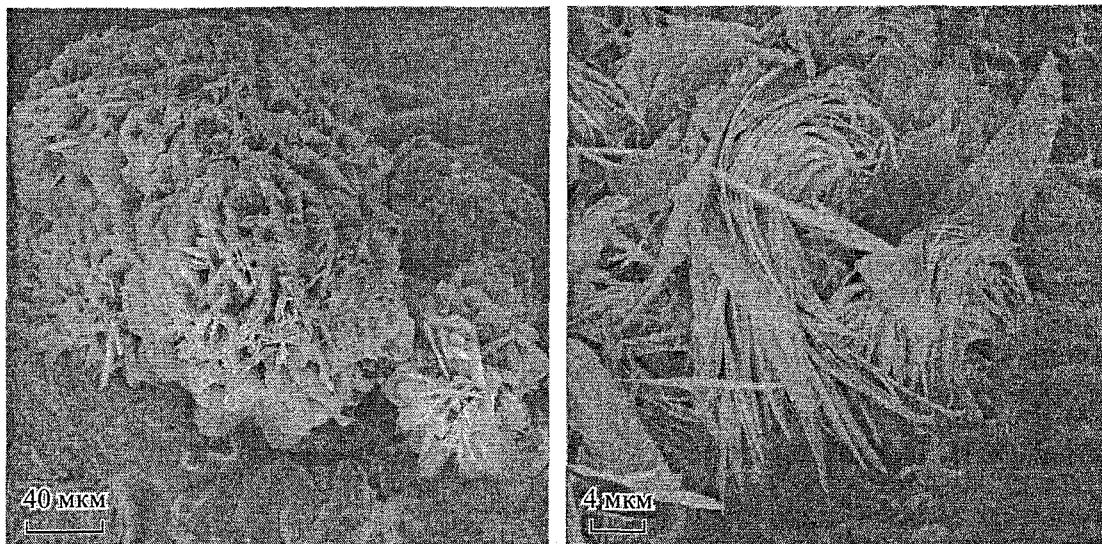


Рис. 1. Агрегаты аттикаита (СЭМ-фото).

Fig. 1. Aggregates of attikaite (SEM photo), МКМ =  $\mu\text{m}$ .

Аттикаит образовался в зоне гипергенеза полиметаллических сульфидно-кварцевых жил. Ассоциирующие минералы: арсенокрандаллит, арсеногояцит, конихальцит, оливинит, филипсорнит, азурит, малахит, карминит, бедантит, гётит, кварц, аллофан. Аттикаит образует сильно уплощенные в направлении [001], обычно искривленные кристаллики-чешуйки размером до  $3 \times 30 \times 80$  мкм, собранные в сфероидальные агрегаты диаметром до 0.3 мм (рис. 1, 2), нарастающие на стенки небольших ще-

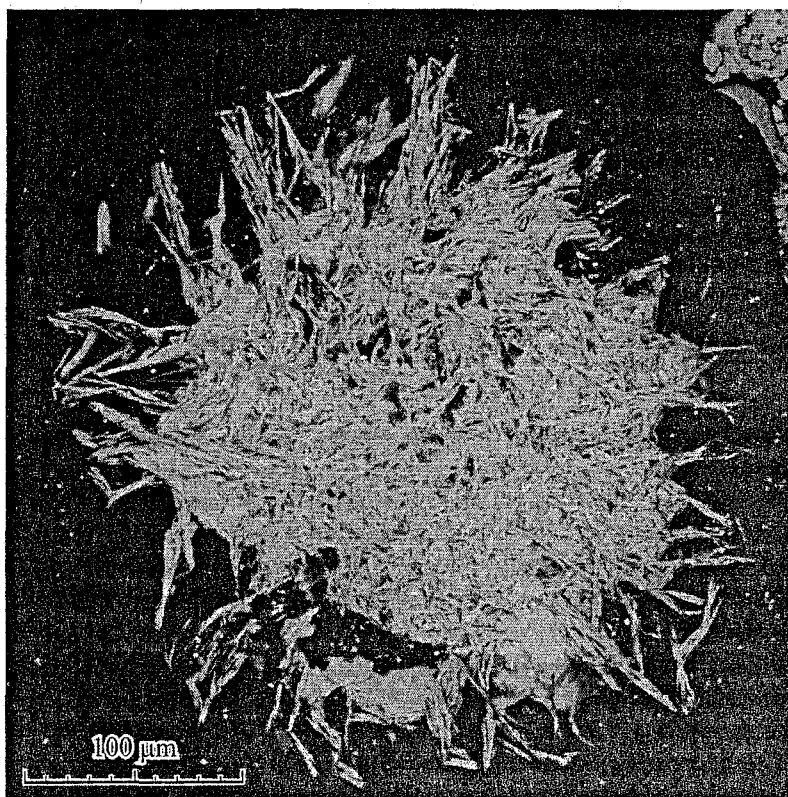


Рис. 2. Агрегат аттикаита. Аншлиф. Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 2. Aggregate of attikaite. Polished section. BSE image.

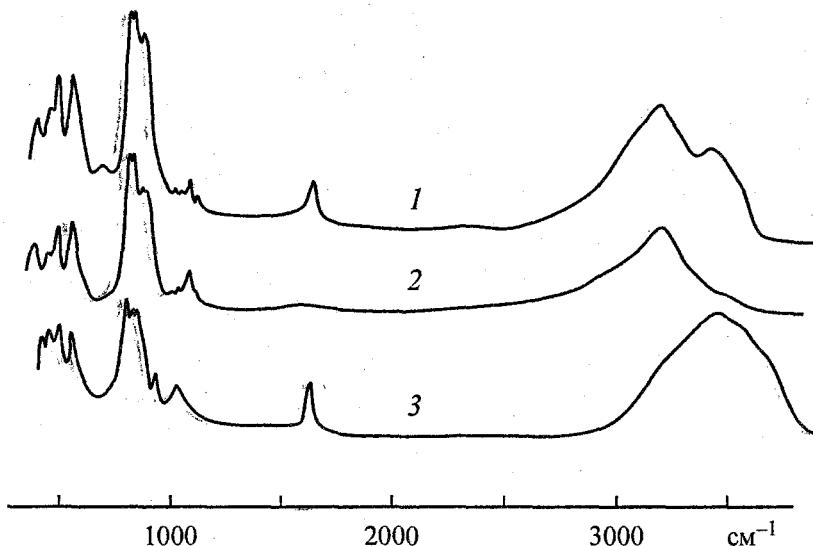


Рис. 3. ИК-спектры исходного аттикаита (1), аттикаита, прогретого при 140 °С в течение 35 мин (2), и лавендулана (3).

Fig. 3. IR spectra of initial attikaite (1), attikaite heated at 140 °C during 35 minutes (2) and lavendulan (3).

левидных полостей в окисленной руде. Чешуйки гибкие; твердость агрегатов по шкале Мооса 2—2.5. Спайность весьма совершенная, слюдоподобная по {001}. Цвет минерала голубой до зеленовато-голубого. Черта бледно-голубая.

Плотность нового минерала, измеренная методом уравнивания в тяжелых жидкостях, составляет 3.2 (2) г/см<sup>3</sup>, вычисленная — 3.356 г/см<sup>3</sup>. Заниженное значение измеренной плотности связано с рыхлостью агрегатов аттикаита, содержащих обильные микроскопические полости (рис. 2).

Волновые числа полос ИК-спектра поглощения аттикаита и их отнесение следующие (см<sup>-1</sup>; sh — плечо; w — слабая полоса; волновые числа наиболее сильных полос подчеркнуты; рис. 3): 3525sh, 3425 (О—Н-валентные колебания молекул H<sub>2</sub>O), 3180 (О—Н-валентные колебания групп OH), 1642 (деформационные колебания молекул H<sub>2</sub>O), 1120w, 1070w (валентные колебания ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>?), 1035w (валентные колебания ионов PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>?), 900sh, 874, 833, 820 (валентные колебания ионов AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), 690w, 645w (деформационные колебания ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>?), 600sh (деформационные колебания ионов PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>?), 555 (Al—O-валентные колебания?), 486, 458, 397 (комбинация валентных колебаний связей Cu—O и Ca—O и деформационных колебаний ионов AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). По ИК-спектру аттикаит наиболее близок к лавендулану и зденекиту, отличаясь от этих минералов присутствием сильных полос поглощения в диапазоне колебаний групп OH, образующих прочные водородные связи (область 3000—3300 см<sup>-1</sup>). После термостатирования образца аттикаита при температуре 140 °С в течение 35 мин полосы, относящиеся к молекулам H<sub>2</sub>O (при 3425 и 1642 см<sup>-1</sup>), исчезают, но полоса валентных колебаний групп OH при 3180 см<sup>-1</sup> сохраняется (рис. 3).

Новый минерал оптически двуосный, отрицательный;  $n_p = 1.642$  (2),  $n_m = n_g = 1.644$  (2).  $2V_{изм.} = 10$  (8)°,  $2V_{выч.} = 0$ °. Оптическая ориентировка:  $X = c$ . Дисперсия оптических осей не наблюдалась. Минерал под микроскопом бесцветный, плеохроизм отсутствует.

Химический состав аттикаита (электронно-зондовые данные, среднее из 4 анализов) приведен в табл. 1. Содержания Na, K, Sr, Ba, Zn, Ni, Pb, Bi, Sb, Si, V, Cl, F ниже пределов обнаружения для этих элементов. Эмпирическая формула минерала, рассчитанная на (O, OH, H<sub>2</sub>O)<sub>22</sub> (Z = 4), с учетом требования баланса зарядов имеет вид: Ca<sub>2.94</sub>Cu<sup>2+</sup><sub>1.93</sub>Al<sub>1.97</sub>Mg<sub>0.04</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.02</sub>[(As<sub>3.74</sub>S<sub>0.16</sub>P<sub>0.12</sub>)Σ<sub>4.02</sub>O<sub>16.08</sub>](OH)<sub>3.87</sub> · 2.05H<sub>2</sub>O. Идеализированной формуле Ca<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>(OH)<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O отвечает состав: CaO 17.51, CuO 16.55, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10.61, As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 47.83, H<sub>2</sub>O 7.50, сумма 100.00 мас. %. При этом количество H<sub>2</sub>O, относя-

Химический состав аттикаита  
Chemical composition of attikaite

Компонент	Содержание (мас. %)	Пределы содержаний	Эталон
MgO	0.17	0—0.33	MgO
CaO	17.48	16.19—18.43	Волластонит
FeO	0.12	0—0.22	Fe
CuO	16.28	15.48—17.94	Cu
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.61	9.46—11.43	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.89	0.59—1.10	LaPO <sub>4</sub>
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	45.45	44.02—47.53	As
SO <sub>3</sub>	1.39	1.15—1.72	FeS <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O*	(7.61)		
Сумма	(100.00)		

Примечание. \* Содержание воды вычислено по разности.

щееся к ОН-группам, составляет 3.75 мас. %, а количество молекулярной воды — 3.75 мас. %. Последняя величина близка к потере массы 4.3 %, зафиксированной при прогреве аттикаита в интервале от комнатной температуры до 140 °С (см. ниже).

Попытки монокристалльного рентгеновского исследования аттикаита не увенчались успехом по причине искривленности и малых размеров его индивидов. Однако близость нового минерала по рентгеновским характеристикам и физическим свойствам к арсенатам семейства лавендулана (табл. 2) позволила осуществить выбор элементарной ячейки аттикаита по порошковым данным. Проведенные эксперименты по обезвоживанию минерала (см. ниже) однозначно указали на его слоистое строение и позволили четко вычленить серию рефлексов 00 $l$  (принято за направление, перпендикулярное слоям). По результатам этих опытов, а также по аналогии с родственными арсенатами (табл. 2) был установлен и один из двух параметров ячейки, перпендикулярных [001] (он принят за  $a$ ). Используя эти данные, мы смогли вполне удовлетворительно проиндексировать дебаеграмму аттикаита (табл. 3), полученную в камере РКГ-86, специально сконструированной для фиксации отражений в малоугловой области (FeK $_{\alpha}$ -изучение, диаметр камеры 86 мм, внутренний эталон — кремний).

Согласно порошковым данным, новый минерал ромбический, параметры элементарной ячейки:  $a = 10.01$  (1) Å,  $b = 8.199$  (5) Å,  $c = 22.78$  (1) Å,  $V = 1870$  (3) Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$ . Систематические погасания указывают на возможные пространственные группы  $Pban$ ,  $Pbam$  и  $Pba2$ .

Формально индексирование рентгенограммы аттикаита могло бы быть произведено также на основе малой элементарной ячейки с параметрами:  $a = 5.004$ ,  $b = 4.097$ ,  $c = 22.76$  Å,  $Z = 1$  (возможные пространственные группы  $Pmmm$ ,  $Pmm2$  и  $P222$ ), однако из сравнения с родственными минералами (табл. 2) можно заключить, что такая ячейка крайне маловероятна. Действительно, в основе кристаллических структур подробно изученных минералов, родственных аттикаиту (а именно зденекита, эндиробертсита, кальциоэндиробертсита и манертита), лежат гетерополиэдрические слои, состоящие из тетраэдров AsO<sub>4</sub> и кластеров, образованных четырьмя или пятью полиэдрами CuO<sub>5</sub> (Cooper e. a., 1999; Cooper, Hawthorne, 2000; Зубкова и др., 2003; Zubkova e. a., 2004, 2005; Pushcharovsky e. a., 2004; Sarp, Černý, 2004). Наличие крупных структурных элементов типа кластеров Cu<sub>5</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>[As(O,OH)<sub>4</sub>]O<sub>9</sub>, описанных для эндиробертсита и кальциоэндиробертсита (Sarp, Černý, 2004), или кластеров

Сравнительные данные для аттикаита и родственных арсенатных минералов\*  
Comparative data for attikaite and related arsenate minerals

Минерал	Аттикаит	Лавендулан	Злекеит	Мапертит	Эндрибертит	Кальциозидрибертит**
Формула	$\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaCaCu}_5(\text{AsO}_4)_4\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaPbCu}_5(\text{AsO}_4)_4\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$(\text{Na,Ca})\text{Cu}_{2.75}(\text{AsO}_4)_2\text{Cl}_{0.62} \cdot 3.62\text{H}_2\text{O}$	$\text{KCaCu}_5(\text{AsO}_4)_4[\text{AsO}_2(\text{OH})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{KCaCu}_5(\text{AsO}_4)_4[\text{AsO}_2(\text{OH})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Симметрия	Ромбическая	Моноклиная	Моноклиная, псевдотетрагональная	Тетрагональная	Моноклиная	Ромбическая
Пространственная группа	$R\bar{3}m, R\bar{3}m$ или $R\bar{3}m2$	$P12_1/n1$	$P2_1/n$	$I4/mmm$	$P2_1/n$	$R\bar{3}m$
$a, \text{Å}$	10.01	10.011	10.023	10.037	9.810	19.647
$b, \text{Å}$	8.199	19.478	19.55	10.037	10.034	10.087
$c, \text{Å}$	22.78	10.056	10.023	23.797	9.975	9.963
$\beta, ^\circ$	90	90.39	90.02	90	101.84	90
$V, \text{Å}^3$	1870	1960.8	1964.6	2397.3	961.0	1974.4
$Z$	4	4	4	8	2	4
Сильные линии порошковых диаграмм: $d, \text{Å}$ ( $I, \%$ )	22.8 (100) 11.36 (60) 5.01 (90) 3.38 (50) 2.780 (70) 2.503 (50)	9.77 (100) 7.01 (40) 4.87 (50) 4.41 (40) 3.11 (70) 2.90 (20) 2.76 (20)	9.83 (100) 4.925 (60) 4.482 (50) 3.132 (90) 2.772 (40) 2.515 (50)	11.90 (100) 9.29 (60) 7.132 (50) 5.046 (60) 3.098 (80) 3.061 (70)	9.64 (100) 4.46 (40) 3.145 (50) 3.048 (40) 2.698 (40)	9.80 (50) 7.084 (70) 6.665 (60) 4.830 (70) 4.487 (90) 3.965 (60) 3.116 (100) 2.760 (90)
Оптические данные:						
$\alpha$	1.642	1.645	1.710	1.635	1.720	1.715
$\beta$	1.644	1.748	1.770	1.686	1.749	1.730
$\gamma$	1.644	1.748	1.770	1.686	1.757	1.735
$2V$ , оптический знак	$-10^\circ$	$-0^\circ$	$-0^\circ$	$-0^\circ$	$-50^\circ$	$-55^\circ$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3.355 (выч.) 3.2 (изм.)	3.59 (выч.) 3.54 (изм.)	4.16 (выч.) 4.08 (изм.)	3.14 (выч.) 3.33 (изм.)	4.01 (выч.)	3.80 (выч.) 3.9 (изм.)
Ссылка	Настоящая работа	Guillemin, 1956; Sarp, Çerný, 2004	Chiappero, Sarp, 1995; Зубкова и др., 2003	Sarp, 1996; Pushchakovsky et al., 2004	Cooper et al., 1999	Sarp, Çerný, 2004

Примечание. \* Самплит  $\text{NaCaCu}_5(\text{PO}_4)_4\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  — родственный фосфат; \*\* полнитип 20; для полнитипа 1M см. Cooper et al., 1999; параметры ячейки даны в установке авторов; слои расположены с для мапертита и аттикаита, с для лавендулана и злекеита, с для эндрибертита и кальциозидрибертита.

## Порошковые рентгеновские данные для аттикаита

## X-ray powder diffraction data for attikaite

$I_{\text{изм}}, \%$	$d_{\text{изм}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	$hkl$
100	22.8	22.78	001
60	11.36	11.39	002
10	7.61	7.593	003
90	5.01	5.005	200
10	4.55	4.582, 4.556	202, 005
10	4.09	4.099	020
50	3.38	3.394, 3.369	123, 205
10	3.12	3.141, 3.116	221, 215
10	3.06	3.063, 3.055	311, 222
10	2.906	2.915, 2.895	125, 117
70	2.780	2.786	026
30	2.682	2.684	126
50	2.503	2.503	400
20	2.292	2.291	404
10b	2.25	2.259, 2.250, 2.241	209, 325, 317
10b	2.08	2.089, 2.079, 2.073	406, 332, 2.0.10
10b	1.98	1.984, 1.982, 1.979, 1.978, 1.978	407, 334, 043, 229, 142
10b	1.93	1.934, 1.934, 1.931, 1.929, 1.928	138, 425, 237, 044, 417
10	1.738	1.741, 1.741, 1.739	341, 239, 419
20	1.666	1.670, 1.669, 1.668, 1.664, 1.664	344, 517, 600, 601, 048
15	1.570	1.573, 1.571, 1.571, 1.568	149, 614, 442, 2.3.11
15	1.511	1.512, 1.512	4.0.12, 0.2.14

$\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_4\text{ClO}_n$ , присутствующих в манертите и зденеките (Зубкова и др., 2003; Pushcharovsky e. a., 2004), несовместимо с малой ячейкой, в которой  $a = 5.004 \text{ Å}$  и  $b = 4.097 \text{ Å}$ .

В кластерах этого типа один из пяти полиэдров  $\text{CuO}_5$  характеризуется увеличенными расстояниями  $\text{Cu—O}$  по сравнению с четырьмя остальными. По аналогии со структурно изученными минералами семейства лавендулана можно предположить, что аттикаит содержит кластер  $\text{Cu}_2\text{Al}_2\text{Ca}(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})\text{O}_n$ , в котором атом кальция находится в позиции с увеличенными расстояниями катион—анион. В этом случае остальные два атома  $\text{Ca}$  (из трех, присутствующих в идеализированной формуле нового минерала), скорее всего, располагаются в межслоевых позициях, подобно  $\text{K}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Cd}$  и  $\text{Pb}$  в других представителях этого семейства (табл. 2). Пониженное значение параметра  $b$  элементарной ячейки аттикаита по сравнению с родственными арсенатами, по-видимому, связано с замещением двух ионов  $\text{Cu}^{2+}$  ионами  $\text{Al}^{3+}$ , имеющими существенно меньший радиус. Несмотря на указанные различия, объемы элементарных ячеек минералов, перечисленных в табл. 4, практически соизмеримы: для всех минералов, кроме манертита, объем ячейки кратен  $960 \pm 30 \text{ Å}^3$ , а для манертита удвоенный объем ячейки кратен  $959 \text{ Å}^3$ .

Принимая во внимание присутствие слабосвязанных молекул воды в межслоевом пространстве родственных аттикаиту зденекита, лавендулана и манертита — арсенатов со слоистыми структурами, был проведен ряд экспериментов по прогреву нового минерала. За основу были взяты хорошо разработанные для водных слоистых силикатов (сметитов, смешанослойных минералов и др.) методики термического обезвожи-

Порошковые рентгеновские данные для аттикаита, прокаленного при 128 °С в течение 30 мин

X-ray powder diffraction data for attikaite heated at 128 °C during 30 minutes

$I_{\text{изм}}, \%$	$d_{\text{изм}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	$hkl$
80	19.1	18.77	001
90	9.32	9.385	002
100	5.01	5.008	200
40	4.39	4.418	202
30	4.10	4.106	020
70	3.75	3.762, 3.754	022, 005
20	3.57	3.530	213
80	3.43	3.433, 3.424	023, 204
40	3.14	3.131	221
40	2.970	3.008, 3.004, 2.953	222, 205, 124
30	2.841	2.832	223
70	2.788	2.806, 2.773, 2.771	116, 313, 025
70	2.675	2.681, 2.670	007, 125
10	2.563	2.566	321
50	2.503	2.504	400
40	2.375	2.383, 2.376, 2.364	231, 411, 207
10	2.161	2.160	135
20	2.083	2.086, 2.084, 2.083	009, 422, 405
30	1.895	1.902, 1.900, 1.890	416, 240, 241
40	1.783	1.789, 1.786, 1.773	237, 417, 145
30	1.720	1.719, 1.719, 1.719	342, 434, 2.1.10
40	1.670	1.672, 1.669	427, 600
10	1.614	1.617, 1.616, 1.615, 1.615, 1.613	530, 2.2.10, 2.0.11, 151, 603
60	1.574	1.576, 1.575, 1.575, 1.573, 1.573, 1.572	0.2.11, 517, 239, 419, 604, 338

вания, позволяющие, в частности, оценить степень уменьшения базального параметра элементарной ячейки при потере межслоевой воды.

Термостатирование аттикаита при умеренных температурах (128—140 °С) в течение 30—35 мин приводит к уменьшению массы твердого остатка на 4.3 %, что приблизительно соответствует потере двух молекул воды на формулу. ИК-спектр прогретого образца показывает отсутствие молекул  $\text{H}_2\text{O}$  при сохранении групп  $\text{OH}$  (рис. 3). Дебаеграмма прогретого образца аттикаита, полученная в той же камере РКГ-86 (табл. 3), содержит практически такой же набор отражений, что и порошковая диаграмма исходного образца (табл. 4), но межплоскостные расстояния большинства рефлексов с ненулевыми значениями  $l$  на ней оказываются уменьшенными. Наиболее сильно сдвигаются в сторону уменьшения после прогрева образца отражения серии  $00l$ , умеренные сдвиги наблюдаются для серий  $h0l$ ,  $0kl$  и  $hkl$ , тогда как положения рефлексов с индексами  $h00$  и  $0k0$  не изменяются. Расчет дает следующие параметры элементарной ячейки прогретого аттикаита:  $a = 10.016$  (5),  $b = 8.212$  (5),  $c = 18.77$  (1) Å,  $V = 1544$  Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$ . Видно, что «базальный» параметр  $c$  уменьшается после прогрева приблизительно на 4 Å, а два других параметра остаются практически неизменными.

Таким образом, совокупность термогравиметрических, ИК-спектроскопических и рентгеновских данных, полученных в результате эксперимента по термическому обезвоживанию аттикаита, однозначно указывает на его слоистую структуру и на на-

хождение слабосвязанной молекулярной воды в межслоевом пространстве, что еще раз подчеркивает родство нового минерала с арсенатами семейства лавендулана, перечисленными в табл. 4.

Сходимость состава, оптических параметров и плотности аттикаита по критерию Гладстона—Дейла хорошая: для вычисленной плотности  $1 - (K_p/K_C) = -0.006$ ; для измеренной плотности  $1 - (K_p/K_C) = -0.055$ .

Эталонный образец аттикаита находится на хранении в Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве, регистрационный номер 3435/1.

Авторы благодарны Х. Брайту (Helmut Braith) и Х. Сνιαшеку (Harry Sniasek) за предоставленные для исследований образцы, а также Л. А. Паутову за помощь при изучении нового минерала методом сканирующей электронной микроскопии.

### Список литературы

*Зубкова Н. И., Пушчаровский Д. Ю., Сарп Х., Тут С. Дж., МакЛин Э. Дж.* Кристаллическая структура зденекита  $\text{NaPbCu}_5(\text{AsO}_4)_4\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  // Кристаллография. **2003**. Т. 48. С. 1006—1011.

*Chiappero P.-J., Sarp H.* Zdenekite, a new mineral from the Cap Garonne mine // Eur. J. Mineral. **1995**. Vol. 7. P. 553—558.

*Cooper M. A., Hawthorne F. C.* Highly undersaturated anions in the crystal structure of andyrobertsite — calcio-andyrobertsite, a doubly acid arsenate of the form  $\text{K}(\text{Cd},\text{Ca})[\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_4\{\text{As}(\text{OH})_2\text{O}_2\}](\text{H}_2\text{O})_2$  // Canad. Miner **2000**. Vol. 38. P. 817—830.

*Cooper M. A., Hawthorne F. C., Pinch W. W., Grice J. D.* Andyrobertsite and calcio-andyrobertsite: two new minerals from the Tsumeb mine, Tsumeb, Namibia // Miner. Record. **1999**. Vol. 30. P. 181—186.

*Guillemin C.* Contribution a la minéralogie des arséniates, phosphates et vanadates de cuivre. I. Arséniates de cuivre // Bull. Minér. **1953**. Vol. 79. P. 7—95.

*Pushcharovsky D. Yu., Zubkova N. I., Teat S. J., Maclean E. J., Sarp H.* Crystal structure of mahnertite // Eur. J. Miner. **2004**. Vol. 16. P. 687—692.

*Sarp H.* La mahnertite,  $(\text{Na}, \text{Ca})\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , un nouveau minéral de la mine Cap Garonne, Var (France) // Arch. Sci. Genève. **1996**. Vol. 49/2. P. 119—124.

*Sarp H., Černý R.* Calcio-andyrobertsite-2O,  $\text{KCaCu}_5(\text{AsO}_4)_4[\text{AsO}_2(\text{OH})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : its description, crystal structure and relation with calcio-andyrobertsite-2M // Eur. J. Miner. **2004**. Vol. 16. P. 163—169.

*Zubkova N. I., Pushcharovsky D. Yu., Teat S. J., Mac Lean E. J., Sarp H.* Crystal structures and topology of two copper arsenates: zdenekite and mahnertite. Abstr. of the 22<sup>nd</sup> Eur. Crystallogr. Meeting. Budapest, Hungary, **2004**. P. 200.

*Zubkova N. I., Pushcharovsky D. Yu., Teat S. J., Mac Lean E. J., Sarp H.* Crystal structures and topology of new and rare arsenates. Abstr. of the XX Congr. of the Intern. Union of Crystallogr. Congress and General Assembly. Florence, Italy, **2005**. P. 16.

Поступила в редакцию  
11 октября 2006 г.