

УДК 553.491:553.48

## Хараэлахит ( $\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni}$ )<sub>9</sub> $\text{S}_8$ — новый сульфид платины, меди и свинца \*

А. Д. Генкин, Т. Л. Евстигнеева, Л. Н. Вяльсов, И. П. Лапутина

Новый минерал состава ( $\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni}$ )<sub>9</sub> $\text{S}_8$  обнаружен в прожилковых экзоконтактовых халькопиритовых рудах месторождения Талнахское. Он образует в халькопирите, ассоциирующем с борнитом и миллеритом, тонкие (20–30 мкм) каймы, нарастающие на брэггит-куперитовом срастании. В отраженном свете сероватый с коричневато-сиреневым оттенком. Двутрение слабое. Анизотропия отчетливая с цветными эффектами от розовато-силеневого до синеватого. Отражение в воздухе (%) для  $\lambda=580$  нм:  $R_g=42,8$ ;  $R_m=40,3$ ;  $R_p=37,9$ . Химический анализ, выполненный с помощью электронного зонда, рассчитывается на формулу ( $\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni}$ )<sub>9</sub> $\text{S}_8$ . Ромбическая сингония. Параметры элементарной ячейки  $a \sim 0,971$  нм,  $b \sim 0,883$ ,  $c \sim 1,452$  нм. Основные линии рентгенограммы: 6,30 (2) (110), 3,04 (4) (310), 2,80 (10) (314, 030), 1,813 (5) (016), 1,518 (2) (50.12), 1,251 (2) (268), 1,026 (2) (50.24, 184). Минерал назван по названию плато Хараэлах.

Новый сульфид платины, меди и свинца, названный хараэлахитом (kharaelakhite) по имени плато Хараэлах, вблизи которого расположено месторождение Талнахское, обнаружен в прожилковых экзоконтактовых халькопиритовых рудах рудника Комсомольский.

Образец руды, содержащий новый минерал, представлен ассоциацией преобладающего халькопирита с борнитом и миллеритом. Хараэлахит встречается среди халькопирита в срастании с брэггитом и куперитом. Основную часть этих срастаний слагает куперит с тонкой каймой брэггита, заканчивающейся отдельными вытянутыми кристаллами брэггита. Хараэлахит нарастает на брэггит в виде тонкой каймы (рис. 1) и удлиненных кристаллов максимального размера  $30 \times 120$  мкм. В срастании с хараэлахитом и в халькопирите наблюдаются зерна самородного серебра (рис. 2).

В отраженном свете в срастаниях с брэггитом и халькопиритом хараэлахит сероватый со слабым коричневато-лиловым оттенком. Слабо двутрение. При скрещенных николях отчетливо анизотропен с цветными эффектами анизотропии в розовато-силеневых и синих тонах. Спектры отражения хараэлахита измерены на микроспектрофотометре МСФ-10. В качестве опорных эталонов использовались кремний и (W, Ti) С. Данные по дисперсии  $P$  минерала приведены в табл. 1, спектры отражения показаны на рис. 3. По результатам фотометрических измерений хараэлахит оптически двусочный, положительный. Величина  $(R_g - R_m) > (R_m - R_p)$ . Как видно из рис. 3, характер дисперсии спектров отражения минерала аномальный. Для показателей  $R_m$  и  $R_p$  наблюдается четко выраженный минимум при 500 нм и широкое плато в области 640–740 нм. Основной максимум для показателя  $R_g$  лежит, по-видимому, в ближней ИК-области спектра.

Состав хараэлахита изучен с помощью электронного зонда MS-46 «Самеса». Ускоряющее напряжение 20 кВ. В качестве эталонов использовались  $\text{CuFeS}_2$  (на серу, медь и железо),  $\text{PbS}$  и  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  (на серу), металлическая платина и  $\text{PtAs}_2$  (на платину), металлический палладий (на палладий),  $\text{PbS}$  (на свинец), металлический никель и  $\text{NiAs}$  (на никель). При расчете истинных концентраций введены поправки на «мертвое» время регистрирующей системы, атомный номер, поглощение, характеристическую флюресценцию. Поправки рассчитаны по программе «ПУМА» на ЭКВМ «Hewlett-Packard 9830 A» [1].

\* Минерал рассмотрен и утвержден Комиссией по новым минералам и названиям минералов (КНМ) Всесоюзного минералогического общества 14 июля 1983 г. и Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 30 декабря 1983 г.

Анализ четырех зерен минерала показал, что его главными компонентами являются платина, медь, свинец, железо, никель и сера (табл. 2). Состав минерала довольно постоянный; выявлены лишь небольшие вариации содержаний слагающих его элементов. Расчет анализов минерала, исходя из 17 атомов, позволяет представить идеальную формулу минерала как  $(\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ . Соотношение  $\text{Me}:\text{S}$  в ха-

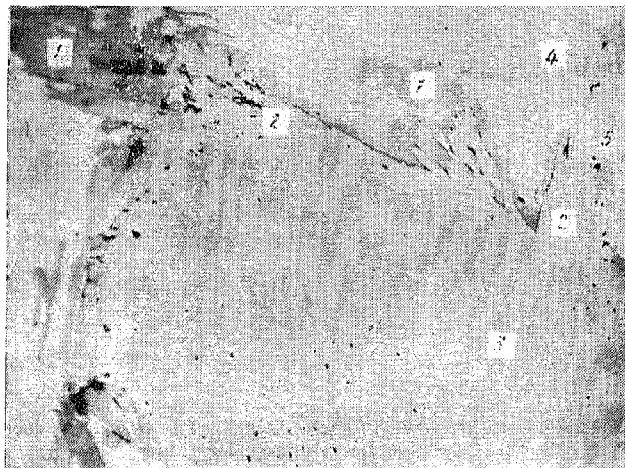


Рис. 1. Хараэлахит (1), нарастающий в виде каймы на брэггит (2), окаймляющий зерно куперита (3); 4 — халькопирит; 5 — миллерит. Полир. шлиф. Ув. 160.

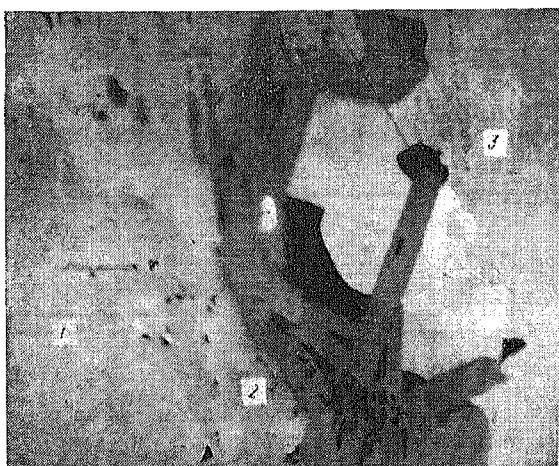


Рис. 2. Удлиненные кристаллы хараэлахита (темно-серое) и нарастающее на них самородное серебро (ярко-белое): 1 — куперит; 2 — брэггит; 3 — халькопирит. Полир. шлиф. Ув. 350.

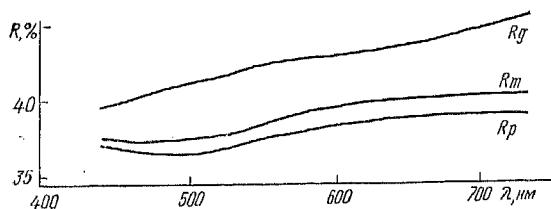


Рис. 3. Спектры отражения хараэлахита в диапазоне 440—740 нм.

раслахите такое же, как в пентландите и других соединениях со структурой типа  $\pi$ -фазы, характеризующихся формулой  $\text{Me}_8\text{S}_8$ . Формула минерала может быть представлена также в виде  $(\text{Pt}, \text{Pb}, \text{Cu}, \text{Fe}, \text{Pd})_8\text{NiS}_8$  или  $(\text{Pt}, \text{Pb}, \text{Pd})_4(\text{Cu}, \text{Fe})_4\text{NiS}_8$ , однако в настоящее время для этого не достаточно данных.

Анализы (табл. 3) находящихся в срастании с хараэлахитом брэггита и куперита показывают значительные колебания содержаний платины и палладия и преобладание последнего в составе брэггита.

Таблица 1. Коэффициенты отражения хараелахита в видимой части спектра

Показатель	$\lambda, \text{ нм}$							
	440	460	480	500	520	540	560	580
$R_g$	39,6	40,3	40,9	41,4	41,8	42,2	42,5	42,8
$R_m$	37,6	37,5	37,5	37,6	37,9	38,3	38,9	40,3
$R_p$	37,1	36,8	36,6	36,6	36,8	37,1	37,5	37,9

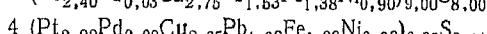
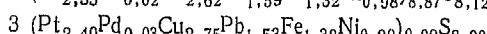
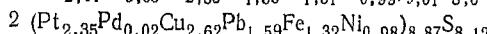
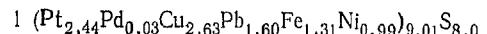
  

Показатель	$\lambda, \text{ нм}$							
	600	620	640	660	680	700	720	740
$R_g$	43,0	43,3	43,7	44,1	44,4	44,8	45,3	45,8
$R_m$	40,6	40,8	40,9	41,0	41,1	41,2	41,3	41,3
$R_p$	38,3	38,6	38,8	38,9	39,0	39,1	39,1	39,0

Таблица 2. Состав хараелахита, по данным микрорентгеноспектрального анализа

Порядковый номер анализа	Элементы						Сумма
	Pt	Pd	Cu	Pb	Fe	Ni	
1	34,70	0,20	12,20	24,20	5,35	4,24	18,70 99,59
2	34,10	0,12	12,40	24,50	5,50	4,30	19,40 100,32
3	34,50	0,24	12,90	23,40	5,70	3,90	18,90 99,54
4	32,70	0,20	12,70	25,00	5,80	4,40	19,70 100,50

Кристаллохимические формулы



Материал для рентгеновского изучения в связи с очень малым размером зерен минерала отобран с помощью пробоотборника (конструктор Л. Н. Вяльсов). Было приготовлено три образца («резиновых шарика»). Рентгенограммы со всех трех образцов оказались практически идентичными по основным линиям (табл. 4). Возможно, в образцы попало небольшое количество халькопирита, поэтому отражения с  $d_a \sim 0,304, 0,1854, 0,1591$  и  $0,1077$  могут иметь несколько завышенные интенсивности.

Рентгенограммы хараелахита сходны с таковыми фаз пентландитового типа, однако явно выраженная оптическая анизотропия и оптическая двусосность не позволяет считать структуру минерала непосредственно кубической типа  $\pi$ -фазы.

Рентгенограмму хараелахита удалось проиндцировать в ромбической ячейке с  $a = 0,9713 \pm 0,0005$  нм,  $b = 0,8333 \pm 0,0005$ ,  $c = 1,450 \pm 0,01$  нм. Значительное растяжение ячейки минерала по оси « $c$ » связано, скорее всего, с вхождением в структуру крупных атомов свинца и палладия. Как видно из данных табл. 4, сходимость  $d_{\alpha\text{изм}}$  и  $d_{\alpha\text{расч}}$  достаточно хорошая\*. Окончательно отбросить линии, совпадающие с межплоскостными расстояниями 0,304, 0,1854, 0,1591 и 0,1077 нм халькопирита, пока не представляется возможным, так как они индицируются и в предложенной ромбической ячейке. Судя по отсутствию закономерных погасаний в наборе  $hkl$ , возможна одна из трех пространственных групп:  $Pmm$ ,  $Pmm2$  или  $P222$  (дифракционный класс  $Pmm$ ).

\* Индицирование проведено до  $\left| \frac{1}{d_{\alpha\text{изм}}} - 2 - \frac{1}{d_{\alpha\text{расч}}} - 2 \right| \leq 0,003 \text{ } 1/\text{A}^2$ .

О возможной близости структуры хараэлахита к структурам типа  $\pi$ -фазы (пентландит) свидетельствуют следующие соображения: а) формула хараэлахита хорошо рассчитывается исходя из общего количества атомов 17 (68) (на формульную единицу) при соотношении  $\text{Me} : \text{S} = 9 : 8$  (см. табл. 2); б) если «кубизировать» пространственную группу  $Pm\bar{3}m$  мы получим последовательно группы  $Pm\bar{3}$ ;  $Fm\bar{3}$  и  $Fm\bar{3}m$ . Снижение симметрии от кубической до ромбической при упорядочении в структурном типе  $\pi$ -фазы может привести к возможно упорядоченному размещению атомов в ромбической ячейке хараэлахита (для состава  $[(\text{Cu}_{10,54}\text{Pt}_{9,76}\text{Pb}_{6,41}\text{Fe}_{5,26}\text{Pd}_{0,10})_{32,07}\text{Ni}_{3,96}]_{36,03}\text{S}_{32,00}$ ).

Таблица 3. Химический состав брэггита и куперита, ассоциирующих с хараэлахитом

Элементы	Брэггит		Куперит
Pt	38,83	44,81	79,83
Pd	32,50	27,92	3,89
Ni	8,44	6,53	1,67
S	20,21	19,79	14,93
Сумма	99,98	99,05	100,32

Атомы Позиции в структуре  $\pi$ -фазы

$$4\text{Ni} \quad 4(b) - \left( \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right)$$

$$32\text{S} \quad 8(c) - \left( \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4} \right)$$

$$24(e) - (x00) \left( x \sim \frac{1}{4} \right)$$

$$\begin{aligned} & \text{Позиции в структуре хараэлахита} \\ & 1(h) - \left( \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right), 1(d) - \left( \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2} \right), \\ & 1(f) - \left( \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0 \right), 1(g) - \left( 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right) \\ & 8(k) - (xyz) \left( x \sim y \sim z \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(i) - (x00) \left( x \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(r) - \left( 0 \frac{1}{2} z \right) \left( z \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(s) - \left( \frac{1}{2} 0z \right) \left( z \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(t) - \left( \frac{1}{2} \frac{1}{2} z \right) \left( z \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(n) - \left( 0y \frac{1}{2} \right) \left( y \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(o) - \left( \frac{1}{2} y0 \right) \left( y \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(p) - \left( \frac{1}{2} y \frac{1}{2} \right) \left( y \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(q) - (00z) \left( z \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(j) - \left( x0 \frac{1}{2} \right) \left( x \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(k) - \left( x \frac{1}{2} 0 \right) \left( x \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(m) - (0y0) \left( y \sim \frac{1}{4} \right) \\ & 2(l) - \left( x \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right) \left( x \sim \frac{1}{4} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (6\text{Pb}+ \\ & +10\text{Pt}+ \\ & +5\text{Fe}+ \\ & +11\text{Cu}) \quad 32(f) - (xxx) \left( x \sim \frac{1}{8} \right) \quad \text{Четыре позиции } 8(-) - (xyz): \\ & 1) x \sim \frac{3}{8} y \sim \frac{5}{8} z \sim \frac{1}{8}; \text{ могут объединяться по 2} \\ & 2) x \sim \frac{1}{8} y \sim \frac{3}{8} z \sim \frac{5}{8}; (6\text{Pb}+10\text{Pt}=16) \\ & 3) x \sim \frac{3}{8} y \sim \frac{1}{8} z \sim \frac{5}{8} \\ & 4) x \sim \frac{1}{8} y \sim \frac{1}{8} z \sim \frac{1}{8} (5\text{Fe}+11\text{Cu}=16) \end{aligned}$$

Таблица 4. Результаты расчета дифракции хараелахита

Хараелахит				Халькопирит		
I	$d_{\alpha_{\text{изм}}}$ , нм	$hkl$	$d_{\alpha_{\text{выч}}}$ , нм	I	$d_{\alpha}$ , нм	$hkl$
1	0,725	004	0,725			
2	0,630	110	0,632			
1	0,579	104	0,581			
0,5	0,476	114	0,477			
0,5	0,364	008	0,363			
		214	0,363			
2	0,313	220	0,315			
4	0,304	310	0,302	10	0,303	112
0,5	0,291	208	0,291			
		224	0,290			
10	0,280	314	0,279			
		030	0,278			
2	0,267	130	0,267	0,5	0,263	020 004
2	0,259	320	0,259			
0,5	0,240	00.12	0,242			
		230	0,241			
		228	0,238			
1	0,234	410	0,236			
		10.12	0,235			
2	0,223	414	0,222			
0,5	0,217	20.12	0,216			
1	0,204	140	0,204			
0,5	0,1964	12.12	0,204			
		418	0,1961			
				4	0,1865	220
3	0,1854	244	0,1851	8	0,1854	024
5	0,1813	00.16	0,1814			
3	0,1728	11.16	0,1743			
		40.12	0,1713			
2	0,1592	33.12	0,1589	6	0,1591	132
1	0,1575	250	0,1576	2	0,1573	116
		22.16	0,1573			033
0,5	0,1548	614	0,1552			
		444	0,1545			
2	0,1518	50.12	0,1514	0,5	0,1518	224
0,5	0,1499	24.12	0,1501			
		13.16	0,1500			
1	0,1442	258	0,1446			
1	0,1430	41.16	0,1431			
1	0,1371	42.16	0,1372			
		21.20	0,1371			
1	0,1330	53.12	0,1330	1	0,1323	040
		61.12	0,1328			
1	0,1300	708	0,1296	0,5	0,1303	008
2	0,1251	268	0,1253			
				1	0,1214	332
				3	0,1205	136 143
1	0,1190	44.16	0,1192			
		71.12	0,1191			
		070	0,1190			
		25.16	0,1190			
		464	0,1189			
1	0,1170	26.12	0,1169			
1	0,1162	50.20	0,1162			
		21.24	0,1162			
		650	0,1161			
		62.16	0,1160			
1	0,1076	26.16	0,1076	6	0,1077	244
				3	0,1069	228
1	0,1057	914	0,1059			
1	0,1044	64.16	0,1045			
		36.16	0,1044			
		664	0,1043			
		27.12	0,1043			

Продолжение табл. 4

Хараэлахит				Халькопирит		
<i>I</i>	$d_{\alpha_{\text{изм}}}$ , нм	<i>hkl</i>	$d_{\alpha_{\text{выч}}}$ , нм	<i>I</i>	$d_{\alpha}$ , нм	<i>hkl</i>
2	0,1026	50.24 184	0,1026 0,1025	2	0,1018	152

Примечание. РКД-57,3;  $\lambda_{\text{Fe}}$  ( $\beta$ -линии отфильтрованы расчетным путем; асимметрическая закладка пленки).

Для проверки этого предположения необходимо детальное структурное исследование, которое может быть проведено только на синтезированном материале. В настоящее время ведутся попытки синтеза искусственного аналога хараэлахита.

Рентгеновская плотность хараэлахита состава  $(\text{Cu}_{10.54}\text{Pt}_{9.76}\text{Pb}_{6.41}\text{Fe}_{8.26}\text{Pd}_{0.10}\text{Ni}_{3.96}) \times \times \text{S}_{32.00}$  равна 7,78 г/см<sup>3</sup>. Сравнительно высокое значение плотности для сульфида связано с оригинальностью структуры типа  $\pi$ -фазы: существование кластеров из восьми серных тетраэдров обеспечивает плотное заполнение пространства при высоком содержании платины и свинца, наиболее тяжелых атомов.

Результаты исследования состава и рентгеновских особенностей хараэлахита свидетельствуют о необычности этого минерала. Свинец в сульфидах платины до этого не был обнаружен в больших количествах. Небольшие содержания свинца отмечены в некоторых анализах брэггита (0,93 %) и куперита (1,40 %) [2].

Возрастные соотношения хараэлахита с куперитом и брэггитом показывают, что эти минералы образовались в последовательности куперит  $\rightarrow$  брэггит  $\rightarrow$  хараэлахит. В состав наиболее поздно кристаллизующегося хараэлахита, развивающегося в халькопирите в виде метакристаллов, вошли медь, свинец и железо, отсутствующие в куперите и брэггите.

Эталонные образцы хараэлахита находятся в Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана АН СССР и в лаборатории минерографии ИГЕМ АН СССР.

**SUMMARY.** A new mineral of  $(\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$  composition is found in veined exocontact chalcopyrite ores of the Talnakhian deposit. It forms thin (20-30  $\mu\text{m}$ ) edges accreted on braggite-cooperite intergrowth in chalcopyrite, associated with bornite and millerite. It is greyish with brownish-lilac tint in the reflected light. Weak bi-reflection. Distinct anisotropy with coloured effects from pink-lilac to bluish. Reflection in the air (%) for  $\lambda=580$  nm:  $R_g=42.8$ ;  $R_m=40.3$ ;  $R_p=37.9$ . Chemical analysis carried out by means of electron probe is calculated for the  $(\text{Pt}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$  formula. Rhombic syngony. Parameters of an elementary cell are as follows:  $a \sim 0.971$  nm,  $b \sim 0.833$  nm,  $c \sim 1.452$  nm. Basic lines of the X-ray pattern: 6.30 (2) (110), 3.04 (4) (310), 2.80 (10) (314. 030), 1.813 (5) (0.16), 1.518 (2) (50. 12), 1.251 (2) (268), 1.026 (2) (50.24, 184). Mineral is called from the plateau name Haraelakh.

- Боронихин В. А., Цепин А. И. Программа универсальная для расчета поправок и статистической обработки результатов текущих измерений при количественном рентгеноспектральном микроанализе («ПУМА»).—В кн.: Аппаратура и методы рентгеноского анализа. Л., 1980, с. 204—217.
- Schwellnus J. S. I., Hiemstra S. A., Gasparini E. The Merensky reef at the Atok Platinum mine and its environs.—Econ. Geol., 1976, 71, N 6, p. 249—260.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР, Москва

Поступила 28.05.84