

О МИНЕРАЛАХ ГРУППЫ ШТЕРНБЕРГИТА

К группе штернбергита или, по определению Брейтгаупта, к группе серебряного колчедана в настоящее время с различной степенью достоверности относят 4 минерала: штернбергит, аргентопирит, аргиропирит и фризент.

Первым из названных минералов был открыт штернбергит, обнаруженный Хайдингером в Яхимове в 1826 г. [1]. Состав минерала был определен как $AgFe_2S_3$. Спустя 40 лет в рудах того же месторождения Вальтерсхаузенном был установлен минерал аналогичного состава, но с иным, чем у штернбергита обликом кристаллов [2]. В 1877 г. Вайсбахом был описан аргиропирит из Фрейберга [3], а в 1878 г. Врба открыл в Яхимове фризент [4]. Основанием для выделения двух последних минералов в качестве самостоятельных минеральных видов послужили, прежде всего, отличия их химических составов от штернбергита и аргентопирита. Для аргиропирита была предложена формула $Ag_3Fe_7S_{11}$, а для фризента — $Ag_2Fe_5S_8$.

Согласно данным первых исследователей, минералы внутри группы довольно четко различаются по морфологии кристаллов. Так, для штернбергита характерны тонкопластинчатые кристаллы, а для аргентопирита — призматические, вытянутые по оси *c*. Кристаллы аргиропирита, по Вайсбаху, имеют форму укороченных призм, кристаллы фризента — толстотаблитчатые.

Природа минералов этой группы, за исключением штернбергита, требует уточнения. Для аргентопирита в литературе известны два варианта формул: $AgFe_3S_4$ и $AgFe_2S_3$ [5]. Последняя формула подтверждается рентгеноструктурными исследованиями Мёрдоча и Берри [6], а также микронзондовыми исследованиями Квельмальца [7].

Таблица 1

Величины межплоскостных расстояний минералов группы штернбергита

Аргентопирит, обр. 29272		Штернбергит, обр. 47397		"Фризент", обр. 47899	
<i>l</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>d</i>
3	5,81	3	4,75		
1	5,68	10	4,25	8	4,34
2	4,67	8	3,25	10	3,25
2	4,30	8	2,79	8	2,80
5	3,624	5	2,64	6	2,65
10	3,341	3	2,36	1	2,15
10	3,318	5	1,945	5	1,945
1	3,226	5	1,895	5	1,907
4	3,110	7	1,79	4	1,795
3	2,902	5	1,66	2	1,658
3	2,878	3	1,59		
2	2,291				
1	2,523				
3	2,434				
1	2,323				
1	2,276				
1	2,178				
1	2,120				
1	2,040				
1	2,017				
1	1,988				
5	1,931				
4	1,908				
1	1,890				
2	1,835				
1	1,810				
1	1,790				

Условия съемки: $\lambda = Cu, Ni$ -фильтр; 40 кВ — 4 мА, $D = 57,3$; $d = 0,2$ мм.

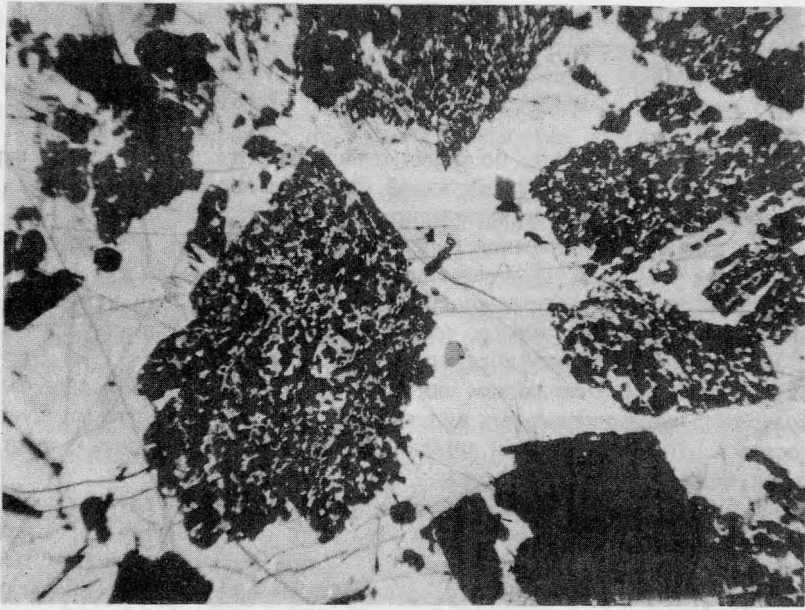


Рис. 1. Замещение фризита (1) пиритом (2). Аншлиф. Увел. 11

что дает основание рассматривать аргентопирит как полиморфную модификацию штернбергита. Сведения об аргиропирите и фризите более ограничены и менее определены. Ряд исследователей (6)–(8) полагают, что отличия химических составов аргиропирита и фризита от штернбергита связаны с примесью в анализируемых пробах пирита, постоянно наблюдаемого вместе с этими минералами. При этом Мёрdoch и Берри [6] полагают, что аргиропирит можно рассматривать как параморфозу штернбергита по аргентопириту, а фризит, согласно Пикоку [8], по-видимому, представлен агрегатом продуктов его распада (штернбергита и пирита) по схеме: $\text{Ag}_2\text{Fe}_5\text{S}_8 \rightarrow 2\text{AgFe}_2\text{S}_3 + \text{FeS}_2$.

Исследование минералов группы штернбергита выполнено нами на образцах из коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана АН СССР. Среди них образцы штернбергита и аргентопирита из различных месторождений и образец фризита из Яхимова — места единственной находки этого минерала.

Диагностика минералов проводилась на основе данных дебаеграмм, полученных микрометодом. Величины межплоскостных расстояний штернбергита и аргентопирита, приведенные в табл. 1, хорошо согласуются с эталонными значениями [9]. Рентгенограмма фризита из Яхимова полностью отвечает таковой штернбергита (табл. 1), что дает основание считать исследованный нами минерал штернбергитом, и лишь условно для удобства изложения называть его ниже "фризитом".

Состав минералов исследовался на микрозонде, что гарантировало однородность анализируемого материала. Это тем более важно, что во всех исследованных образцах, как показало их микроскопическое исследование, минералы группы штернбергита в той или иной степени замещены пиритом (рис. 1). Определения выполнены в рентгено-спектральной лаборатории ИГЕМ В. Маловым и на кафедре физики твердого тела МГУ Г.Н. Ронами. Условия эксперимента: ускоряющее напряжение 15 (для Ag и S) и 20 кВ (для Fe), диаметр зонда 1 мкм, эталоны — чистые металлы (на Ag и Fe) и PbS (на S). Измерение велось для S и Fe по линии K_{α} , для Ag — по L_{α} . Результаты рентгено-спектральных анализов штернбергита, аргентопирита и "фризита" приведены в табл. 2. Согласно этим анализам состав всех исследованных образцов, в том числе и "фризита" практически одинаков и отвечает формуле AgFe_2S_3 (заниженные значения S в некоторых случаях, по-видимому, связаны с частичным выгоранием ее при микроанализе).

Сведения об оптических свойствах минералов группы штернбергита немногочисленны и несколько противоречивы [10–13], что, вероятно, является следствием нечеткого разграничения на минеральные виды внутри группы. Наиболее полно и достоверно охарактеризован лишь штернбергит.

Все исследованные нами минералы обладают под микроскопом весьма близкими оптическими свойствами, что делает практически невозможной их индивидуальную

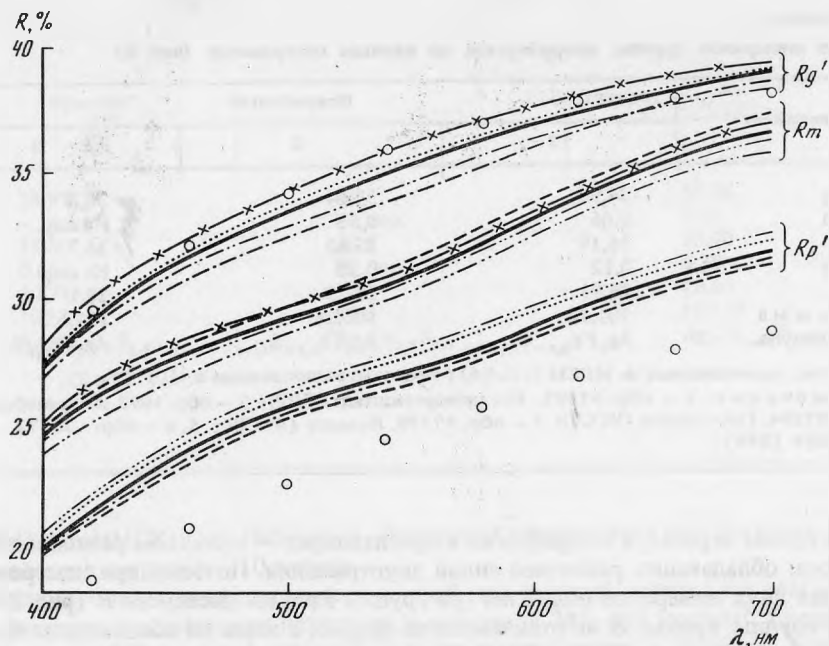


Рис. 2. Спектры отражения (R) разноориентированных зерен штернбергита (обр. 47397)

Толстые линии — средние значения R_g' , R_m , R_p' ; тонкие линии с разными обозначениями — кривые дисперсии, полученные на различно двуотражающих зернах. Кружки с точкой — эталонные значения [12]

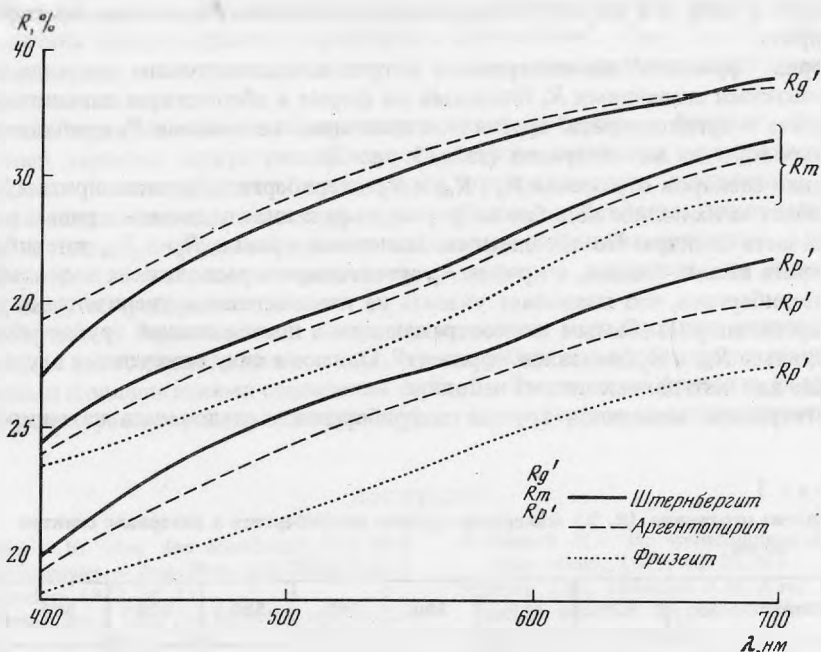


Рис. 3. Спектры отражения R штернбергита, аргентопирита и "фризеита"

минераграфическую характеристику на основе визуальных данных. Цвет минералов в отраженном свете — желтовато-бурый. Двуотражение — сильное, в воздухе l_c — бурый, l_s — более светлый, коричневатожелтый. Эффекты анизотропии сильные, с цветным эффектом от фиолетово- и красновато-бурого до серовато-синего.

Исследование спектров отражения минералов группы штернбергита подтвердило чрезвычайную близость их оптических свойств. Коэффициенты отражения минералов были измерены в интервале λ 400–700 нм на микроскоп-фотометре 01 фирмы "Оптон" (эталон $WTiC$, объектив $40 \times 0,85$, зонд — 6 мк). Результаты измерения представлены в табл. 3 и в виде графиков на рис. 2 и 3). В исследованных образцах "фризеит" пред-

Таблица 2

Состав минералов группы штернбергита по данным микрозонда (вес. %)

Компонент	Штернбергит		
	1	2	3
Ag	34,98	35,04	36,8
Cu	0,06	0,58	Не опр.
Fe	36,19	35,65	36,7
As	0,12	0,26	Не опр.
S	26,91	28,73	28,1
Сумма	101,26	100,26	101,6
Формула	$Ag_1Fe_{2,00}S_{2,97}$	$Ag_1Fe_{1,96}S_{2,76}$	$Ag_1Fe_{1,9}S_{2,6}$

Анализы, выполненные в ИГЕМ (1,2,4,6); анализы, выполненные в МГУ (3 и 5).

Примечание. 1 – обр. 47397, Иоганнсбергенштадт (ГДР); 2 – обр. 1092, Андреасберг (ФРГ); 3 – обр. 47394, Гайстерганг (ЧССР); 4 – обр. 47399, Яхимов (ЧССР); 5, 6 – обр. 29272 и 47652, Андреасберг (ФРГ).

ставлен одним зерном, а штернбергит и аргентопирит – агрегатом разноориентированных зерен, обладающих различной силой двуотражения. Поэтому при измерении зерен последних двух минералов получены три группы кривых дисперсии R (рис. 2). Внутри каждой группы кривые R не отличаются по форме, а лишь по абсолютным значениям, различия которых составляют 1,5–2,0%. Эти различия могут быть обусловлены как оптической ориентировкой сечения, так и степенью полировки, горизонтальностью установки образца, точностью аттестации эталона ($\pm 1\%$). В каждой группе для всех значений λ по измерениям 8 зерен вычислены средние арифметические значения R , приведенные в табл. 3 и на рис. 3. Установлена оптическая двуосность штернбергита и аргентопирита.

Для зерна "фризеита" по измерениям в трех точках получены два вида кривых: одна – с низкими значениями R , близкими по форме и абсолютным значениям к R_p' штернбергита и аргентопирита, другая – с высокими значениями R , приближающимися к кривым R_m этих же минералов (табл. 3, рис. 3).

Сравнение спектров отражения R_g' , R_m и R_p' штернбергита, аргентопирита и "фризеита" указывает на их полное подобие по форме, выраженное подъемом кривых в длинноволновую часть спектра. По абсолютным значениям кривые R_g' и R_m штернбергита и аргентопирита весьма близки, а кривая R_p' аргентопирита расположена несколько ниже, чем R_p' штернбергита, что позволяет указать на незначительное увеличение двуотражения для аргентопирита. Самым низкоотражающим в исследованной группе минералов, судя по кривым R_m и R_p' , оказался "фризеит". Однако в силу отмеченных выше причин, полученные для него данные весьма неполны.

Микротвердость минералов группы штернбергита исследовалась на микротвердо-

Таблица 3

Коэффициент отражения (R , %) минералов группы штернбергита в интервале спектра $\lambda = 420 \div 700$ нм

Минерал	420	460	500	540	580	620	660	700
Штернбергит, обр. 47397								
R_g'	29,0	31,7	33,5	35,0	36,4	37,6	38,3	39,0
R_m	25,8	27,8	29,1	30,4	32,2	34,0	35,5	36,7
R_p'	21,4	24,0	25,5	26,8	28,0	29,4	30,8	31,8
Аргентопирит, обр. 29972 и 47395								
R_g'	30,3	32,3	34,1	35,6	36,8	37,8	38,5	38,8
R_m	25,2	27,0	28,6	30,0	31,8	33,6	35,1	36,0
R_p'	20,4	22,5	24,2	25,7	27,1	28,2	29,4	30,2
"Фризеит", обр. 47399								
R_g'	24,1	25,5	26,9	28,3	30,0	32,1	33,7	34,3
R_p'	19,0	20,1	21,4	22,8	24,4	25,6	26,7	27,4

	"Фризейт"	Аргентопирит	
	4	5	6
	35,97	33,0	35,26
	—	He опр.	0,66
	35,80	38,3	35,70
	0,09	He опр.	0,38
	30,71	28,3	28,65
	102,57	99,6	100,65
	$Ag_1Fe_{1,92}S_{2,87}$	$Ag_1Fe_{2,2}S_{2,9}$	$Ag_1Fe_{1,96}S_{2,73}$

мере ПМТ-3 в ИМГРЭ С.И. Лебедевой. Измерения проводились при нагрузке 20–30 г; время действия нагрузки – 10 секунд.

Согласно проводимым исследованиям, наиболее твердый минерал группы – аргентопирит. Значения его твердости находятся в интервале 247–258 кгс/мм². Среднее значение составляет 253 кгс/мм². Микротвердость штернбергита и фризейта практически одинакова. Значения микротвердости штернбергита в различных сечениях колеблются от 184 до 268 кгс/мм². Среднее значение из 15 замеров составляет 235 гкс/мм². Штернбергит обнаруживает слабую анизотропию 1-го и 2-го рода: $K_{H'_1} = 1,17$ и $K_{H'_2} = 1,20$. Для фризейта при колебании значений микротвердости от 205 до 247 кгс/мм² средняя величина микротвердости определена в 236 кгс/мм², $K_{H'_1} = 1,15$ и $K_{H'_2} = 1,12$. У аргентопирита анизотропию выявить не удалось, по-видимому, из-за малого количества измеренных зерен.

При одинаковой величине микротвердости штернбергит и фризейт обнаруживают различный характер микротрещиноватости, возникающей при вдавливании алмазной пирамидки. У штернбергита проявляется трещиноватость разрывного характера, в то время как для фризейта характерно обилие скобовидных раковистых трещин, и лишь в одном сечении наблюдалась небольшая разрывная трещинка. Аргентопирит характеризуется микротрещиноватостью разрывного характера, но проявлена она слабее, чем у штернбергита.

Совокупность проведенных нами исследований подтверждает высказанное еще в прошлом веке предположение о том, что штернбергит и аргентопирит являются полиморфными модификациями соединения $AgFe_2S_3$. Что касается фризейта, то его, по-видимому, можно рассматривать как параморфозу штернбергита по аргентопириту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haidinger W. Über den Sternbergit, eine neue Mineralspecies. – Ann. Phys. und Chem. Hgg. v. Poggendorf, 1827, Bd. 11.
2. Waltershausen S. Über den Silberkies von Jochimstahl. – N. Jb. Miner., 1866.
3. Weisbach A. Über die Silberkiese. – Ibid., 1877.
4. Vrba C. Frieseit, ein dem Sternbergit ähnliches Mineral. – Ztschr. Kristallogr., 1878, Bd. 11.
5. Минералы. Справочник, т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
6. Murdoch J., Berry L.G. X-ray measurements on argentopyrite. – Amer. Miner., 1954, vol. 39, N 5/6.
7. Quellmalz W. Mineralogische Untersuchungen zum Problem der "Silberkiese". – Abh. Staatl. Mus. Miner. und Geol. Dresden, 1974, Bd. 21.
8. Peacock M.A. On sternbergite and frieseite. – Amer. Miner., 1942, vol. 27, N 3.
9. Berry L.G., Thomson R.M. X-ray powder data for ore minerals: the peacock atlas. – Geol. Soc. Amer., 1962, mem. 85.
10. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
11. Волынский И.С. Определение рудных минералов под микроскопом. Т. 3., М.: Госгеолтехиздат, 1949.
12. Безмертная М.С., Чвилева Т.Н. Определитель рудных минералов в отраженном свете. М.: Недра, 1976.
13. Исаенко М.П., Боришанская С.С., Афанасьева Е.Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. М.: Недра, 1978.