

Э. М. СПИРИДОНОВ, Н. Ф. СОКОЛОВА, Т. Н. ЧВИЛЕВА, Н. Г. ШУМКОВА

## ТЕЛЛУРОВИСМУТИТЫ И ТЕТРАДИМИТЫ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

**Минералы висмута в месторождениях Северного Казахстана.** Руды позднеордовикских золотых месторождений повсеместно содержат те или иные количества висмута, причем, содержания этого элемента в рудах разных месторождений сильно отличаются. Наиболее богаты висмутом руды месторождений, приуроченных к плутонам гранитоидов повышенной калийности — адамеллитов и гранодиоритов II фазы крыккудукского комплекса: Селетинскому (месторождение Ичкеульмес), Буландино-Аккульскому (Бурли), Северо-Аксу́йскому (Северный Аксу); самые высокие содержания висмута (1 кг/т и более) установлены в пологозалегающих рудных жилах Северного Аксу — рудные тела этого месторождения представляют золото-висмутовый тип руд; содержания висмута в рудах Ичкеульмеса выше 100 г/т.

Месторождения, приуроченные к гранитоидам К—Na типа, характеризуются более низкими содержаниями висмута. Так, в рудах Жана-Тюбе содержания висмута около 20 г/т. В рудах Декабрьского месторождения, приуроченного к интрузиву плагиигранитов, содержания  $Bi \sim 1$  г/т.

В гипабиссальных и менее глубинных из мезоабиссальных месторождениях висмут не образует собственных минералов. В более глубинных месторождениях значительная часть висмута присутствует в виде самостоятельных минералов. Теллуриды висмута — тетрадимит и теллуровисмутит установлены в ряде месторождений. Тетрадимит — на месторождениях Бурли и Джеламбет (Боришанская, 1946), теллуровисмутит — на месторождениях Джеламбет (Вейц и др., 1971; Назьмова, Шалаев, 1971) и Жана-Тюбе (Вейц и др., 1971); О. А. Анкинович и Н. Я. Яценко (1969) на месторождении Ичкеульмес тетрадимит описан в ассоциации с висмутином, рядом сложных сульфидов висмута, самородным висмутом. Авторами (Спирidonov и др., 1974, 1974<sub>2</sub>) на месторождении Жана-Тюбе определены теллуровисмутит и вольтскит с высокими содержаниями в них сурьмы, на месторождении Северный Аксу установлены тетрадимит и теллуровисмутит и их свинцовистые разновидности.

Характер висмутовой минерализации различен и зависит от минерального состава жил и вмещающих пород. Так, в кварцевых жилах Жана-Тюбе и Джеламбета, залегающих преимущественно в породах основного состава — базальтоидах и габброидах — и содержащих заметное количество пирротина, т. е. сформированных в условиях дефицита серы, развиты исключительно теллуриды висмута — стибитотеллуровисмутит в Жана-Тюбе и теллуровисмутит в Джеламбете. Судя по обилию различных теллуридов в этих месторождениях, в том числе теллуридов золота, железа и никеля и присутствию пирротина, можно полагать, что химический потенциал теллура в гидротермальных растворах был весьма высок, а серы — низок. В малосульфидных кварцевых жилах Северного Аксу, залегающих в гранитоидах повышенной основности — кварцевых диоритах и т. п., установлены тетрадимит и теллуровисмутит примерно в равных количествах, немного калаверита. Наличие в Северном Аксу самородного золота и серебра указывает, что потенциал теллура в растворах был не очень высок.

В бедных сульфидами кварцевых жилах Бурли, залегающих в кремнекислых гранитоидах, отмечен тетрадимит в ассоциации с золотом. В халькопиритовых скарновых рудах Ичкеульмес, там, где они насыщены прожилками и гнездами жильного кварца, широко развиты висмутин, сложные сульфосоли меди, висмута и свинца, тетрадимит, самородный висмут. Обилие в рудах Ичкеульмеса самородного висмута и сульфидов висмута свидетельствует о низком химическом потенциале теллура в растворах и достаточно высоком потенциале серы.

Химический потенциал серы в значительной степени зависел от того, в породах какого состава формировались рудные тела. Таким образом, состав вмещающих пород влиял на появление тех или иных ассоциаций минералов висмута.

Минералы висмута в золоторудных телах выделились одними из последних, они тесно ассоциируют с самородным золотом и теллуридами золота. Для руд большинства месторождений Северного Казахстана характерна сильная положительная корреляция содержаний висмута и золота.

**Условия нахождения и ассоциации теллуровисмутита и тетрадимита.** Теллуровисмутит относительно широко распространен в рудных жилах Южного и Центрального участков месторождения Желамбет; повсеместно образует в алтаите пластинчатые выделения толщиной от тысячных долей до 0,4 мм, которые ориентированы по [100] или [111] алтаита (рис. 1, а, б). Алтаит с вростками теллуровисмутита часто ассоциирует с галенитом, петцитом и самородным золотом, реже с креннеритом, сильванитом или мелонитом. Лишь мельчайшие (0,00n мм) выделения алтаита, главным образом в галените, не содержат вростков теллуровисмутита. Исследованы образцы теллуровисмутита из кварцевых жил с горизонтов 100—200 м.

Стибиотеллуровисмутит — один из распространенных теллуридов в рудах месторождения Жана-Тюбе. В отдельных участках стибиотеллуровисмутит количественно преобладает над другими теллуридами. Местами отмечен свинцовистый стибиотеллуровисмутит. Обычно стибиотеллуровисмутит слагает пластинчатые (рис. 2, а, б), реже клиновидные или линзовидные зерна, заключенные целиком или большей своей частью в алтаите, значительно реже в сильваните, гессите, фробергите (рис. 3, а—в) или креннерите. Пластины стибиотеллуровисмутита ориентированы параллельно одной из граней зерна алтаита или образуют сложной формы сростания, по-видимому, по [111] алтаита. В крупных пластинах стибиотеллуровисмутита заключены уплощенные линзы алтаита. Отдельные крупные зерна стибиотеллуровисмутита (до 1 мм) имеют изометричную или короткопризматическую форму, сростки их достигают 3—4 мм в поперечнике; в них содержатся небольшие клиновидные или линзовидные выделения алтаита.

Такие взаимоотношения алтаита и теллуровисмутита Жана-Тюбе и Желамбет наводят на мысль, что наблюдаемые сейчас в рудах сростки этих минералов представляют собой продукты распада существовавшего ранее относительно высокотемпературного твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 = \text{PbTe}$  на основе  $\text{PbTe}$  (чаще) или  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (значительно реже).

Наблюдаются и агрегатные сростки стибиотеллуровисмутита с алтаитом, гесситом (рис. 4), петцитом, фробергитом, сильванитом, креннеритом. В сростках стибиотеллуровисмутита и гессита по границам сростания изредка наблюдаются удлиненные образования сурьмяного вольтинскита, представляющие реакционные каймы;  $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3 + \text{Ag}_2\text{Te} \rightarrow 2\text{Ag}(\text{Bi}, \text{Sb})\text{Te}_2$ . Мельчайшие мономинеральные пластинки стибиотеллуровисмутита обособлены в трещинах в жильном кварце, кальците и хлорите.

Свинцовистые тетрадимит и теллуровисмутит являются характерными рудными минералами малосульфидной кварцевой жилы Пологой и ряда более мелких пологих жил, залегающих в гранодиоритах и адалмеллитах месторождения Северного Аксу. Они образуют таблитчатые, пластинчатые и сложной формы зерна и сростки размером от тысячных долей до 5 мм,

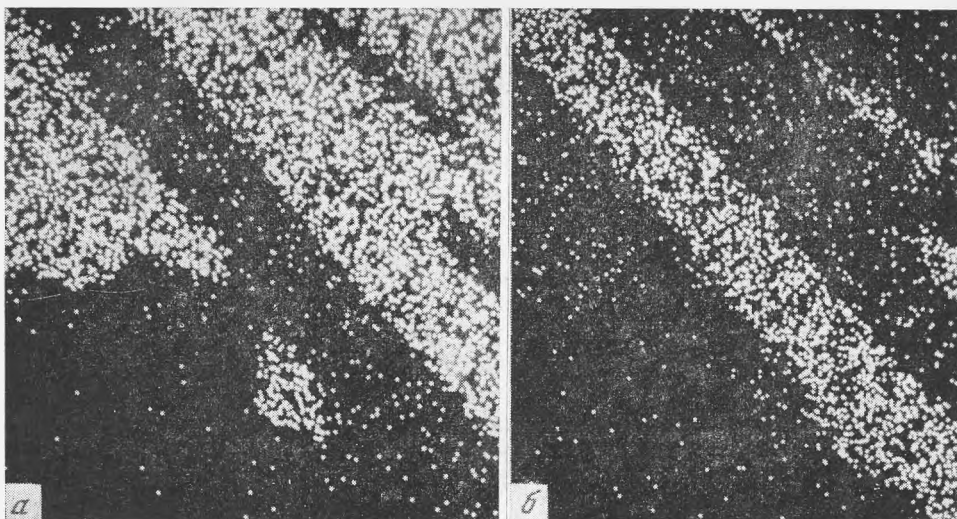


Рис. 1. Сrostок теллуrowисмутита и алтаита, увел. 500. Снимки сделаны в характеристическом рентгеновском излучении

*a* — распределение свинца; *б* — распределение висмута. Джеламбет, обр. Д-44

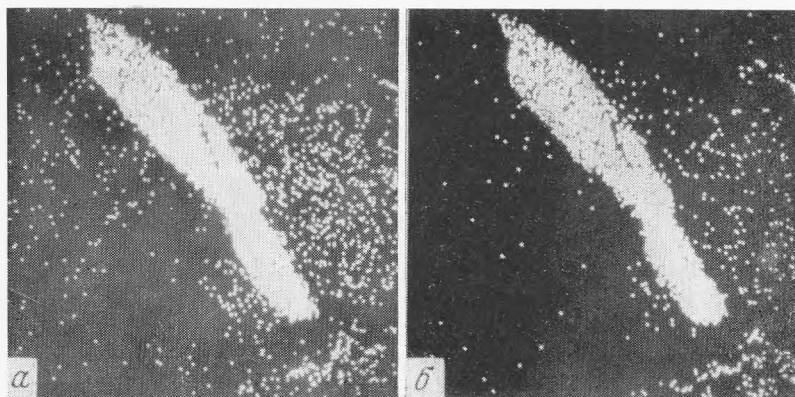


Рис. 2. Пластина стибителлуrowисмутита в алтаите на границе с силванитом, увел. 250. Снимки сделаны в характеристическом рентгеновском излучении

*a* — распределение висмута (густые точки — стибителлуrowисмутит, более редкие точки — висмутсодержащий алтаит); *б* — распределение сурьмы. Месторождение Жана-Тюбе, обр. Ж-6а-70

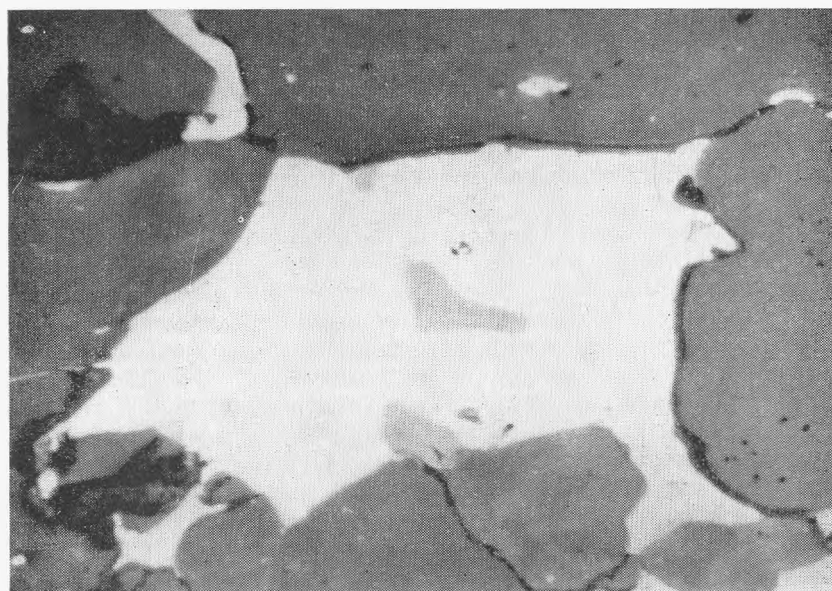
чаще менее 0,5 мм. Выделения призматической формы иногда достигают 20 мм в длину. Эти минералы пространственно тесно ассоциируют преимущественно с самородным золотом, тяготея к лежащему зальбанду жилы. В жиле Пологой свинцовистый тетрадимит количественно преобладает над свинцовистым теллуrowисмутитом (более чем вдвое).

Минеральный состав жилы Пологой изменяется от участка к участку. В одних участках преобладает халькопирит и здесь наблюдается главным образом свинцовистый тетрадимит; в других — наряду с халькопиритом содержится заметное количество тетраэдрита, в них свинцовистые тетрадимит и теллуrowисмутит развиты примерно в равных количествах. В третьих — мало сульфидов, руды обогащены самородным золотом, из теллуrowидов отмечен преимущественно свинцовистый теллуrowисмутит. Каждый из теллуrowидов иногда слагает мономинеральные выделения, но



**Рис. 3.** Сросток стибителлу-  
 луровисмутита и фробергита,  
 с каймой хлорита, увел.  
 250. Снимки сделаны в ха-  
 рактеристическом рентге-  
 новском излучении

*a* — распределение теллура;  
*b* — распределение висмута;  
*c* — распределение железа.  
 Месторождение Жана-  
 Тюбе, обр. Ж-8п-72



**Рис. 4.** Сложный сросток стибителлу-  
 ровисмута ( $\tau$ ), алтаита (*a*) и гессита (*z*).  
 Месторождение Жана-Тюбе, обр. Ж-74а-68. Шлиф, увел. 20, без анализатора

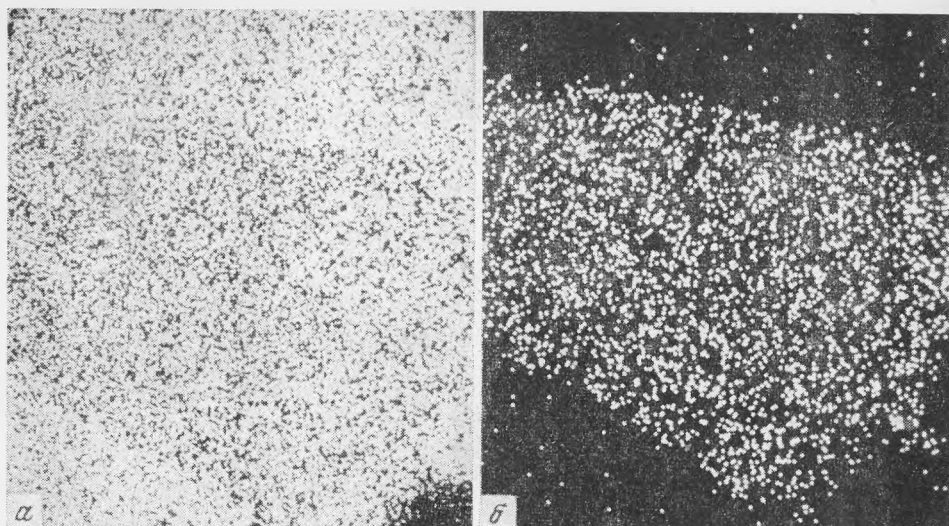


Рис. 5. Сросток свинцовистого теллуrowисмутита и свинцовистого тетрадимита, увел. 750. Снимки сделаны в характеристическом рентгеновском излучении

*a* — распределение теллура (густые точки — теллуrowисмутит, более редкие — тетрадимит);  
*b* — распределение серы. Месторождение Северный Аксу, обр. А-132в-71

чаще встречаются сростки теллуридов друг с другом (рис. 5*a, б*), с золотом и халькопиритом, с халькопиритом, с золотом и пиритом, иногда с тетраэдритом. В отдельных участках жилы Пологой теллуриды цементируют мелкие идиоморфные кристаллы пирита, обрастают и отчасти замещают халькопирит и пирит. Свинцовистые тетрадимит и теллуrowисмутит обычно содержат мелкие кубоктаэдры пирита. Нередки включения теллуридов в золоте.

В отличие от жилы Пологой, характерными рудными минералами малосульфидной кварцевой жилы № 1, залегающей в кварцсодержащих и кварцевых диоритах, являются тетрадимит и теллуrowисмутит, не содержащие свинца. Они образуют отдельные ксеноморфные зерна, чаще сростки и скопления зерен до 1 см в поперечнике, которые тесно ассоциируют с крупночешуйчатым самородным золотом в промежутках между зернами кварца и карбоната.

Характерны параллельные сростки пластинок тетрадимита (преобладает) и теллуrowисмутита.

В зоне окисления теллуrowисмутиты и тетрадимиты замещены оксикарбонатами и теллуритами висмута (монтанит), теллуритами железа. В псевдоморфозах по стибьотеллуrowисмутиту Жана-Тюбе широко развит трипугит.

**Теллуrowисмутиты.** Сурьмянистый теллуrowисмутит Джеламбета и стибьотеллуrowисмутит Жана-Тюбе представлены характерными для этого минерала пластинчатыми выделениями серовато-серебристого цвета с розоватым оттенком, с совершенной спайностью по базису. На свежей спайной поверхности минералы имеют отчетливый фиолетовый оттенок. Спайные пластины мягкие и гибкие. Для более крупных зерен стибьотеллуrowисмутита Жана-Тюбе характерна отдельность под углом около 60° к спайности. На воздухе минералы довольно быстро тускнеют и становятся свинцово-серыми. В отраженном свете сурьмянистый теллуrowисмутит и стибьотеллуrowисмутит белые, в сростании с алтаитом — с отчетливым розовым оттенком. Двухотражение заметно достаточно отчетливо.

Химический состав теллуrowисмутита Джеламбета приведен в табл. 1. Минерал постоянно содержит сурьму и свинец. По данным исследования

Таблица 1

Химический состав теллуровисмутита Джеламбета \*, вес. %

Образец	Bi	Sb	Pb	Te	Se	S	Сумма
Д-856/9-66	51,07	1,43	—	48,92	—	0,05	101,47
Д-44	49,78	1,38	0,24	48,41	—	0,00	99,81
Д-1021	—	1,59	—	—	—	—	—

\* Состав определен микрозондированием, аналитик Э. М. Спиридонов. Микроанализатор JXA-5, 25 кв. эталоны — особо чистые Bi, Sb, Te, Se, Ag, Cu, природные PbTe, FeS<sub>2</sub>. Методика расчета стандартная.

на микрозонде состав отдельных выделений сурьмянистого теллуровисмутита однородный и не меняется в участках, контактирующих с алтаитом. Средний состав минерала (вес. %): Bi — 50,42; Sb — 1,47; Pb — 0,24; Te — 48,66; S — 0,02; сумма — 100,86 (из трех), что в расчете на два катиона отвечает формуле  $(\text{Bi}_{1,896}\text{Sb}_{0,095}\text{Pb}_{0,009})_2(\text{Te}_{2,997}\text{S}_{0,005})_{3,002}$ . По данным спектрального анализа минерал содержит около 0,01% Zn; 0,001% Ag; следы Cu, Mn. Микротвердость минерала (восемь измерений на неориентированных срезах);  $H_1=53-76$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_2=30-59$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_{\text{ср}}=62$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_{2\text{ср}}=44$  кг/мм<sup>2</sup>; коэффициент анизотропии твердости 1,4. Рентгенограмма минерала табл. 5 близка с эталонной для теллуровисмутита ASTM 15-863.

В литературе имеется очень мало данных по химическому составу теллуровисмутитов, содержащих заметные количества сурьмы (Odman, 1941; Магакьян, 1956). Самые высокие содержания сурьмы до сих пор были известны в теллуровисмутите из Болидена, Швеция; эта разновидность минерала, содержащая около 3% вес. сурьмы (10% минала Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), получила название стибиотеллуровисмутита (Odman, 1941). Исходя из этого и учитывая общепринятые в практике минералого-петрографических исследований градации для выделения разновидностей, представляется целесообразным применять название стибиотеллуровисмутит для разновидностей минерала, содержащих не менее 10 мол. % Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. В литературе описаны всего две находки стибиотеллуровисмутита (одна — упоминавшаяся выше — из месторождения Болиден) и обе они относятся к разновидностям, бедным сурьмой.

Поэтому нами уделено значительное внимание изучению состава стибиотеллуровисмутита Жана-Тюбе, который отличается высокими содержаниями сурьмы (табл. 2).

Состав стибиотеллуровисмутита Жана-Тюбе различен в рудах с алтаит-сильванитовой и петцит-фробергитовой ассоциациями теллуридов. Стибиотеллуровисмутит из алтаит-сильванитовой ассоциации изучен нами из жилы Широкой, гор. 100 м (табл. 2 анализы 1—7); из жилы Северной, гор. 100 м — 8; из жилы Июньской, гор. 100 м — 9. Состав минерала в различных жилах и в серии образцов из одной жилы достаточно устойчив. Анализы 4 — 7 отражают вариации состава минерала в пределах одного штуфа. Микрозондирование показало, что состав отдельных выделений стибиотеллуровисмутита однороден и не меняется в участках вдоль границ с алтаитом, гесситом, сильванитом. Минерал содержит около 7 — 8% Sb.

Наиболее полный анализ типичного стибиотеллуровисмутита алтаит-сильванитовой ассоциации — 5. Пересчет его на два катиона привел к формуле  $(\text{Bi}_{1,549}\text{Sb}_{0,437}\text{Pb}_{0,013}\text{Ag}_{0,001})_2\text{Te}_{2,930}\text{Se}_{0,065})_{2,995}$ , которая близка к теоретической. Средний состав стибиотеллуровисмутита алтаит-сильвани-



Таблица 2

Химический состав стибителлуrowисмутита Жана-Тюбе \* (вес.%) из руд с алтаит-сильванитовой (№ 1—9) и петцит-фробергитовой (№ 10—26) ассоциациями теллуридов

№ п/п	Образец	Bi	Sb	Pb	Ag	Cu	Te	Se	S	Сумма	Ассоциирующие минералы
1	Ж-74а-68	43,91	6,81	сл.	0,08	0,00	49,98	—	—	100,78	Гессит, алтаит
2	Ж-74л-68	42,15	7,33	0,45	0,12	0,05	48,72	сл.	0,03	98,85	Алтаит, гессит
3	Ж-74р-68	40,99	7,66	0,46	0,11	—	49,98	—	—	99,20	Алтаит
4	Ж-74у-68	43,04	7,48	0,54	—	—	49,50	—	0,02	100,58	Алтаит, сильванит
5		42,68	7,02	0,36	0,01	сл.	49,29	0,68	0,00	100,04	Алтаит
6		41,17	9,11	—	—	—	48,99	—	—	99,27	Алтаит
7		41,56	8,41	—	—	—	49,59	—	—	99,56	Гессит, вольтский
8	Ж-7-72	41,33	9,30	—	—	—	50,56	—	—	101,19	Сильванит, гессит
9	Ж-10-72	41,76	8,36	—	—	—	50,19	—	—	100,31	Алтаит
10	Ж-30-68	41,01	8,67	сл.	—	—	48,92	—	—	98,60	Петцит, алтаит
11	Ж-1а-72	39,74	7,27	2,06	0,03	0,00	49,55	0,45	0,02	99,12	Алтаит, фробергит
12		39,47	6,58	2,02	—	—	52,19	—	—	100,26	Алтаит, фробергит, петцит
13	Ж-2а-72	39,65	10,70	—	—	—	49,58	—	—	99,93	Петцит, креннерит, фробергит, алтаит
14	Ж-2в-72	32,35	14,90	сл.	0,02	0,00	52,65	сл.	0,00	99,92	Петцит, фробергит, алтаит
15		35,23	11,97	1,32	сл.	—	51,29	—	—	99,81	Кварц, хлорит
16	Ж-2э-72	39,91	10,54	0,58	—	—	50,64	—	—	101,67	Алтаит
17		43,39	7,57	—	—	—	50,84	—	—	101,80	Хлорит, пирротин
18	Ж-3д-72	39,44	9,46	—	—	—	50,93	—	—	99,83	Петцит, халькопирит
19	Ж-8д-72	34,04	13,00	0,88	—	—	52,73	—	—	100,65	Центр
20		34,43	11,71	0,85	—	—	51,58	—	—	98,49	Край
21		—	10,38	—	—	—	—	—	—	—	Петцит, креннерит
22		—	8,61	—	—	—	—	—	—	—	Кварц
23		—	9,01	—	—	—	—	—	—	—	Кварц, кальцит
24		—	10,51	—	—	—	—	—	—	—	Петцит, алтаит
25		—	10,66	—	—	—	—	—	—	—	Алтаит, петцит
26		—	10,37	—	—	—	—	—	—	—	Петцит

\* Состав определен микрозондированием, аналитик Э. М. Спиридонов.

товой ассоциации (из девяти, вес.%) : Bi — 42,06; Sb — 7,94; Pb — 0,36; Ag — 0,08; Cu — 0,02; Te — 59,64; Se — 0,34; S — 0,02; сумма — 100,48, что в расчете на два катиона отвечает формуле  $(\text{Bi}_{1,495}\text{Sb}_{0,434}\text{Pb}_{0,013}\text{Ag}_{0,006}\text{Cu}_{0,002})_2(\text{Te}_{2,890}\text{Se}_{0,032}\text{S}_{0,005})_{2,927}$ . Таким образом, минерал содержит около 25% минерала  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . По данным спектрального анализа в стибителлуrowисмутите из алтаит-сильванитовой ассоциации присутствуют около 0,05% Zn и Ag; 0,01% Cu; 0,001% Mn.

Стибителлуrowисмутит петцит-фробергитовой ассоциации по составу менее постоянен и в целом богаче сурьмой, свинцом, теллуrom. Он изучен нами в образцах из жилы Широкой, № 13, Ноябрьской и из рудной зоны № 1. В этом типе руд обнаружены зональные по составу кристаллы стибителлуrowисмутита — анализы 19 и 20 в табл. 2.

Различия в составе зон — 3%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Еще один зональный кристалл установлен в образце Ж-2а-72, рудная зона № 1: разница в составе зон — 2%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (11,26% Sb в центре; 10,60% в краевой части кристалла).

Для одного из образцов (Ж-30-68) определены удельный вес  $D_{4\cdot c} =$

$=7,50 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$  (метод гидростатического взвешивания, как и для других образцов) и параметры элементарной ячейки (табл. 5). Это позволило рассчитать формулу по анализу 10 (табл. 2)

$$K = V \cdot D \cdot 0,006023 / z = 7,539:$$

Ж-30-68	вес. %	Атомное кол-во	Форм. ед.
Bi	41,01	0,1962	1,479
Sb	8,67	0,0712	0,537
Te	48,92	0,3834	2,890
			2,016

Стибиотеллуровисмутит, типичный для петцит-фробрергитовой ассоциации, охарактеризован наиболее полным анализом 14. Пересчет его на два катиона привел к формуле  $(\text{Bi}_{1,116}\text{Sb}_{0,883}\text{Ag}_{0,001})_2\text{Te}_{2,976}$ , что отвечает содержанию минала  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  около 40%.

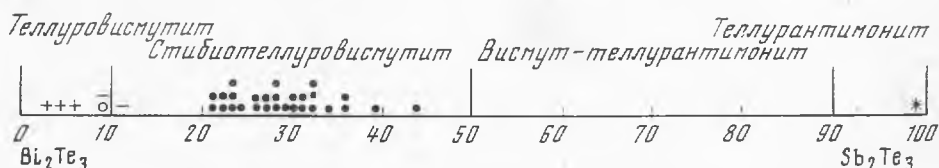


Рис. 6. Схема классификации минералов системы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  —  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$

+ — Джеламбет, — — Волиден, O — 3 од: ● — Жана-Тюбе, \* — Маттагами

Стибиотеллуровисмутит из существенно кварцевой жилы 13, богатой пирротином (анализы 11 и 12), обогащен свинцом и относительно беден сурьмой. Наиболее полный анализ свинцовистого стибиотеллуровисмутита — 11; пересчет его на два катиона привел к формуле  $(\text{Bi}_{1,462}\text{Sb}_{0,459}\text{Pb}_{0,077}\text{Ag}_{0,002})_2(\text{Te}_{2,986}\text{Se}_{0,044}\text{S}_{0,005})_{3,035}$ .

Средний состав стибиотеллуровисмутита из петцит-фробрергитовой ассоциации (из 17, вес. %): Bi — 38,06; Sb — 10,11; Pb — 0,96; Ag — 0,02; Te — 50,99; Se — 0,23; S — 0,01; сумма — 100,38, что в пересчете на два катиона отвечает формуле  $(\text{Bi}_{1,349}\text{Sb}_{0,616}\text{Pb}_{0,034}\text{Ag}_{0,001})_2(\text{Te}_{2,960}\text{Se}_{0,022}\text{S}_{0,002})_{2,984}$ . Минерал содержит около 30% минала  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ .

В целом для Жана-Тюбе из 28 анализированных образцов стибиотеллуровисмутита 17 содержат от 20 до 30%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , 10 — от 30 до 40%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , один — свыше 40%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (рис. 6).

Микротвердость стибиотеллуровисмутита Жана-Тюбе (девять измерений):  $H_1 = 39-62 \text{ кг/мм}^2$ ;  $H_2 = 27-54 \text{ кг/мм}^2$ ;  $H_{1cp} = 48 \text{ кг/мм}^2$ ;  $H_{2cp} = 35 \text{ кг/мм}^2$ ; коэффициент анизотропии твердости минерала 1,37. Величины микротвердости стибиотеллуровисмутитов Жана-Тюбе с несколькими различными содержаниями сурьмы отличаются незначительно.

Спектры отражения стибиотеллуровисмутита Жана-Тюбе (табл. 4, рис. 7) близки к спектрам теллуровисмутитов, приведенным в сводке М. С. Бессмертной и др. (1973). Таким образом, изоморфное замещение висмута сурьмой в теллуровисмутите ощутимо не влияет на его оптические свойства.

Рентгенограмма стибиотеллуровисмутита (табл. 5) близка к эталонной для теллуровисмутита ASTM 15-863, отличаясь заметным сдвигом отражений в сторону больших углов.

Величины межплоскостных расстояний и параметры элементарной ячейки сурьмянистого теллуровисмутита Джеламбет и стибиотеллуровисмутита Жана-Тюбе имеют промежуточные значения между  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Мы попытались оценить содержание минала  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  по этим величинам (табл. 6). Хорошая сходимость с данными химического анализа получена по  $d_{205}$  и особенно по  $d_{0,1,20}$ . Последняя величина измеряется с большей точностью, чем другие. Хорошая сходимость оценок содержания минала  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  по химическому анализу и по рентгенометрическим дан-



ным получена также по величине параметра  $a_0$  и особенно по величине объема элементарной ячейки. В ряду теллуровисмутит — сурьмянистый теллуровисмутит — стибиотеллуровисмутит постепенно увеличиваются интенсивности отражений 1.0.10, 0.1.11, 0.1.20 (см. табл. 5). Таким образом, рентгенометрические характеристики изоморфного ряда  $Bi_2Te_3$  зависят от состава аддитивно, что позволяет оценивать по ним содержание сурьмы в стибиотеллуровисмутитах.

Теллуровисмутит и свинцовистый теллуровисмутит Северного Аксу представлен пластинчатыми и чаще таблитчатыми и толстотаблитчатыми выделениями серовато-серебристого цвета с весьма совершенной спайностью по базису. На воздухе минералы довольно быстро тускнеют и становятся свинцово-серыми. Спайные пластинки весьма гибкие. Изредка у толстотаблитчатых выделений на спайной поверхности наблюдаются треугольные фигуры, образованные трещинками отдельности. В отраженном свете теллуровисмутиты Аксу белые, двуотражение распознается отчетливо.

Микронзондированием установлено, что состав отдельных зерен теллуровисмутита и их сростков для конкретного образца однороден и не меняется у контактов с тетрадимитом, золотом, тетраэдритом, халькопиритом. Результаты химического анализа двух образцов теллуровисмутита Аксу приведены в табл. 3. Еще в одном образце теллуровисмутита (А-131-71) количественным спектральным анализом определено 0,96% свинца. Чистота монофракций контролировалась рентгенометрически.

В теллуровисмуте Аксу, в отличие от теллуровисмутитов Жана-Тюбе и Джеламбет, содержания сурьмы и селена более низкие, состав минерала близок к теоретическому. Удельный вес теллуровисмутита обр. А-134-71  $D_{10} \cdot c = 7,81 \pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>. Пересчет анализа теллуровисмутита:

А-134-71	вес. %	атомное кол-во	форм. ед.	
Bi	52,17	0,2496	1,981	} 1,990 K=7,936
Sb	0,14	0,0011	0,009	
Te	47,62	0,3732	2,961	} 2,971
Se	0,05	0,0006	0,005	
S	0,02	0,0006	0,005	

По данным спектрального анализа минерал содержит около 0,05% Ag; 0,01% Zn; 0,005% Cu; следы Mn; Pb отсутствует. Рентгенограмма теллуровисмутита Аксу близка эталонной (табл. 5); спектры отражения практически не отличаются от теллуровисмутита Жана-Тюбе (рис. 7).

Свинцовистый теллуровисмутит Аксу содержит от 1 до 2% свинца, изоморфно замещающего висмут. Удельный вес свинцовистого теллуровисмутита обр. А-109-71  $D_{10} \cdot c = 7,76 \pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>. Пересчет его анализа:

А-109-71	вес. %	атомное кол-во	форм. ед.	
Bi	50,35	0,2409	1,927	} 2,010 K=8,000
Pb	2,14	0,0103	0,083	
Te	47,42	0,3716	2,973	} 2,983
Se	0,08	0,0010	0,008	
S	0,01	0,0003	0,002	

Микротвердость (28 измерений):  $H_1 = 40 - 80$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_2 = 24 - 50$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_{1cp} = 61$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_{2cp} = 37$  кг/мм<sup>2</sup>; коэффициент анизотропии 1,65. Величина твердости отчетливо зависит от кристаллографической ориентировки. На разрезе, перпендикулярном плоскости базиса, микротвердость максимальна вдоль удлинения — в среднем 65 кг/мм<sup>2</sup>, поперек удлинения — в среднем 47 кг/мм<sup>2</sup>. На плоскости базиса величина микротвердости минимальна — в среднем 35 кг/мм<sup>2</sup>.

Таблица 3

Химический состав теллуровисмутита и свинцовистого теллуровисмутита  
Северного Аксу \*, вес. %

Образец	Bi	Pb	Te	Se	Sb	S	Fe	Cu	Сумма
A-134-71	51,90	Не обн.	47,38	0,05	0,14	0,27	0,21	0,015	99,97
A-109-71	50,11	2,13	47,20	0,08	Не опр.	0,41	0,35	Не обн.	100,28
То же без пирита, приведенное к 100%									
A-134-71	52,17	—	47,62	0,05	0,14	0,02	—	—	100,00
A-109-71	50,35	2,14	47,42	0,08	—	0,01	—	—	100,00
Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	52,19	—	47,81	—	—	—	—	—	100,00

\* Анализы выполнены из навесок 200—300 мг Н. Г. Шумковой.

Таблица 4

Значения  $R$  (%) стибитотеллуровисмутита Жана-Тюбе (1, 2)  
и свинцовистого теллуровисмутита Аксу (3—5) \*

№ п/п	Образец	$R$ , %	$\lambda$ , нм						
			420	440	460	480	500	520	540
1	Ж-74р-68	$R_g'$	62,2	62,2	62,3	62,7	63,0	63,8	64,0
		$R_p'$	57,5	57,6	57,7	57,8	58,0	58,2	58,3
2	Ж-2э-72	$R_g'$	56,5	56,8	57,2	57,7	58,4	59,0	59,2
3	A-128а-71	$R_g'$	62,6	62,4	62,3	62,6	63,0	63,6	63,7
4	A-129-71	$R_g'$	61,4	61,3	61,4	61,8	62,3	63,0	63,1
		$R_p'$	57,0	56,8	56,9	57,0	57,2	57,5	57,7
5	A-134-71	$R_g'$	61,7	61,6	61,6	61,8	62,3	63,0	63,3
		$R_p'$	58,2	58,0	58,0	58,0	58,2	58,6	58,6

№ п/п	Образец	$R$ , %	$\lambda$ , нм							
			560	580	600	620	640	660	680	700
1	Ж-74р-68	$R_g'$	64,7	65,0	65,2	65,5	66,2	66,5	66,8	67,1
		$R_p'$	58,8	59,1	59,4	59,8	60,5	61,0	61,4	62,1
2	Ж-2э-72	$R_p'$	59,9	60,1	60,2	60,4	61,0	61,2	61,4	61,6
3	A-128а-71	$R_g'$	64,1	64,6	64,7	65,0	66,0	66,5	66,9	67,1
4	A-129-71	$R_g'$	63,8	64,3	64,5	64,9	65,7	66,0	66,4	67,0
		$R_p'$	58,0	58,4	58,6	59,0	59,9	60,4	61,2	61,9
5	A-134-71	$R_g'$	63,8	64,3	64,6	64,8	65,6	66,2	66,7	67,0
		$R_p'$	59,0	59,4	59,6	59,8	60,7	61,3	62,0	62,7

\* Измерено Т. Н. Чвилевой, прибор «Блеск», объектив 20\* с апертурой 0,40; эталон — кремний.

Рентгенограммы свинцовистых теллуровисмутитов близки к эталонной для теллуровисмутита, отличаясь небольшим сдвигом большинства отражений в сторону меньших углов. Особенностью свинцовистого теллуровисмутита является значительная интенсивность отражений 110 и 205 и малая интенсивность отражения 0.0.15 (табл. 5). С ростом содержания свинца в теллуровисмутитах (0→0,96→2,14% вес.) увеличиваются межплоскостные расстояния, параметр  $a_0$  (4,378→4,393→4,410 Å)

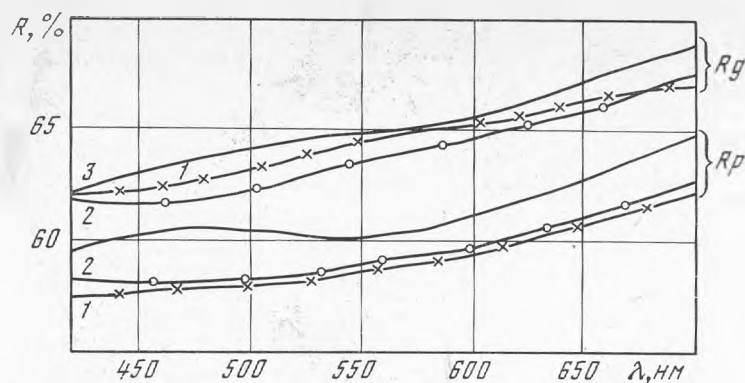


Рис. 7. Спектры отражения теллуrowисмутита

1 — Жана-Тюбе, шлиф Ж-74р-68; 2 — Аксу, шлиф А-134-71; 3 — Робб-Монтбрей (Безсмертная, Чвилева и др., 1973)

и объем элементарной ячейки ( $506,1 \rightarrow 509,1 \rightarrow 513,5 \text{ \AA}^3$ ), соотношение интенсивностей отражений 110 и 1.0.10 (0,3) и (0,9  $\rightarrow$  1,6).

Химический состав теллуrowисмутитов Северного Казахстана в целом близок к формуле  $\text{A}_2\text{B}_3$ . Из 24 анализированных теллуrowисмутитов у половины образцов отклонения коэффициента при  $B$  от трех менее чем  $\pm 0,05$ ; у двух третей образцов отклонения менее чем на  $\pm 0,1$  (рис. 8). В большинстве случаев отмечен некоторый дефицит теллура. Усредненная формула для всех проанализированных теллуrowисмутитов  $(\text{Bi}, \text{Sb}, \text{Pb})_2 \cdot (\text{Te}, \text{Se})_{2,955}$ .

Наиболее чутко реагируют на изменения химического состава теллуrowисмутитов их рентгенометрические характеристики. Использование табл. 6 и 5 позволяет оценить по рентгеновским данным содержания сурьмы или свинца в теллуrowисмутитах. Интересно заметить, что изоморфное замещение висмута сурьмой или свинцом заметно влияет особенно на величину параметра  $a_0$ , в то время как параметр  $c_0$  практически не меняется. Особенно отчетливо изменение состава теллуrowисмутита отражается на объеме элементарной ячейки. Микротвердость стибитотеллуrowисмутита заметно ниже микротвердости теллуrowисмутита. Микротвердость свинцовистого теллуrowисмутита мало отличается от микротвердости теллуrowисмутита. Величины отражения всех разновидностей теллуrowисмутитов близки.

**Тетрадимиты.** Тетрадимиг и свинцовистый тетрадимит Аксу представлены чаще таблитчатыми и толстотаблитчатыми выделениями серо-серебристого цвета с совершенной спайностью по базису. Цвет их заметно более темный, чем у теллуrowисмутитов. Спайные пластинки довольно гибкие. В отраженном свете тетрадимиты белые со слабым кремовато-зеленоватым оттенком, несколько более темные, чем теллуrowисмутиты.

Химический состав тетрадимита Аксу приведен в табл. 7, он близок к теоретическому. Удельный вес минерала обр. А-134-71  $D_{4^\circ}^c = 7,63 \pm \pm 0,03 \text{ г/см}^3$ . Пересчет анализа тетрадимита:

А-134-71	вс. %	атомное кол-во	форм. ед.
Bi	59,40	0,2842	2,001
Te	35,96	0,2818	1,984
Se	0,07	0,0009	0,006
S	4,57	0,1425	1,003

}  $K=7,040$   
} 1,990

По данным спектрального анализа тетрадимит содержит около 0,1% Sb и Zn; 0,05% Ag; 0,01% Pb; 0,003% Cu; следы Mn. Рентгенограмма минерала (табл. 9) близка эталонной ASTM 9-447.

Таблица 5

Межплоскостные расстояния и параметры элементарной ячейки \* стибигеллурувисмутита Жана-Тюбе (Ж-30-68), сурьмянистого теллурувисмутита Джеламбета (Д-858/9-66), теллурувисмутита Аксу (А-134-71; А-131-71) и свинцовистого теллурувисмутита Аксу (А-109-71)

hkl	Ж-30-68			Д-858/9-66			А-134-74			А-131-71			А-109-71		
	I/I <sub>1</sub>	dA <sub>измер</sub>	dA <sub>расч</sub>	I/I <sub>1</sub>	dA <sub>измер</sub>	dA <sub>расч</sub>	I/I <sub>1</sub>	dA <sub>измер</sub>	dA <sub>расч</sub>	I/I <sub>1</sub>	dA <sub>измер</sub>	dA <sub>расч</sub>	I/I <sub>1</sub>	dA <sub>измер</sub>	dA <sub>расч</sub>
006	18	5,08	5,07	8	5,12	5,08	15	5,09	5,08	7	5,11	5,08	8	5,15	5,08
101 *	5	3,77	3,745	4	3,80	3,761	5	3,75	3,763	4	3,79	3,775	12	3,80	3,790
104 *	2	3,39 <sub>5</sub>	3,392	2	3,41 <sub>2</sub>	3,394	3	3,38 <sub>6</sub>	3,394	2	3,43	3,403	2	3,43	3,415
009 *	2	3,38 <sub>5</sub>	3,382	1	3,373	3,388	5	3,379	3,387	2	3,36	3,384	4	3,36	3,388
015 *	100	3,209	3,208	100	3,223	3,220	100	3,214	3,219	100	3,218	3,227	100	3,23	3,238
018 *	4	2,676	2,679	5	2,690	2,688	3	2,689	2,688	3	2,688	2,691	5	2,710	2,700
0.0.12 *	2	2,539	2,537	1	2,544	2,541	2	2,534	2,541	4	2,530	2,538	2	2,546	2,541
1.0.10 *	55	2,371	2,370	19	2,374	2,376	73	2,372	2,376	45	2,381	2,378	35	2,390	2,386
0.1.11 *	16	2,238	2,232	3	2,239	2,238	9	2,234	2,237	3	2,244	2,239	4	2,251	2,246
110 *	12	2,180	2,179	8	2,187	2,188	26	2,186	2,189	41	2,197	2,197	55	2,203	2,205
0.0.15 *	28	2,030	2,029	19	2,035	2,033	28	2,029	2,033	5	2,039	2,031	5	2,050	2,033
116	8	2,003	2,002		—		4	2,010	2,011		—			—	
1.0.13	7	1,994	1,990		—		1	1,994	1,994	3	1,986	1,995	5	1,988	2,002
0.1.14 *	2	1,878	1,884	4	1,890	1,889	3	1,890 <sub>4</sub>	1,888	4	1,897	1,889	3	1,896	1,895
205 *	6	1,801 <sub>5</sub>	1,8025	6	1,810	1,8098	23	1,808 <sub>5</sub>	1,8103	18	1,813	1,816	38	1,821	1,823
208 *	9	1,699 <sub>8</sub>	1,6996	10	1,703 <sub>2</sub>	1,6995	6	1,701	1,6974	6	1,708	1,702	3	1,715	1,708
0.0.18	3	1,692 <sub>7</sub>	1,6911		—		6	1,695	1,6939		—			—	
0.2.10 *	9	1,604	1,6038	6	1,610	1,6097	8	1,613	1,6100	15	1,613	1,613	19	1,620	1,620
2.0.11 *	4	1,552 <sub>3</sub>	1,5591	5	1,560 <sub>6</sub>	1,5645	5	1,563	1,5641	4	1,565	1,568	6	1,569	1,573
1.1.15 *	15	1,485	1,4853	11	1,488 <sub>2</sub>	1,4896	20	1,488	1,4895	13	1,493	1,491	17	1,499	1,496
0.0.21 *	2	1,450 <sub>3</sub>	1,4495	2	1,452 <sub>2</sub>	1,4519	7	1,450 <sub>6</sub>	1,4519	8	1,454	1,451	4	1,454	1,452
0.1.20 *	17	1,412 <sub>5</sub>	1,4118	8	1,413 <sub>7</sub>	1,4148	6	1,415 <sub>1</sub>	1,4143	15	1,414	1,414	30	1,416	1,418
a <sub>0</sub> , Å		4,358			4,377			4,378			4,393			4,410	
c <sub>0</sub> , Å		30,44			30,49			30,49			30,46			30,49	
a <sub>0</sub> /c <sub>0</sub>		0,1432			0,1436			0,1436			0,1442			0,1446	
V, Å <sup>3</sup>		500,67			505,88			506,11			509,08			513,53	
Sb, вес. %		8,67			1,43			0,14			—			0,00	
Pb, вес. %		Сл.			0,00			0,00			0,96			2,14	

\* Условия съемки дифрактограмм: ДРОН-1; λCo, ф. Fe (первые три образца); λCu, ф. Ni (два других образца); 1° θ=4 см. на диаграмме. Расчет параметров элементарной ячейки проведен методом наименьших квадратов (МНК) по величинам межплоскостных расстояний отражений, помеченных звездочкой. Аналитик Э. М. Спиридонов.

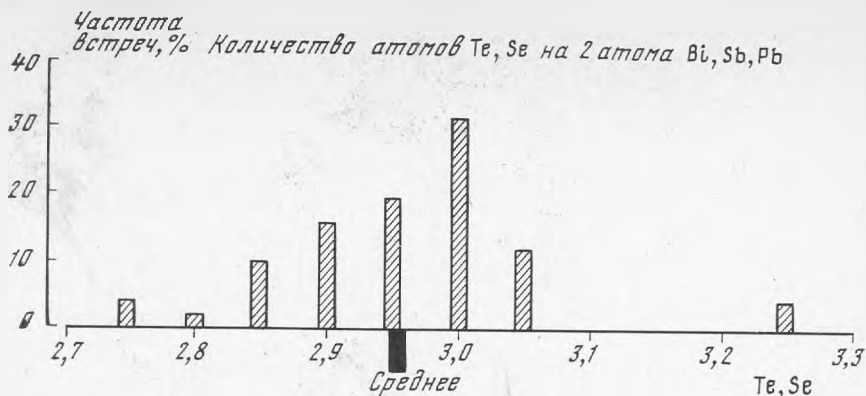


Рис. 8. Вариации состава теллуровисмутита Северного Казахстана

Свинцовистые тетрадимиты Аксу содержат от 1,7 до 3,3% Pb. Они богаче селеном (в среднем 0,21%), чем тетрадимит, не содержащий свинца (0,07% Se). Микрондированием установлено, что свинцовистые тетрадимиты Аксу однородны по содержанию Bi, Te, S, Pb. Состав их не меняется у контактов с теллуровисмутитом, золотом, халькопиритом, тетраэдритом, сфалеритом. Содержания висмута и свинца в тетрадимитах Аксу связаны

Таблица 6  
Оценка содержания сурьмы (минала  $Sb_2Te_3$  %) в теллуровисмутите по межплоскостным расстояниям

hkl	$Bi_2Te_3$ ASTM-15-863	Джеламбет Д-858/9-66	Жана-Тюбе Ж-30-68	$Sb_2Te_3$ ASTM-15-874
205	1,812	1,810 (4%)	1,801 <sub>5</sub> (23%)	1,766
0.2.10	1,611	1,610 (3%)	1,604 (21%)	1,578
1.1.15	1,490	1,488 <sub>2</sub> (9%)	1,485 (25%)	1,470
0.1.20	1,4140	1,4137 (5%)	1,4125 (25%)	1,4080
$a_0, \text{Å}$	4,385	4,377 (6%)	4,358 (22%)	4,262
$V, \text{Å}^3$	507,61	505,88 (6,0%)	500,67 (24,3%)	479,01
Содержание $Sb_2Te_3$ по данным химического анализа	—	4,6%	26,6%	—

Таблица 7  
Химический состав тетрадимита и свинцовистого тетрадимита, Северного Аксу \*, вес. %

Образец	Bi	Pb	Te	Se	S	Fe	Cu	Сумма
A-134-71	59,22	Не обн.	35,84	0,07	4,78	0,19	Не обн.	100,10
A-16-71	58,23	1,77	35,17	0,30	4,84	0,16	»	100,47
A-129-71	56,12	2,34	35,76	0,13	5,04	0,51	»	99,90
A-109-71	55,70	3,27	35,73	0,19	4,79	0,21	»	99,89

То же, без пирита, приведенное к 100%

	$Bi_2Te_2S$	Bi	Pb	Te	Se	S	Fe	Cu	Сумма
$Bi_2Te_2S$	59,26	—	36,19	—	4,55	—	—	—	100,00
A-134-71	59,40	—	35,96	0,07	4,57	—	—	—	100,00
A-16-71	58,15	1,77	35,13	0,30	4,65	—	—	—	100,00
A-129-71	56,81	2,37	36,19	0,13	4,50	—	—	—	100,00
A-109-71	56,01	3,29	35,93	0,19	4,58	—	—	—	100,00

\* Анализы выполнены из навески 200—300 мг Н. Г. Шумковой.

обратной пропорциональной зависимостью, сумма их практически постоянна  $\sim 59,5$  вес.%. Содержания теллура и серы в тетрадимитах устойчивы. Удельный вес свинцовистых тетрадимитов обр. А —  $129-71 D_{4\cdot c} = 7,62 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup>; обр. А =  $109-71 D_{4\cdot c} = 7,56 \pm 0,01$  г/см<sup>3</sup>.

Пересчет химических анализов свинцовистых тетрадимитов Аксу:

А-16-71	вес. %	атомное кол-во	форм. ед.	
Bi	58,15	0,2782	1,944	} 2,004 K=6,986
Pb	1,77	0,0085	0,060	
Te	35,13	0,1753	1,923	} 1,950
Se	0,30	0,0038	0,027	
S	4,65	0,1450	1,013	
А-129-71	вес. %	атомное кол-во	форм. ед.	
Bi	56,81	0,2718	1,918	} 1,999 K=7,058
Pb	2,37	0,0114	0,081	
Te	36,19	0,2836	2,006	} 2,014
Se	0,13	0,0016	0,012	
S	4,50	0,1403	0,990	
А-109-71	вес. %	атомное кол-во	форм. ед.	
Bi	56,01	0,2680	1,887	} 1,999 K=7,043
Pb	3,29	0,0159	0,112	
Te	35,93	0,2816	1,983	} 2,000
Se	0,19	0,0024	0,017	
S	4,58	0,1428	1,006	

По данным спектрального анализа свинцовистые тетрадимиты содержат (вес. %):

	Zn	Cu	Ag	Sb	Mn
А-16-71	0,05	0,01	0,01	0,005	0,001
А-129-71	0,03	0,005	0,05	—	Следы
А-109-71	0,1	0,003	0,001	—	Следы

Таким образом, с ростом содержания свинца в тетрадимитах возрастает содержание цинка и понижаются содержания меди, серебра и сурьмы.

Микротвердость свинцовистых тетрадимитов (18 измерений).  $H_1 = 36-49$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_2 = 23-34$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_{1cp} = 42$  кг/мм<sup>2</sup>;  $H_{2cp} = 28$  кг/мм<sup>2</sup>; коэффициент анизотропии твердости минерала 1,50. Микротвердость свинцовистого тетрадимита заметно варьирует в различно ориентированных сечениях: перпендикулярно базису вдоль удлинения она максимальна — в среднем 48 кг/мм<sup>2</sup>; поперек удлинения — в среднем 35 кг/мм<sup>2</sup>; на плоскости базиса минимальна — в среднем 26 кг/мм<sup>2</sup>. Микротвердость свинцовистых тетрадимитов Аксу несколько ниже микротвердости тетрадимитов, не содержащих заметного количества свинца (Дунин-Барковская и др., 1974).

Спектры отражения свинцовистых тетрадимитов Аксу (табл. 8, рис. 9) близки спектрам отражения тетрадимитов, исследованных ранее (Безсмертная и др., 1973). Ощутимые различия наблюдаются в положении  $R_{max}$ : общая тенденция к снижению этих значений может быть связана с восхождением в тетрадимит Аксу заметных количеств свинца (2—3%). Возможно, однако, что в изученном материале отсутствовали главные сечения минерала.

Рентгенограммы свинцовистых тетрадимитов (табл. 9) близки с эталонной для тетрадимита ASTM 9-447, отличаясь сдвигом всех отражений в сторону меньших углов. При увеличении содержания свинца (0 →



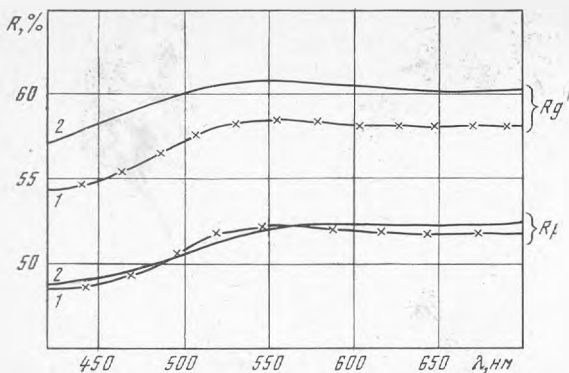


Рис. 9. Спектры отражения тетрадимита

1 — Аксу, шлиф А-109-71;  
2 — Мисхана (Безсмертная, Чвилева и др., 1973)

→ 1,77 → 2,37 → 3,29%) постепенно увеличиваются межплоскостные расстояния тетрадимитов, параметр  $a_0$  (4,237 → 4,241 → 4,243 → 4,253 Å) и объем элементарной ячейки (459,6 → 460,9 → 461,3 → 463,8 Å<sup>3</sup>); соотношения интенсивностей отражений 006 и 009 (1,8 → 2,7 → 3,7 → 6,7) и отражений 303 и 110 (0,36 → 0,56 → 0,62 → 1,6). Такие закономерные изменения в рентгеновских характеристиках свинцовистых тетрадимитов дают возможность оценивать по ним содержания свинца в минерале (табл. 10).

Таблица 8

Значения  $R$  (%) свинцовистого тетрадимита Северного Аксу\*

Образец	$R, \%$	$\lambda, \text{нм}$						
		420	440	460	480	500	520	540
А-109-71	$R_g'$	54,6	54,9	55,2	56,3	57,6	58,2	58,3
	$R_p'$	48,7	48,9	49,0	49,6	50,8	51,8	52,0
А-129-71	$R_g'$	54,2	54,4	54,7	55,6	56,8	57,5	57,7

\* Измерено Т. Н. Чвилевой, прибор «Блеск», объектив 20\* с апертурой 0,40; эталон — кремний.

Образец	$R, \%$	$\lambda, \text{нм}$							
		560	580	600	620	640	660	680	700
А-109-71	$R_g'$	58,4	58,3	58,1	58,0	58,0	58,1	58,1	58,0
	$R_p'$	52,1	52,1	52,0	51,9	51,7	51,7	51,7	51,7
А-129-71	$R_g'$	57,9	58,0	57,9	57,8	57,7	57,7	57,7	57,7

\* \* \*

Химический состав исследованных тетрадимитов в целом близок к формуле  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ . Тетрадимиты чаще имеют небольшой дефицит, реже избыток теллура. Содержание серы отвечает теоретическому. Усредненная формула проанализированных тетрадимитов Северного Казахстана  $(\text{Bi}, \text{Pb})_{2,001}(\text{Te}, \text{Se})_{1,989}\text{S}_{1,003}$ . Наиболее чутко реагируют на изменение состава тетрадимитов рентгенометрические характеристики, что позволяет оценивать по ним содержание свинца в тетрадимитах.

Таблица 9

Межплоскостные расстояния и параметры элементарной ячейки тетраэдрита Аксу (А-134-71) и свинцовистого тетрадимита Аксу (А-16-71, А-129-71, А-109-71)

<i>hkl</i>	А-134-71			А-16-71			А-129-71			А-109-71		
	$I/I_1$	$d_{\text{измер.}} \text{ \AA}$	$d_{\text{расч.}} \text{ \AA}$	$I/I_1$	$d_{\text{измер.}} \text{ \AA}$	$d_{\text{расч.}} \text{ \AA}$	$I/I_1$	$d_{\text{измер.}} \text{ \AA}$	$d_{\text{расч.}} \text{ \AA}$	$I/I_1$	$d_{\text{измер.}} \text{ \AA}$	$d_{\text{расч.}} \text{ \AA}$
003	5	9,87	9,85	6	9,88	9,86	6	9,87	9,86	6	9,89	9,87
006 *	28	4,92	4,93	35	4,94	4,93	33	4,93	4,93	60	4,95	4,93 <sub>5</sub>
101 *	11	3,64	3,642	10	3,65	3,645	10	3,65	3,646	11	3,66	3,655
104	14	3,290	3,286	12	3,298	3,291	11	3,301	3,291	7	3,305	3,297
009 *	16	3,274	3,284	13	3,290	3,288	9	3,289	3,288	9	3,292	3,289
015 *	100	3,116	3,118	100	3,129	3,121	100	3,126	3,122	100	3,128	3,127
107 *	11	2,772	2,770	12	2,777	2,772	9	2,778	2,774	12	2,782	2,778
018 *	13	2,601	2,605	14	2,612	2,606	15	2,610	2,607	18	2,609	2,610
0.0.12 *	17	2,462	2,463	21	2,466	2,466	19	2,464	2,466	23	2,468	2,467
1.0.10 *	50	2,300	2,302	60	2,308	2,304	56	2,306	2,305	58	2,308	2,307
0.1.11 *	16	2,168	2,168	18	2,173	2,170	17	2,172	2,171	17	2,174	2,173
110 *	39	2,122	2,119	36	2,125	2,121	29	2,126	2,122	19	2,128	2,126
0.0.15 *	18	1,969	1,970 <sub>7</sub>	22	1,972	1,973	16	1,972	1,973	20	1,972	1,974
1.0.13 *	25	1,932	1,932	30	1,936	1,935 <sub>7</sub>	29	1,936	1,935	35	1,938	1,937
0.1.14	3	1,827	1,829	3	1,830	1,832	3	1,832	1,832	4	1,838	1,834
024	4	1,781	1,781	6	1,782	1,782	7	1,783	1,783	5	1,785	1,787
205 *	14	1,754	1,752	16	1,757	1,754	9	1,757	1,754 <sub>5</sub>	11	1,762	1,759
208 *	12	1,644 <sub>2</sub>	1,6432	25	1,644 <sub>5</sub>	1,6447	16	1,650	1,6454	25	1,652	1,6487
0.0.18 *	19		1,6422	25	1,642 <sub>3</sub>	1,6439	17	1,642	1,6439	22	1,647	1,6447
1.1.12 *	15	1,607 <sub>5</sub>	1,6062	9	1,608 <sub>3</sub>	1,6077	6	1,608	1,6082	7	1,609	1,6106
0.2.10 *	14	1,5608	1,5590	14	1,561 <sub>4</sub>	1,5604	9	1,5617	1,5609	15	1,563	1,5637

Таблица 9 (окончание)

$hkl$	A-134-71			A-16-71			A-129-71			A-109-71		
	$I/I_1$	$d_{\text{измер}}, \text{Å}$	$d_{\text{расч}}, \text{Å}$	$I/I_1$	$d_{\text{измер}}, \text{Å}$	$d_{\text{расч}}, \text{Å}$	$I/I_1$	$d_{\text{измер}}, \text{Å}$	$d_{\text{расч}}, \text{Å}$	$I/I_1$	$d_{\text{измер}}, \text{Å}$	$d_{\text{расч}}, \text{Å}$
2.0.11	2	1,515 <sub>2</sub>	1,5152	2	1,516 <sub>7</sub>	1,5165	3	1,518	1,5172	4	1,521	1,5198
1.1.15 *	9	1,442 <sub>7</sub>	1,4427	13	1,443 <sub>8</sub>	1,4443	8	1,444 <sub>5</sub>	1,4447	12	1,445	1,4465
0.2.13	5	1,428 <sub>5</sub>	1,4278	9	1,428 <sub>5</sub>	1,4292	5	1,430 <sub>2</sub>	1,4296	9	1,432	1,4320
0.0.21	4	1,408 <sub>4</sub>	1,4076	2	1,4089	1,4090	3	1,409 <sub>6</sub>	1,4090	1	1,410	1,4098
121	2	1,384 <sub>4</sub>	1,3852	2	1,386 <sub>6</sub>	1,3866	3	1,387 <sub>5</sub>	1,3873	3	1,390	1,3905
0.1.20	2	1,368 <sub>1</sub>	1,3706	3	1,372 <sub>1</sub>	1,3723	4	1,372 <sub>2</sub>	1,3725	4	1,374	1,3734
125 *	10	1,351 <sub>4</sub>	1,3503	12	1,352 <sub>6</sub>	1,3514	5	1,352	1,3520	7	1,356	1,3552
128	16	1,299 <sub>2</sub>	1,2985	22	1,299	1,2992	13	1,300 <sub>5</sub>	1,3002	19	1,302	1,3028
1.1.18	17	1,297 <sub>5</sub>	1,2978		—			—		17	1,299	1,3009
2.1.10	11	1,2552	1,2556	11	1,2563	1,2565	10	1,2570	1,2572	8	1,2593	1,2597
303 *	14	1,2130	1,2137	20	1,2148	1,2148	18	1,2153	1,2154	31	1,2175	1,2183
0.1.23	15	1,2120	1,2126	18	1,2140	1,2142	17	1,2142	1,2143	25	1,2150	1,2150
$a_0, \text{Å}$		4,237			4,241			4,243			4,253	
$c_0, \text{Å}$		29,56			29,59			29,59			29,605	
$a_0/c_0$		0,1433			0,1433			0,1434			0,1436	
$V, \text{Å}^3$		459,57			460,91			461,34			463,75	
Pb, вес. %		0,00			1,77			2,34			3,29	

\* Условия съемки дифрактограмм: ДРОП-1;  $\lambda\text{Co}$ , ф. Fe;  $1^\circ \theta=4$  см на диаграмме. Расчет параметров элементарной ячейки проведен МНК по величинам межплоскостных расстояний отражений, помеченных звездочкой. Аналитик Э. М. Спиридонов.

Таблица 10

## Рентгенометрические характеристики тетрадимитов с различными содержаниями свинца

Pb, вес. %	Pb, форм. ед.	$d_{117}$ , Å	$d_{110}$ , Å	$d_{303}$ , Å	$a_c$ , Å	$V$ , Å <sup>3</sup>	$I_{006}/I_{009}$	$I_{303}/I_{110}$
0,00	0,000	2,772	2,122	1,2130	4,237	459,57	1,8	0,36
1,77	0,060	2,777	2,125	1,2148	4,241	460,91	2,7	0,56
2,37	0,080	2,778	2,126	1,2153	4,243	461,34	3,7	0,62
3,29	0,112	2,782	2,128	1,2175	4,253	463,75	6,7	1,60

## ЛИТЕРАТУРА

- Безсмертная М. С., Чвилева Т. Н. и др. Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости. «Недра», 1973.
- Боришанская С. С. Теллуриды в золоторудных месторождениях СССР и их диагностика. Автореф. канд. дис., М., 1946.
- Вейц Б. И., Крикунова Н. П., Слюсарев А. П. Редкие минералы золоторудного месторождения Жана-Тюбе Северного Казахстана.— Труды ГИН АН КазССР, т. 31. Алма-Ата, 1971.
- Дуниин-Барковская Э. А., Аранова Г. А., Вяльсов Л. Н., Лебедева С. И., Бородин Ю. В. Тетрадимит и условия его образования в Средней Азии.— В кн.: Новые данные о минералах СССР, вып. 23, М., «Наука», 1974.
- Магакьян И. Г. Стибиотеллуровисмутит Зодского золоторудного месторождения.— Изв. АН АрмССР, 1956, XXIII, № 51, Ереван.
- Назьмова Г. Н., Шалаев Ю. С. Минеральные ассоциации золоторудных месторождений Северного Казахстана.— Вестн. МГУ, серия геол., 1971, № 2.
- Спиридонов Э. М., Соколова Н. Ф., Ганеев А. К. Минеральные ассоциации золототеллуридного месторождения Жана-Тюбе (Северный Казахстан).— Геол. рудн. месторожд., 1974, № 1.
- Спиридонов Э. М., Соколова Н. Ф., Шумкова Н. Г. Новые типы минеральных ассоциаций самородного золота Северо-Казахстанской провинции.— В кн.: Минералогия золота. Владивосток, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1974.
- Ödman O.— Sver. geol. undersokn. Arsbok, 1941, 35.
- Thorpe R. J., Harris D. C.— Canad. Mind., 1973, 12, N 1.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

## О связи химического состава и рентгенометрических характеристик теллуридов и сульфотеллуридов висмута.

Чтобы рассмотреть связи состава и рентгенометрических характеристик теллуридов и сульфотеллуридов висмута, нужно классифицировать последние. Для этого удобно привести формулы теллуридов и сульфотеллуридов висмута к виду  $Bi_xA_y$  ( $A = Te+S$ ) и расположить минералы по возрастанию отношения  $Bi:A$  и  $Te:S$  (табл. 11). Предлагаемая схема близка к схемам А. А. Годовикова и др. (1971) и Д. О. Онтоева и др. (1974).

В предложенном варианте классификации помимо общеизвестных, приведено несколько минералов по данным А. А. Годовикова и др. (1970), М. С. Сахаровой (1972), Э. А. Дуниин-Барковской и др. (1968), А. С. Глатца (Glatz, 1967), В. С. Аксенова и др. (1968), С. Коха (Koch, 1948), М. А. Пикока (Peacock, 1941). Все эти минералы весьма близки в структурном отношении.

Выделено шесть вертикальных рядов — от  $Bi_2A_5$  до  $Bi_7A_3$ . В ряду  $Bi_2A_5$  известен только минерал Аксенова — теллурид с Алтая. К ряду  $Bi_2A_3$ , ряду теллуровисмутита — висмутита относятся теллуровисмутит, тетрадимит, чикловаит и искусственные  $\beta$ - и  $\gamma$ -тетрадимиты (Glatz, 1967).

Ряд  $BiA$  представлен искусственным теллуридом  $BiTe$ , верлитом, минералом М Годовикова и др. (1970), гриндингитом, минералом Коха. К искусственному  $BiTe$  близок теллурид из Дарасуна (Сахарова, 1972). М. С. Сахарова предложила именовать последний верлитом. Первоначально верлитом был назван минерал  $Bi_4Te_3S_4$ .

Таблица 11

Систематика теллуридов и сульфотеллуридов висмута  $\text{BiA}$  ( $\text{A}=\text{Te}+\text{S}$ ) и величины межплоскостного расстояния их сильнейшего отражения 015 (A)

Te : S	$\text{Bi}_2\text{A}_5$	$\text{Bi}_2\text{A}_3$	$\text{BiA}$	$\text{Bi}_4\text{A}_3$	$\text{Bi}_3\text{A}_2$	$\text{Bi}_2\text{A}_5$	$\text{Bi}_7\text{A}_3$	$\text{BiA}_6$
$\infty$	Минерал Аксенова $\text{BiTe}_{2,5}$ 3,20	Теллуровисмутит $\text{BiTe}_{1,5}$ 3,21	Искусственный $\text{BiTe}$ 3,23 Дарасунит $\text{BiTe}$ 3,22	?	Пильзенит $\text{BiTe}_{0,67}$ 3,23	?	Хедлейит $\text{BiTe}_{0,42}$ 3,25	Висмут Bi 3,28
4	—	—	?	?	?	—	—	—
3	—	$\beta$ -тетрадимит $\text{BiTe}_{1,13}\text{S}_{0,37}$ 3,13	Верлит $\text{BiTe}_{0,75}\text{S}_{0,25}$ ...	?	?	—	—	—
2	—	Тетрадимит $\text{BiTeS}_{0,5}$ 3,11	?	Жозеит В $\text{BiTe}_{0,5}\text{S}_{0,25}$ 3,16	Минерал К $\text{BiTe}_{0,45}\text{S}_{0,22}$ ...	—	Искусственный $\text{BiTe}_{0,28}\text{S}_{0,14}$ 3,24	—
1	—	$\gamma$ -тетрадимит $\text{BiTe}_{0,75}\text{S}_{0,75}$ ...	Минерал М $\text{BiTe}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ 3,04	Жозеит Д $\text{BiTe}_{0,37}\text{S}_{0,37}$ 3,09	Минерал L $\text{BiTe}_{0,33}\text{S}_{0,33}$ 3,10	—	—	—
1/2	—	Чикловаит $\text{BiTe}_{0,5}\text{S}$ ...	?	Жозеит А $\text{BiTe}_{0,25}\text{S}_{0,5}$ 3,07	?	—	—	—
1/3	—	—	Грюнлингит $\text{BiTe}_{0,25}\text{S}_{0,75}$ 3,04	Жозеит С $\text{BiTe}_{0,2}\text{S}_{0,55}$ 3,05	Минерал Пикока $\text{BiTe}_{0,17}\text{S}_{0,5}$ ...	—	—	—
1/4	—	—	Минерал Коха $\text{BiTe}_{0,2}\text{S}_{0,8}$ ...	?	Минерал Р $\text{BiTe}_{0,14}\text{S}_{0,53}$ ...	Оруэтит $\text{BiTe}_{0,12}\text{S}_{0,5}$ 3,07	—	—
0	—	Висмутин $\text{BiS}_{1,5}$	?	Икуволит $\text{BiS}_{0,75}$ 3,02	—	—	—	—

в дальнейшем название верлит чаще использовалось как синоним пильзенита  $\text{Bi}_3\text{Te}_2$  (Рамдор, 1962). Нам представляется рациональным использование названия верлит в первоначальном значении. Минерал М. С. Сахаровой из Дарасуна состава  $\text{BiTe}$ , видимо, целесообразно именовать дарасунитом.

Ряд  $\text{Bi}_4\text{As}_2$  представлен жозейтами. Помимо известных жозейта *A* (сульфожозейта) и жозейта *B* (теллурижозейта), здесь представлены жозейт *C* (Годовиков и др., 1971) и жозейт *D* — минерал из Устарасая Э. А. Дунин-Барковской, по составу промежуточный между жозейтами *A* и *B*.

Ряд  $\text{Bi}_3\text{As}_2$  включает пильзенит, минералы *K*, *L* и *P* (Годовикова и др., 1970), минерал Пикока. Соединения типа  $\text{Bi}_3\text{As}_2$  представлены оруэтитом. Ряд  $\text{Bi}_7\text{As}_3$  представлен хедлейитом и искусственным соединением  $\text{Bi}_7\text{Te}_2\text{S}$  (Рихтер, 1967). Вопросы отмечены в таблице помечены возможные минералы.

Как видно (табл. 11), с ростом отношения  $\text{Te} : \text{S}$  в пределах каждого рассмотренного ряда существенно увеличивается межплоскостное расстояние сильнейшего отражения (015) минералов. Величина  $d_{015}$  постепенно возрастает и при увеличении отношения  $\text{Bi} : \text{As}$ , правда в меньшей степени, чем в первом случае. Это позволяет с достаточной точностью предсказывать величины  $d_{015}$  для тех сульфотеллуридов висмута, для которых отсутствуют рентгеновские данные. Заметные различия величины  $d_{015}$  наиболее распространенных теллуридов и сульфотеллуридов висмута позволяют надежно диагностировать такие сходные минералы, как жозейты разного состава или теллуровисмутит и тетрадимит в изолированных выделениях, диагностировать эти минералы в тонких сростках и т. п. Так как рассматриваемые минералы обладают слоистой структурой, то на препарат для рентгеновской съемки достаточно одного зерна, которое вместе с внутренним эталоном раздавливается на стеклянной пластинке.

Известно, что теллур в значительной мере может замещаться селеном, а висмут — сурьмой (вплоть до теллурантимонита) и свинцом. Вхождение значительных количеств свинца (до 5%) в теллуровисмутиты и тетрадимиты, по данным М. С. Сахаровой и нашим наблюдениям, практически не влияет на их структуру. Недавно Ж. Раклидж (Rucklidge, 1969) описал теллурид висмута и свинца, по составу отвечающий  $(\text{Bi}, \text{Pb})_3\text{Te}_4$ . Минерал содержит около 18% свинца. В настоящее время этот минерал рассматривается некоторыми исследователями как свинцовистая разновидность теллуровисмутита или пильзенита, хотя структура раклиджита отличается от структуры теллуровисмутита. Поэтому в соответствии с изложенным выше представляется, что раклиджит не относится к ряду теллуридов висмута и написание формулы, приведенное выше, неправильное. По-видимому, формула раклиджита скорее имеет вид  $\text{PbBi}_2\text{Te}_4$ , состав минерала весьма точно отвечает этой формуле.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Аксенов В. С., Косяк Е. А., Мергенов Ш. К., Рафиков Т. К. Новый теллурид висмута  $\text{Bi}_2\text{Te}_5$ .— Докл. АН СССР, 1968, 181, № 2.
- Годовиков А. А., Кочеткова К. В., Лаврентьев Ю. Г. Изучение сульфотеллуридов висмута месторождения Сохондо.— Геол. и геоф., 1970, № 11.
- Годовиков А. А., Кочеткова К. В., Лаврентьев Ю. Г. О систематике сульфотеллуридов и теллуридов висмута.— Зап. ВМО, ч. 100, вып. 4, 1971.
- Дунин-Барковская Э. А., Лидер В. В., Романский В. Н. Свинцовсодержащий жозейт из Устарасая.— Зап. ВМО, ч. 97, вып. 3, 1968.
- Онтоев Д. О., Тронева Н. В., Цепин А. И., Вьяльсов Л. Н., Басова Г. В. Первая находка оруэита в СССР.— Зап. ВМО, ч. 103, вып. 3, 1974.
- Рамдор П. Рудные минералы и их сравнения. ИЛ, 1962.
- Рихтер Т. Л. К вопросу о сульфотеллуридах висмута и их искусственных аналогах.— В кн.: Экспериментальные исследования в области минералогии и геохимии редких элементов. «Наука», 1967.
- Сахарова М. С. О химическом составе минералов висмута из Восточного Забайкалья.— Изв. АН СССР, серия геол., 1972, № 2.
- Glatz A. C. The  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{S}_3$  system and the synthesis of the mineral tetradymite.— Amer. Mineral., 1967, 52, N 1.
- Koch S. Bismuth mineral in the Carpathian Basin.— Acta miner., petrogr., 1948, 2.
- Peacock M. A. On joseite, grundlingite, orueteite.— Univ. Toronto St., ser. geol., 1941, 46.
- Rucklidge I. Frohbergite, montbrayite and new Pb—Bi telluride.— Canad. Mineral., 1969, N 9.