

ГЕОЛОГИЯ

УДК 549.313(470.64)

БАКСАНИТ $\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$ – НОВЫЙ МИНЕРАЛ ИЗ ТЫРНЫАУЗА (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ)

© 1996 г. И. В. Пеков, Е. Н. Завьялов, С. В. Федющенко,
Д. К. Щербачев, Ю. С. Бородаев, Г. И. Дорохова

Представлено академиком В.А. Жариковым 04.10.95 г.

Поступило 06.10.95 г.

Новый сульфотеллурид висмута обнаружен в 1989 г. при изучении рудной минерализации в скарнах Северного участка месторождения Тырныауз (Северный Кавказ). Минерал получил название баксанит* по долине р. Баксан, в левом борту которой расположено месторождение.

Тырныауз – крупнейший, очень сложно построенный рудно-магматический узел, локализованный в пределах мощной тектонической зоны; он изучается уже более 60 лет. Помимо наиболее известного гигантского вольфрам-молибденового месторождения, в состав рудного поля входят несколько более мелких самостоятельных объектов, лежащих в его периферических частях. Это проявления Sn, Bi, Au, Pb–Zn–Cu–Ag, Sb. Оруденение разных типов связано по большей части с контактово-метасоматическими (известково-скарновыми) и гидротермальными образованиями [1]. Исключительное разнообразие типов минерализации и детальная изученность обусловили весьма обширный минеральный кадастр Тырныауза: здесь, по данным О.В. Кононова, установлено более 270 минеральных видов.

Теллуриды и сульфотеллуриды висмута встречаются в пределах всего рудного поля [2], но наиболее часто и обильно в существенно гранатовых золотосодержащих скарнах и сульфидоносных кварц-карбонатных жилах Северного участка. Более всего распространены тетрадимит, цумоит и жозеит А, реже отмечаются ингодит, теллуrowисмутит, жозеит В, пильзенит, сульфоцумоит и баксанит. Последний найден только в отвалах одной из разведочных штолен, вскрывающей круп-

ное скарновое тело Аномалии № 3 в верховьях ручья Тырныауз-су. Скарны здесь содержат богатую вкрапленность теллуридов висмута и самородного золота; при этом практически полностью отсутствуют сульфиды, кроме редкого висмутина. Баксанит находится в мелких гнездах и

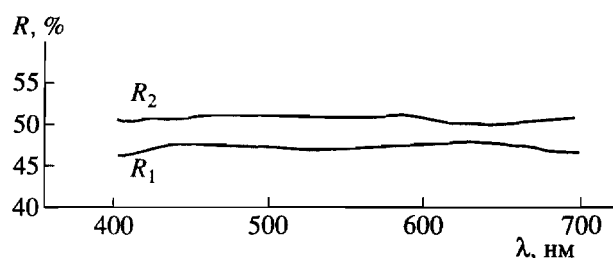


Рис. 1. Спектры отражения R_1 и R_2 баксанита.

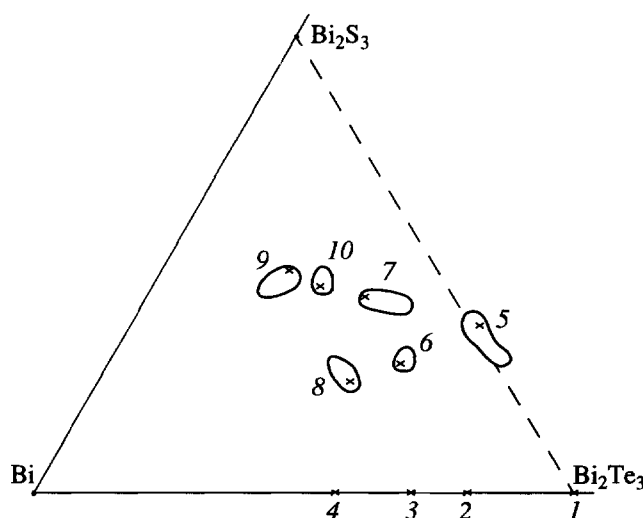


Рис. 2. Вариации составов природных сульфотеллуридов висмута. × – точки стехиометрии. 1 – теллуrowисмутит Bi_2Te_3 ; 2 – цумоит BiTe ; 3 – пильзенит Bi_4Te_3 ; 4 – хедлиит Bi_2Te ; 5 – тетрадимит $\text{Bi}_2(\text{Te}_2\text{S})$; 6 – сульфоцумоит $\text{Bi}_3(\text{Te}_2\text{S})$; 7 – ингодит $\text{Bi}_2(\text{TeS})$; 8 – жозеит В $\text{Bi}_4(\text{Te}_2\text{S})$; 9 – жозеит А $\text{Bi}_4(\text{TeS}_2)$; 10 – баксанит $\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$.

* Баксанит (92-042) и его название одобрены КНМ ВМО и утверждены КНМ ММА 4 мая 1995 г.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Московская государственная геологоразведочная
академия

Всероссийский институт минерального сырья
им. Н.М. Федоровского

Таблица 1. Зависимость коэффициента отражения баксанита (R , %) от длины волны (λ , нм)

λ , нм	R_1 , %	R_2 , %
400	46.3	50.1
420	47.5	50.2
440	48.9	50.5
460	48.1	52.2
480	48.2	52.0
500	47.7	52.4
520	47.7	52.2
540	48.1	52.4
560	48.7	52.6
580	48.6	52.1
600	49.0	51.6
620	49.3	51.0
640	49.2	51.1
660	49.2	50.8
680	48.7	51.1
700	48.5	51.2

Примечание. Измерение коэффициента отражения выполнено при помощи автоматической микроспектрофотометрической установки на основе универсального спектрального вычислительного комплекса КСВУ-12М; эталон – WTiC.

прожилках среди гидротермально измененного гранат-магнетитового скарна. Гнезда эти сложены кристалликами позднего красного андрадита, агрегатом кальцита, хлорита и стильпномелана. Баксанит образует сферические или каплевидные обособления диаметром до 13 мм, сложенные одним или несколькими монокристаллическими блоками. Внутри них обычны вроски высокопробного золота до 1–2 мм, а снаружи – тонкая “скорлупа” висмутита. Изредка в сростании с баксанитом отмечаются ингодит или жозеит А; граница между фазами всегда резкая.

Макроскопически и в шлифах баксанит неотличим от других сульфотеллуридов висмута. Он имеет весьма совершенную базальную спайность, светлый стально-серый цвет, черную черту и металлический блеск, очень сильный на плоскостях спайности. В полированном шлифе это ярко-белый минерал с коэффициентом отражения от 47 до 52% (табл. 1). Двухотражение слабое, наблюдается отчетливая анизотропия с цветным эффектом в желтовато-серых тонах. Спектры отражения баксанита (рис. 1) близки к спектрам других висмутовых сульфотеллуридов. Минерал мягкий, твердость по Моосу 1.5–2. Микротвердость, измеренная на пенетрометре “Reichert” при нагрузке 5 г, составляет в среднем 62 кг/мм² на анизотропном сечении.

Химический состав баксанита определен рентгеноспектральным методом. Всего изучено около 20 зерен минерала. Средний состав, взятый из результатов анализа зерен, для которых сняты преци-

Таблица 2. Теоретическая рентгенограмма, рассчитанная для модели структуры баксанита (1), экспериментальная дифрактограмма баксанита из Тырныауза (2) и вычисленные для них параметры элементарной ячейки

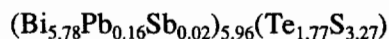
hkl	1. Теоретическая		2. Экспериментальная	
	d , Å	I , %	d , Å	I , %
005	12.56	1	12.3	4
00.11	5.71	12	5.65	14
00.14	4.49	3	4.50	46
00.15	4.19	3	—	—
100	3.681	14	3.68	3
103	3.625	3	3.63	10
104	3.584	4	3.58	22
105	3.532	3	3.53	15
00.19	3.305	1	3.30	20
01.11	3.094	100	3.09	100
10.22	2.256	34	2.255	38
110	2.125	36	2.126	25
01.25	2.075	2	2.083	2
01.27	1.966	1	1.965	2
11.14	1.920	1	1.921	5
00.33	1.903	5	1.903	4
11.15	1.895	11	1.893	4
025	1.821	1	1.822	1
11.19	1.788	1	1.789	1
20.11	1.752	18	1.755	12
11.24	1.650	1	1.649	6
02.22	1.547	10	1.547	12
20.25	1.485	1	1.485	2
11.33	1.418	5	1.416	6
12.11	1.352	7	1.351	12
01.44	1.331	2	—	—
12.17	1.301	<0.5	1.301	1
21.22	1.251	4	1.250	5
300	1.226	5	1.225	10

Параметры элементарной ячейки

$a_0 = 4.25$ Å	$a_0 = 4.249(2)$ Å
$c_0 = 62.8$ Å	$c_0 = 62.82(5)$ Å
$V = 982.35$ Å ³	$V = 982(1)$ Å ³

Примечание. Условия съемки: дифрактометр ДРОН-3, CoK_{α_1} -излучение, Fe-фильтр.

зионные дифрактограммы, следующий, мас. %: Bi 76.40; Pb 2.15; Sb 0.12; Te 14.33; Se 0.00; S 6.64; сумма 99.64. Формула, рассчитанная в соответствии со структурными данными, на сумму 11 атомов:



или, в упрощенном виде, $\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$.

Баксанит – однородная фаза с достаточно устойчивой стехиометрией. Его составы образуют на диаграмме Bi–Te–S индивидуальное компактное поле (рис. 2). Жозеит А и ингодит по химизму

имма, рассчитан-
(1), эксперимен-
Тырныауза (2) и
ментарной ячейки

экспериментальная

	$I, \%$
	4
	14
	46
	—
	3
	10
	22
	15
	20
	100
5	38
6	25
3	2
5	2
1	5
3	4
3	4
2	1
9	1
5	12
9	6
7	12
5	2
6	6
1	12
1	—
0	5
5	10

ментарной

4.249(2) Å
62.82(5) Å
982(1) Å³

ометр ДРОН-3,

ций, мас. %:
Se 0.00; S 6.64;
в соответствии
у 11 атомов:

$S_{3.27}$)

достаточно ус-
авы образуют
бное компакт-
ит по химизму

ближе других к баксаниту, однако различия все же существенны. Так, эти минералы, даже тесно ассоциирующие с баксанитом, имеют свой обычный состав.

Порошковая рентгенограмма баксанита (табл. 2) индивидуальна и является его вторым, наряду с составом, надежным диагностическим признаком (табл. 3). Как и другие сульфотеллуриды висмута, новый минерал обладает слоистой структурой. В рамках ее изучения был построен ряд моделей для расчета теоретической рентгенограммы и дальнейшего сопоставления ее с экспериментальной дифрактограммой баксанита. При составлении моделей за основу взяты, с учетом обширного литературного материала [3–7], следующие положения. В подобных соединениях со слоистой структурой каждый слой составлен однотипными атомами – (Bi, Sb, Pb) или (Te, S, Se). Если не учитывать сортность атомов внутри слоя, то четко просматривается n -кратная повторяющаяся трех-слойная (кубическая) плотнейшая упаковка, т.е. число слоев в тригональной элементарной ячейке для любой такой структуры кратно трем. Оно отвечает, как минимум, утроенному суммарному количеству атомов в химической формуле.

Подбор наименьших целых коэффициентов в формуле баксанита дает стехиометрию $\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$. Суммарное количество атомов – 11, минимальное предполагаемое число слоев в ячейке – 33. К тому же результату независимо приводит уже первичное индицирование порошкограммы. Для этого, согласно предложенной Е.Н. Завьяловым [6] схеме индицирования, взяты две наиболее сильные линии, являющиеся в таких соединениях рефлексами подструктуры с индексами $01.l_0$ и $01.2l_0$: 3.09 и 2.255 Å, и “сверхструктурное” базальное отражение $00.l_s$: 4.50 Å (табл. 2). Из рассчитанного значения отношения l_0/l_s , равного 0.789, следует, что индексы l_0 и l_s имеют значения соответственно 11 и 14. Как и у других слоистых халькогенидов висмута, индекс l_0 (11) равен сумме коэффициентов (атомов) в химической формуле, а умноженный на 3 указывает на число слоев в ячейке – 33. Индекс l_s (14), в свою очередь, задает базальный параметр c_0 ($14 \times 4.50 \approx 63$ Å).

Все эти данные, а также значения межатомных расстояний в известных структурах сульфотеллуридов висмута [7], позволили построить ряд моделей 33-слойного баксанита с несколько отличными значениями c_0 – от 62.1 до 62.9 Å. При отсутствии на порошкограмме рефлексов 005 и 00.14 однозначно отрицает R -решетку, что сужает круг рассматриваемых моделей до рамок просторанственной группы $P\bar{3}m1$ и более низкосимметричных. Кроме того, еще на первых этапах исследования баксанита привлек внимание тот факт, что его формула $\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$ может быть по-

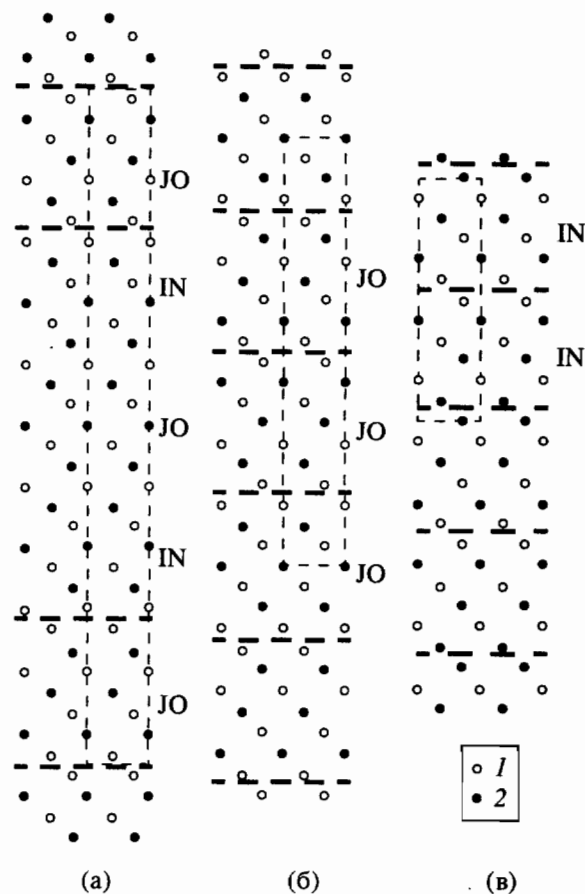


Рис. 3. Схемы моделей кристаллических структур баксанита (а), жозеита А (б) и ингодита (в) в проекции на (1120). 1 – Bi, 2 – (Te, S).

лучена простым сложением формул ингодита $\text{Bi}_2(\text{TeS})$ и жозеита А $\text{Bi}_4(\text{TeS}_2)$. При этом в ячейке ингодита ($P\bar{3}m1$) содержится 12 слоев и $c_0 = 23.2$ Å, а для жозеита А ($R\bar{3}m$) эти значения – 21 слой и $c_0 = 39.77$ Å [7]; суммарное число слоев (при соотношении 1 : 1) – 33, а “совокупный” параметр $c_0 \approx 62.97$ Å. Поэтому особое внимание было уделено моделям на базе структур этих минералов.

Теоретические рентгенограммы для моделей структур были рассчитаны с помощью программы LAZY PULVERIX. Наилучшая сходимость с экспериментальной дифрактограммой баксанита (табл. 2) установлена для модели, схема которой, в соотношении со структурами жозеита А и ингодита, показана на рис. 3.

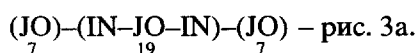
И н г о д и т: в структуре четко выделяются два однотипных 6-слойных блока (IN), связанных центром инверсии: (IN)⁺(IN)[−]. На рис. 3 в границы между блоками показаны жирной штриховой линией. Ж о з е и т А: выделяются три однотипных семи-слойных блока (JO), связанных трансляциями

Таблица 3. Сравнительная характеристика баксанита, жозеита А и ингодита

Параметр	Баксанит	Жозеит А	Ингодит
Химическая формула	$\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$	$\text{Bi}_4(\text{TeS}_2)$	$\text{Bi}_2(\text{TeS})$
Теоретический состав, мас. %			
Bi	78.1	81.4	72.4
Te	15.9	12.3	22.0
S	6.0	6.3	5.6
Симметрия	Тригональная $P\bar{3}m1$	Тригональная $R\bar{3}m$	Тригональная $P\bar{3}m1$
Параметры элементарной ячейки			
$a_0, \text{\AA}$	4.249	4.241	4.247
$c_0, \text{\AA}$	62.82	39.77	23.2
Число слоев в ячейке	33	21	12
Интенсивные линии рентгенограммы, $\text{\AA}$	4.50*	4.41*	4.70*
	3.09	3.10	3.11
	2.255	2.25	2.26
	2.126	2.13	2.13
	1.755	1.752	1.942
	1.547	1.415	1.430

Примечание. Параметры ячейки жозеита А и ингодита взяты по данным [7]; звездочкой отмечен главный диагностический рефлекс.

R -решетки: $(\text{JO})^R(\text{JO})^R(\text{JO})$ – рис. 3б. Б а к с а н и т: “сердцевина” – 19-слойный блок, полученный путем внедрения между блоками (IN) центрального блока (JO): (IN)–(JO)–(IN). Этой 19-слойной конструкцией заменяется центральный блок в структуре жозеита А. Таким образом, схему модели структуры баксанита можно условно записать так:



Эта модель отвечает симметрии $P\bar{3}m1$. Значительное увеличение интенсивности большинства базальных рефлексов на экспериментальной дифрактограмме относительно вычисленных значений можно объяснить текстурированием частиц в препарате вдоль плоскости спайности (001). Модель позволяет уверенно индифицировать рефлекс порошкограммы баксанита; уточненные параметры элементарной ячейки $a_0 = 4.249(2) \text{\AA}$, $c_0 = 62.82(5) \text{\AA}$ близки к теоретическим (табл. 2). Вычисленная плотность баксанита $D_x = 8.07 \text{ г/см}^3$, измеренная $8.1(1) \text{ г/см}^3$.

Таким образом, по своей кристаллической структуре 33-слойный баксанит $\text{Bi}_6(\text{Te}_2\text{S}_3)$ совершенно индивидуален и не может быть отнесен ни к одной из выделенных в настоящее время подгрупп слоистых халькогенидов висмута: тетрадимита (15-слойной), жозеита (21-слойной), цумойта

(12-слойной), хедлиита (9-слойной) [6, 7]. От сходных минералов баксанит надежно отличается присутствием на порошкограмме базального рефлекса $4.49\text{--}4.52 \text{\AA}$ (00.14) вкупе с главным отражением $3.09\text{--}3.10 \text{\AA}$ (01.11), табл. 3.

Из ранее опубликованных данных в поле составов баксанита, несомненно, попадает анализ неназванной фазы из месторождения Кти-Теберда (Сев. Кавказ) [8], который можно рассчитать на формулу $(\text{Bi}_{5.42}\text{Pb}_{0.63})_{6.05}(\text{Te}_{2.06}\text{S}_{2.88})_{4.94}$. Возможно, высокосернистым баксанитом является и сульфотеллурид из Баянского месторождения (Сев. Казахстан) [9], имеющий состав $(\text{Bi}_{5.69}\text{Pb}_{0.13})_{5.82}(\text{Te}_{1.46}\text{S}_{3.72})_{5.18}$. Однако в этих работах приводятся лишь результаты электронно-зондовых анализов без рентгеновских данных. Для Тырныаузского рудного поля фаз с составом, близким к баксаниту, ранее не отмечалось [2].

Эталонный образец баксанита передан в Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН в Москве.

Авторы благодарят О.В. Кононова за ценные консультации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 95–05–14390).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родзянко Н.Г., Нефедов Н.К., Свириденко А.Ф. Редкометалльные скарны Тырныауза. М.: Недра, 1973. 215 с.
2. Липовецкий А.Г. Особенности химического состава теллуридов висмута Тырныаузского рудного поля. Деп. ВИНТИ. 1978. № 2415-78. С. 118–125.
3. Strunz H. // Ns. Jb. Miner. Mohatch. 1963. № 1. P. 154–157.
4. Стасова М.М., Карпинский О.Г. // ЖСХ. 1967. Т. 8. № 1. С. 85–88.
5. Pauling L. // Amer. Miner. 1975. V. 60. № 9/10. P. 994–997.
6. Завьялов Е.Н. // Новые данные о минералах. 1981. В. 29. С. 59–70.
7. Bayliss P. // Amer. Miner. 1991. V. 76. № 1/2. P. 257–265.
8. Дружинин А.В., Онтюев Д.О., Игнатов А.В. и др. // Геология руд. месторождений. 1975. Т. 17. № 5. С. 25–35.
9. Кудрина М.А., Кудрин В.С., Материкова А.М. и др. // Новые данные о минералах. 1986. В. 33. С. 86–93.

родит

(TeS)

2.4

2.0

5.6

ыная $P\bar{3}m1$

.247

.2

12

70*

11

26

13

942

430

гностический

7]. От сход-
отличается
льного ре-
вным отра-

поле соста-
нализ нена-
берда (Сев.
на формулу
высокосер-
теллурид из
хстан) [9],
2)5.18. Одна-
ьтаты эле-
теновских
поля фаз с
не отмеча-

едан в Ми-
мана РАН

за ценные

Российско-
аний (про-