

Д. О. Онтоев

**ОСОБЕННОСТИ ВИСМУТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ  
В НЕКОТОРЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ  
ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

Первые упоминания о висмутовых минералах, в частности о висмутине, в вольфрамитовых месторождениях Забайкалья встречаются в работах П. П. Сущинского (1916, 1917). Висмутовый концентрат из руд Букукинского месторождения впервые получен К. А. Ненадкевичем (1922).

Последующие исследования показали, что висмутовые минералы, особенно висмутин и самородный висмут (а в зоне окисления — базобисмутин), весьма характерны для относительно высокотемпературных месторождений кварц-сульфидно-вольфрамитовой формации (Левицкий, 1939; Дроздов, 1939). В последние годы в некоторых месторождениях этого типа (Букукинском и Белухинском) обнаружены сложные сульфосоли висмута и свинца — козалит (Барabanов, 1957), лиллианит (Онтоев, 1959) и сульфотеллуриды висмута — тетрадимит (Дружинин, 1958; Самонов, 1959), а также твердый раствор кубической разновидности матильдита ( $\alpha\text{-AgBiS}_2$ ) — галенита, обуславливающий высокое содержание Bi и Ag в галенитах этих месторождений (Онтоев, Ниссенбаум, Органова, 1960).

Таким образом, устанавливается довольно широкое распространение висмутовых и висмутосодержащих минералов в рассматриваемых месторождениях, свидетельствующее как о разнообразии минеральных видов, содержащих висмут, так и о широком изоморфизме среди сульфосолей Bi, Ag и Pb.

Предлагаемая вниманию читателей статья имеет целью показать общие закономерности проявления висмутовой минерализации и наиболее характерные парагенетические ассоциации висмутовых минералов в вольфрамитовых месторождениях на примере Букуки и Белухи.

**КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВИСМУТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ  
В БУКУКИНСКОМ И БЕЛУХИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

Общая геологическая характеристика, минералогия и особенности генезиса рассматриваемых месторождений освещены в работах О. Д. Левицкого (1939), М. Д. Дроздова (1939), Т. А. Яковлевской (1953), А. Д. Щеглова (1959), А. В. Дружинина (1958), И. З. Самонова (1959, 1960), В. Ф. Барabanова (1961), Е. П. Малиновского (1959) и Д. О. Онтоева (1959). Наиболее интенсивно и разнообразно висмутовая минерализация проявлена на Букукинском месторождении и значительно в меньшей степени на Белухе.

**Букукинское месторождение.** В пределах Букукинского месторождения известны следующие висмутовые и висмутосодержа-

щие минералы: висмутин, самородный висмут, козалит, лиллианит, галено-висмутит, тетрадимит, висмут- и серебросодержащий галенит (твердый раствор  $\alpha$ -матильдита — галенита) и беегерит (?), а в зоне окисления — базовисмутин и висмутовые охры. Наиболее распространенными среди них являются висмутин, висмут- и серебросодержащий галенит и частично козалит. Остальные минералы встречаются сравнительно редко. Весьма характерно, что собственно висмутовые минералы — висмутин, сложные сульфосоли Bi и Pb, тетрадимит, самородный висмут и другие преимущественно встречаются в пологопадающих жилах одной ранней стадии минерализации (Онтоев, 1962), а также в штокверковых телах карьеров 18 и 19 и частично в участках сплошной грейзенизации гранодиоритов (карьер 1). Между тем в крутопадающих жилах многостадийного формирования висмутин, самородный висмут и другие висмутовые минералы встречаются очень редко, однако в них широко развит висмут- и серебросодержащий галенит. В соответствии с этим указанные две группы жил резко отличаются по содержанию висмута: в пологих жилах № 3, 7, 53 и других содержание висмута в 3—5 раз больше, чем в крутопадающих.

**Белухинское месторождение.** Висмутовые минералы здесь встречаются преимущественно в крутопадающих кварц-сульфидно-вольфрамитовых жилах, сформированных в течение одной стадии минерализации. По минеральному составу и условиям образования эти жилы являются аналогами пологопадающих жил Букуки. В отдельных жилах, образованных в несколько стадий, висмутовая минерализация проявлена очень слабо.

Среди висмутовых минералов на Белухе наибольшее развитие получили висмутин и самородный висмут. В последние годы в очень незначительных количествах в рудах обнаружены тетрадимит, виттихенит и козалит (Самонов, 1959). Крайне редок висмутсодержащий галенит. В отличие от Букуки на Белухе широко проявлен самородный висмут, особенно на нижних горизонтах месторождения, в ассоциации с которым появляются крайне мелкие выделения редких, еще точно не диагностированных минералов. Вместе с тем, здесь исключительно слабо развиты сложные сульфосоли висмута и свинца.

## ОПИСАНИЕ ВИСМУТОВЫХ И ВИСМУТСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ

Ниже приводится описание висмутовых и висмутсодержащих минералов в рассматриваемых месторождениях в порядке их распространенности.

**В и с м у т и н** — наиболее распространенный минерал. Он встречается в форме рассеянных вкраплений в участках сплошной грейзенизации и в кварцевых прожилках штокверковых зон (Букука, карьер 18); однако основная масса его сконцентрирована в рудных жилах, образованных в течение одной ранней стадии минерализации (пологие Букуки и крутопадающие Белухи). Крайне редко он наблюдается в более поздних жилах многостадийного формирования. Можно выделить три генерации висмутина.

Первая генерация представлена мелкозернистыми и короткопризматическими агрегатами в грейзенах и в призальбандовых мусковитовых оторочках рудных жил одной стадии минерализации в тесной ассоциации с молибденитом, мусковитом, темно-фиолетовым флюоритом и др. Она образует короткопризматические кристаллы и мелкозернистые агрегаты, которые нередко выполняют промежутки между листочками мусковита и молибденита. Эта генерация висмутина, имеющая в общем ограниченное распространение, образовалась в начальный момент формирования рудных жил, а именно: в процессе грейзенизации вмещающих гранодиоритов,



Рис. 1. Удлиненно-шестоватые агрегаты висмутина второй генерации (1) в жильном крупнокристаллическом кварце (2) с сульфидами Fe и Cu (3). Внизу — тонкая слюдяная оторочка

а также совместно с мусковитом и молибденитом в слюдяных оторочках рудных жил.

Вторая генерация — главная и резко преобладающая над другими, образует крупные и удлиненно-призматические и шестоватые кристаллы, сноповидные и веерообразные агрегаты, обычно ориентированные перпендикулярно к стенкам жильной полости (рис. 1). Эта генерация более широко развита в жилах Букуки и в меньшей — на Белухе. Размеры отдельных индивидов висмутина колеблются в поперечнике от  $1 \times 2$  до  $2 \times 5$  мм, а в длину от 1—2 до 13—15 см. Наблюдения над взаимоотношениями с другими минералами показывают, что висмутин второй генерации выделяется почти одновременно с крупнотаблитчатым вольфрамитом или несколько позднее его, но до отложения основной массы жильного кварца и сульфидов (пирита, сфалерита, пирротина и халькопирита), которые, как правило, цементируют призматические и шестоватые агрегаты висмутина. Последние нередко наблюдаются внутри отдельных индивидов крупнокристаллического кварца.

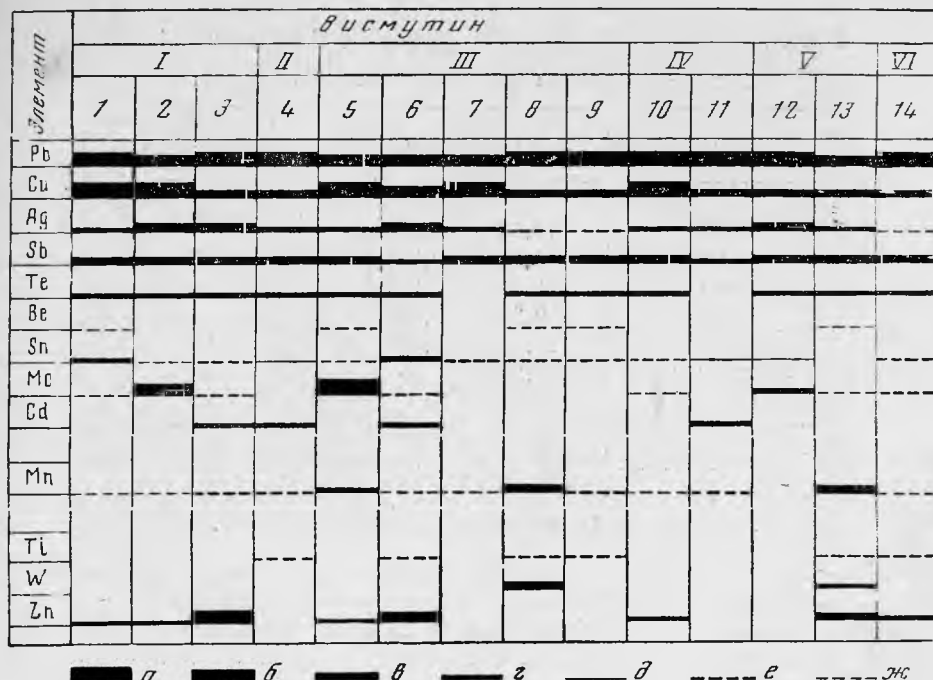


Рис. 2. Полуколичественные спектральные анализы висмутина:

I — жила 7: 1 — обр. 80/55, уклонка 2; 2 — обр. 97/55; 3 — обр. 677/57, канава; II — жила 53: 4 — обр. 644/57, штрек 14; III — жила 3: 5 — обр. 11/55, штрек 77; 6 — обр. 554/56, штрек 76; 7 — обр. 558/56, штрек 76; 8 — обр. 728/57, штрек 11; 9 — обр. 729/57, штрек 11; IV — штоковёрк: 10 — обр. 10/55, карьер 1; 11 — обр. 3/56, карьер 18; V — жила 2: 12 — обр. 672/57, отвалы штольни 2; 13 — обр. 675/57, отвалы карьера; VI — жила 63: 14 — обр. 720/57, штрек 26. Содержание (в %): а — от 1 до 6; б — от 0,6 до 1; в — от 0,1 до 0,6; г — от 0,01 до 0,09; д — от 0,006 до 0,009; е — от 0,001 до 0,006; ж — от 0,0001 до 0,0009

Третья генерация висмутина наблюдается в виде мелкозернистых агрегатов среди сульфидных минералов жил — сфалерита, пирита, пирротина, халькопирита, иногда в тесной ассоциации с самородным висмутом и тетрадимитом, что особенно заметно на нижних горизонтах Белухинского месторождения. Указанный комплекс сульфидных минералов образует неправильные, гнездовые и лапчатые обособления в интерстициях крупных кристаллических индивидов жильного кварца. Отложение их происходило вслед за вольфрамитом и кварцем в течение одной кварц-сульфидно-вольфрамитовой стадии (Онтоев, 1962). Намечается следующая последовательность: сфалерит, пирит, пирротин, висмутин третьей генерации, халькопирит.

Физические и оптические (в отраженном свете) свойства висмутина обычны для этого минерала. Спектральные анализы висмутина (рис. 2), выполненные в спектральной лаборатории ИГЕМ АН СССР Ф. И. Суминой, показывают повсеместно высокое содержание Pb (от десятых долей до 2—3%, реже до 5%), заметное количество Cu, Ag, Sb и Te (от 0,01 до 0,1%). Присутствие последних элементов, видимо, связано с изоморфным вхождением этих элементов в состав висмутина. Наличие Mo, W, Sn и Cd в ряде проб, вероятно, обусловлено механической примесью молибденита, сфалерита, вольфрамита и др.

Химический анализ висмутина второй генерации<sup>1</sup> из жилы № 7 Букуки приведен в табл. 1.

<sup>1</sup> Материал для химического анализа отобран под бинокулярной лупой и чистота пробы проверялась под микроскопом.

Т а б л и ц а 1

## Химический состав висмутина второй генерации

Компоненты	Вес. %	Атомные кол-ва	Коэффициен	
Bi	76,49	0,366	} 0,389	
Pb	1,73	0,008		
Cu	1,00	0,015		
Fe	0,23	0,004		
S	18,60	0,580	0,580	3
Нерастворимый остаток	1,20	—	—	—
Сумма . . . . .	99,25	—	—	—

Аналитик П. Н. Ниссенбаум, ИГЕМ АН СССР.

Эмпирическая формула<sup>1</sup> анализированного минерала  $[(\text{Bi}_{0,366} \text{Pb}_{0,008} \text{Cu}_{0,015})_{0,389} \text{S}_{0,580}]$  очень близка к теоретическому составу висмутина.

Следует заметить, что в висмутинах Букуки содержание свинца, по данным спектральных анализов, колеблется от десятых долей процента до 2—6%, при этом более высокие содержания свинца в висмутинах отмечаются на нижних горизонтах жил, а более низкие — на верхних. Так, например, висмутин из верхних горизонтов жилы № 7 Букуки содержит 0,5—0,7% Pb, а из нижних горизонтов (уклонка № 2) — 1,73% (см. табл. 1), т. е. с глубиной содержание свинца в висмутине увеличивается в 2,5—3 раза.

Учитывая близкий ионный радиус  $\text{Bi}^{3+}$  (1,20 Å) и  $\text{Pb}^{2+}$  (1,32 Å), можно предполагать непрерывный изоморфизм в ряду висмутин-устарасит (Сахарова, 1955), где содержание свинца в устарасите составляет 11,51%.

Весьма интересно повсеместное присутствие в висмутинах Букуки теллура и селена, обусловленное как включениями мельчайших зерен тетрадимита, петцита (?) и, возможно, других минералов, так и изоморфным вхождением Te и Se в решетку висмутина.

Анализы двух проб висмутина на Te и Se, выполненные в ИМГРЭ химиком-аналитиком Н. З. Курбановой, показали (в %):

	Te	Se
Проба 729/57	0,0880	0,0080
» 644/57	0,0140	0,0220

С а м о р о д н ы й в и с м у т наиболее распространен в жилах Белухинского месторождения и сравнительно редко встречается на Букуке. Так, в отдельных жилах (№ 7,37) Букуки наблюдались мельчайшие зерна самородного висмута в парагенезисе с висмутином III генерации и тетрадимитом среди сфалерита и пирротина, корродируя и частично замещая их. По данным предыдущих исследователей (Дроздов, Левицкий и др.), на верхних горизонтах Белухинского месторождения самородный висмут практически не встречался или имел крайне ограниченное развитие. Однако вскрытие нижних горизонтов ряда рудных жил (№ 49, 16, 24, 44 и др.) показало, что в них с глубиной заметно возрастает роль сульфидов, особенно сфалерита, пирротина и халькопирита, хотя уменьшение содержания вольфрамита с глубиной не происходит. Параллельно с этим в указанных сульфидных рудах, по нашим данным, возрастает количество самородного висмута, который образует мелкие самостоятельные обособления в пирротиновых рудах.

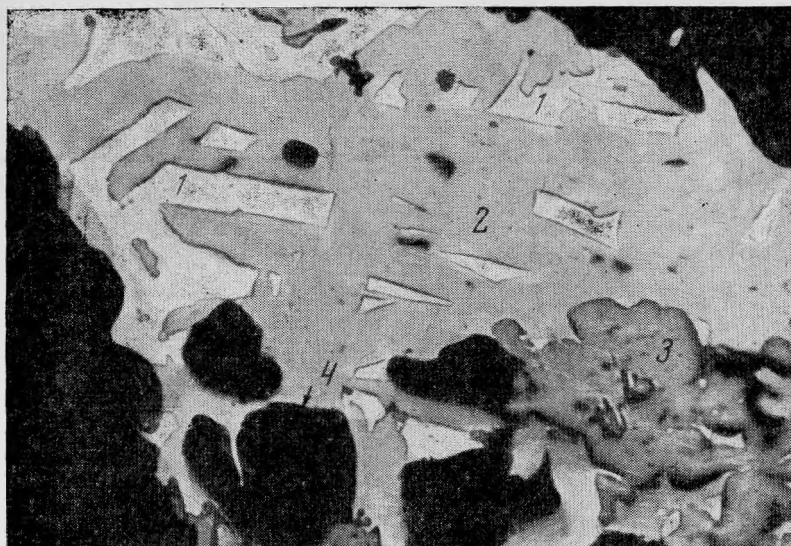


Рис. 3. Пластинчатые и ксеноморфные выделения самородного висмута (1) среди висмутина (2); 3 — пирротин; 4 — кварц. Увел. 40

Изучение последних показало, что висмут встречается в пирротине в форме мелких изометричных зерен (до 0,02—0,05 мм) и отдельных крайне неправильных, округлых и ксеноморфных выделений до 0,5—0,7 мм в диаметре. В тех случаях, когда пирротин замещается халькопиритом, то в последнем висмут почти не сохраняется и наблюдается только на контакте халькопирита с пирротинном.

В ассоциации с висмутином висмут образует неправильные, часто угловатые и ксеноморфные зерна, свидетельствующие о том, что отложение его происходило в интерстициях призматических зерен висмутина (рис. 3). Среди пирротина совместно с самородным висмутом встречаются иногда галенит, хорошо диагностируемый по оптическим свойствам, характерным треугольникам выкрашивания и травлению реактивами, тетрадимит, гессит и ряд других чрезвычайно мелких выделений, вероятно,  $Te$  и  $Se$ -содержащих минералов.

Наблюдения над взаимоотношениями самородного висмута с сульфидами показывают, что  $Bi$  выделяется позже сфалерита и пирротина, почти одновременно с висмутином, но отчетливо до отложения халькопирита.

В отраженном свете висмут обладает розовато-кремовым цветом, высокой отражательной способностью, отчетливой анизотропией; двуотражение не заметно; рельеф I группы. Из стандартных реактивов не действуют  $KCN$  и  $KOH$ .

**К о з а л и т** ( $Pb_2 Bi_2 S_5$ ) довольно широко распространен в пологопадающих жилах Букуинского месторождения и крайне редок в жилах Белухи; в последних он впервые описан И. З. Самоновым (1959) и позднее рентгенометрически подтвержден В. Ф. Барабановым (1960). В жилах Букуки козалит встречается преимущественно в остаточных друзовых пустотках среди жильного кварца в ассоциации с лиллианитом, поздними генерациями вольфрамита, пирита, сфалерита, халькопирита и кальцита. Наблюдаются две морфологические разновидности козалита: наиболее распространенная — это игльчатые и волокнистые агрегаты минерала, свободно растущие в друзовых пустотках часто на кристаллах кварца, пирита, сфалерита и др. Эта разновидность была детально описана Ф. В. Барабановым (1957). Другая разновидность в аналогичных друзовых пустотках представлена пластинчатыми и тонкопластинчатыми агре-

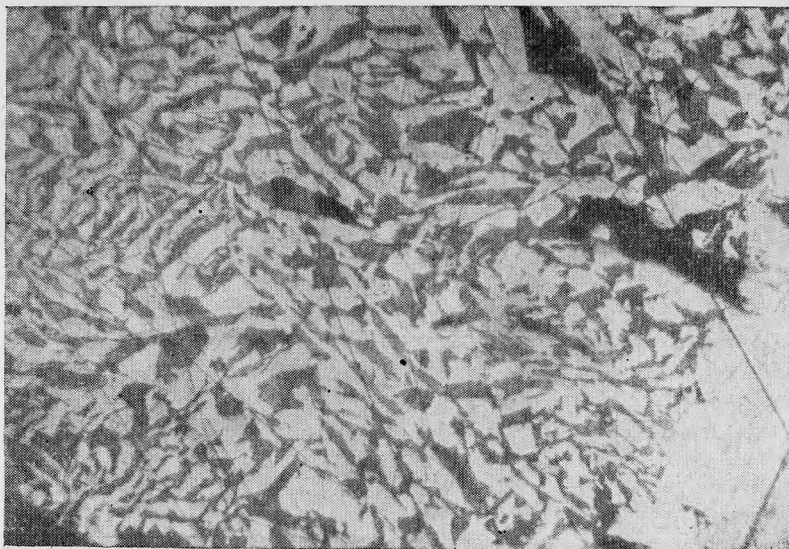


Рис. 4. Графическая структура сростания козалита (белое) и галенита (темное); протравлено  $\text{FeCl}_3$  в течение 20 сек. Увел. 165

гатами, образующими массивные обособления в кальцитовой массе или окаймляющие агрегаты зерен лиллианита. Соотношение между двумя этими разновидностями таково, что игольчатые и волокнистые агрегаты всегда нарастают на пластинчатые и таблитчатые разности, а по времени отложения первые следуют за вторыми.

Макроскопически пластинчатый и таблитчатый козалит обладает светло-серым, оловянно-белым цветом, сильным металлическим блеском и твердостью около 2. Отмечается прекрасно выраженная продольная спайность. Размеры отдельных индивидов достигают до 1—2 см в длину при ширине до 3—4 мм и толщине в доли миллиметра.

В отраженном свете под микроскопом минерал бесцветный, слабоанизотропный, двуотражение незаметно; отражательная способность около 42—43%; относительный рельеф II группы. Диагностическое травление:  $\text{HNO}_3$  (1 : 1) — без вскипания буреет и чернеет;  $\text{HCl}$  — вызывает слабое побурение;  $\text{HgCl}_2$  — слабое бурое пятно;  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{KOH}$  и  $\text{KCN}$  — не действуют. По отрицательному действию  $\text{FeCl}_3$  козалит резко отличается от лиллианита.

Структурное травление пластинчатых и таблитчатых агрегатов козалита (с помощью  $\text{FeCl}_3$  в течение 10—30 сек) обнаруживает многочисленные включения галенита, количество которых в козалите колеблется в широких пределах. Здесь наблюдаются одиночные мелкие, часто веретенообразные включения галенита, расположенные параллельно удлинению зерен включающего козалита, а также удлиненные, нередко сливающиеся между собой включения галенита вдоль спайности минерала-хозяина и, наконец, обильные включения с образованием графической структуры сростания (рис. 4). Мелкие изометричные зерна галенита иногда нарастают на пластинчатые и таблитчатые зерна козалита.

Результаты рентгенометрического исследования (аналитик М. Т. Дмитриева, ИГЕМ АН СССР) пластинчатого козалита Букукинского месторождения (обр. 732/57) приведены в табл. 2. Для сравнения в табл. 2 приведены так же данные эталонов козалита из Центрального Казахстана (Ермилова и Сендеров, 1955) и галенита (Михеев, 1957).

Результаты расчета пластинчатого козалита Букуки  
(Fe-излучение,  $2D = 57,9$  мм,  $d = 0,6$  мм)

Пластинчатый таблитчатый козалит		Эталон-козалит, Центральный Казахстан		Лиллианит, Букуки		Эталон-галенит, по Михееву	
I	$d_{\alpha/n}$	I	$d_{\alpha/n}$	I	$d_{\alpha/n}$	I	$d_{\alpha/n}$
—	—	—	—	4	3,50	—	—
10	3,44	10	3,42	—	—	9	3,442
—	—	—	—	8	3,36	—	—
10	2,95	10	2,95	5	2,97	10	2,965
—	—	—	—	10	2,89	—	—
7	2,81	3	2,81	—	—	—	—
—	—	—	—	7	2,76	—	—
2	2,47	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	2	2,35	—	—
3	2,24	—	—	1	2,22	—	—
8	2,13	1	2,13	9	2,13	—	—
8	2,10	—	—	—	—	10	2,093
9	2,03	6	2,04	10	2,03	—	—
—	—	—	—	3	1,946	—	—
8	1,902	4	1,900	—	—	—	—
9	1,780	8	1,795	—	—	9	1,780
—	—	—	—	4	1,757	—	—
4	1,714	1	1,709	—	—	8	1,707
—	—	—	—	3	1,449	5	1,480
4	1,386	3	1,387	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	6	1,358
7	1,329	5	1,326	3	1,326	10	1,342
2	1,294	1	1,292	3	1,288	—	—
1	1,247	—	—	—	—	—	—
3	1,213	5	1,213	—	—	8	1,209
3	1,143	—	—	—	—	7	1,141
—	—	—	—	—	—	3	1,048

Из табл. 2 следует, что дебаэграмма исследованного пластинчатого и таблитчатого козалита соответствует таковой эталона-козалита, но содержит также дополнительные линии, характерные для галенита (2,093; 1,707; 1,324; 1,209 и др.), что соответствует микроскопическим наблюдениям.

Химический анализ пластинчатого козалита (обр. 732/57) приведен в табл. 3.

Как видно из табл. 2, анализированный пластинчатый козалит представляет смесь двух фаз — 85,4% козалита и 14,6% галенита как продуктов разложения первичного минерала. Как уже отмечалось, количественные соотношения между этими фазами резко колеблются. Иногда количество галенита в козалите (см. рис. 4) доходит до 30—40%. По данным Л. П. Ермиловой и В. М. Сендеровой (1955) в образце из Центрального Казахстана наблюдается графическая смесь, состоящая из 60% галенита и 40% козалита. Подобные колебания в соотношениях галенитовой и козалитовой фаз указывают на то, что исходные соединения, которые подвергались разложению с образованием указанных графических структур,



Химический состав пластинчатого козалита Букуки и его пересчет

Компоненты	Вес. %	Вес. %, пересчитанный на 100	Атомные кол-ва	Пересчет		
				козалит $2\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$	галенит $\text{PbS}$	остаток
Bi	34,73	35,54	0,1700	0,1750	—	—
Sb	0,59	0,60	0,0050	—	—	—
Pb	45,76	46,81	0,2259	—	—	—
Ag	0,58	0,59	0,0055	0,1750	0,0625	+0,0015
Cu	0,27	0,27	0,0042	—	—	—
Fe	0,19	0,19	0,0034	—	—	—
S	15,66	16,00	0,5000	0,4375	0,0625	—
SiO <sub>2</sub>	0,97	—	—	—	—	—
CaO	1,05	—	—	—	—	—
MgO	Следы	—	—	—	—	—
С у м м а	99,80	100,00	—	0,7875	0,1250	—
Молекулярный %				85,4	14,6	

Аналитик Г. Арапова, ИГЕМ АН СССР.

не отвечали составу лиллианита. В последнем случае смесь должна состоять из 80 % козалита и 20 % галенита.

Л и л л и а н и т ( $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$ ) встречается в тех же друзовых пустотах жильного кварца пологопадающих жил Букуки в тесной ассоциации с козалитом. Он образует мелко- и среднезернистые обособления у основания волокнистых и лучистых агрегатов козалита и нередко окаймляется пластинчатыми и тонкопластинчатыми его разновидностями. Более детальное описание минерала сделано нами ранее (Онтоев, 1959). Исследованный нами лиллианит был однородным, что проверялось под микроскопом. Хотя по оптическим и некоторым другим физическим свойствам (цвет, твердость и т. д.) лиллианит практически не отличим от козалита, по рентгенометрическим (см. табл. 2) и химическим данным эти два минеральных вида резко отличаются друг от друга. Далее в зернах лиллианита не наблюдаются включения галенита, которые встречаются обычно в козалите как продукты распада твердого раствора козалит — галенит с образованием субграфической структуры.

В последние годы по вопросу о лиллианите в литературе возникла дискуссия. Так, В. Ф. Барабанов (1961) отрицает наличие лиллианита как самостоятельного минерального вида в Букукинском месторождении, полагая, что дебаеграмма изученного им «лиллианита» соответствует таковой козалита. Чешские геологи (Kurčik и др., 1961) приводят описание сульфосоли Bi и Pb, ее дебаеграмму и размеры элементарной ячейки. Они предполагают, что это лиллианит. Оставляя за собой право в скором будущем вернуться к «проблеме лиллианита», здесь отметим лишь, что изученный В. Ф. Барабановым (1961) минерал, судя по наличию в нем наиболее интенсивных линий (10—2,89; 10—2,13; 10—2,03; 8—3,36; 7—2,76, см. табл. 2), характерных для лиллианита (Онтоев, 1959; «Минералы», 1960), в основе своей имеет лиллианитовую фазу с примесью других минералов. Что касается чешского минерала, то дебаеграмма его заметно отличается от таковой козалита и лиллианита.

Галеновисмутит ( $PbBi_2S_4$ ) наблюдался в жиле № 63 (штрек 26) Букуки, представляющей крутопадающую апофизу жилы № 7 висячем ее боку. Здесь он образует одиночные изометричные, коротко-призматические и таблитчатые кристаллы, а также агрегаты зерен в жильном кварце. Размеры отдельных кристаллов и зерен достигают до 1—2 см в длину при толщине до 0,2—0,5 см.

Галеновисмутит встречается вблизи зальбандов кварцевой жилы и нередко ассоциирует с мелкотаблитчатым вольфрамитом и висмутином, с которыми выделяется почти одновременно, но до отложения жильного кварца.

Макроскопически минерал обладает светло-серым и оловянно-белым цветом, сильным металлическим блеском, хорошей спайностью по (110) и твердостью около 2,5.

В отраженном свете под микроскопом минерал галенито-белый, отчетливо анизотропный со слабым двуотражением; отражательная способность 46,42%<sup>2</sup>, относительный рельеф II группы. Диагностическое травление: от действия  $HNO_3$  (1 : 1) легко буреет и темнеет,  $HCl$  — вызывает слабое побурение; от  $FeCl_3$  — отчетливое бурое пятно;  $HgCl_2$  — вызывает бурое пятно через 30—40 сек.

Спектральный анализ минерала (аналитик Ф. И. Сумина, ИГЕМ АН СССР) показал: более 6% Bi и Pb, десятые доли процента Sb, сотые доли процента Ag, тысячные доли процента Cu и Sn.

Результаты рентгенометрического изучения минерала (аналитик М. Т. Дмитриева, ИГЕМ АН СССР), а также эталон галеновисмутита (по В. И. Михееву, 1957), приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Порошкограммы галеновисмутита  
(Fe-излучение,  $2D = 57,9$  мм,  $d = 0,6$  мм)

Галеновисмутит Букуки		Эталон галенови- смутита (по Михееву)		Галеновисмутит Букуки		Эталон галеновисмутита (по Михееву)	
<i>I</i>	$d_{\alpha/n}$	<i>I</i>	$d_{\alpha/n}$	<i>I</i>	$d_{\alpha/n}$	<i>I</i>	$d_{\alpha/n}$
2	3,78	—	—	10	1,961	7	1,975
3	3,61	4	3,67	5	1,872	6	1,882
10	3,42	10	3,47	8	1,754	7	1,772
7	2,99	7	3,03	2	1,723	3	1,729
1	2,76	4	2,79	4	1,511	3	1,510
1	2,73	—	—	6	1,451	6	1,451
3	2,64	3	2,66	4	1,410	6	1,415
7	2,46	7	2,47	6	1,377	6	1,378
4	2,38	6	2,38	1	1,356	—	—
1	2,25	3	2,26	1	1,331	—	—
1	2,16	—	—	2	1,241	—	—
8	2,04	7	2,06	2	1,098	—	—
				3	1,055	—	—

Как видно из табл. 4, основные диагностические линии минерала полностью совпадают с таковыми эталона галеновисмутита.

Химический анализ галеновисмутита приведен в табл. 5.

<sup>2</sup> Здесь и далее отражательная способность измерена в минераграфической лаборатории ИГЕМ АН СССР для  $\lambda 590$  мк на приборе с электронным фотоумножителем при эталоне ширита с  $R = 54,4\%$ .

## Химический состав галеновисмутита Букукинского месторождения и его пересчет

Компоненты	Вес. %	Вес. %, пересчитанный на 100	Атомные кол-ва	Пересчет на минералы		Остаток
				галеновисмутит $PbS \cdot Bi_2S_3$	висмутит $Bi_2S_3$	
Pb	21,69	24,35	0,1175	0,1175	—	—
Bi	51,43	57,75	0,2763	0,2350	0,0413	—
Sb	0,40	0,49	0,004	—	—	—
Ag	0,04	0,04	—	—	—	—
S	15,33	17,22	0,5371	0,4700	0,0621	+0,005
Fe	0,08	0,09	—	—	—	—
Cu	0,05	0,06	—	—	—	—
$SiO_2$	9,79	—	—	—	—	—
CaO	0,31	—	—	—	—	—
MgO	Следы	—	—	—	—	—
С у м м а	99,11	100,0	—	0,8225	0,1034	—
Молекулярный %				89,0	11,0	—

Аналитик Г. Арапова, ИГЕМ АН СССР.

Из данных анализа и его пересчета следует, что анализированный материал с примесью кварца состоял из галеновисмутита с незначительным количеством висмутита (11%). Это подтверждается микроскопическими данными.

Висмут- и серебро содержащий галенит развит на Букуке и крайне редок в Белухе. Наблюдаются две генерации галенита.

Галенит первой генерации встречается в друзовых пустотах жильного кварца пологопадающих жил в тесной ассоциации с козалитом, лиллианитом и другими минералами, где он наблюдается в виде включений и графических сростаний с сульфовисмутитами свинца, а также образует мелкие изометричные зерна октаэдрической формы (Барабанов, 1961) в промежутках между пластинчатыми, таблитчатыми и игольчатыми кристаллами козалита. Галенит указанной генерации, судя по парагенезису с висмутовыми сульфосолями, обладает, очевидно, повышенным содержанием висмута.

Вторая генерация галенита, наиболее распространенная в месторождении, встречается преимущественно в крутопадающих жилах и частично в штокерке карьера 18 в тесной парагенетической ассоциации с кварцем второй генерации, вольфрамитом II, сфалеритом II, пиритом, триплитом, родохрозитом и др. Рассматриваемый парагенезис образован в позднюю кварц-сульфидно-вольфрамитовую стадию минерализации. К этой генерации относятся мелкие выделения галенита в парагенезисе с висмутом и гесситом среди пирротина в жилах Белухи.

Специальное изучение галенита второй генерации Букуки, произведенное автором совместно с П. Н. Ниссенбаум и Н. И. Органовой (1960), показало, что содержание висмута в нем колеблется от десятых долей процента до 7,61%, серебра от десятых долей до 3,44%. Рентгеноструктурными и химическими анализами было установлено, что высокое содер-

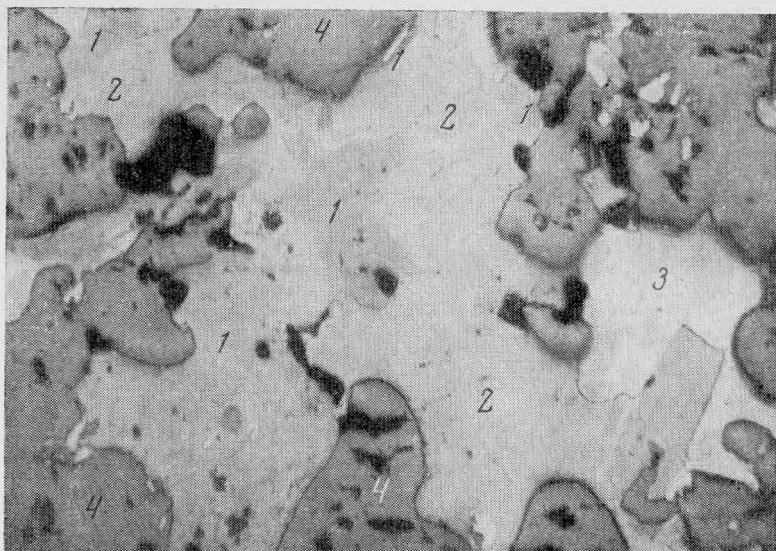


Рис. 5. Агрегаты зерен висмутина (1), тетрадимита (2) и самородного висмута (3) среди пирротина (4); Увел. 165

жание висмута и серебра в галенитах обусловлено главным образом наличием в них шапбахита (высокотемпературная кубическая модификация матильдита —  $\alpha\text{-AgBiS}_2$ ) в виде твердого раствора и частично присутствием мелких пластинчатых включений, вероятно, беегерита<sup>3</sup> ( $\text{Pb}_6\text{Bi}_2\text{S}_9$ ). Таким образом, в галенитах второй генерации предполагается наличие сложного (двойного) твердого раствора  $\text{PbS} - \alpha\text{-AgBiS}_2$  и  $9\text{PbS} - \text{Pb}_6\text{Bi}_2\text{S}_9$ , из которых последний обнаруживает распад с образованием мелких включений беегерита (?) в галените.

Нами было высказано соображение о том, что описываемые висмут- и серебросодержащие галениты могут являться своеобразным геологическим термометром, характеризующим относительно высокотемпературные минеральные парагенезисы; в них обычно встречается высокотемпературная модификация матильдита (шапбахит), температура перехода которой в низкотемпературную ромбическую равна  $225^\circ$  (Ramdohr, 1960) —  $195^\circ$  (Van Hook, 1960).

В тесной ассоциации с висмут- и серебросодержащим галенитом второй генерации встречаются крайне мелкие зерна и включения таких минералов теллура, как гессит, самородный теллур и алтант (Дружинин, 1958), а также сильванит, петцит и др. Так, например, сильванитсодержащий галенит из жилы Озерной (обр. 146/56), по данным анализа Н. В. Курбановой (ИМГРЭ), содержит 0,1372% Te и 0,0140% Se.

Тетрадимит ( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ ) встречается в небольших количествах в рудных жилах Букуки и Белухи в парагенезисе с висмутином III генерации, висмутом, пирротинном и халькопиритом. Заметные скопления тетрадимита отмечаются на нижних горизонтах Белухинского месторождения, где агрегаты зерен тетрадимита среди пирротинной массы цементируют призматические зерна висмутина и частично корродируются висмутом (рис. 5).

В отраженном свете под микроскопом тетрадимит обладает беловато-кремовым цветом, высокой отражательной спайностью: значение R,

<sup>3</sup> Наличие чрезвычайно мелких выделений беегерита в галените рентгенометрически пока еще не доказано.

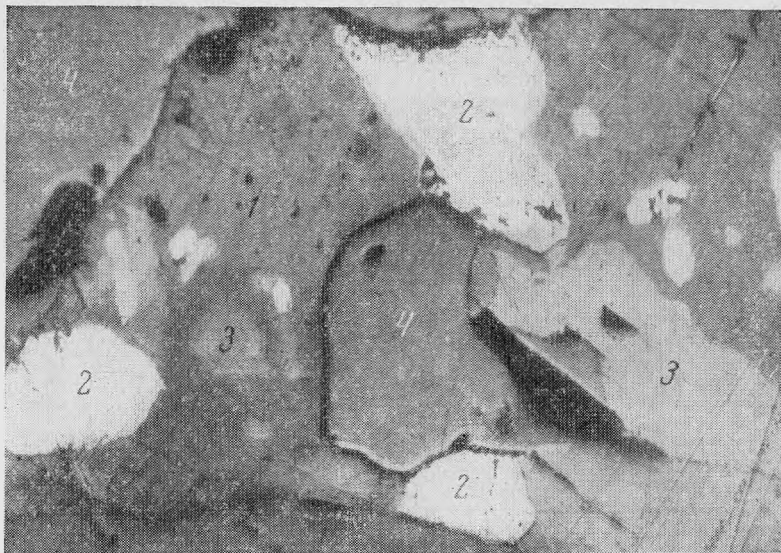


Рис. 6. Выделения гессита (1) в ассоциации с самородным висмутом (2) и галенитом (3) среди пирротина (4); черное — выбоины. Иммерсия, увел. 690

измеренное нами, составляет 44% по сравнению с таковым висмутита, равным 41,8%; анизотропия отчетливая, слабое двуотражение и относительный рельеф II группы. От действия  $\text{HNO}_3$  минерал вскипает и быстро чернеет;  $\text{FeCl}_3$  вызывает бурое пятно.

С и л ь в а н и т (?)  $[(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_4]$  наблюдался в висмут- и серебро-содержащем галените второй генерации жилы Озерной Букукинского месторождения в виде мелких пластинчатых включений размером в сотые доли миллиметра. Иногда отмечается пластинчатая двойниковая структура отдельных его зерен. Минерал под микроскопом обладает желтовато-кремовым цветом, отражательная способность выше галенита, но ниже пирита, отчетливо анизотропный с заметным двуотражением; рельеф II группы (выше галенита). От  $\text{HNO}_3$  без вскипания буреет; действие  $\text{KOH}$  сомнительное; остальные реактивы не действуют. По оптическим свойствам, наличию двойников и по поведению при травлении минерал определяется как силъванит (?).

П е т ц и т (?)  $[(\text{Ag}, \text{Au})_2\text{Te}]$  встречается в галенитах Букуки в виде мелких неправильных включений, размером в сотые и тысячные доли миллиметра. Минерал заметно анизотропный, очень слабое двуотражение, отражательная способность очень близка к галениту. От  $\text{HNO}_3$  быстро буреет и чернеет.  $\text{HCl}$  вызывает слабое бурое пятно;  $\text{FeCl}_3$  действует с образованием черного пятна;  $\text{HgCl}_2$  вызывает слабое побурение.  $\text{KCN}$  и  $\text{KOH}$  не действуют. От похожего гессита минерал отличается отсутствием пластинчатых двойников и отрицательным действием  $\text{KOH}$  и  $\text{KCN}$ .

Г е с с и т  $(\text{Ag}_2\text{Te})$  наблюдается в ассоциации с самородным висмутом и галенитом среди пирротина (рис. 6) преимущественно в рудах Белухи. В отраженном свете светло-серый, слабо анизотропный, двуотражение незаметно в воздухе. Отражательная способность заметно ниже галенита, несколько меньше пирротина, но отчетливо выше блеклой руды: измеренная нами величина  $R$  равна 37%. Рельеф I группы несколько выше такового висмута, но ниже галенита. Диагностическое травление:  $\text{HNO}_3$  буреет без вскипания; от  $\text{KCN}$  быстро темнеет;  $\text{HgCl}_2$  вызывает бурое пятно. Остальные реактивы не действуют.

С а м о р о д н ы й т е л л у р (?) встречается в сростании с гесситом в самородном висмуте и нередко образует тонкую оторочку вокруг его выделений (рис. 7, а). Минерал беловато-кремовый, слабо анизотропный. Отражательная способность несколько ниже самородного Вi и ориентировочно равна 63% (Ramdohr, 1960). Двуотражение очень слабое, едва заметное в воздухе; рельеф I группы, но несколько выше висмута. Действие реактивов не выяснено. По оптическим свойствам минерал похож на самородный теллур.

М и н е р а л № 1 отмечается довольно часто в самородном висмуте, иногда в виде сростаний с ним, а местами располагается по периферии его зерен (рис. 7, б).

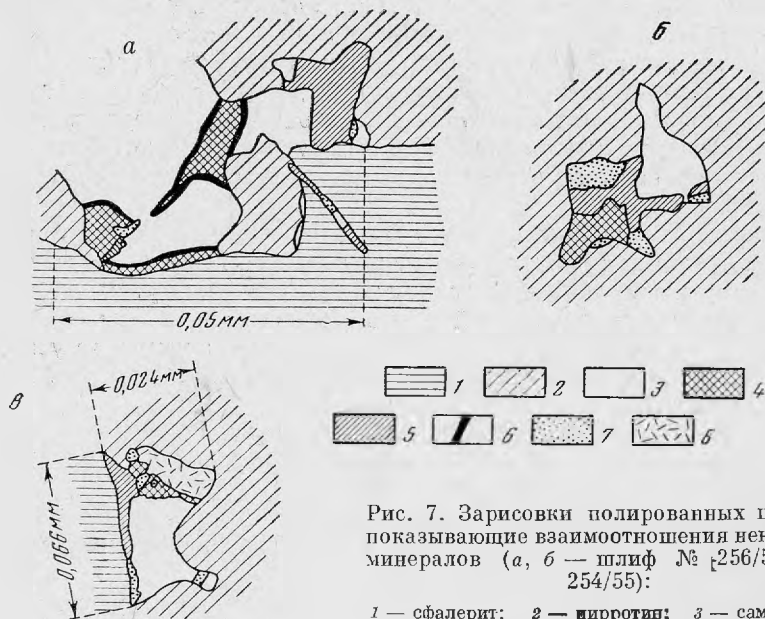


Рис. 7. Зарисовки полированных шлифов, показывающие взаимоотношения некоторых минералов (а, б — шлиф № 256/56; в — 254/55):

1 — сфалерит; 2 — пирротин; 3 — самородный висмут; 4 — гессит (?); 5 — минерал № 1; 6 — самородный Те (?); 7 — галенит; 8 — минерал № 2

В отраженном свете минерал бесцветный, изотропный; отражательная способность больше сфалерита, близка к блеклым рудам (27—28%). Относительный рельеф II группы: больше галенита, но меньше халькопирита. Внутренних рефлексов не заметно. Из стандартных реактивов действуют KCN (быстро темнеет в течение 3—5 сек) и  $HgCl_2$  (моментально чернеет). По оптическим свойствам и поведению при травлении минерал, видимо, относится к селеновым и близок к берцелианиту или тиманниту.

М и н е р а л № 2 наблюдается в сростании с гесситом и минералом № 1 по периферии самородного висмута (рис. 7, в). Он обладает светло-серым цветом, слабо анизотропный, отражательная способность около 36—38% (почти как у пирротина), рельеф I группы. Легко травится  $HgCl_2$ . Действие других реактивов изучено слабо. Характерно, что минерал содержит мельчайшие мирмекитоподобные включения самородного висмута.

Кроме перечисленных минералов, содержащих Те и Se, встречается еще ряд чрезвычайно мелких выделений других минералов, диагностика которых крайне затруднительна.

Таким образом, самородный висмут в пирротиновых рудах нижних горизонтов оказывается своеобразным «коллектором» Те и Se, где в усло-

виях низкой концентрации S указанные элементы играют роль серы с образованием сульфотеллуридов, теллуридов и селенидов (?).

Химические анализы висмутсодержащей штуфной пирротиновой руды из жилы № 16 (горизонт штольни 6), выполненные в химической лаборатории ИМГРЭ химиком-аналитиком Н. З. Курбановой, показали 0,008% Те и 0,0082% Се, а в дубликате рудной пробы — 0,0002% Те и 0,0005% Се.

### НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВИСМУТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Анализ парагенетических ассоциаций, содержащих висмутовые минералы, показывает, что в изученных месторождениях висмутовая минерализация проявляется преимущественно на ранних и средних стадиях рудного процесса (грейзенизация, ранняя кварц-сульфидно-вольфрамитовая, вторая кварц-вольфрамито-сульфидная), тогда как на поздних стадиях (кварц-полевошпатовая, кварцевая и халцедонового кварца) концентрация висмута практически не отмечается. Это, видимо, связано с отсутствием висмута в составе рудоносных растворов поздних стадий минерализации.

Наиболее характерными минеральными парагенетическими ассоциациями, в которых присутствуют висмутовые минералы, являются:

1) висмутин-молибденит-мусковитовая, где висмутин встречается в пределах участков площадной и околожильной грейзенизации вмещающих пород в ассоциации с кварцем и мусковитом, а также в мусковитовых оторочках рудных жил совместно с молибденитом, пиритом, бериллом, флюоритом и т. д.;

2) висмутин-вольфрамитовая, иногда с галеновисмутитом и пиритом среди крупнокристаллического жильного кварца первой кварц-сульфидно-вольфрамитовой стадии минерализации;

3) висмутин-самородный висмут-тетрадимит-пирротиновая со сфалеритом и халькопиритом, образующаяся в конце первой стадии минерализации в промежутках жильного кварца;

4) галенит-лиллианит-козалитовая в остаточных друзовых пустотах рудных жил первой стадии;

5) висмут- и серебросодержащий галенит с кварцем II и вольфрамитом II, сфалеритом, пиритом, триплитом, родохрозитом и другими минералами, возникшими во вторую кварц-вольфрамито-сульфидную стадию минерализации.

Указанные парагенетические ассоциации наиболее полно проявлены в месторождении Букука, а на Белухе известны только ассоциации 1,3 и 4 и то не в полной мере. Преобладающими висмутовыми минералами в этих ассоциациях являются висмутин, самородный висмут, сложные сульфосоли свинца и висмута и висмутсодержащий галенит.

Образование того или иного висмутового минерала в различных парагенетических ассоциациях, вероятно, зависело прежде всего от изменения концентрации ионов  $Bi^{3+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $S^{2-}$  и других элементов в рудоносных растворах на ранних и средних стадиях рудного процесса.

Рассмотрим наблюдаемые парагенезисы висмутовых минералов в четверной системе  $Bi - Pb - Fe - S$  (рис. 8) в зависимости от потенциала серы, а затем от соотношения концентрации  $Bi$  и  $Pb$  в рудоносных растворах.

1. В условиях повышенного потенциала серы в растворах висмут почти всегда фиксируется в форме висмутина, который обычно встречается в тесном парагенезисе с пиритом, молибденитом, вольфрамитом, мусковитом и др. Очевидно, висмутин в ассоциации с пиритом образуется здесь в более окислительной обстановке, чем самородный висмут и пирротин и даже висмутин — пирротин. Следовательно, в условиях повышен-

ного потенциала серы практически не образуются такие парагенезисы, как  $\text{Bi} - \text{FeS}_2$ ,  $\text{Bi} - \text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{FeS}_2$ ,  $\text{Bi} - \text{FeS} - \text{FeS}_2$  и  $\text{Bi} - \text{FeS}_2 - \text{PbS}$ .

Однако в зависимости от соотношения концентрации  $\text{Bi}$  и  $\text{Pb}$  в растворах, а также широкого изоморфизма между  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  и  $\text{PbS}$  в рудных жилах возникают различные минеральные парагенезисы, в которых встречаются свинецсодержащий висмутин, сложные сульфосоли  $\text{Bi}$  и  $\text{Pb}$ , висмутсодержащий галенит и т. д. При этом парагенезис  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  и  $\text{PbS}$ , т. е. парагенезис между крайними членами изоморфного ряда, а также тройные парагенезисы  $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{PbS} - \text{FeS}_2$  и  $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{PbS} - \text{FeS}$  в рассматриваемой системе невозможны.

При резком преобладании  $\text{Bi}$  над  $\text{Pb}$  в рудоносных растворах отмечается вхождение  $\text{Pb}$  (до 2—5%) в решетку висмутина. Этому, видимо, в значительной мере способствует относительно высокая температура в начальных стадиях рудного процесса, когда в парагенезисе со свинецсодержащим висмутином образуются мусковит, молибденит, ранний флюорит и вольфрамит. Поэтому в той части диаграммы, которая примыкает к висмутину, мы других висмутовых минералов не встречаем.

В тех случаях, когда в рудоносном растворе отмечается высокая концентрация одновременно и висмута, и свинца, то возникают сложные сульфосоли этих металлов — галеновисмутит, козалит и лиллианит.

Так, наблюдаемый парагенезис висмутин и галеновисмутита, иногда с пиритом, вольфрамитом и другими минералами в жиле № 63 Букуки обусловлен, видимо, локальным возрастанием концентрации свинца в растворе. Однако более характерны парагенезисы лиллианита, козалита, кальцита и пирита в друзовых пустотках кварцевых жил, особенно на Букуке. Здесь в конце формирования рудных жил остаточные рудоносные растворы, законсервированные в друзовых пустотках, были сильно обогащены висмутом, свинцом и углекислотой. Концентрация свинца в таких растворах иногда настолько высока, что в парагенезисе с лиллианитом и козалитом местами образуется висмутсодержащий галенит первой генерации.

Наконец, при резком преобладании в растворах свинца над висмутом преимущественно образуется висмут- и серебросодержащий галенит второй генерации, где висмут в форме  $\alpha$ -матильдита ( $\alpha\text{-AgBiS}_2$ ) образует твердый раствор и частично представлен пластинчатыми включениями беегерита (?). Таким образом, висмутсодержащий галенит II, встречающийся в парагенезисе с пиритом II, сфалеритом II, вольфрамитом II и другими минералами преимущественно в крутопадающих жилах Букуки, представляет собой сложный двойной твердый раствор, с одной стороны, галенита —  $\alpha$ -матильдита, а с другой — галенита — беегерита (?), из которых последний претерпевает распад с образованием мелких пластинчатых включений беегерита (?) в галените (Огтоев и др., 1960).

2. В условиях относительно низкого потенциала серы в растворах, когда отчетливая недосыщенность серой отмечается появлением в жилах

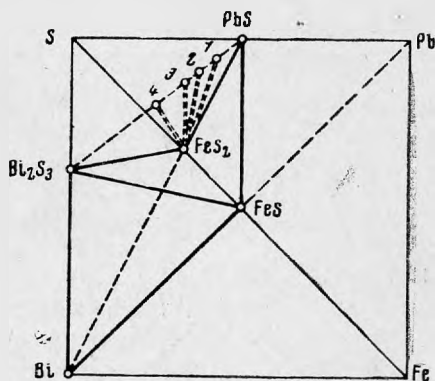


Рис. 8. Состав и парагенезис минералов в системе  $\text{Bi} - \text{Pb} - \text{Fe} - \text{S}$ . Толстыми линиями показаны наблюдаемые парагенезисы на верхних гранях тетраэдра, пунктирными — на нижних, двойной пунктир — внутри тетраэдра. На конноде  $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{PbS}$ :

- 1 — беегерит ( $6\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ ); 2 — лиллианит ( $3\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ ); 3 — козалит ( $2\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ ); 4 — галеновисмутит ( $\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ )



пирротина вместо пирита, обычно образуются парагенезисы самородного висмута и пирротина, висмута и висмутина, и, наконец, сочетание последних с пирротинном. В этих условиях практически не встречаются парагенезисы  $\text{Bi} - \text{FeS}_2$ ,  $\text{Bi} - \text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{FeS}_2$  и  $\text{Bi} - \text{FeS}_2 - \text{FeS}$ .

Однако при низком потенциале серы, но при высокой концентрации в растворах висмута и свинца теоретически вполне возможны как двойные парагенезисы самородного висмута с сульфовисмутитами (галеновисмутит, козалит, лиллианит) и галенитом, так и тройные парагенезисы между ними (рис. 9). Более того, в условиях недосыщенности серой даже незначительное количество свинца в растворах отлагается в форме галенита в парагенезисе с самородным висмутом и пирротинном (см. рис. 6).

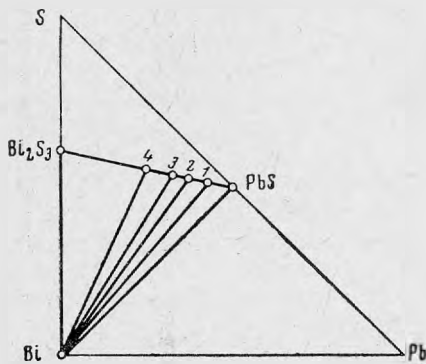


Рис. 9. Состав и парагенезис минералов в системе  $\text{Bi} - \text{Pb} - \text{S}$ . Толстыми линиями показаны возможные парагенезисы:

1 — беегерит ( $6\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ ); 2 — лиллианит ( $3\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ ); 3 — козалит ( $2\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ ); 4 — галеновисмутит ( $\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ )

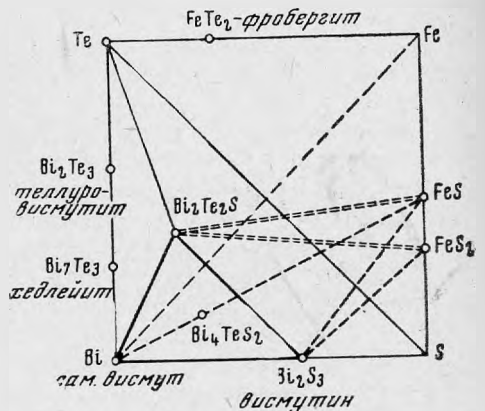


Рис. 10. Состав и парагенезис минералов в системе  $\text{Bi} - \text{Fe} - \text{Te} - \text{S}$ . Толстыми линиями показаны наблюдаемые парагенезисы на верхних гранях тетраэдра, толстыми пунктирными — на нижних, двойной пунктир — внутри тетраэдра ( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$  — тетрадимит;  $\text{Bi}_4\text{TeS}_2$  — жозеит А)

Наблюдаемые минеральные парагенезисы самородного висмута, висмутина и пирротина в ассоциации со сфалеритом и халькопиритом встречаются в пологих жилах Букуки и особенно отчетливо проявлены во многих рудных жилах Белухи, сформированных в течение одной ранней стадии минерализации. При этом сульфидные минералы в виде гнезд и неправильных обособлений отлагаются после кристаллизации молибденита, вольфрамита, висмутина и основной массы жильного кварца в промежутках между кристаллами последнего.

Таким образом, рассматриваемые минеральные парагенезисы, образующиеся в условиях недосыщенности серой, хотя и относятся к заключительной фазе формирования жил, но, видимо, предшествуют отложению сложных сульфосолей  $\text{Bi}$  и  $\text{Pb}$  в остаточных друзовых пустотках тех же жил.

Далее представляет большой научный интерес наличие  $\text{Te}$  и  $\text{Se}$  в рудах изученных месторождений. Как уже указывалось, здесь мы наиболее часто встречаем парагенезис тетрадимита с самородным висмутом, висмутином и пирротинном. Кроме того, в ассоциации с самородным висмутом и пирротинном, особенно на нижних горизонтах жил Белухи, наблюдаются чрезвычайно мелкие зерна самородного теллура (?), гессита и некоторых селенидов (?).

Если мы рассмотрим диаграмму состав и парагенезис в системе  $\text{Bi} - \text{Te} - \text{Fe} - \text{S}$  (рис. 10), то здесь, кроме самородного висмута, висмутина, пирротина и пирита, известны такие редкие минералы, как самородный

теллур, теллуrowисмутит ( $\text{Bi}_2\text{Te}$ ), хедлейит ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), фробергит ( $\text{FeTe}_2$ ), тетрадимит ( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ ) и жозеит ( $\text{Bi}_{1+x}\text{Te}_{1-x}\text{S}_2$ , где  $x=0-0,3$ ). Упоминаемые в литературе минералы — верлит ( $\text{Bi}_{2+x}\text{Te}_{3+x}$ ), чиклоаит ( $\text{Bi}_2\text{TeS}_2$ ), грюнлигит ( $\text{Bi}_4\text{TeS}_2$ ) и оруэтит ( $\text{Bi}_4\text{TeS}_2$ ) требуют дополнительных исследований для идентификации их как самостоятельных фаз (Синдеева, 1959). Как видно из диаграммы, появление тетрадимита в парагенезисе с самородным висмутом, висмутином и пирротинном, а равно наличие самородного Те, гессита и некоторых селенидов (?) в ассоциации с самородным Bi и пирротинном, несомненно, указывают на крайний низкий потенциал серы в растворах, поэтому Те и Se здесь играют роль серы в анионном составе образующихся минералов.

Если парагенезисы самородный висмут — пирит и самородный висмут — висмутин — пирит теоретически невозможны в условиях недостаточности серы, то парагенезисы тетрадимит — пирит и тетрадимит — висмутин — пирит являются незапрещенными и нередко встречаются в некоторых золоторудных месторождениях. В подобных случаях следует говорить не столько о недостатке серы в растворах, сколько о повышенной концентрации Те в них.

Некоторое представление об окислительно-восстановительной обстановке возникающих минеральных парагенезисов можно получить по изменению степени окисленности тех или иных ионов в минералах. Так, например, спаренный анион  $\text{S}_2^{2-}$  в пирите и катион  $\text{Bi}^{3+}$  в висмутине, козалите и лиллианите свидетельствуют о более окислительной обстановке условий образования минеральных парагенезисов 1 (висмутин, молибденит, пирит, мусковит), 2 (висмутин — вольфрамит — пирит) и 4 (козалит — лиллианит — пирит), тогда как анион  $\text{S}^{2-}$  в пирротине,  $\text{Bi}^0$  в самородном висмуте указывают на отчетливо восстановительные условия образования парагенезиса 4 (самородный висмут — тетрадимит — пирротин), особенно на нижних горизонтах месторождения Белухи.

Для оценки температурных условий образования минеральных парагенезисов могут быть использованы минералы-термометры: а) самородный висмут с температурой плавления  $271,3^\circ$ ; б) температура перехода шапбахита (кубическая высокотемпературная разность  $\alpha\text{-AgBiS}_2$ ) в матильдит (ромбическая низкотемпературная модификация), равная  $225^\circ$  (Ramdohr, 1960), а по Van Hook (1960) —  $195^\circ$ .

Наиболее ранний минеральный парагенезис — висмутин I, молибденит, мусковит, флюорит I в грейзенах и мусковитовых оторочках кварцевых жил возник, вероятно, при температуре выше или близкой к критической температуре чистой воды —  $374,15^\circ$ . Основная масса висмутина с вольфрамитом I, жильным кварцем, представленным  $\alpha$ -модификацией (Барабанов, 1960), пиритом и другими минералами, образовалась при температуре ниже  $374^\circ$  вслед за отложением мусковитовых оторочек в зальбандах жил. Парагенезис самородного висмута, висмутина III, тетрадимита, пирротина и халькопирита в интерстициях жильного кварца возник, по всей вероятности, при температурах выше или близкой к  $271,3^\circ$ . В конце первой стадии минерализации в остаточных друзовых пустотках образовался парагенезис лиллианита, козалита, галенита I, папиршпата при температурах ниже  $271,3^\circ$ .

Наконец, парагенезис висмут- и серебросодержащего галенита (твердого раствора шапбахита — галенита), вольфрамита II, кварца II и сфалерита в крутопадающих жилах Букуки возник при температурах несколько выше  $195-225^\circ$ . В поведении висмутовой минерализации с глубиной отмечаются отчетливые элементы вертикальной зональности. Прежде всего, в пологих жилах Букуки с глубиной возрастает содержание свинца в висмутинах в 2,5—3 раза, а также увеличивается относительное количество сульфовисмутитов свинца. Последние могут рассматриваться

как своеобразные минералогические критерии нижних, корневых частей жил. С другой стороны, на нижних горизонтах жил Белухи отчетливо возрастает относительное количество самородного висмута, пирротина, халькопирита и других минералов, а также увеличивается содержание в рудах теллура и селена.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В изученных месторождениях кварц-сульфидно-вольфрамитовой формации наблюдается довольно широкое разнообразие минеральных форм, содержащих висмут. Кроме висмута и самородного висмута, в них развиты сложные сульфосоли Вi и Рb, висмутсодержащий галенит, некоторые сульфотеллуриды Вi и др.

2. В рудных жилах месторождений установлено наличие пяти характерных парагенетических ассоциаций висмутовых и висмутсодержащих минералов.

3. Выяснено, что образование различных висмутовых минеральных парагенезисов зависит прежде всего от соотношения концентрации в растворах Вi, Рb и потенциала S. Показано определенное влияние окислительно-восстановительной обстановки, а также температурных условий на возникновение тех или иных парагенетических ассоциаций, содержащих висмутовые минералы.

4. В изучавшихся месторождениях намечаются элементы вертикальной зональности отложения в пределах одной стадии минерализации, которая выражается в одних случаях в возрастании с глубиной содержания Рb в висмутине и увеличении в том же направлении относительных количеств сульфосолей Вi и Рb, а в других — в увеличении с глубиной количеств самородного висмута, тетрадимита и некоторых теллуридов параллельно с возрастанием на нижних горизонтах жил сульфидов, прежде всего пирротина.

5. Выявленные закономерности висмутовой минерализации на изученных объектах могут быть применимы для других месторождений рассматриваемой формации при решении некоторых генетических вопросов и при оценке возможного комплексного использования руд на W, Вi, Мо, Рb и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Барабанов В. Ф. Козалит из Букукинского месторождения.— Докл. АН СССР, 1957, 112, № 5.
- Барабанов В. Ф. Минералогия вольфрамитовых месторождений Восточного Забайкалья, т. 1. Букука и Белуха. Изд-во ЛГУ, 1961.
- Дроздов М. Д. Белухинское месторождение вольфрамита.— В кн. «Месторождения редких и малых металлов», т. 1. Изд-во АН СССР, 1939.
- Дружинин А. В. Теллур и селен в рудах некоторых вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья.— Изв. высш. учебн. заведений, цветная металлургия, 1958, № 5.
- Ермилова Л. П. и Сендерова В. М. О находке козалита в Центральном Казахстане.— Докл. АН СССР, 1955, 105, № 6.
- Ненадкевич К. А. Очерк исследований висмутовых руд Забайкалья. Чита, 1922.
- Левицкий О. Д. Вольфрамовые месторождения Восточного Забайкалья.— В кн. «Месторождения малых и редких металлов», т. II. Изд-во АН СССР, 1939.
- Малиновский Е. П. Некоторые вопросы генезиса пологопадающих кварцево-вольфрамитовых жил Букукинского месторождения.— В кн. «Материалы по геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии». Изд-во АН СССР, 1959.
- «Минералы», т. I. Изд-во АН СССР, 1960.

- Михеев В. И. Рентгенометрический определитель минералов. М., Госгеолтехиздат, 1957.
- Онтоев Д. О. Лиллианит из Букукинского месторождения (Восточное Забайкалье).— Докл. АН СССР, 1959, 126, № 4.
- Онтоев Д. О. К вопросу об условиях формирования рудных жил одной стадии минерализации.—Геология рудных месторождений, 1962, № 3.
- Онтоев Д. О., Ниссенбаум П. Н. и Органова Н. И. Природа высоких содержаний висмута и серебра в галенитах Букукинского месторождения и некоторые вопросы изоморфизма в системе  $PbS - Bi_2S_3 - Ag_2S$ .— Геохимия, 1960, № 5.
- Самонов И. З. Некоторые особенности минералообразования в рудах Белухинского месторождения и вопросы распределения вольфрамитов в жильных месторождениях.— Изв. высш. учебн. заведений, геология и разведка, 1959, № 4.
- Самонов И. З. Особенности и этапы развития структуры Белухинского месторождения.— В кн. «Основные вопросы и методы изучения структур рудных полей и месторождений». Изд-во АН СССР, 1960.
- Сахарова М. С. О висмутовых сульфосолях Устарасайского месторождения.— Труды мин. музея АН СССР, 1955, вып. 7.
- Синдеева И. Д. Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. Изд-во АН СССР, 1959.
- Суцинский П. П. Очерк месторождений вольфрамовых и оловянных руд России.— Материалы по изучению естествен. производ. сил России, 1916, № 5.
- Суцинский П. П. Заметка о геологическом строении некоторых новых месторождений вольфрамитов в Южном Забайкалье.— Изв. Российской АН, 1917, 11.
- Щеглов А. Д. К вопросу о генезисе вольфрамовых месторождений Забайкалья.— Геология рудных месторождений, 1959, № 6.
- Яковлевская Т. А. Минералогия Белухинского месторождения. Автореф. канд. дисс. МГУ, 1953.
- Ramdohr P. Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. Akad. Verl. Berlin, 1960.
- Krčič V., Matherly M., Varšek C. Prispevek k pobemu strukture minerali «Liljanit».— Geol. sborn. 1961, d. XII, c. 1.
- Van Hook H. I. The ternary system  $Ag_2S - Bi_2S_3 - PbS$ . Econ. Geol., 1960, 55.