

М. С. САХАРОВА

О ВИСМУТОВЫХ СУЛЬФОСОЛЯХ УСТАРАСАЙСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Устарасайское месторождение, расположенное в Западном Тянь-Шане, представляет собой полосу, в основном сложенную известняками фаменского яруса верхнего девона, среди которых выделяются три горизонта: криноидный, брахиоподовый и остансайский.

Геологическое строение Устарасая изучали Е. П. Воробьев, Г. М. Вировлянский, Л. З. Мирошников и ряд других геологов.

Главными структурными элементами Устарасайского месторождения являются три крупных разлома типа сбросов с северо-западным простиранием и крутым падением, расчленяющие рудное поле на северный, центральный и южный участки, минерализованные в различной степени.

Северо-Устарасайский разлом ограничивает на севере рудное поле. Средне-Устарасайский разлом, разделяющий северный и центральный участки, является, повидимому, главной контролирующей структурой рудного поля. Тяготеющая к нему площадь минерализована наиболее интенсивно, и на ней развиты все минеральные комплексы месторождения. Южно-Устарасайский сброс ограничивает с юга центральный участок и по существу рудное поле.

Помимо упомянутых крупных контролирующих структур в пределах рудного поля развиты более мелкие нарушения, сопряженные с главными, которые вмещают рудные тела месторождения и являлись, повидимому, подводными каналами при формировании пластовых метасоматических жил и залежей. Послерудные нарушения на месторождении проявляются в виде мелкой трещиноватости и небольших сбросов.

Рудные тела Устарасая представлены секущими и пластовыми жилами, межпластовыми метасоматическими телами, образующими в ослабленных и нарушенных зонах залежи с раздувами, а в узлах тектонических нарушений местами столбообразные тела. Также необходимо отметить минерализованные зоны дробления.

Секущие кварцево-висмутиновые жилы развиты на всей площади рудного поля. Они имеют сравнительно выдержанное простирание в двух направлениях: СЗ 320—330° и близкое к широтному; преобладают крутые (60—70°) углы падения. Местами происходило повторное приоткрывание этих трещин и наложение более поздней минерализации на кварцево-висмутиновую, что привело к образованию метасоматических тел сложного состава, совпадающих по простиранию с секущими жилами.

Пластовые жилы и метасоматические тела слагаются в основном сульфидами. Они приурочены к центральному участку, где известны также выдержанные пластовые рудные залежи.

Изменения вмещающих пород в пределах рудного поля представлены тремолитизацией, окварцеванием, мраморизацией и, в меньшей мере, хлоритизацией, серицитизацией и пиритизацией. Местами наблюдается наложение этих процессов.

Наиболее интенсивное изменение вмещающих пород связано со Средне-Устарасайским разломом, где тремолитизированные, серицитизированные, окварцеванные известняки содержат вкрапленники пирита и халькопирита.

1. КРАТКИЕ ДАННЫЕ ПО МИНЕРАЛОГИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Устарасайское месторождение весьма разнообразно по минеральному составу; в нем установлено более 50 первичных и вторичных минералов, количественная роль которых весьма различна. Особым своеобразием отличается группа первичных минералов Vi . Изучение этой группы показало, что помимо сравнительно распространенных для данного элемента висмутин и самородного висмута на месторождении развиты весьма редкие висмутовые сульфосоли, результатам изучения которых и посвящена настоящая статья.

Из других минералов месторождения несомненного внимания заслуживают вторичные минералы Vi , так называемые «висмутовые охры», также представляющие собой сложную малоисследованную группу. Следует отметить развитые на месторождении пиритито-скородитовые руды, подробно изучавшиеся В. Б. Татарским (1937).

Среди первичных минералов Устарасая нам представляется возможным выделить четыре разновозрастные минеральные ассоциации, отвечающие стадиям формирования месторождения: тремолитово-кварцевую, кварцево-висмутиновую, арсенопиритовую (главный сульфидный комплекс) и хлорит-карбонатную. Необходимо отметить наличие на Устарасе нескольких генераций одних и тех же минералов.

В табл. 1 приводится список минералов Устарасайского месторождения. В графе «Распространенность» указывается относительная степень распространенности минерала в рудах по данным полевых наблюдений и микроскопического изучения.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРВИЧНЫХ ВИСМУТОВЫХ МИНЕРАЛОВ

Группа висмутовых минералов, широко развитая на месторождении, представляет большой интерес. Основная масса этих минералов приурочена к секущим кварцево-висмутиновым жилам. Вместе с тем висмутовые минералы присутствуют и в мышьяковых рудных телах.

При прежних исследованиях все висмутовые минералы, за исключением самородного висмута, рассматривались как висмутин. Детальное минералогическое изучение показало, что относимые к висмутину минералы не являются однородными, а представляют собой группу, в которой наряду с собственно висмутином присутствуют висмутовые сульфосоли. Члены этой группы заметно отличаются некоторыми физическими свойствами (цвет, блеск), данными микроскопического изучения (отражательная способность, степень анизотропности), различным эффектом травления. Спектральным и химическим анализами в исследованных минералах было обнаружено постоянное существенное содержание Pb (до 22,8%). Подобное значительное количество Pb не позволило отождествить исследуемые минералы с висмутином и заставило поставить вопрос: обусловлено ли присутствие Pb рассеянными вкрапленниками галанита или же

Минералы Устарасая

Распространенность	Гипогенные минералы	Гипергенные минералы
I. Рудные минералы		
Большая	1. Арсенопирит. 2. Пирит. 3. Пиррестин. 4. Висмутин. 5. Устарасит	18. Лимонит. 19. Скородит и различные продукты его изменения (в том числе пиритит). 20. Марказит. 21. Ярозит. 22. Свинец, содержащий гидробисмутит
Средняя	6. Сфалерит. 7. Халькопирит. 8. Самородный висмут. 9. Рецебашиит. 10. Кобеллит	23. Базобисмутит. 24. Бисмит. 25. Мелангерит. 26. Копвалит. 27. Малахит. 28. Халькозин. 29. Марганцовые охры
Малая	11. Блеклые руды. 12. Бурнонит. 13. Галенит. 14. Висмутовый джемсонит. 15. Самородная сурьма. 16. Реальгар. 17. Киноварь	30. Цианотрихит. 31. Хризоконда. 32. Ковеллин. 33. Фармаколит
II. Нерудные минералы		
Большая	34. Кварц. 35. Кальцит. 36. Тремолит. 37. Хлорит. 38. Серицит	49. Кальцит. 50. Гипс
Средняя	39. Доломит. 40. Анкерит. 41. Сидерит. 42. Актинолит. 43. Тальк. 44. Диопсид	51. Арагонит. 52. Эпсомит
Малая	45. Апатит. 46. Рутил. 47. Темная слюда (биотит?). 48. Полевой шпат	

Pb входит в состав минерала и мы имеем дело со свинцово-висмутовыми сульфосолями?

Как известно, отражательная способность галенита и висмутина весьма близка, в силу чего достоверно отличить эти минералы друг от друга подчас бывает затруднительно. Оптическое отличие указанных минералов производится в первую очередь на основании изотропности галенита и анизотропности сульфида висмута. Однако вследствие малых размеров включения галенита могли быть легко пропущены.

Для выяснения вопроса о форме нахождения Pb нами была применена рекомендуемая А. Г. Бетехтиным (1941) методика длительного травления полированных шлифов разбавленными кислотами. Как известно, такого рода травление в ряде случаев выявляет неоднородность внешне совершенно однородных минеральных агрегатов. В качестве травителей нами были взяты соляная и азотная кислоты в различных концентрациях (50, 20, 10, 5 и 2%) и $KMnO_4$ в концентрациях 20, 10 и 5%. Для изучения был отобран ряд штучков, богатых Pb-содержащими висмутовыми минералами, из различных жил и участков месторождения. Время травления бралось различное (5, 10, 20 и 30 мин., 1, 2 и 3 часа). Результаты травления контролировались микроскопически. При этом никакой неоднородности в исследуемых минералах обнаружено не было.

Однако полученные данные были еще недостаточны для однозначного отрицания возможности примеси галенита. Максимальные увеличения, применявшиеся в процессе работы, равнялись 600—700, размер же включений галенита мог быть меньше разрешающей способности микроскопа. С целью окончательного решения вопроса о природе Pb из образцов, подвергавшихся травлению, был отобран материал для рентгеновского анализа, произведенного Н. Н. Слудской.

При наличии в минерале примеси галенита в полученных дебаграммах неизбежно должны были бы обнаруживаться две минеральные фазы и основные линии галенита, хотя бы ослабленной интенсивности. Между тем ни в одной из дебаграмм линий галенита установлено не было. Вместе с тем полученные дебаграммы существенно отличались от дебаграммы висмутита.

Проведенные исследования показывают, что обнаруженный в висмутовых минералах Pb не связан с примесью галенита. Детальное изучение минералогических и оптических свойств, а также данных химического, рентгено-структурного и рентгено-химического анализов позволили установить, что в рудах Устарасая наряду с висмутином и самородным висмутом присутствует группа свинцово-висмутовых сульфосолей, количественная роль которых существенна. Среди указанных сульфосолей ведущая роль принадлежит своеобразному минералу, который может рассматриваться как самостоятельный новый минеральный вид и назван нами по наименованию месторождения «устараситом». Помимо устарасита на месторождении установлены еще два весьма редких минерала из группы свинцово-висмутовых сульфосолей: минерал типа рецбаниита и кобеллит, а также своеобразная Bi-содержащая разновидность джемсонита.

Ниже мы приводим описание изученных нами висмутовых минералов.

С а м о р о д н ы й в и с м у т Bi наблюдается на Устарасая в виде мелких вкрапленников в висмутите и сульфовисмутитах. Размеры его зерен мелкие, не превышают долей миллиметра, и лишь изредка его обособления различимы макроскопически.

Наиболее обогащен самородным висмутом кобеллит, зерна которого содержат обильные густые вкрапленники овальных, удлинённых или извилистых включений, местами смыкающихся между собой и состоящих из мелких жилковидных обособлений самородного висмута. Существенного значения в рудах самородный висмут не имеет.

В и с м у т и н Bi_2S_3 представлен на месторождении двумя генерациями. Основная его масса связана с секущими кварцево-висмутиновыми жилами, в которых он образует сравнительно крупные (до 2—3 см) удлиненно-призматические кристаллы. Висмутии II развит в арсенипиритовой минеральной ассоциации, слагает мелкозернистые агрегаты и значительных скоплений не дает.

Наиболее интересной особенностью Устарасайского висмутита является постоянное присутствие в нем примеси Pb (табл. 2).

Химический анализ висмутита обнаружил в нем 3,37% Pb и 2,39% Sb. Постоянное присутствие в висмутите небольших количеств Pb подтверждается также данными спектрального и рентгено-химического анализов. Последним методом И. Б. Боровским для ряда образцов висмутита (восемь анализов) было установлено отношение Pb : Bi, составлявшее 0,01—0,05.

В целом количество Pb и Sb невелико и не влияет на формулу минерала, принадлежность которого к висмутиту подтверждается также оптическими данными и хорошим соответствием полученных для исследуемого минерала дебаграмм стандартной дебаграмме висмутита.

Таблица 2

Химический состав висмутина
(аналитик В. М. Сендерова)

Компоненты	Вес. %	Атомное количество	Отношение атомных количеств
Bi	75,26	0,360	2,00
Sb	2,39	0,019	0,10
Pb	3,37	0,016	0,09
Cu	Нет	—	—
Fe	0,28	0,005	0,00
As	Нет	—	—
Нерастворимый остаток	0,70	—	—
S	18,04	0,563	3,13
Сумма	100,04	—	—
Формула		Bi_2S_3	

Присутствие в висмутине незначительных количеств Pb отмечалось и на некоторых других месторождениях, в частности В. И. Вернадским (1916) и Ф. В. Чухровым (1944). Последним исследователем описан минерал с октаэдрической отдельностью из месторождения Акчагыл (Казахстан), содержащий до 2% Bi.

Все эти данные указывают на возможность присутствия в висмутине незначительного количества Pb, изоморфно замещающего Bi, не влияющего на основные свойства и структуру минерала.

Устарасит $\text{PbS} \cdot 3(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$. Минерал, описываемый нами под этим названием, относится к группе свинцово-висмутовых сульфоселенов. Он сравнительно широко распространен на месторождении и развит в кварцево-висмутиновых жилах.

По внешнему виду описываемый минерал сходен с висмутином, за который он и принимался предыдущими исследователями. Устарасит развит в виде призматических кристаллов (рис. 1 и 2), местами изогнутых и искривленных. Цвет минерала серебристо-серый до серого, блеск металлический. Спайность совершенная в одном направлении и несовершенная выходящая лишь для длительного травления, — в другом. Твердость 2,5.

Микроскопически устарасит обнаруживает белый, без оттенков, цвет, сильную анизотропность, более резкую, чем у висмутина, отчетливо заметную без иммерсии, а также заметное двуотражение. Внутренних рефлексов не наблюдается. Отражательная способность устарасита равна 42% (среднее из семи определений). Измерение отражательной способности производилось на микрофотометре Берека при желтом светофильтре. За стандарт принимался сфалерит из месторождения Сантандер (Испания), используемый Швейдехеном. Разница в полученных определениях не превышала 10%.

Действие травителей на устарасит дало следующие результаты: от HNO_3 концентрированной вскипает и чернеет; от HNO_3 (1 : 1) слабо вскипает

пает; от HCl концентрированной после 10 мин. появляется призирующая пленка; от HCl (1 : 1) при действии свыше 2 час. слабо коричневет и вы- является второе направление спайности; от KOH концентрированного коричневет; от паров царской водки чернеет; KCN, FeCl₃, KOH, HgCl₂ и KMnO₄ не действуют.

Химический анализ двух образцов устарасита приведен в табл. 3. Ма- териал для анализа № 1 был взят из кварцево-висмутовой жилы штольни № 16, для анализа № 2 — из жилы штольни № 11 и тщательно отобран под бинокляром.

Таблица 3

Химический состав устарасита

[аналитики: В. М. Сендерова (анализ № 1) и Ю. С. Нестерова (анализ № 2)]

Компоненты	Анализ № 1			Анализ № 2		
	вес. %	атомные количества	отношение атомных количеств	вес. %	атомные количества	отношение атомных количеств
Bi	65,33	0,312	6,23	64,90	0,311	6,05
Sb	2,96	0,024		1,87	0,015	
Pb	10,51	0,051	0,95	11,35	0,055	1,02
Cu	0,30	0,005	0,00	0,74	0,012	0,22
Fe	0,60	0,010	0,02	1,40	0,025	0,46
Ag	Нет	—	—	Нет	—	—
As	»	—	—	0,45	0,002	0,00
Нерастворимый остаток . .	0,34	—	—	0,54	—	—
S	17,25	0,539	10,0	17,25	0,539	10,0
Сумма	97,29	—	—	98,20	—	—
Формула	PbS·3(Bi, Sb) ₂ S ₃			PbS·3(Bi, Sb) ₂ S ₃		

Как следует из данных химического анализа, в состав минерала входят Bi, Pb, S и небольшое количество Sb. Присутствие в анализе незначительной примеси Fe и Cu, видимо, связано с примесью пирита и халькопирита, развитых в ассоциации с описываемым минералом. Следует отметить, что некоторое, весьма небольшое количество S, недостаточное для пересчета металлов на сернистые соединения, видимо, связано с постоянным присутствием в устарасите эмульсионных вкрапленников самородного висмута. Для анализа № 1 количество избыточного Bi составляет около 2% весовых, что хорошо согласуется с данными микроскопических наблюдений. В анализе № 2 эта величина еще меньше. Постоянное присутствие Sb, устанавливаемое химическим и спектральным анализами, заставляет ее рассматривать как составную часть сульфосоли, в которой она, повидимому, изоморфно замещает часть Bi. Пересчет данных химического анализа в обоих случаях дал отношение PbS : (Bi, Sb)₂S₃ = 1 : 3, в силу чего формула минерала может быть представлена как PbS·3(Bi, Sb)₂S₃.

В целях выяснения постоянства состава исследуемого минерала серия образцов из разных участков месторождения подверглась помимо микроскопического также спектральному, рентгено-химическому и рентгено-структурному изучению.

Спектральный анализ шести образцов устарасита, произведенный, как и во всех остальных случаях, Н. В. Лизуновым, показал их полную идентичность. Во всех исследованных образцах были установлены линии следующих элементов: Вi — очень сильной и сильной интенсивности; Рb — сильной и выше средней; Sb и Cu — выше средней и средней; Fe — выше средней до слабой; Ag и Si — средней и слабой; Ca, Te — слабой и очень слабой; Sn, Mg — слабой; Mn, Al, Cr — следы и ничтожные следы. В единичных образцах установлены следы As, Sr и Cd.

Для проверки постоянства отношения Рb : Вi в десяти образцах устарасита И. Б. Боровский рентгено-химически определил количественное отношение этих элементов. Полученные данные также подтвердили однотипность исследованных образцов. Отношение Рb : Вi дало колебания 0,11—0,33, в среднем составляя 0,21, что очень близко к отношениям, найденным химически.

Рентгено-структурное изучение висмутовых минералов Устарасая производилось Н. Н. Слудской по методу Дебая-Шерера в камере диаметром 57,9 мм на железном излучении с марганцевым фильтром. Анализ девяти образцов устарасита показал полную гомогенность исследуемого материала. Изученные образцы характеризовались как большим постоянством межплоскостных расстояний, так и прекрасным совпадением интенсивности.

Не имея в настоящей статье возможности привести полностью все полученные рентгено-структурные данные, мы приводим таблицу межплос-

Таблица 4

Межплоскостные расстояния устарасита

№ ли- нии	I	d	№ ли- нии	I	d	№ ли- нии	I	d	№ ли- нии	I	d
1	Слабая	5,524	14	Слабая	2,295	27	Слабая	1,556	40	Слабая, широкая	1,247
2	»	5,019	15	Средняя	2,242	28	»	1,532	41	Очень слабая	1,227
3	»	4,895	16	Слабая	2,195	29	Очень сильная	1,483	42	Очень слабая, широкая	1,215
4	Средняя	3,885	17	Сл. шир.	2,073	30	Средняя	1,442	43	Слабая	1,202
5	Очень сильная, широкая	3,527	18	Слабая	1,980	31	»	1,429	44	Средняя	1,189
6	Средняя	3,382	19	Сильная, широкая	1,915	32	»	1,400	45	Слабая	1,166
7	Сильная	3,080	20	Средняя	1,884	33	Очень слабая	1,384	46	Сильная	1,140
8	Очень слабая	2,973	21	»	1,857	34	Слабая	1,368	47	Слабая	1,125
9	Средняя	2,785	22	Очень слабая	1,780	35	Средняя	1,352	48	Средняя	1,110
10	Слабая	2,702	23	Сильная	1,732	36	Слабая	1,320	49	»	1,102
11	»	2,627	24	Слабая	1,699	37	Средняя	1,308	50	Слабая, широкая	1,088
12	Сильная	2,508	25	»	1,680	38	Слабая	1,296	51	Очень сильная	1,057
13	Очень слабая	2,443	26	Очень слабая	1,632	39	»	1,283	52	Средняя	1,033

костных расстояний устарасита по несколько усредненным данным из крайне близких между собой девяти дебаеграмм этого минерала (табл. 4).

При сравнении дебаеграммы исследуемого минерала с рентгенограммами других минералов висмута выясняется, что она отличается как от висмутита, так и от других висмутовых сульфосолей [Харкорт (Harcourt), 1942; Нафильд (Nuffield), 1947].

Постоянство химического состава, оптических и физических свойств, данные рентгено-структурного и рентгено-химического изучения свидетельствуют о том, что мы имеем дело с самостоятельным минеральным видом из группы свинцово-висмутовых сульфосолей, отвечающим формуле $PbS \cdot 3(Bi, Sb)_2S_3$, который мы по наименованию месторождения предлагаем назвать устараситом.

В опубликованной литературе описан ряд сульфосолей, содержащих Bi и Pb, однако во всех упомянутых сульфосолях содержание свинца существенно выше, чем в устарасите. Свинцово-висмутовые сульфосолы в целом весьма редки и характеризуются различным соотношением $PbS : Bi_2S_3$. Они могут быть представлены в виде следующего ряда.

Название	Формула	$PbS : Bi_2S_3$
Беегерит	$6PbS \cdot Bi_2S_3$	6 : 1
Гунгаррит	$4PbS \cdot Bi_2S_3$	4 : 1
Лиллианит	$3PbS \cdot Bi_2S_3$	3 : 1
Козалит	$2PbS \cdot Bi_2S_3$	2 : 1
Галеновисмутит	$PbS \cdot Bi_2S_3$	1 : 1
Рецбаниит	$4PbS \cdot 5Bi_2S_3$	$\frac{4}{5} : 1$
Чивиаит	$2PbS \cdot 3Bi_2S_3$	$\frac{2}{3} : 1$
Канинцарит	$PbS \cdot 2Bi_2S_3$	$\frac{1}{2} : 1$
Устарасит	$PbS \cdot 3(Bi, Sb)_2S_3$	$\frac{1}{3} : 1$

Известен также ряд медно-висмутовых сульфосолей и сульфовисмутитов Pb и Cu. Так, медным аналогом лиллианита является виттихенит, а галеновисмутита — эмплектит, а как промежуточные разновидности между ними могут рассматриваться айкиннит и линдстрёмит.

Название	Виттихенит	Айкиннит	Лиллианит
Формула	$3Cu_2S \cdot Bi_2S_3$	$2PbS \cdot Cu_2S \cdot Bi_2S_3$	$3PbS \cdot Bi_2S_3$
$(RS + R_2S : Bi_2S_3)$	3 : 1	3 : 1	3 : 1
Название	Эмплектит	Линдстрёмит	Галеновисмутит
Формула	$Cu_2S \cdot Bi_2S_3$	$2PbS \cdot Cu_2S \cdot 3Bi_2S_3$	$PbS \cdot Bi_2S_3$
$(RS + R_2S : Bi_2S_3)$	1 : 1	1 : 1	1 : 1

Среди медных сульфосолей известен крайне редкий минерал эйхбергит, установленный в Земмеринге (Австрия), формула которого $(Cu, Fe)_2S \cdot 3(Bi, Sb)_2S_3$.

Из сравнения этой формулы с формулой устарасита следует, что эйхбергит представляет собой медный аналог устарасита.

Все изложенное дает основание утверждать, что исследованный минерал представляет собой новый, самостоятельный минеральный вид из группы свинцово-висмутовых сульфосолей. Он отвечает формуле $PbS \cdot 3(Bi, Sb)_2S_3$ и, как указывалось, назван нами устараситом.

Минерал типа рецбаниита $4PbS \cdot 5(Bi, Sb)_2S_3$. В кварцево-висмутиновых жилах Устарасая помимо описанных минералов Bi

развит свинцово-висмутовый минерал типа рецбаниита, имеющий подчиненное значение в рудах месторождения. Он приурочен к кварцево-висмутиновым жилам и тяготеет к их центральной части.

Макроскопически рецбаниит отличается от висмутита и устарасита более темным свинцово-серым цветом и сплошным массивным строением своих агрегатов. Микроскопически он подобно устараситу характеризуется белым цветом, резкой анизотропностью и заметным двуотражением. По величине отражательной способности описываемый минерал близок к устараситу.

Рецбаниит травится HNO_3 (1 : 1), HCl (1 : 1) и FeCl_3 ; HgCl дает иризирующие пленки. Остальные травители не действуют.

Для химического анализа рецбаниит выделялся путем отбора под бюнокюляром. Необходимо отметить, что микроскопически в описываемом минерале обнаруживается постоянное присутствие мелких вкрапленников самородного висмута, местами в значительном количестве, что заставляет исключить при выводе формулы минерала часть Bi , избыточного при пересчете металлов на сернистые соединения (табл. 5).

Полученная при пересчете данных анализа формула $4\text{PbS} \cdot 5(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$ отвечает рецбанииту, однако последний минерал является крайне редким и малоизученным, в силу чего его состав различными исследователями рассматривается по-разному. Так, для рецбаниита из Рецбаньи (Румыния) и Васко (Венгрия) дается формула $\text{Cu}_2\text{S}_3\text{PbS} \cdot 5(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$ (Дана, 1937). К сульфосолям меди и свинца относит рецбаниит и А. Г. Бетехтин (1950).

Таблица 5

Химический состав минерала типа рецбаниита
(аналитик В. М. Седерова)

Компоненты	Вес. %	Вычитаемые компоненты	Оставшиеся компоненты	Оставшиеся компоненты, приведенные к 100 %	Атомные количества	Отношение атомных количеств
Bi	55,50	7,94*	47,56	52,15	0,250	10,0
Sb	4,56	—	4,56	5,00	0,040	
Pb	22,80	—	22,80	24,98	0,121	4,16
Cu	Нет	—	—	—	—	—
Fe	0,50	0,50**	—	—	—	—
As	Нет	—	—	—	—	—
Нерастворимый остаток	0,55	0,55	—	—	—	—
S	16,30	—	16,30	17,87	0,557	19,17
Сумма . . .	100,21	8,99	91,22	100,00	—	—
Формула . . .	$4\text{PbS} \cdot 5(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$					

* Bi , избыточный в отношении серы за счет самородного висмута.

** Примесь железа за счет лимонита.

При проверке количественных взаимоотношений Bi и Pb в рецбаниите рентгено-химическим методом в трех образцах отношение $\text{Pb} : \text{Bi}$ составляло 0,4, 0,4 и 0,45.



Рис. 1. Кристаллы устарасита (серое) в кварце (светлое). Натуральная величина.

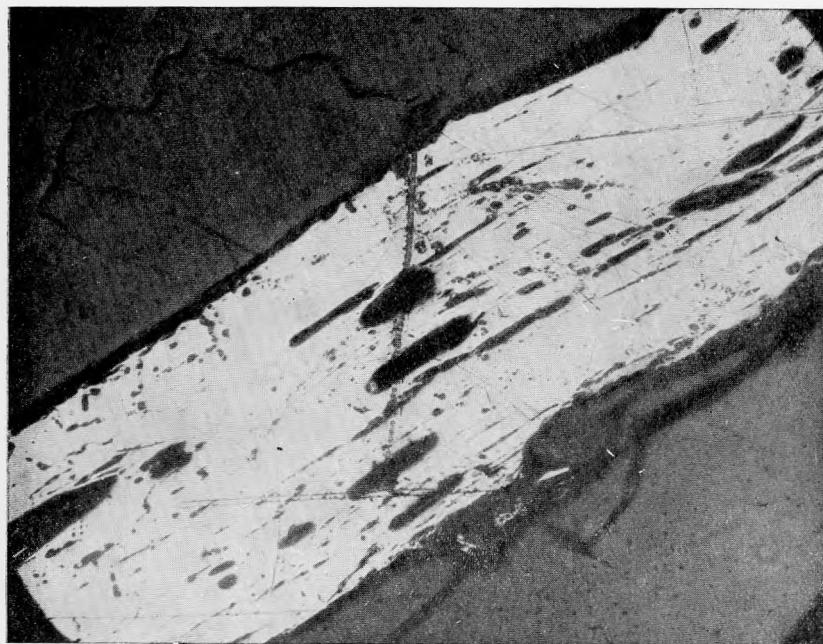


Рис. 2. Удлиненно-призматические кристаллы устарасита. $\times 76$.

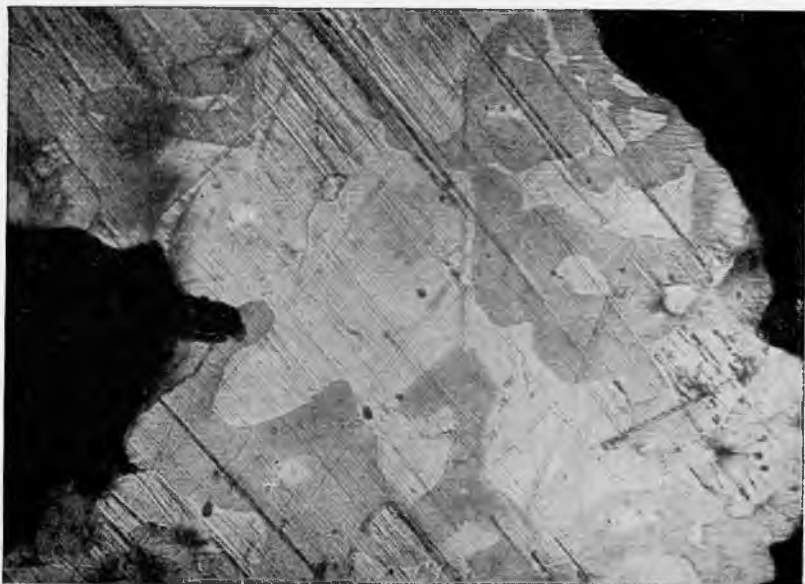


Рис. 3. Взаимное прорастание кобеллита (серое) и висмутина II (светлое). $\times 145$.

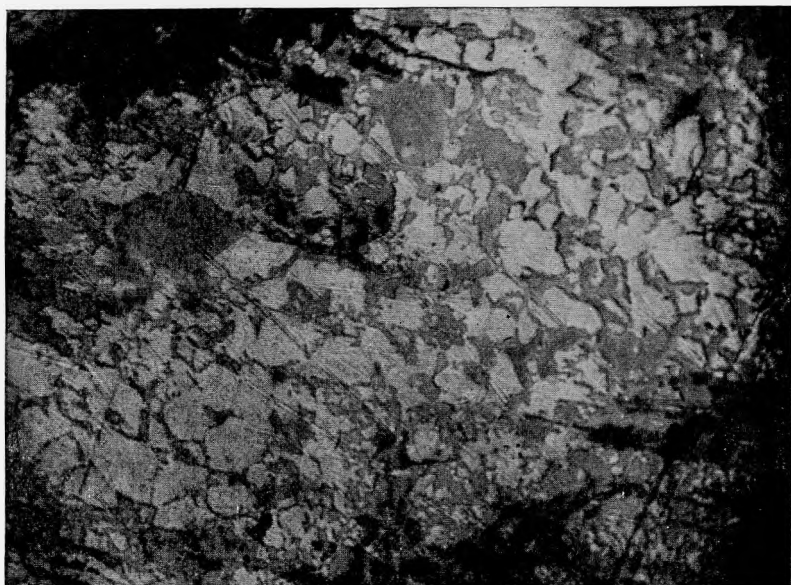


Рис. 4. Кобеллит (серое), содержащий включения самородного висмута (светлое). $\times 365$.

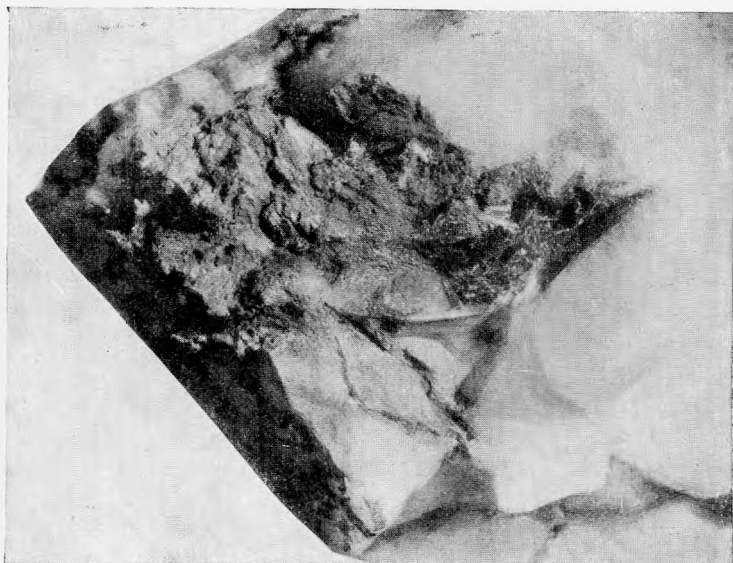


Рис. 5. Волосовидные кристаллы висмутового джемсонита (темносерое) в кварце (светлое). Натуральная величина.

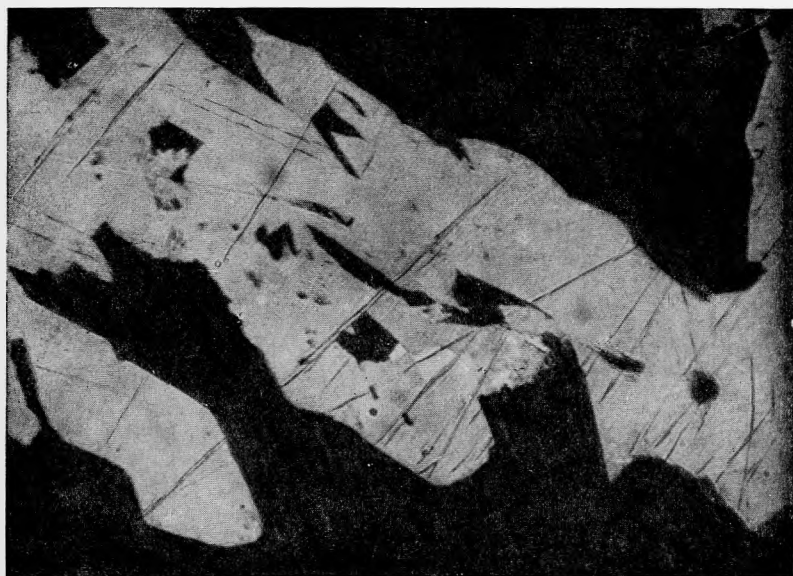


Рис. 6. Кристаллы висмутового джемсонита (серое) с вкраплениями самородной сурьмы (белое). $\times 145$.



Рис. 7. Поперечное сечение кристаллов висмутового джемсонита (серое).
× 450.

Спектральный анализ четырех образцов рецбаниита показал линии следующих элементов: Bi, Pb, Sb — очень сильной и сильной интенсивности; Cu, Fe, Ag — выше средней; Si — средней; Sn, Mn, Te, Ca, Cd — слабой и очень слабой; Al, Sr, Cr — следы и ничтожные следы.

Рентгено-структурное исследование четырех образцов рецбаниита показало, что они близки между собой и отвечают одному минералу.

Ниже мы приводим межплоскостные расстояния для образца, проанализированного химически (табл. 6).

При сравнении полученных данных с межплоскостными расстояниями других минералов Bi близких аналогов не найдено. Приводимая Харкуртом (1942) дебаеграмма рецбаниита имеет ряд отличий от полученной нами, и сам минерал рецбаниит рассматривается этим автором как сурьмяный, что исключает сопоставление с ним.

Таблица 6

Межплоскостные расстояния минерала типа рецбаниита

№ п/п	I	d	№ ли-ний	I	d	№ ли-ний	I		№ ли-ний	I	
							d	№ ли-ний		d	№ ли-ний
1	Слабая	3,872	8*	Слабая	2,290	15	Очень сильная	1,721	22	Слабая	1,310
2	Очень сильная	3,505	9	Средняя	2,244	16	Очень слабая	1,699	23	»	1,249
3	Сильная	3,382	10	»	2,124	17	Слабая	1,552	24	»	1,187
4	Средняя	3,053	11	»	2,025	18	»	1,479	25	Очень слабая	1,163
5	Очень слабая	2,772	12	Сильная	1,938	19	Средняя	1,431	26	Средняя	1,139
6	Слабая	2,696	13	Очень слабая	1,884	20	Очень слабая	1,386	—	—	—
7	Средняя	2,504	14	То же	0,852	21	То же	1,348	—	—	—

Приведенные данные показывают, что изученный минерал из Устарасая по своим свойствам может быть отождествлен с рецбаниитом, однако не содержит Cu и является свинцово-висмутовой сульфосолю. Ввиду неизученности состава минерала, описанного под названием рецбаниит в опубликованной литературе, мы называем исследованный минерал с Устарасая минералом типа рецбаниита.

К о б е л л и т $2PbS \cdot (Bi, Sb)_2S_3$. В отличие от других свинцово-висмутовых сульфосолей кобеллит на Устарасая развит в арсенипиритовом рудном комплексе и не встречается в кварцево-висмутиновых жилах. Кобеллит наблюдается в виде мелкозернистых агрегатов и не образует крупных кристаллов, а также значительных скоплений. Кобеллит иногда встречается в ассоциации с висмутином II, с которым он дает взаимные прорастания (рис. 3).

Микроскопически кобеллит заметно отличается от других минералов Bi своим голубовато-серым оттенком, хорошо заметным благодаря обильным вкраплениям самородного висмута (рис. 4). Его отражательная способность ниже, чем у висмутина; анизотропность и внутренние красноватые рефлексы отчетливо заметны только с иммерсией. Двуотражение заметно в воздухе. Минерал травится HNO_3 и слабо иризирует от $FeCl_3$. Остальные травители не действуют.

Малый размер зерен не дал возможности отобрать минерал для химического анализа. Из материала, отобранного из шлифов под микроскопом, были произведены спектральный анализ, количественное определение отношения $Pb : Bi$ и снята дебаграмма. Спектральным анализом были установлены линии следующих элементов: Bi , Pb — сильной интенсивности; Sb , Cu — выше средней; Ag , Fe , Si — средней; Te , As , Ca , Al — слабой; Au — очень слабой; Cd , Cr , Na — следы; Tl , Zn — ничтожные следы.

Определенное рентгено-химическим путем отношение $Pb : Bi$ составило для одного образца 0,92, для другого 0,85.

Дебаграмма, полученная для кобеллита с Устарасая, соответствовала стандартной дебаграмме этого минерала (табл. 7).

Таблица 7

Межплоскостные расстояния кобеллита

№ линии	Кобеллит с Устарасая		Кобеллит по данным Харкурта (1942)		№ линии	Кобеллит с Устарасая		Кобеллит, по данным Харкурта (1942)	
	<i>l</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>d</i>		<i>l</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>d</i>
1	Слабая	3,571	2	3,55	9	Слабая, широкая	2,230	0,3	2,31
2	Сильная	3,382	2	3,88	10	—	—	0,3	2,25
3	—	—	1	3,27	11	Средняя	2,135	1,0	2,13
4	—	—	0,5	3,14	12	»	0,018	1,3	2,02
5	Слабая	2,975	0,5	2,98	13	Очень слабая	1,950	0,2	1,94
6	»	2,880	3,0	2,86	14	То же	1,912	0,3	1,81
7	Средняя	2,714	2,0	2,72	15	Слабая	1,732	0,8	1,74
8	—	—	0,3	2,60					

Характерной чертой описываемого минерала являются обильные вкрапления самородного Bi , присутствие которого в ряде случаев, вероятно, является результатом распада.

Следует, однако, отметить, что местами кристаллы кобеллита густо насыщены вытянутыми изогнутыми обособлениями самородного Bi , составляющего, судя по шлифам, до половины сложного кобеллитово-висмутового агрегата. Чаще обособления самородного висмута имеют четковидную форму, дают пережимы и раздувы, иногда сливаются между собой и образуют изогнутые «перемычки» и жилковидные обособления самородного висмута (рис. 4). Возможно, что подобные соотношения являются результатом одновременного выпадения сложного геля, в пределах которого в последующем произошло обособление самородного висмута.

Висмутовый джемсонит $PbS \cdot (Bi, Sb)_2S_3$. Характерной геохимической чертой Устарасайского месторождения является постоянное присутствие в рудах малых концентраций Sb .

Небольшие количества Sb постоянно входят в состав висмутовых сульфосолей. Вместе с тем в рудах присутствуют и собственно сурьмяные минералы: бурнонит, блеклые руды и самородная сурьма, распространенность которых весьма мала.

Крайне своеобразную минеральную разновидность представляет установленный нами висмутовый джемсонит, отличающийся высоким содержанием Bi ; распространенность его на месторождении незначительная.

Висмутовый джемсонит представлен тонкими волосовидными кристаллами, образующими лучистые, напоминающие пучки, агрегаты. Местами наблюдаются волокнистые скопления или «паутинообразное» затягивание небольших полостей (рис. 5). В поперечном сечении волосовидные кристаллы имеют форму несколько неправильных прямоугольников или ромбов (рис. 6 и 7). Длина кристаллов обычно составляет несколько миллиметров, иногда доходит до 1 см; поперечное сечение измеряется долями миллиметра.

Цвет минерала свинцово-серый; блеск металлический; спайность совершенная в одном направлении. Микроскопически висмутовый джемсонит характеризуется белым цветом, низкой твердостью и сильной анизотропностью. Двуреломление и красноватые внутренние рефлексии хорошо заметны только с иммерсией. Величина отражательной способности, измеренная на микрофотометре Берека, составляет 34%.

Таблица 8

Химический состав висмутового джемсонита
(аналитик В. М. Сендерова)

Компоненты	Вес. %	Атомное количество	Отношение атомных количеств
Bi	30,50	0,146	
Sb	16,50	1,136	1,07
Pb	32,25	0,156	1,00
Fe	1,39	0,025	1,15
Cu	0,30	0,004	0,17
As	»	—	0,02
Нерастворимый остаток	1,59	—	—
S	17,62	0,550	4,04
Сумма	100,15	—	—

Формула . . . $2\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3 \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$ или $\text{PbS} \cdot (\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$

По аналогии с формулами других сульфосолей Устарасайского месторождения, в которых наблюдается изоморфизм Bi и Sb, формулу исследованного минерала можно написать так: $\text{PbS} \cdot (\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$.

Тождество исследуемого Bi-содержащего джемсонита с нормальным стандартным джемсонитом подтверждается данными рентгено-структурного изучения (табл. 9). Таким образом, по морфологии кристаллов, оптическим свойствам и структуре исследованный минерал тождествен джемсониту, от которого отличается присутствием значительного количества Bi, и может рассматриваться как разновидность джемсонита — висмутовый джемсонит.

Необходимо подчеркнуть, что подобное значительное содержание Bi является своеобразной минералогической чертой, так как Bi обычно не встречается в сурьмяных минералах в заметных количествах.

Висмутовый джемсонит наблюдался в полостях между кристаллами кварца, а также встречен в тонких карбонатных микропрожилках, пересекающих арсенопиритовые руды. Это заставляет предполагать, что обра-

Таблица 5

Межплоскостные расстояния джемсонита

№ линии	Висмутовый джемсонит с Устарасая		Стандартный джемсонит, по Харкурту		№ линии	Висмутовый джемсонит с Устарасая		Стандартный джемсонит по Харкурту	
	l	d	l	d		l	d	l	d
1	Сильная	3,412	3,0	3,40	14	Очень слабая	1,695	—	—
2	Слабая	3,093	1,0 шир.	3,10	15	Слабая	1,527	—	—
3	Очень слабая	2,960	—	—	16	»	1,474	—	—
4	Слабая	2,811	2,0	2,81	17	»	1,458	—	—
5	Средняя	2,721	2,0	2,72	18	Очень слабая	1,406	—	—
6	Слабая	2,299	1,0	2,28	19	То же	1,370	—	—
7	»	2,244	1,0	2,23	20	»	1,351	—	—
8	Средняя двойная	2,031	1,0	2,04	21	»	1,288	—	—
9	Слабая	1,912	1,0	2,01	22	»	1,277	—	—
10	Очень слабая	1,881	0,5	1,90	23	Слабая	1,265	—	—
11	Слабая	1,849	1,0	1,82	24	Очень слабая	1,240	—	—
12	Очень слабая	1,760	0,2	1,75	25	Слабая	1,217	—	—
13	Слабая	1,721	0,2	1,71	26	»	1,121	—	—
					27	»	—	—	—

зование висмутового джемсонита происходило в конце арсенопиритовой стадии и несколько оторвано от образования главной массы сульфидов. В ассоциации с висмутовым джемсонитом встречены мелкие кристаллы реалгара и киновари. Внутри кристаллов висмутового джемсонита присутствуют мелкие обособления самородной сурьмы, округлой или удлиненной формы, заметные только при больших увеличениях. Помимо висмутового джемсонита самородная сурьма наблюдалась нами в бурноните, однако зерна ее также крайне мелкие.

В заключение необходимо подчеркнуть, что диагностика и сопоставление висмутовых минералов представляют значительную трудность вследствие их малой изученности и редкости.

3. ПОЛОЖЕНИЕ ВИСМУТОВЫХ МИНЕРАЛОВ В ПРОЦЕССЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Не разбирая детально вопросов происхождения месторождения, остановимся только на некоторых генетических особенностях, вытекающих из данных минералогического изучения.

Устарасая представляет собой сложное по составу гидротермальное месторождение, характеризующееся многостадийностью формирования, отчетливо выраженной зависимостью особенностей минерализации от структуры и интенсивным изменением вмещающих пород.

Нам представляется возможным выделить для Устарасая четыре разновозрастных минеральные ассоциации, отвечающие различным стадиям формирования месторождения.

Наиболее ранняя — тремолитово-кварцевая стадия является типично-метасоматической. Она проявляется на значительной части рудного

поля независимо от рудных тел и представляет собой результат мощного гидротермального изменения карбонатных пород, предшествовавшего собственно рудному процессу. Главными минералами этой стадии являются тремолит, хлорит I, мелкозернистый кварц I; подчиненная роль принадлежит серициту, тальку, карбонатам и некоторым другим.

Вторая по времени — кварцево-висмутиновая стадия минерализации относится к собственно рудному процессу. Для нее характерно резкое преобладание выполнения открытых трещин над процессами метасоматоза. С этой стадией связано образование группы висмутовых минералов: висмутита I, самородного висмута и свинцово-висмутовых сульфосолей — устарасита и редбаниита.

Выделение висмутовых минералов близко по времени и лишь несколько отстает от начала кристаллизации крупношестоватого кварца II. В конце второй стадии происходило образование крупнозернистого пирита I, незначительных количеств халькопирита, сидерита и кальцита.

Кварцево-висмутиновые жилы рассекаются и смещаются арсенопиритовыми рудными телами, отчетливо разведаящими жильный комплекс. В отличие от предыдущей арсенопиритовая стадия минерализации характеризуется интенсивным проявлением процессов метасоматоза. Возможно, что это объясняется не столько характером растворов, сколько структурными особенностями: наличием хорошо выраженных трещинных полостей и проникновением рудоносных растворов вдоль сети сближенных, слабо раскрытых трещин. С этой стадией минерализации связано образование мышьяковых и, частично, висмутовых руд. Минералообразование начинается с выделения близко следующих друг за другом арсенопирита, пирита II и мелкозернистого кварца III, проявляющихся как несколько обособленно, так и в тесной ассоциации с последующими сульфидами: пиротином, сфалеритом, халькопиритом, минералами висмута — висмутином II, кобеллитом и самородным висмутом. В единичных случаях в описываемом сульфидном комплексе наблюдались отдельные зерна бурнонита, блеклых руд, а также галенит.

Арсенопиритовая стадия минерализации заканчивается образованием висмутового джемсонита, самородной сурьмы, реальгара и киновари.

Возможно, что висмутовые минералы арсенопиритовой стадии частично могут представлять собой результат переработки рудоносными растворами более ранних кварцево-висмутиновых рудных тел. Вместе с тем присутствие висмутовых минералов в сульфидном комплексе, разобщенном с кварцево-висмутиновыми жилами, делает вероятным присутствие V_1 в рудоносных растворах арсенопиритовой стадии.

Последняя, наиболее поздняя, минеральная ассоциация Устарасая представлена прожилками белого кальцита II, сопровождающимися хлоритовыми оторочками и содержащими незначительные количества сульфидов: пирита и халькопирита. Лишь в зоне Средне-Устарасайского разлома кальцит-хлоритовая минерализация проявлена значительно.

Присутствие в рудах месторождения сложной и редкой группы сульфосолей представляет собой весьма своеобразную черту месторождения. Особенностью висмутовых сульфосолей Устарасая является постоянное присутствие в них изоморфной примеси сурьмы.

Следует отметить, что концентрация Pb в рудах в общем невелика и галенит во вскрытых выработках частях месторождения практически отсутствует. Также весьма незначительна роль Sb , образующей ничтожно малые количества собственно сурьмяных минералов.

Образование висмутовых и сурьмяных сульфосолей, реальгара и киновари указывает на относительно низкотемпературность рудоотложе-

ния главных сульфидов месторождения (арсенопиритовая стадия). Следует отметить, что образование сложного ряда свинцово-висмутовых сульфосолей вообще является специфической особенностью месторождения и, видимо, указывает на не вполне обычные для кварцево-висмутиновых жил условия его формирования.

ЛИТЕРАТУРА

- А. Г. Бетехтин. О структурном травлении полированных шлифов. Труды ИГиН АН СССР, вып. 11, сер. 15, 1941.
- А. Г. Бетехтин. Минералогия. Госгеолгиздат, 1950.
- В. И. Вернадский. Висмут в земной коре. Изв. АН СССР, сер. VII, т. X, № 15, 1916.
- Э. С. Дана. Описательная минералогия. ОНТИ, 1937.
- Минералы СССР, т. I и II. АН СССР, 1940.
- В. Б. Татарский. К минералогии и геохимии Брич-Муллинского месторождения скородита. Уч. зап. ЛГУ, вып. 4, № 16, 1937.
- Ф. В. Чухров. О галените с октаэдрической отдельностью из месторождения Акчагыл в Казахстане. ЗМО, сер. 2, ч. LXXIII, вып. 2—3, 1944.
- G. A. Hargrourt. Tables for the identification of ore minerals by x-ray Powder Patterns. Amer. Mineral, v. 27, 1942.
- R. W. Nuffield. Studies of mineral sulphosalts. Econ. Geol., v. XLII, № 2, 1947.