

**ВИСМУТОВЫЕ МИНЕРАЛЫ СУЛЬФИДНО-МАГНЕТИТОВЫХ РУД
МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАШ (ЗАПАДНЫЙ КАРАМАЗАР,
ТАДЖИКИСТАН)**

У.А. Ятимов^{1,2}, Н.Р. Аюпова¹, И.А. Блинов¹, В.А. Котляров¹

¹Южно-Уральский федеральный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия, umed1990@list.ru

²Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

**BISMUTH MINERALS OF SULFIDE-MAGNETITE ORES FROM THE AKTASH DEPOSIT
(WESTERN KARAMAZAR, TAJIKISTAN)**

U.A. Yatimov^{1,2}, N.R. Ayupova¹, I.A. Blinov¹, V.A. Kotlyarov¹

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk district, 456317, Russia; umed1990@list.ru

²*South Urals State University, pr. Lenina, 76, Chelyabinsk, 454080, Russia*

Изучена висмутовая минерализация в сульфидно-магнетитовых рудах месторождения Акташ в Западном Карамазаре (Северный Таджикистан), в геологическом строении которого принимают участие осадочные и интрузивные породы среднего-верхнего палеозоя. Установлено, что повышенные содержания Bi обусловлены присутствием его многочисленных минералов, представленных самородным висмутом, висмутином, разнообразными по составу сульфосолями Cu–Ag–Pb–Bi (виттихенит, эмплектит, айкинит, фридрихит и зальцбургит) и оксидами висмута (бисмит, заварицкит) в ассоциации с галенитом, халькопиритом, гранатом, пироксеном эпидотом и англезитом. Выделены серебросодержащие разновидности виттихенита (Cu,Ag)₃BiS₃, айкинита (Pb,Ag)CuBiS₃ и галеновисмутита (Pb,Ag)Bi₂S₄. Большинство из висмутовых минералов впервые описаны не только для данного месторождения, но и для всего горнорудного района. Особенности минеральных форм висмута могут быть использованы для уточнения генетических особенностей месторождения.

Илл. 4. Табл. 3. Библ. 27.

Ключевые слова: висмутовая минерализация, самородный висмут, оксиды висмута, Cu–Ag–Pb–Bi–сульфосоли, сульфидно-магнетитовые руды, Карамазар, Таджикистан.

Bismuth mineralization is studied in sulfide-magnetite ores of the Aktash deposit in Western Karamazar (Northern Tajikistan), which is hosted in the Middle–Upper Paleozoic sedimentary and intrusive rocks. The higher Bi contents are related to the presence of its numerous minerals including native bismuth, bismuthine, Cu–Ag–Pb–Bi sulfosalts (wittichenite, emplectite, aikinit, friedrichite and salzburgite) and Bi oxides (bismite, zavarazkite) in assemblage with galena, chalcopyrite, garnet, pyroxene, epidote and anglesite. The Ag-bearing varieties of wittichenite (Cu,Ag)₃BiS₃, aikinite (Pb,Ag)CuBiS₃ and galenobismuthite (Pb,Ag)Bi₂S₄ are identified. Most of the bismuth minerals were first described not only for this deposit, but for the ore region as well. The mode of occurrence of Bi can be used to refine the genetic features of the deposit.

Figures 4. Tables 3. References 27.

Key words: Bi minerals, native bismuth, Bi oxides, Cu–Ag–Pb–Bi sulfosalts, sulfide-magnetite ores, Karamazar, Tajikistan.

Введение

В Кансайском рудном поле Карамазарского рудного района на территории Республики Таджикистан сосредоточено более 60 месторождений и рудопроявлений Pb, Zn, Bi, U, W, Mo и F скарново-рудного типа (Левин, 1965). Месторождения имеют различный генезис и представлены выходящими на поверхность и «слепыми» рудными телами. В отличие от Восточного Карамазара, где известны многочисленные мелкие уникальные медно-висмутовые месторождения (Тарызкан, Алмалык, Котран, Телебет, Джузум, Джеркамар, Асказан и др.) (Бадалов, 1991; Болдырева, Чернышева, 1972; Дунин-Барковская, 1978), в Западном Карамазаре, где располагается месторождение Акташ, собственно висмутовые объекты отсутствуют, хотя и известны небольшие участки обогащения Bi в сульфидных и магнетитовых месторождениях (Есимов, 1969).

Месторождение Акташ является одним из главных скарново-полиметаллических месторождений Западного Карамазара и характеризуется многокомпонентной рудной минерализацией: скарново-магнетитовой, скарново-полиметаллической, колчеданной, медно-висмутовой, золото-теллуридной. В рудах месторождения описано 135 минералов, однако среди них указаны лишь единичные минералы Bi – висмутин, галеновисмутит, тетрамит, теллуrowисмутит и козалит (Протождяконова, 1972). Нами при изучении сульфидно-магнетитовых руд месторождения выявлена богатая висмутовая минерализация, описание которой впервые приводится в данной работе. Минеральные формы Bi могут быть использованы для воссоздания физико-химических условий формирования месторождения. Кроме того, исследование закономерностей распределения и минеральных форм висмута в сульфидно-магнетитовых рудах имеет непосредственное отношение к оценке перспектив освоения месторождения.

Геологическая характеристика

Месторождение Акташ расположено в Кансайском рудном поле Западно-Карамазарского рудного района в северной части Республики Таджикистан (рис. 1а). Площадь месторождения представляет собой восточное окончание полосы известняков верхнего девона–нижнего карбона, протягивающейся вдоль хребта Окур-Тау. Толща известняков прорвана серией субвулканических тел гранодио-

ритов, гранитов и диоритовых порфиритов (Вольфсон, Титов, 1965). Интрузивные породы представлены гранодиоритами преакчинского (C_2) и гранодиорит-порфирами и диоритами послееакчинского (C_3-P_1) интрузивных комплексов. На месторождении выявлено 12 основных рудных зон полиметаллических и магнетитовых руд, приуроченных к субширотным тектоническим нарушениям и протягивающихся узкой полосой на расстояние до 1–2 км. Они связаны с Южно-Окурдаванским разломом и образовались в послеекаменноугольное время после внедрения интрузивных тел (Левин, 1965; Белоусов, Полотов, 1981ф) (рис. 1б). Рудные зоны приурочены к участкам дробления и брекчирования и гидротермальных изменений вмещающих пород, проявленных эпидотизацией, пиритизацией, хлоритизацией, карбонатизацией, окварцеванием и серпентинизацией интрузивных пород и окварцеванием карбонатных пород вплоть до формирования гранат-эпидотовых и гранат-пироксеновых (диопсидовых) скарнов (Вольфсон, Титов, 1965).

В пределах рудных зон рудные тела не имеют четких геологических границ, характеризуются небольшими размерами (от 20–30 до 250–300 м), резко изменчивой мощностью (1–40 м) и представляют собой сочетание линз со сравнительно крутыми ($55-80^\circ$) углами падения на север и сложных жило- и столбообразных тел с крайне неравномерным распределением рудных компонентов (рис. 1в). Рудные тела прослежены канавами, на отдельных горизонтах штольней и до глубины 200–550 м скважинами колонкового бурения.

По характерным минеральным ассоциациям выделены следующие минеральные типы руд (Белоусов, Полотов, 1981ф, Шихин и др., 1972):

1. Скарново-магнетитовый, где магнетит образует крутопадающие линзообразные рудные тела разнообразной морфологии и тяготеет к гранат-эпидотовым скарнам на контактах гранодиоритов и известняков.

2. Скарново-полиметаллический, который развивается в гранат-пироксеновых скарнах, иногда накладывается на скарново-магнетитовые руды, основными минералами являются галенит и сфалерит. Рудные тела имеют разнообразную форму: от контактовых залежей (столбообразных, ветвящихся и трубообразных) до мелких линз и маломощных жил.

3. «Колчеданный», представленный пиритовой, пирит-пирротиновой и пирит-халькопиритовой,

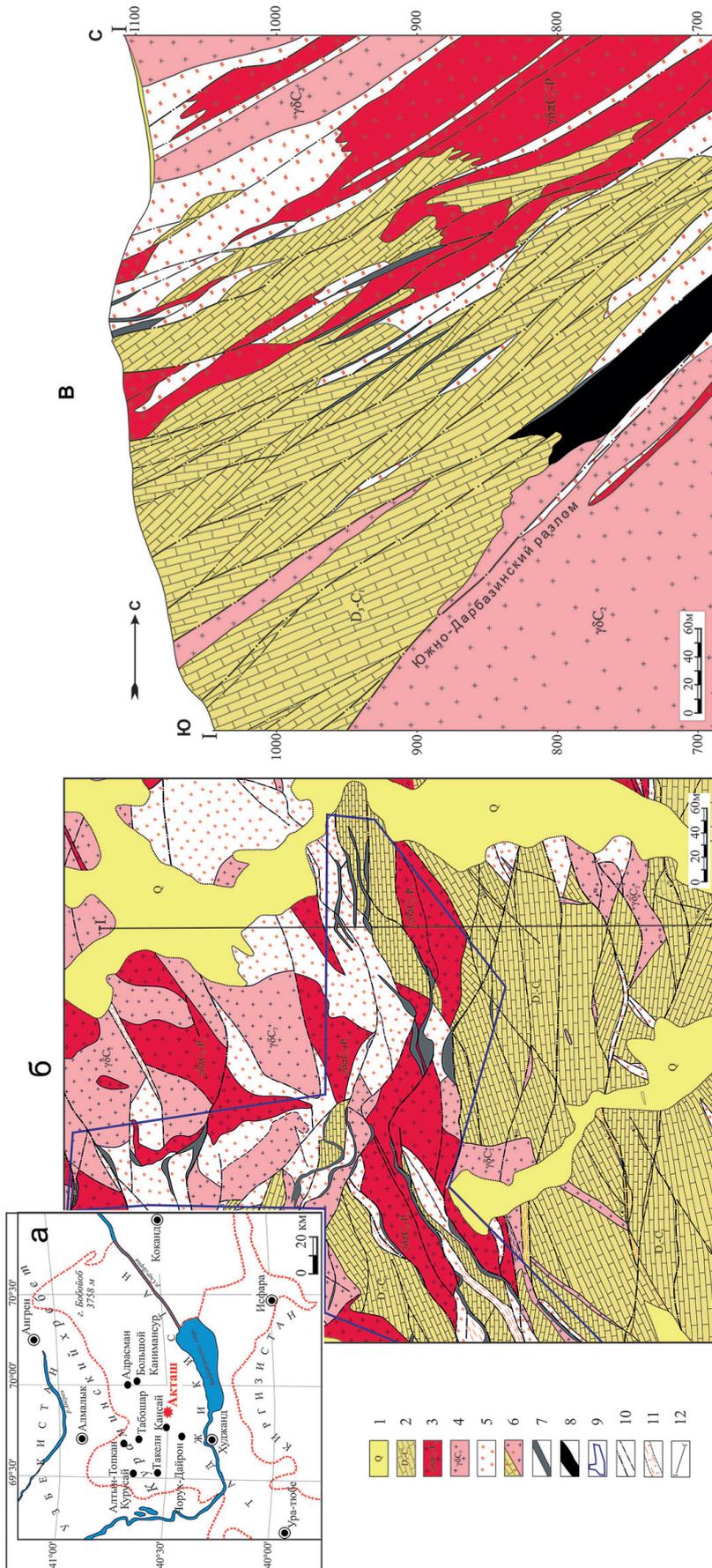


Рис. 1. Схема географического положения месторождения Акташ в Северном Таджикистане (а), геологическая карта (б) и разрез по линии I–I месторождения (Белоусов, Полотов, 1981ф):
 1 – четвертичные отложения; 2 – верхнедевонские–нижнекарбонные карбонатные породы; 3 – верхнекарбонно–нижнепермский вулкан–плутонический комплекс (гранодиориты, граниты, диориты); 4 – гранодиориты среднего карбона; 5 – скарны нерасчлененные; 6 – скарны нерасчлененные породы (а – по известнякам, б – по интрузивам); 7 – полиметаллические рудные тела; 8 – магнетитовые рудные тела; 9 – контур рудной зоны; 10 – разрывные нарушения; 11 – зоны дробления; 12 – линии геологического разреза.

Fig. 1. Geographical position of the Aktash deposit in Northern Tajikistan (a), geological map (b) and cross-section of the deposit (b) along line I-I after (Belousov, Polotov, 1981f): 1 – Quaternary sediments; 2 – upper Devonian–lower Carboniferous carbonate rocks; 3 – upper Carboniferous–lower Permian volcanic–plutonic complex (granodiorites, granites, diorites); 4 – middle Carboniferous granodiorites; 5 – undivided skarns; 6 – skarn rocks (a – in limestone, б – in intrusive); 7 – polymetallic ore bodies; 8 – magnetite orebodies; 9 – contour of the ore zone; 10 – discontinuous disturbances; 11 – crushing zones; 12 – geological section lines.

вой минеральными ассоциациями; обычно накладывается на скарново-полиметаллические и скарново-магнетитовые руды в виде гнезд, прожилков и участков развития вкрапленной минерализации.

4. Медно-висмутовый, наложенный на скарново-магнетитовый и скарново-полиметаллический типы.

5. Золото-теллуридный, который неравномерно распределен в скарновых образованиях, полиметаллических и магнетитовых рудах.

В настоящее время запасы месторождения по категории С₂ составляют 2.178 млн т полиметаллических руд, 80.2 тыс т Zn, 22.9 тыс т Pb, 579.1 т Bi, 97.5 т Ag и 3.5 т Au (Белоусов, Полотов, 1981ф) при средних содержаниях 3.68 % Zn, 1.05 % Pb, 0.027 % Bi, 44.8 % Ag, 35.8 г/т Au (по отдельным золоторудным телам) и 0.44 г/т Au (по месторождению). Запасы магнетитовых руд не подсчитаны. Месторождение Акташ обрабатывалось подземным способом (штольни и шахты) с 1950 по 1979 гг. с перерывами, глубина эксплуатации 200 м. К настоящему времени месторождение не обработано.

Материалы и методы исследования

Полевые работы на месторождении, включающие составление схемы распространения магнетитовых руд в центральной части месторождения (горизонт IV РЭШ-1, 942 м) и отбор образцов для исследований, проводились в 2018 г. Минеральный состав руд изучен в аншлифах под микроскопом Olympus BX51 с цифровой приставкой Olympus DP12. Состав минералов исследован с помощью растрового электронного микроскопа РЭММА-202М, оснащенного энергодисперсионной приставкой, и микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитики В.А. Котляров, И.А. Блинов). Количественный анализ проведен с использованием эталонов MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited» (стандарт № 01-044) и «Microanalysis Consultants Ltd.» (стандарт № 1362).

Результаты исследований

Висмутовая минерализация обнаружена в массивных магнетитовых рудах с многочисленными сульфидами. Они характеризуются ритмично-полосчатой текстурой, выраженной в чередовании полос выдержанной мощности (5–7 см) однородных и обогащенных сульфидами магнетитовых руд

(рис. 2а). Сульфиды неравномерно распределены в основной равномернозернистой магнетитовой массе и образует крупные скопления неправильной формы, тонкую вкрапленность и секущие прожилки. Они представлены пиритом, галенитом, халькопиритом и сфалеритом (рис. 2а). Из нерудных минералов установлены пироксены (диопсид, геденбергит), амфиболы (актинолит, тремолит), гранаты (гроссуляр, андрадит), эпидот, кальцит и кварц, тесно ассоциирующие с рудной минерализацией.

Магнетит – главный минерал ритмично-полосчатых сульфидно-магнетитовых руд. Он составляет основную массу как магнетитовых, так и обогащенных сульфидами полос (рис. 2б–ж). Установлено четыре морфологических разновидности магнетита: 1) лучистые агрегаты; 2) удлинённые пластинчатые кристаллы (псевдоморфозы по гематиту); 3) почковидные выделения; 4) изометричные зерна (рис. 2б, в). Пространство между мелкозернистыми агрегатами магнетита выполнено пироксеном, гранатом, кальцитом и эпидотом.

Среди сульфидов преобладает пирит, который представлен двумя разновидностями: 1) прерывистыми ксеноморфными агрегатами с крупными включениями галенита размером до 60 мкм (рис. 2г) и 2) крупными эвгедральными кристаллами (до 150 мкм) с многочисленными мелкими (до 15 мкм) включениями галенита (рис. 2д, е) в галенит-халькопиритовых обособлениях основной магнетитовой массы. Халькопирит образует крупные скопления в ассоциации с галенитом и иногда со сфалеритом (рис. 2г–ж). Для сфалерита характерны извилистые очертания, нередко он развивается по краям халькопирита и в интерстициях магнетитовых зерен, а также присутствует в виде эмульсионных включений в халькопирите (рис. 2ж). Размеры зерен галенита сильно варьируют и достигают 300–400 мкм. Во всех случаях с галенитом ассоциируют висмутовые минералы.

Висмутовая минерализация сульфидно-магнетитовых руд месторождения представлена самородным висмутом, висмутином, оксидами висмута и разнообразными по составу сульфосолями Cu–Ag–Pb–Bi.

Самородный висмут (Bi 99.22–99.93 мас. %) выявлен в гранат-пироксен-магнетит-халькопирит-галенитовой ассоциации. Зерна самородного висмута ксеноморфные, сглажено-угловатые, реже округлые (рис. 3а–г). В отраженном свете минерал имеет кремово-белый цвет, обладает высокой отражательной способностью и весьма анизотропный. Основ-

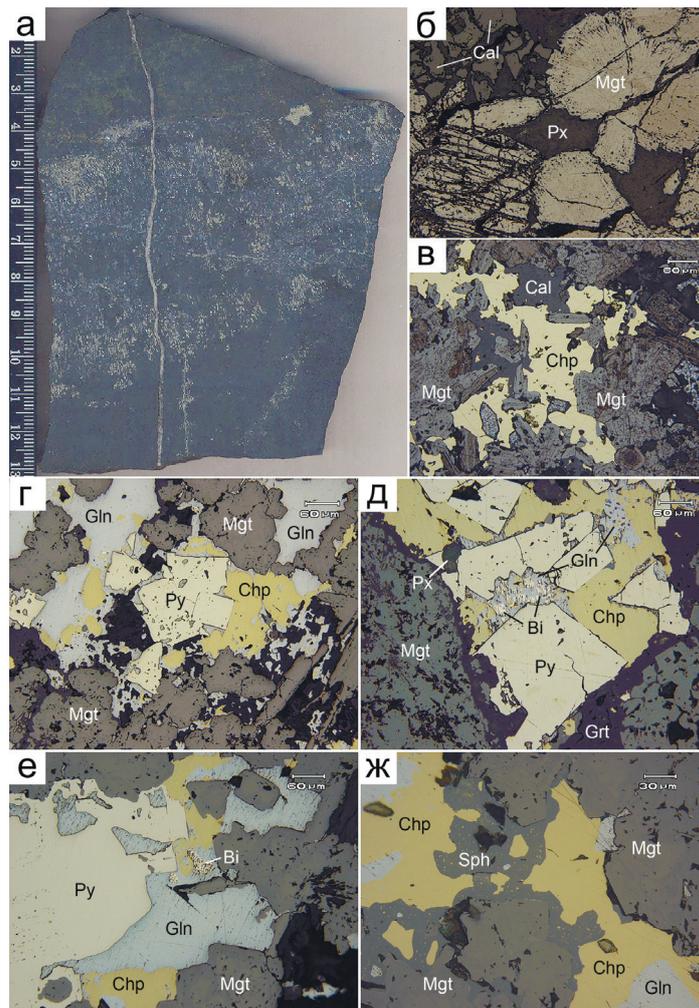


Рис. 2. Текстурно-структурные особенности сульфидно-магнетитовых руд:

а – полосчато-вкрапленная текстура; б – лучистые и пластинчатые агрегаты магнетита (псевдоморфозы по гематиту) (Mgt) в ассоциации с пироксеном (Px) и кальцитом (Cal); в – удлиненный, изометричный и почковидный магнетит (Mgt) в ассоциации с пиритом (Py), галенитом (Gln), сфалеритом (Sph), гранатом (Grt) и пироксеном (Px); г, д – эвгдральные кристаллы пирита (Py) с тонкой нерудной каймой в галенит-халькопиритовой ассоциации среди равнозернистого агрегата магнетита (Mgt); е – халькопирит-галенит-пиритовая ассоциация среди равномернозернистого магнетитового агрегата (Mgt), в галените (Gln) – включение самородного Bi (Bi); ж – сфалерит (Sph) с халькопиритовой эмульсией и извилистыми очертаниями в ассоциации с галенитом (Gln) и халькопиритом (Chp). Полированный образец (а) и отраженный свет (б–ж).

Fig. 2. Sulfide-magnetite ores:

а – banded-disseminated ore texture, б – radiant and lamellar aggregates of magnetite (musketovite) (Mgt) in association with pyroxene (Px) and calcite (Cal); в – elongated, isometric and kidney-shaped precipitates of magnetite (Mgt) in association with pyrite (Py), galena (Gln), sphalerite (Sph), garnet (Grt) and pyroxene (Px); г, д – euhedral crystals of pyrite (Py) with a thin nonmetallic rim in the galena-chalcopyrite association among the equal-grained magnetite (Mgt); е – chalcopyrite-galena-pyrite association among uniform-grained magnetite (Mgt), in galena (Gln) – native bismuth (Bi); ж – sphalerite (Sph) with chalcopyrite emulsion of sinuous outlines in the galena (Gln) – chalcopyrite (Chp) association. а – polished sample; б–ж – reflected light.

ное количество крупных зерен (до 0.1 мм) самородного висмута находится в галените. Установлена ассоциация самородного висмута, Zn-гринокита и халькопирита в галените, который выполняет интерстиции между агрегатами магнетита и эпидота

(рис. 3в). Самородный висмут «избегает» непосредственного контакта с халькопиритом: по границе его зерен обычно располагается виттихенит и/или эмплектит, частично заместившие халькопирит.

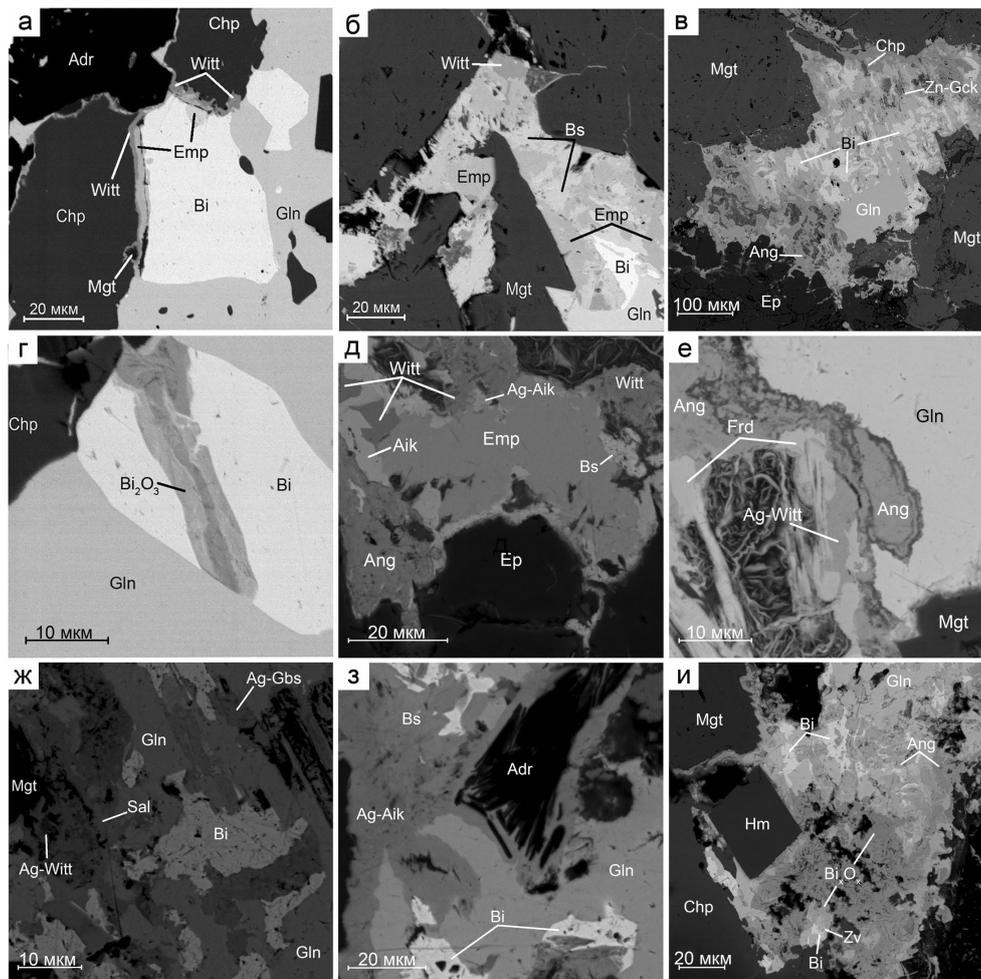


Рис. 3. Взаимоотношения сульфосолей Bi и других минералов в сульфидно-магнетитовых рудах месторождения Акташ:

а – самородный висмут (Bi) в ассоциации с эмплектитом (Emp) и виттихенитом (Witt) в галените (Gln) на контакте халькопирита (Chp) и корродированных кристаллов магнетита (Mgt); б – ассоциация самородного висмута, виттихенита, эмплектита, висмутина (Bs) в тесном сростании с галенитом в магнетите; в – ассоциация самородного висмута, Zn-гринокиста (Zn-Gck), халькопирита в интерстициальном галените между агрегатами магнетита и эпидота (Ep); г – зерно самородного висмута с прожилком оксида висмута (Bi_2O_3) в галените; д – сростание эмплектита, виттихенита, Ag-содержащего айкинита (Ag-Aik), айкинита (Aik), висмутина (Bs) и англезита (Ang) на контакте эпидота с галенитом; е – сростание фридрихита (Frd), Ag-содержащего виттихенита (Ag-Witt) и англезита на контакте с галенитом; ж – ксеноморфное зерно зальцбургита (Sal) с реликтами Ag-содержащего виттихенита в ассоциации с галенитом, самородным висмутом, Ag-содержащим галенобисмутитом (Ag-Gbs) и магнетитом; з – интерстициальные Ag-содержащий айкинит и висмутин между агрегатами магнетита и галенита; и – сростание заварицита (Zv) с самородным висмутом и оксидами висмута (Bi_xO_x) в ассоциации с галенитом, халькопиритом, англезитом, гематитом (Hm) и магнетитом. СЭМ-фото.

Fig. 3. Relationship between bismuth sulfosalts in magnetite ores of the Aktash deposit:

а – native bismuth (Bi) in association with emplectite (Emp) and wittichenite (Witt) in galena (Gln) at the contact of chalcopyrite (Chp) and corroded magnetite crystals (Mgt); б – associations of native bismuth (Bi), wittichenite (Witt), emplectite (Emp), bismuthine (Bs) in close intergrowth with galena (Gln) in the magnetite bulk (Mgt); в – the association of native bismuth (Bi), Zn-greenockite (Zn-Gck), chalcopyrite (Chp) in galena (Gln), which performs interstium between aggregates of magnetite (Mgt) and epidote (Ep); г – native bismuth (Bi) grain with a bismuth oxide vein (Bi_2O_3) in galena (Gln) at the contact of chalcopyrite (Chp); д – intergrowth of emplectite (Emp), wittichenite (Witt), Ag-containing aikinite (Ag-Aik), aikinite (Aik), bismuthine (Bs) and anglesite (Ang) at the epidote contact (Ep); е – close intergrowth of friedrichite (Frd), Ag-containing wittichenite (Ag-Witt) and anglesite (Ang) in contact with galena (Gln); ж – xenomorphic salzburgite grain (Sal) with relics of Ag-containing wittichenite (Ag-Witt) in association with galena (Gln), native bismuth (Bi), Ag-containing galenobismuthite (Ag-Gbs) and magnetite (Mgt); з – Ag-containing aikinite (Ag-Aik) and bismuthine (Bs) performs interstium between aggregates of magnetite (Mgt) and galena (Gln); и – intergrowth of zavaritskite (Zv) with native bismuth (Bi) and bismuth oxides (Bi_xO_x) in association with galena (Gln), chalcopyrite (Chp), anglesite (Ang), hematite (Hm) and magnetite (Mgt). SEM photo, BSE.

Таблица 1

Химический состав висмутовых сульфосолей меди месторождения Акташ (мас. %)

Table 1

Chemical composition of bismuth sulfosalts of copper of the Aktash deposit (wt. %)

№ п/п	Pb	Bi	Cu	Ag	Fe	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
Виттихенит Cu_3BiS_3								
1	–	39,48	39,92	–	–	20,78	100,18	$Cu_{2,91}Bi_{0,87}S_{3,00}$
2	–	46,47	32,28	–	0,35	20,47	99,58	$Cu_{2,39}Bi_{1,05}Fe_{0,03}S_{3,00}$
3	3,27	40,09	37,05	0,66	–	18,13	99,2	$Cu_{3,09}Bi_{1,02}Ag_{0,03}Pb_{0,08}S_{3,00}$
4	–	43,61	37,49	–	–	18,47	99,56	$Cu_{3,07}Bi_{1,09}S_{3,00}$
5	–	44,39	35,73	0,24	–	18,72	99,08	$Cu_{2,89}Bi_{1,09}Ag_{0,002}S_{3,00}$
6	–	41,53	38,32	0,71	–	18,79	99,34	$Cu_{3,09}Bi_{1,02}Ag_{0,007}S_{3,00}$
7	–	43,73	37,49	0,35	–	18,20	99,76	$Cu_{3,12}Bi_{1,11}Ag_{0,003}S_{3,00}$
8	–	45,36	37,01	–	–	16,76	99,13	$Cu_{3,34}Bi_{1,25}Ag_{0,003}S_{3,00}$
Ag-содержащий виттихенит $(CuAg)_3BiS_3$								
9	–	41,89	13,90	22,77	0,97	20,77	100,32	$(Cu_{1,32}Ag_{1,28}Fe_{0,11}Bi_{1,21}S_{3,00})$
10	–	37,86	13,78	27,89	–	19,99	99,52	$(Cu_{1,04}Ag_{1,24}Bi_{0,87}S_{3,00})$
Эмплектит $CuBiS_2$								
11	–	59,56	20,94	–	–	20,15	100,65	$Cu_{1,05}Bi_{0,91}S_{2,00}$
12	–	58,34	20,95	–	0,39	20,12	99,79	$Cu_{1,05}Bi_{0,89}Fe_{0,02}S_{2,00}$
13	–	62,08	19,19	–	–	18,30	99,57	$Cu_{1,06}Bi_{1,04}S_{2,00}$
14	–	62,99	17,60	–	–	18,74	99,33	$Cu_{1,03}Bi_{0,95}S_{2,00}$
15	–	62,42	16,87	1,65	–	18,32	99,26	$Cu_{1,05}Bi_{0,93}Ag_{0,01}S_{2,00}$
16	–	62,17	16,78	1,60	–	18,75	99,26	$Cu_{1,02}Bi_{0,90}Ag_{0,01}S_{2,00}$
17	–	62,60	17,35	–	–	19,19	99,13	$Cu_{1,00}Bi_{0,91}S_{2,00}$

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на S = 3 (виттихенит и Ag-содержащий виттихенит), S = 2 (эмплектит). Прочерк – не обнаружено.

Note. Crystal chemical formulas are calculated for S = 3 (wittichenite and Ag-containing wittichenite), S = 2 (emphlectite). Dash – not found.

Виттихенит Cu_3BiS_3 один из самых распространенных минералов Bi в рудах месторождения, обычно встречается в тесном сростании с эмплектитом и висмутином (рис. 3а, б, д). В отраженном свете минерал имеет коричневый или оливково-коричневатый цвет и более низкую отражательную способность, по сравнению с другими минералами Bi. Виттихенит образует ксеноморфные включения размером до 30 мкм в галените, каймы обрастания вокруг самородного висмута, окаймляет кристаллы магнетита и может быть окружен каймой эмплектита. В составе минерала диагностированы примеси Ag (0,24–0,71 мас. %), в единичных случаях – Fe (до 0,35 мас. %) и Pb (до 3,27 мас. %) (табл. 1).

Ag-содержащий виттихенит $(Cu,Ag)_3BiS_3$ образует ксеноморфные зерна размером до 15 мкм на контакте галенита, сростающиеся с фридрихитом и англезитом, а иногда ассоциирующие с самородным висмутом и зальцбургитом (рис. 3е, ж). Минерал обладает более высокой отражательной способностью, чем эмплектит и висмутин. Содержание Ag в минерале составляет 22,77–27,89 мас. %. На диаграмме $CuS+Ag_2S-BiS_3-Pb_2S_2$ состав минерала ближе к виттихениту (рис. 4). В составе обнаружена примесь Fe до 0,97 мас. % (табл. 1).

Эмплектит $CuBiS_2$ широко распространен в виде ксеноморфных включений в галените и ассоциирует с самородным висмутом, халькопиритом, англезитом, эпидотом, пироксеном и сульфовисмутитами в магнетите (рис. 3а, б, д). Зерна имеют бледно-зеленовато-желтый цвет и умеренную отражательную способность. Иногда минерал обрастает виттихенит в виде кайм размером до 50 мкм. В нерудных минералах установлены ксеноморфные агрегаты эмплектита и виттихенита, образующие извилистые каймы вдоль галенит-халькопиритовых сростков с пироксеном, а также многочисленные прожилки в пироксене. В составе эмплектита присутствует примесь Ag до 1,60–1,65 мас. % (табл. 1).

Айкинит $PbCuBiS_3$ встречается в виде ксеноморфных агрегатов размером до 20 мкм в тесном сростании с англезитом, виттихенитом и эмплектитом и, возможно, замещает их (рис. 3д). В отраженном свете айкинит имеет кремово-белый цвет и сильно анизотропен. Химический состав минерала характеризуется значительными вариациями основных компонентов (мас. %): Pb 29,17–31,62, Bi 38,90–41,12, Cu 10,22–13,99, S 15,39–16,53, Fe 0,22–0,37, что не совпадает с идеализированной формулой этого минерала (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2
Table 2

Химический состав минералов висмутин-айкинитовой серии месторождения Акташ (мас. %)
Chemical composition of minerals of the bismuthinite-aiquinite series of the Aktash deposit (wt. %)

№ п/п	Pb	Bi	Cu	Ag	Fe	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
Висмутин Bi_2S_3								
1	–	77.36	1.98	–	–	19.48	99.18	$\text{Bi}_{1.83}\text{Cu}_{0.15}\text{S}_{3.00}$
2	–	78.77	0.79	–	0.89	19.55	100	$\text{Bi}_{1.85}\text{Cu}_{0.06}\text{Fe}_{0.08}\text{S}_{3.00}$
3	–	79.56	0.91	–	–	18.68	99.16	$\text{Bi}_{1.96}\text{Cu}_{0.07}\text{S}_{3.00}$
Ag-содержащий галеновисмутит $(\text{PbAg})\text{Bi}_2\text{S}_4$								
4	20.28	55.54	0.53	8.59	–	15.90	100.84	$(\text{Pb}_{0.79}\text{Ag}_{0.64}\text{Cu}_{0.07})\text{Bi}_{2.14}\text{S}_{4.00}$
Зальцбургит $\text{Pb}_{1.6}\text{Cu}_{1.6}\text{Bi}_{6.4}\text{S}_{12}$								
5	14.94	62.55	4.23	–	–	18.50	100.21	$\text{Pb}_{1.50}\text{Cu}_{1.38}\text{Bi}_{6.23}\text{S}_{12.00}$
Фридрихит $\text{Pb}_5\text{Cu}_5\text{Bi}_7\text{S}_{18}$								
6	29.87	43.26	9.19	–	–	17.45	99.76	$\text{Pb}_{4.77}\text{Cu}_{4.78}\text{Bi}_{6.85}\text{S}_{18.00}$
Айкинит PbCuBiS_3								
7	31.62	41.00	10.22	–	–	16.50	99.35	$\text{Pb}_{0.89}\text{Cu}_{0.94}\text{Bi}_{1.14}\text{S}_{3.00}$
8	30.72	40.89	11.84	–	0.27	15.39	99.11	$\text{Pb}_{0.93}\text{Cu}_{1.16}\text{Fe}_{0.03}\text{Bi}_{1.22}\text{S}_{3.00}$
9	30.22	38.90	13.99	–	0.22	15.7	99.3	$\text{Pb}_{0.89}\text{Cu}_{1.35}\text{Fe}_{0.02}\text{Bi}_{1.14}\text{S}_{3.00}$
10	29.17	41.12	12.81	–	0.37	16.53	100	$\text{Pb}_{0.79}\text{Cu}_{1.17}\text{Fe}_{0.04}\text{Bi}_{1.15}\text{S}_{3.00}$
Ag-содержащий айкинит $(\text{PbAg})\text{CuBiS}_3$								
12	17.51	49.26	9.43	6.52	–	16.31	99.02	$(\text{Pb}_{0.50}\text{Ag}_{0.36})\text{Cu}_{0.88}\text{Bi}_{1.39}\text{S}_{3.00}$
13	20.85	48.37	6.06	7.05	0.81	15.96	99.1	$(\text{Pb}_{0.61}\text{Ag}_{0.39})\text{Cu}_{0.57}\text{Fe}_{0.09}\text{Bi}_{1.40}\text{S}_{3.00}$
14	20.75	48.24	6.63	7.42	–	16.67	99.71	$(\text{Pb}_{0.58}\text{Ag}_{0.40})\text{Cu}_{0.60}\text{Bi}_{1.33}\text{S}_{3.00}$

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на S = 3 (висмутин), S = 4 (Ag-содержащий галеновисмутит), S = 12 (зальцбургит), S = 18 (фридрихит), S = 3 (айкинит и Ag-содержащий айкинит). Прочерк – не обнаружено.

Note. Crystal chemical formulas are calculated for S = 3 (bismuthinite), S = 4 (Ag-ferous galenobismuthite), S = 12 (salzburgite), S = 18 (friedrichite), S = 3 (aiquinite and Ag-containing aiquinite). Dash – not found.

Ag-содержащий айкинит $(\text{Pb,Ag})\text{CuBiS}_3$ встречается в ассоциации с эмплектитом и виттихенитом, иногда в тесном сростании с висмутином и самородным висмутом, выполняя интерстиции между магнетитом и галенитом (рис. 3з). Размер агрегатов минерала по удлинению до 30 мкм. Ag-содержащий айкинит обладает более низкой отражательной способностью, по сравнению с висмутином. Минерал содержит 6.52–7.05 мас. % Ag. Минерал такого состава до сих пор официально не утвержден, но по данным А.А. Годовикова (1972) такая фаза существует в природе (табл. 2).

Висмутин Bi_2S_3 обнаружен в ассоциации с самородным висмутом, виттихенитом и эмплектитом, редко – в тесном сростании с Ag-содержащим айкинитом (рис. 3д, з). Ангедральные агрегаты висмутин размером до 20 мкм кремово-зеленого цвета с извилистыми очертаниями находятся в галените на контакте с зональным магнетитом. Отражательная способность минерала умеренно высокая, цвет белый с зеленовато-желтым оттенком. По сравнению с галенитом висмутин имеет очень нежный желтый оттенок и несколько светлее, но такой же яркий как галенит. В составе висмутин наблюдается при-

месь Cu 0.79–1.98 мас. %, в единичном случае – 0.89 мас. % Fe (табл. 2). По сравнению с виттихенитом и эмплектитом менее распространен.

Фридрихит $\text{Pb}_5\text{Cu}_5\text{Bi}_7\text{S}_{18}$ наблюдается редко в ассоциации с Ag-виттихенитом и англезитом на контакте галенита и магнетита (рис. 3е). Форма зерен удлиненная (до 20 мкм), извилистая. Цвет минерала в отраженном свете белый с желтовато-кремовым оттенком, отражательная способность умеренно высокая, близкая к галениту. Состав фридрихита близок к идеализированной формуле (табл. 2).

Зальцбургит $\text{Pb}_{1.6}\text{Cu}_{1.6}\text{Bi}_{6.4}\text{S}_{12}$ встречен в виде ксеноморфного зерна (размер около 35 мкм) с извилистой границей в ассоциации с самородным висмутом и другими сульфовисмутитами в галените на контакте с магнетитом (рис. 3ж). В зальцбургите наблюдаются включения Ag-содержащего виттихенита. Цвет минерала в отраженном свете белый с кремовым оттенком. Химический анализ состава зальцбургита характеризуется повышенными содержаниями Bi и S и пониженными – Pb и Cu (табл. 2). На диаграмме $\text{CuS}+\text{Ag}_2\text{S}-\text{BiS}_3-\text{Pb}_2\text{S}_2$ состав минерала практически совпадает с теоретическим составом зальцбургита (рис. 4).

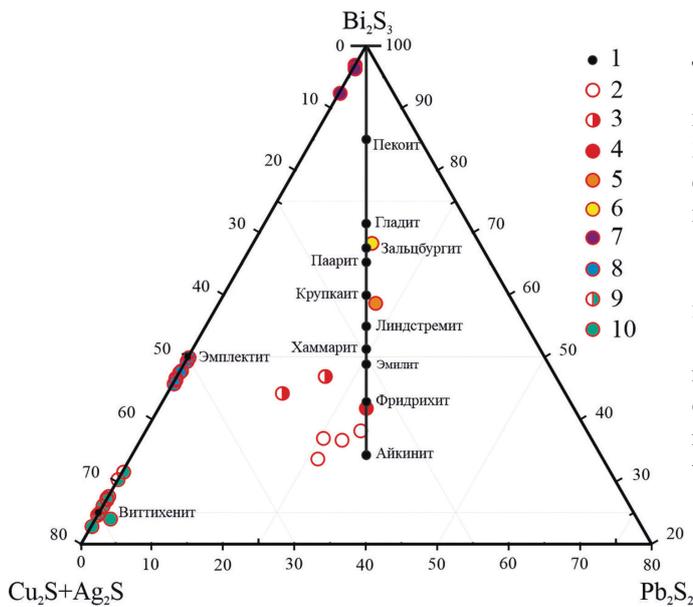


Рис. 4. Тройная диаграмма $Bi_2S_3-(Cu_2S+Ag_2S)-Pb_2S_2$ для висмутовых минералов месторождения Акташ:

1 – теоретические составы минералов; 2–10 – висмутовые минералы месторождения Акташ (2 – айкинит, 3 – Ag-содержащий айкинит, 4 – фридрихит, 5 – Ag-содержащий галеновисмутит, 6 – зальцбургит, 7 – висмутин, 8 – эмплектит, 9 – Ag-содержащий виттихенит, 10 – виттихенит).

Fig. 4. Ternary diagram of $Bi_2S_3-(Cu_2S+Ag_2S)-Pb_2S_2$ for bismuth minerals of the Aktash deposit:

1 – theoretical compositions of minerals; 2–10 – bismuth minerals of the Aktash deposit (2 – aikinite, 3 – Ag-containing aikinite, 4 – friedrichite, 5 – Ag-containing galenobismuthite, 6 – salzburgite, 7 – bismuthine, 8 – emplectite, 9 – Ag-containing wittichenite, 10 – wittichenite).

Ag-содержащий галеновисмутит $(Pb,Ag)Bi_2S_4$ встречается в виде пластинчатых агрегатов размером до 15 мкм в ассоциации с галенитом, самородным висмутом и оксидом висмута (рис. 3ж). Цвет в отраженном свете белый со слабо выраженным двуотражением; минерал отчетливо анизотропный. В составе минерала установлена примеси Ag до 8.59 мас. % и Cu до 0.53 мас. % (табл. 2). На диаграмме $Bi_2S_3-(Cu_2S+Ag_2S)-Pb_2S_2$ точки состава минерала располагаются между галенитом и висмутином и близки теоретической формуле (табл. 2, рис. 4).

Бисмит Bi_2O_3 обнаружен в виде прожилка длиной около 40 мкм в зерне самородного висмута в галените, ассоциирующем с халькопиритом (рис. 4г). Минерал содержит 0.64 мас. % CaO (табл. 3).

Заварицкит $BiOF$ – редкий оксифторид висмута из группы матлокита обнаружен в виде удлиненных и ксеноморфных зерен размером до 10 мкм в ассоциации с самородным висмутом и оксидами висмута на контакте с магнетитом (рис. 3и). Состав изученного зерна практически совпадает с теоретической формулой. Отличительной чертой является примесь FeO до 0.47 мас. % (табл. 3).

Обсуждение

Висмутовые минералы широко распространены в разных типах рудных месторождений и им посвящена обширная литература (Годовиков, 1972; Мозгова, 1985; Moëlo et al., 2008 и др.), затрагивающая вопросы систематики, кристаллохимии, парагенетических ассоциаций и минералообразо-

вания. Минеральные формы нахождения висмута хорошо описаны на месторождениях Канмансурского (Бортников и др., 1985), Адрасманского (Бородаев и др., 1971) и Кочбулакского (Коваленкер и др., 1984) рудных полей Восточного Карамазара и северного склона Кураминского хребта. Установлено, что висмутовая минерализация в рудах различных месторождений имеет как сходные минеральные ассоциации, так и некоторые различия в наборе минералов висмута. Например, в рудах Канмансурского рудного поля широко проявлены висмутин, айкинит, берриит, матильдит, густавит, ширмерит и сульфосоли промежуточного состава между галенитом и матильдитом, однако не встречаются эмплектит и виттихенит, а также минералы группы бенжаминита и павонита, наблюдавшиеся в других месторождениях Карамазара (Бортников и др., 1985). А для сульфосолей висмута Кочбулакского месторождения характерно высокое содержание Se, Te и Sb (Коваленкер и др., 1984).

На сульфидно-магнетитовом месторождении Акташ минералы висмута обнаружены в сульфидно-магнетитовых рудах и находятся в тесной связи с галенит-халькопиритовым парагенезисом. Изученные руды характеризуются ритмично-полосчатой текстурой, которая выражена в чередовании полос, обогащенных сульфидами (пирит + галенит + халькопирит + сфалерит) в магнетитовой основной массе и магнетитовыми полосками с прожилками сульфидов (рис. 3). Нерудные минералы представлены типичными для скарнов пироксеном, гранатом, карбонатами и эпидотом. В других типах руд висмутовая минерализация пока не установлена.

Таблица 3

Химический состав оксидов висмута месторождения Акташ (мас. %)

Table 3

Chemical composition of the oxides of bismuth of the Aktash deposit (wt. %)

№ п/п	Bi ₂ O ₃	FeO	F	CaO	Сумма	Кристаллохимическая формула
Заварицкит BiOF						
1	91.93	0.47	7.59	–	100	(Bi _{0.99} Fe _{0.02}) _{1.01} O _{1.00} F _{1.00}
Бисмит						
2	98.47	–	–	0.64	99.11	Bi _{1.96} Ca _{0.05} O ₃

Примечание. Кристаллохимическая формула заварицкита рассчитана методом на сумму ионов, а кристаллохимическая формула бисмита по кислороду. Прочерк – не обнаружено.

Note. Crystal chemical formula of zavaritskite is calculated by the method of the sum of ions, and the crystal chemical formula of bismite by oxygen. Dash – not found.

В рудах месторождения Акташ присутствуют сульфовисмутиды как висмутин-айкининовой серии (айкинит, Ag-содержащий айкинит, фридрихит, зальцбургит, Ag-содержащий галеновисмутит), так и висмутовые сульфосоли меди (виттихенит, Ag-содержащий виттихенит, эмплектит) в ассоциации с самородным висмутом, висмутином и различными оксидами висмута (бисмит и заварицкит). Характерной особенностью висмутовой минерализации являются тесные сростания минералов, отражающие процессы роста в метасоматической среде (Ятимов и др., 2018). Изучение структурных соотношений между висмутовыми минералами, сульфидами (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит) и магнетитом показывает, что их отложение не было единовременным, а происходило последовательно.

В общем виде последовательность минералообразования можно представить в следующем виде: (1) гранат + пироксен + эпидот → (2) гематит + пирит-I + эпидот → (3) магнетит + пирит-II + халькопирит + сфалерит + галенит + эмплектит + виттихенит + висмутин-айкининовая серия + самородный висмут → (4) оксиды висмута + англезит.

Согласно данным различных исследователей большинство минеральных ассоциаций сульфосолей системы Ag–(Cu)–Pb–Bi образуется в широком диапазоне температур от 200 до 400 °С (Годовиков, 1972, Feitzinger, Paar, 1991; Mladenova et al., 2001). По данным А.А. Годовикова (1972) эмплектит можно использовать как максимальный геотермометр, так как при температуре 360–383 °С он разлагается на виттихенит и купровисмутит, а температура образования виттихенита оценивается не выше 350–400 °С. Данные о температуре кристаллизации висмутин-айкининового ряда отсутствуют, но совместные ассоциации минералов этого ряда с виттихенитом и эмплектитом дают возможность предполагать, что температура формирования ми-

нералов висмутин-айкининового ряда была почти одинакова. Отсутствие ясно выраженных коррозионных взаимоотношений между ними также может свидетельствовать об их одновременной кристаллизации. Отложение обогащенных Ag минералов висмута (Ag-содержащий виттихенит, Ag-содержащий айкинит) может быть обусловлено локальными изменениями химизма рудообразующих растворов. Известно, что в этих условиях самородный висмут осаждается при температуре 271 °С (Tomkins et al., 2007).

Галенит в изученных рудах встречается в виде небольших выделений в ассоциации со всеми минералами висмута и с халькопиритом. Галенит с одновременным высоким содержанием Ag и Bi могут рассматриваться как минимальный геотермометр, и образование такого галенита возможно при температуре не ниже 220 °С (Годовиков, 1972). На некоторых месторождениях галенит в ассоциации с сульфосолями Ag–(Cu)–Pb–Bi интерпретируется как минерал, кристаллизовавшийся при температуре от 300 до 550 °С (Czamanske, Hall, 1976; Karup-Moller, 1977; Karup-Moller, Pauli, 1979). Серебросодержащие твердые растворы галенита без Bi и Sb встречаются очень редко (Simanenko, 2007). Считается, что минеральные осадки Bi–Ag зависят не только от температуры, но и от фугитивности серы, кислорода, pH и растворимости ионов Bi и Ag в растворах (Zhang et al., 2015). Ван Хук (1960) экспериментально показал, что в решетку галенита входит лишь ограниченное количество серебра и растворимость Ag₂S в галените даже при 700 °С составляет всего 0.4 мол. %. По данным П. Рамдора (1962), в условиях, близких к условиям гидротермального минералообразования, растворимость Ag₂S составляет не более 0.1 мол. % для высокотемпературных и 0.01 мол. % для низкотемпературных растворов.

Примесь серебра устанавливается во всех проанализированных галенитах месторождения Акташ. По данным предшественников содержание Ag в галените уменьшается от 1 до 0.01 мас. % по направлению от ранней к более поздней стадиям рудного процесса (Дуброва, Кашинцева, 1965). В составе галенита в ассоциации с висмутовыми минералами содержание Ag обычно достигает 0.99 мас. %, что составляет 0.21 мол. %, в сростании с сульфосолями – 1.72 мас. %, что составляет 0.35 мол. % и свидетельствует о более высокой температуре формирования галенита в данном парагенезисе либо галенит содержит субмикронные или нановключения собственных фаз серебра. Таким образом, можно предположить, что минералы сульфосолей висмута сформировались в интервале температур 270–400 °С.

Оксиды висмута, так же, как и англезит, вероятно, отлагались из окисленных низкотемпературных растворов на последних стадиях рудообразования.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о сложности состава и многообразии висмутовых минералов в сульфидно-магнетитовых рудах месторождения Акташ. Впервые для месторождения описаны самородный висмут, висмутин, бисмит, виттихенит, эмплектит, айкинит, Ag-содержащие виттихенит, галеновисмутит и айкинит, фридрихит, зальцбургит и редкий заварицит. Ассоциация висмутовых минералов с галенитом, халькопиритом, пиритом и сфалеритом, образующими прожилки и выполняющими интерстиции в магнетитовых агрегатах в сульфидно-магнетитовых рудах месторождения Акташ свидетельствует о наложении висмутово-сульфидной минерализации на первичные магнетитовые руды. Источником висмута, по-видимому, служили кислые изверженные породы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № АААА-А19-119061790049-3. Авторы благодарны профессору чл.-корр. В.В. Масленникову за консультации и руководство темой исследований, д.г.-м.н. Е.В. Белогуб за советы и замечания при проведении минералогических работ, рецензенту и редакторам журнала за конструктивные замечания.

Литература

- Бадалов С.Т.** (1991) Геохимические особенности рудообразующих систем. Ташкент, Фан, 144 с.
- Белоусов В.А., Полотов В.С.** (1981) Отчет о до-разведке нижних горизонтов рудной зоны № 9 месторождения Акташ, по работам Кансайской ГРП за 1978–1980 гг. Кайраккум: фонды Кайраккумской комплексной геологоразведочной экспедиции.
- Болдырева М.М., Чернышева В.Ф.** (1972) Айкинит из месторождения Тарыэкан (Восточный Карамазар). *Записки Всероссийского минералогического общества*, 101(5), 308–313.
- Бородаев Ю.С., Мозгова Н.Н., Свешникова О.Л.** (1971) Группа сульфосолей состава Ag–Cu–Pb–Bi–S. *Известия АН СССР. Серия геологическая*, (4), 76–78.
- Бортников Н.С., Коваленкер В.А., Сафонов Ю.Г., Тронева Н.В., Лапутина И.П., Раздолина Н.В.** (1985) Парагенетическая ассоциация и условия образования Ag–Cu–Pb–Bi-сульфосолей в Канмансурском рудном поле. *Известия АН СССР. Серия геологическая*, (9), 65–75.
- Вольфсон Ф.И. Титов В.Н.** (1965) Основные особенности геологического строения Кансайского рудного поля / Геология свинцово-цинковых месторождений Кансайского рудного поля. М., Наука, 21–29.
- Годовиков А. А.** (1972) Висмутовые сульфосоли. М., Наука, 303 с.
- Дуброва И.В., Кашинцева Е.Н.** (1965) Распределение элементов-примесей в некоторых главнейших минералах руд месторождений Кансайского рудного поля / Геология свинцово-цинковых месторождений Кансайского рудного поля. М., Наука, 115–125.
- Дунин-Барковская Э.А.** (1978) Геохимия и минералогия висмута (Чаткало-Кураминские горы). Ташкент, Фан, 272 с.
- Есимов Б.А.** (1969) О распределении железа, висмута и золота в скарново-магнетитовой зоне одного из месторождений Кураминского хребта / Геология, минералогия и геохимия рудных регионов Узбекистана. Ташкент, Фан, 116–122.
- Коваленкер В.А., Бортников Н.С., Тронева Н.В.** (1984) Химический состав и минеральные парагенезисы Ag–(Cu)–Pb–Bi-сульфосолей в рудах Кочбулакского месторождения. *Минералогический журнал*, (2), 16–30.
- Левин В.И.** (1965) Краткие черты геологического строения района Кансайского рудного района / Геология свинцово-цинковых месторождений Кансайского рудного поля. М., Наука, 7–19.
- Мозгова Н.Н.** (1985) Нестехиометрия и гомологические ряды сульфосолей. М., Наука, 264 с.
- Протодьяконова З.М.** (1972) Минералогия месторождений / Геология и минеральные комплексы Западного Карамазара. М., Недра, 147–148.
- Рамдор П.** (1962) Рудные минералы и их сростания. М., Иностранная литература, 1132 с.

- Шихин Ю.С., Байков В.Н., Ищенко Е.Н., Кузнецов Ж.Н., Михайлов В.В., Починок А.А., Шехтман П.А.** (1972) Общая характеристика рудоносности. Кансайское рудное поле / Геология и минеральные комплексы Западного Карамазара. М., Недра, 95–97.
- Ятимов У.А., Целуйко А.С., Котляров В.А.** (2018) Висмутовая минерализация сульфидно-скарнового месторождения Акташ. *Металлогения древних и современных океанов-2018. Вулканизм и рудообразование*. Миасс, Институт минералогии УрО РАН, 135–138.
- Czamanske G. K., Hall W. E.** (1976) The Ag–Bi–Pb–Sb–S–Se–Te mineralogy of the Darwin lead–silver–zinc deposit, Southern California. *Economic Geology* **70**, 1092–1110.
- Feitzinger G., Paar W.** (1991) Gangformige Gold-Silber-Vererzungen in der Sonnblickgruppe (Hohe Tauern, Karnten). *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, **13**, 17–50.
- Karup-Møller S.** (1977) Mineralogy of some Ag–(Cu)–Pb–Bi sulphide associations. *Bulletin of Geological Society of Denmark*, **26**, 41–68.
- Karup-Møller S., Pauli H.** (1979) Galena and associated minerals from the cryolite deposit at Ivigtut, South Greenland. *Meddelelser Om Grønland: Geoscience*, **2**, 1–25.
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N.J., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser G., Karup-Møller S., Balic-Zunic T., Mumme W.G., Vurro V., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M.** (2008) Sulfosalt systematics: A review. Report of the Sulfosalt Sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, **20**, 7–46.
- Mladenova V., Kerestedjian T., Dimitrova D.** (2001) Ag–Cu–Pb–Bi mineralization from the Svishti Plaz gold deposit, Central Balkan Mountain, Bulgaria. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, **38**, 55–66.
- Simanenko L.F.** (2007) Modes of trace element occurrence in galena from the Partizansky base metal-skarne deposit, Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, **1**(2), 144–152.
- Tomkins A., Pattison R.M., Frost R.B.** (2007) On the initiation of metamorphic sulfide anataxis. *Journal of Petrology*, **48** (3), 511–535.
- Van Hook H.J.** (1960) The ternary system Ag_2S – Bi_2S_3 –PbS. *Economic Geology*, **55**(4), 759–788.
- Zhang L., Wen H., Qin C., Du S., Zhu C., Fan H., Zhang J.** (2015) The geological significance of Pb–Bi and Pb–Sb sulphosalts in the Damajianshan tungsten polymetallic deposit, Yunnan Province, China. *Ore Geology Review*, **71**, 203–214.
- Belousov V.A., Bolotov V.S.** (1981) [Report on exploration of low levels of ore zone no. 9 of the Aktash field (1978–1980)]. Qayraqqum: Funds of the Kayrakkum complex geological expedition, 18–20. (in Russian).
- Boldyreva M.M., Chernysheva V.F.** (1972) [Aikinite from the Taryekan deposit (East Karamazar)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **101**(5), 308–313. (in Russian).
- Borodaev Yu.S., Mozgova N.N., Sveshnikova O.L.** (1971) [Group of Ag–Cu–Pb–Bi–S sulfosalts]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Geograficheskaya [News of Academy of Sciences of the USSR. Geological series]*, (4), 76–78. (in Russian).
- Bortnikov N.S., Kovalenker V.A., Safonov Yu.G., Troneva N.V., Laputina I.P., Razzolina N. V.** (1985) [Paragenetic assemblage and formation conditions of Ag–Cu–Pb–Bi-sulfosalts in the Kanimansur ore field]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Geograficheskaya [News of Academy of Sciences of the USSR. Geological series]*, (9), 65–75. (in Russian).
- Czamanske G.K., Hall W.E.** (1976) The Ag–Bi–Pb–Sb–S–Se–Te mineralogy of the Darwin lead–silver–zinc deposit, Southern California. *Economic Geology*, **70**, 1092–1110.
- Dubrova I.V., Kashintseva E.N.** (1965) [Distribution of trace-elements in some of the main minerals of ore deposits of Kansai ore field]. In: *Geologiya svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy Kansayskogo rudnogo polya [Geology of Pb–Zn deposits of the Kansai ore field]*. Moscow, Nauka, 115–125. (in Russian).
- Dunin-Barkovskaya E.A.** (1978) [Geochemistry and mineralogy of bismuth (Chatkal and Kurama mountains)]. Tashkent, Fan, 272 p. (in Russian).
- Esimov B.A.** (1969) [Distribution of Fe, Bi and Au in the skarn-magnetite zone of one deposit of the Kurama Ridge]. In: *Geologiya, mineralogiya i geokhimiya rudnykh regionov Uzbekistana [Geology, mineralogy and geochemistry of ore regions of Uzbekistan]*. Tashkent, Fan, 116–122. (in Russian).
- Feitzinger G., Paar W.** (1991) Gangformige Gold-Silber-Vererzungen in der Sonnblickgruppe (Hohe Tauern, Karnten). *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, **13**, 17–50.
- Godovikov A.A.** (1972) [Bismuth sulphosalts]. Moscow, Nauka, 303 p. (in Russian).
- Karup-Møller S.** (1977) Mineralogy of some Ag–(Cu)–Pb–Bi sulphide associations. *Bulletin of Geological Society of Denmark*, **26**, 41–68.
- Karup-Møller S., Pauli H.** (1979) Galena and associated minerals from the cryolite deposit at Ivigtut, South Greenland. *Meddelelser Om Grønland: Geoscience*, **2**, 1–25.
- Kovalenker V.A., Bortnikov N.S., Troneva N.V.** (1984) [Chemical composition and mineral assemblages of Ag–(Cu)–Pb–Bi-sulfosalts in ores of the Kochbulak deposit]. *Mineralogicheskii zhurnal [Mineralogical Journal]*, (2), 16–30. (in Russian).

References

Badalov S.T. (1991) [Geochemical features of ore-forming systems]. Tashkent, Fan, 144 p. (in Russian).

- Levin V.I.** (1965) [Brief features of geological structure of the Kansai ore district]. In: *Geologiya svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy Kansayskogo rudnogo polya* [Geology of Pb–Zn deposits of the Kansai ore field]. Moscow, Nauka, 7–19. (in Russian).
- Moelo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N.J., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser G., Karup-Moller S., Balic-Zunic T., Mumme W.G., Vurro V., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M.** (2008) Sulfosalt systematics: A review. Report of the Sulfosalt Sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, **20**, 7–46.
- Mozgova N.N.** (1985) [Non-stoichiometry and homological series of sulfosalts]. Moscow, Nauka, 264 p. (in Russian).
- Mladenova V., Kerestedjian T., Dimitrova D.** (2001) Ag–Cu–Pb–Bi mineralization from the Svishti Plaz gold deposit, Central Balkan Mountain, Bulgaria. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, **38**, 55–66.
- Protod'yakonova Z.M.** (1972) [Mineralogy of deposits]. In: *Geologiya i mineral'nye komplekсы Zapadnogo Karamazara* [Geology and mineral complexes of Western Karamazar]. Moscow, Nedra, 147–148. (in Russian).
- Ramdor P.** (1962) [Ore minerals and their intergrowth]. Moscow, Foreign Literature, 1132 p. (in Russian).
- Simanenko L.F.** (2007) Modes of trace element occurrence in galena from the Partizansky base metal-skarn deposit, Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, **1**(2), 144–152.
- Shikhin Yu.S., Baykov V.N., Ishchenko E.N., Kuznetsov Zh.N., Mikhailov V.V., Pochinok A.A., Shekhtman P.A.** (1972) [General characteristics of ore potential of the Kansai ore field]. In: *Geologiya i mineral'nye komplekсы Zapadnogo Karamazara* [Geology and mineral complexes of Western Karamazar]. Moscow, Nedra, 95–97. (in Russian).
- Tomkins A., Pattison R.M., Frost R.B.** (2007) On the initiation of metamorphic sulfide anataxis. *Journal of Petrology*, **48** (3), 511–535.
- Van Hook H.J.** (1960) The ternary system $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Bi}_2\text{S}_3-\text{PbS}$. *Economic Geology*, **55**(4), 759–788.
- Wolfson F.I., Titov V.N.** (1965) [Main features of geological structure of the Kansai ore field]. In: *Geologiya svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy Kansayskogo rudnogo polya* [Geology of Pb–Zn deposits of the Kansai ore field]. Moscow, Nauka, 21–29 p. (in Russian).
- Yatimov U.A., Tseluiko A.S., Kotlyarov V.A.** (2018) [Bismuth mineralization of the Aktash sulfide-skarn deposit (Western Karamazar, Northern Tajikistan)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2018. Vulkanizm i rudoobrazovanie* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2018. Volcanism and ore formation], (24), Miass: Imin UB RAS, 135–138. (in Russian).
- Zhang L., Wen H., Qin C., Du S., Zhu C., Fan H., Zhang J.** (2015) The geological significance of Pb–Bi and Pb–Sb sulphosalts in the Damajianshan tungsten polymetallic deposit, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, **71**, 203–214.

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2019 г.