

УДК (553.411'412:553.43):550.4+549.574

Л. Е. ГЕРЦЕН¹, В. Л. ЛЕВИН²

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА НА МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАЗАХСТАНА

Казакстанның мыс-порфирлі кенорындарындағы кенді минералдардағы алтын мен күмістің қасиеттері зерттеліп, кенді оралымның соңғы айналымдарына жататын күмістің жиналуы аныкталған. Кенді минералдағы осы элементтердің орташа мөлшері есептелген. Алтын мен күмістің кендерге қосылу пішіндері қаралып, оларды бөліп алуға арнайы ұсыныстар берілген.

Изучено поведение золота и серебра в метасоматитах и рудных минералах медно-порфировых месторождений Казахстана, установлено накопление серебра к поздним стадиям рудного процесса. Рассчитаны средние содержания этих элементов в рудных минералах. Рассмотрены формы вхождения золота и серебра в руды и даны рекомендации для их извлечения.

Many aspects of gold and silver behaviour in metasomatites and ore minerals in the copper-porphyritic deposits in Kazakhstan have been studied. Accumulation of silver occurred at the late stages of ore process. Average amounts of these elements in ore minerals have been estimated. Forms of penetration of gold and silver into the ores were considered and recommendations on their extraction were given.

Изучение молибден-медно-порфировых месторождений (МПМ) показало, что в завершенном гидротермально-метасоматическом процессе их образования выделяются 4 последовательные стадии: щелочная, кислотная, ультракислотная и позднешелочная. Нередко фиксируется также бороалюмосиликатная стадия, проявление которой на разных месторождениях приурочено к начальному, среднему или конечному этапу развития [3–10, 12]. Первые три стадии являются рудообразующими.

В щелочной стадии (биотитизация, калишпатизация, окварцевание пород) выделено несколько парагенетических ассоциаций минералов, развитых от периферии к центру метасоматической колонки: биотит-магнетитовая ± апатит, кварц-хлорит-пиритовая (пирит I), (пренит) ± (эпидот)-кварц-калишпат-молибденит I'-халькопиритовая (халькопирит I), калишпат-кварц-молибденит I'-халькопиритовая с борнитом I. Иногда вблизи центра метасоматической колонки присутствует мусковит-кварц-молибденитовая с халькопиритом и борнитом парагенетическая ассоциация (Каскырмыс, Семизколь).

С кислотной стадией связаны хлоритизация, серicitизация и окварцевание пород. Здесь в центральных частях колонок развита серицит-

кварц-пиритовая (пирит II) парагенетическая ассоциация, по периферии – кварц-хлорит-халькопиритовая (халькопирит II) с молибденитом II ± сфалерит ± галенит и кварц-хлорит ± сидерит ± гематитовая парагенетические ассоциации.

С бороалюмосиликатной стадией связаны турмалинизация пород или образование эксплозивных брекчий на турмалинизованным цементе. Редкие скопления сульфидов (пирит III, халькопирит III, молибденит III, сфалерит, галенит и др.) в этой стадии не представляют промышленного интереса.

Продукты ультракислотной стадии распространены на месторождениях Коунрад, Сокуркой, Восток I, Борлы, Кызылту(?). Наиболее детально они изучены на месторождении Восток I Куйган-Майбулакского рудного поля. Здесь они представлены в центре колонки вторичными кварцитами с пиритом IV (основной рудный минерал) и окружающими их аргиллизитами, где развита каолинит ± (серицит)-кварц-энаргит-хальказиновая парагенетическая ассоциация с теннантитом, молибденитом IV, халькопиритом IV и другими минералами.

Продукты позднешелочной стадии (цеолитизация и карбонатизация) содержат реликтовые или переотложенные сульфиды (пирит V, халько-

^{1,2} Казахстан. 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69^a. Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева.

пирит V, молибденит V и др.), не представляющие промышленного интереса.

Как видно из приведенных данных, главные рудные минералы МПМ (пирит, молибденит, халькопирит) являются сквозными, присутствуя в продуктах всех стадий рудно-метасоматического процесса.

Серебро и золото – типоморфные элементы-примеси медно-порфировых руд, однако изученность их поведения в процессе минералообразования различная. При проведении полуколичественных спектральных анализов петрографически проконтролированных проб серебро устанавливается почти всегда, в то время как золото – в единичных случаях, преимущественно в более

основных оруденелых породах, что подтверждает большую сидерофильность золота по сравнению с серебром [17]. Так, на месторождении Бозшаколь отношение Ag/Au для оруденелых пород колеблется от 1 до 9, что свидетельствует о более интенсивном накоплении в них золота по сравнению с основными породами района месторождения, для которых это отношение равно приблизительно 25. Количество серебра и золота в минеральных ассоциациях Бозшаколя, приуроченных к порфиритам, выше, чем в аналогичных ассоциациях среди плагиогранит-порфиров. Широкая дисперсия отношения Ag/Au в рудах косвенно указывает на вероятность преобладания в них минеральной формы этих элементов.

Таблица 1. Относительное содержание серебра в оруденелых породах некоторых МПМ Казахстана, усл. ед.

Месторождение	Неизмененные породы		Измененные породы щелочной стадии		Оруденелые породы кислотной стадии		Оруденелые породы ультракислотной стадии	
	Кол-во проб	Ag	Кол-во проб	Ag	Кол-во проб	Ag	Кол-во проб	Ag
Бозшаколь	249	1,00	635	6,33	434	31,22		
Актогай	59	1,00	537	11,64	158	4,82		
Айдарлы	35	1,00	523	5,26	238	17,28		
Куйган-Майбулакское рудное поле (Каскырмыс, Восток I-V, Семизколь)	35	1,00	434	1,65	297	9,03	136	15,42

Таблица 2. Относительное содержание серебра в метасоматитах некоторых МПМ Казахстана

Месторождение	Относительное содержание серебра в метасоматитах								
	Щелочная стадия по зонам			Кислотная стадия по зонам			Ультракислотная стадия по зонам		
	внешняя	промежуточная		внутренняя	внешняя	промежуточная	внутренняя	аргиллизиты	аргиллизиты с серицитом
		внешняя	внутренняя						
Актогай	4,05*	3,85	3,31	2,80	8,44	3,98	4,36	-	-
	74	246	91	57	56	47	26	-	-
Борлы	2,17	1,59	1,90	1,99	3,92	4,46	3,61	-	-
	33	71	109	65	107	88	60	-	-
Коксай	-	-	-	-	2,60	2,85	3,46	-	-
					51	88	53	-	-
Айдарлы	1,72	4,39	7,11	10,00	3,72	3,42	44,78	-	-
	0,65	1,23	2,65	1,96	6,96	7,23	14,46	19,88	17,69
Куйган-Майбулакское рудное поле	35	69	74	142	163	39	76	21	94
									21

* В числителе – относительное содержание серебра в зоне, усл. ед., в знаменателе – количество проанализированных проб.

Из табл. 1 видно, что накопление серебра происходит в течение всего рудного процесса, причем степень его накопления почти на всех МПМ (за исключением Актогая) увеличивается в поздних кислотной и ультракислотной стадиях.

Более четкая картина получается при рассмотрении относительного содержания серебра в минеральных парагенетических ассоциациях из различных зон метасоматических колонок (табл. 2).

Серебро концентрируется в промежуточных и тыловых зонах, а выносится из фронтальных зон щелочной и кислотной стадий на всех месторождениях, кроме Актогая и Борлы, где наблюдается обратная картина. Максимальные концентрации серебра на остальных месторождениях

характерны для внутренней зоны кислотной и аргиллизитов ультракислотной стадий. Во вторичных кварцитах (внутренняя зона ультракислотной стадии) его содержание меньше, чем в исходных породах.

Минеральные кларки золота и серебра в рудных минералах пока не установлены [11]. В литературе имеются сведения по среднему содержанию этих элементов в некоторых минералах медно-порфировых месторождений Узбекистана [13] и в халькопирите скарновых, медно-колчеданных и колчеданно-полиметаллических руд [11]. Нами рассчитаны средние содержания золота и серебра в рудных минералах МПМ Казахстана (табл. 3).

Таблица 3. Среднее содержание золота и серебра в рудных минералах МПМ Казахстана (г/т)
и сравнение его с сульфидами из других регионов

Минералы	Медно-порфировые (Казахстан)		Медно-порфировые (Узбекистан)		Медно-скарновые (Болгария)		Медно-колчеданные (Урал)		Колчеданно-полиметаллические	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Пирит I	<u>4,48</u> 63(5)	<u>8,56</u> 107(17)								
Пирит II	<u>11,10</u> 80(8)	<u>9,13</u> 149(17)								
Пирит	<u>7,79</u> 143	<u>8,84</u> 256	<u>3,50</u> 60	<u>33,20</u> 58						
Халькопирит I	<u>7,63</u> 39(4)	<u>24,17</u> 82(17)								
Халькопирит II	<u>11,93</u> 47(8)	<u>47,57</u> 104(17)								
Халькопирит	<u>9,78</u> 86	<u>35,87</u> 186	<u>15,00</u> 41	<u>67,00</u> 41	<u>2,5</u> 4(1)		<u>0,37</u> 5(3)	<u>112-407</u> 5(3)	<u>5,08</u> 12(7)	
Молибденит I ¹	<u>6,5</u> 3(1)	<u>19,8</u> 10(1)								
Молибденит I ²	<u>0,85</u> 2(1)	<u>27,3</u> 6(1)								
Сфалерит	<u>38,91</u> 23(4)	<u>50,71</u> 41(8)	<u>0,80</u> 5	<u>135,0</u> 5						<u>428,00</u> 78(10)
Галенит	<u>0,05</u> 2(1)	<u>157,5</u> 31(2)	<u>6,30</u> 8	<u>47,6</u> 7						
Борнит	<u>0,05</u> 1(1)	<u>111,0</u> 10(3)								<u>408-</u> <u>11475</u>
Блеклая руда	<u>30,5</u> 6(3)	<u>3815,0</u> 5(2)								
Энаргит	-	<u>14,0</u> 2(1)								
Халькозин	-	<u>6,5</u> 7(1)								
Магнетит	<u>0,9</u> 5(1)	<u>0,18</u> 4(1)								

Примечание. В числителе – среднее содержание элемента, в знаменателе – количество проб, в скобках – количество месторождений. Среднее содержание элементов в халькопирите и пирите рассчитано, исключая резко повышенные их количества в отдельных пробах.

Все рудные минералы МПМ Казахстана являются носителями серебра. Золото также присутствует почти в каждом из них, за исключением энаргита и халькозина. Отношение Ag/Au для магнетита ниже 1, что свидетельствует о большей сидерофильности золота по сравнению с серебром, в связи с чем первое более интенсивно накапливается в железистых минералах. Сидерофильность золота оказывается и на содержании его в пиритах, где отношение Ag/Au близко или ниже 1. Отношение Ag/Au повышается для минералов тыловой зоны щелочной стадии (максимум в молибдените I² – 32,12) и в халькопирите кислотной стадии. Обращает на себя внимание

высокое содержание золота в сфалерите (Ag/Au для него равно 1,3). Содержание золота в других минералах кислотной стадии чрезвычайно низко (за исключением блеклой руды), а в минералах ультракислотной стадии (энаргите, халькозине) оно не обнаружено.

Содержание золота в пирите МПМ Казахстана выше, а серебра – значительно ниже, чем в пирите МПМ Узбекистана. В халькопирите МПМ Казахстана содержания золота и серебра более низкие в сравнении с таковыми из МПМ Узбекистана.

На рис. 1 и 2 приведены средние содержания золота и серебра в изученных минералах конкретных месторождений.

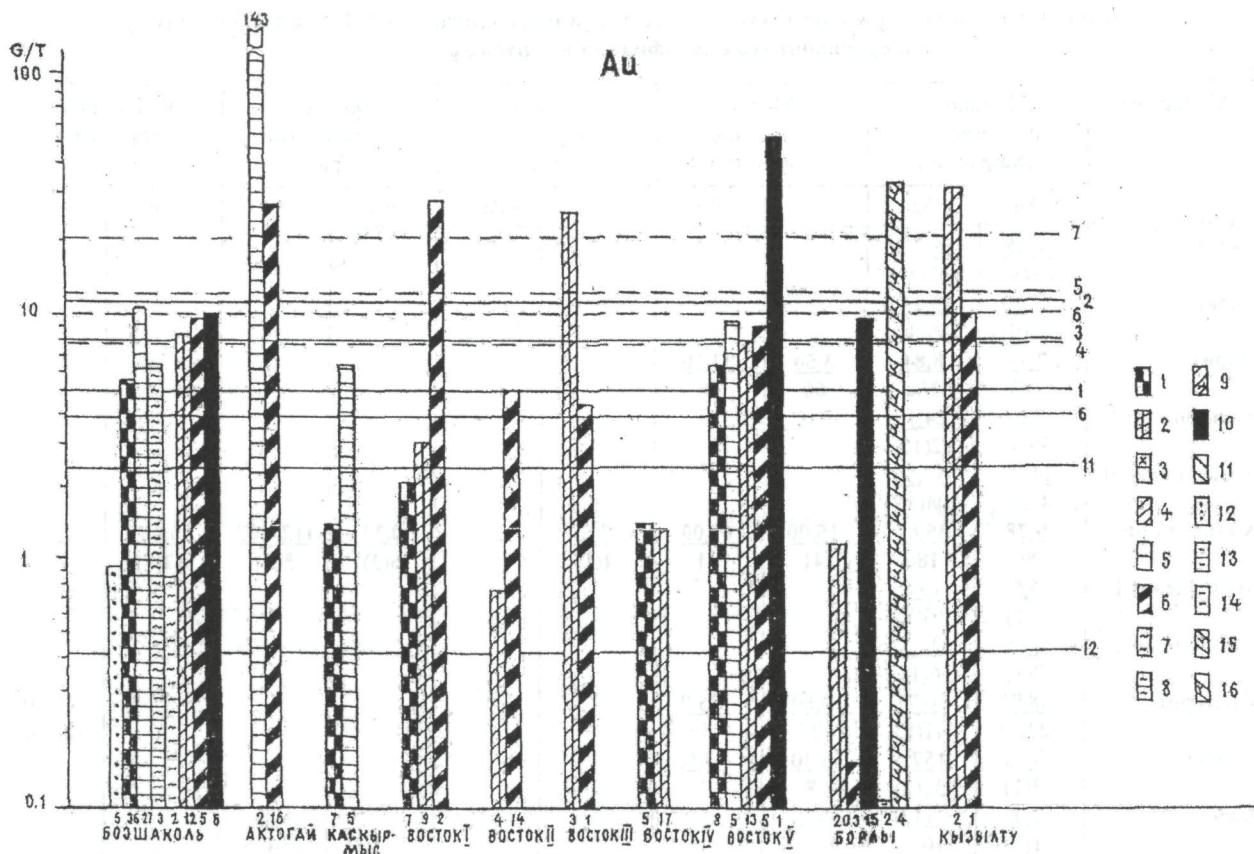


Рис. 1. Среднее содержание золота в рудных минералах медно-порфировых месторождений Казахстана. По вертикали – содержание элемента, г/т. Масштаб логарифмический. По горизонтали – минералы. Внизу – количество проанализированных проб каждого минерала и название месторождения. Минералы: 1 – пирит I; 2 – пирит II; 3 – пирит IV; 4 – пирит

V; 5 – халькопирит I; 6 – халькопирит II; 7 – молибденит I²; 8 – молибденит I²; 9 – молибденит II; 10 – сфалерит; 11 – борнит I; 12 – магнетит; 13 – галенит; 14 – энаргит; 15 – халькозин; 16 – блеклая руда. Горизонтальные прямые: 1 – среднее содержание элемента в пирите I; 2 – среднее содержание элемента в пирите II; 3 – среднее содержание элемента в пирите МПМ Казахстана; 4 – среднее содержание элемента в халькопирите I; 5 – среднее содержание элемента в халькопирите II; 6 – среднее содержание элемента в халькопирите МПМ Казахстана; 7 – среднее содержание элемента в сфалерите МПМ Казахстана; 8 – среднее содержание элемента в молибдените I; 9 – среднее содержание элемента в молибдените II; 10 – среднее содержание элемента в молибдените МПМ Казахстана; 11 – среднее содержание Au в халькопиритах медно-скарновых месторождений; 12 – среднее содержание Au в халькопиритах медно-колчеданных месторождений

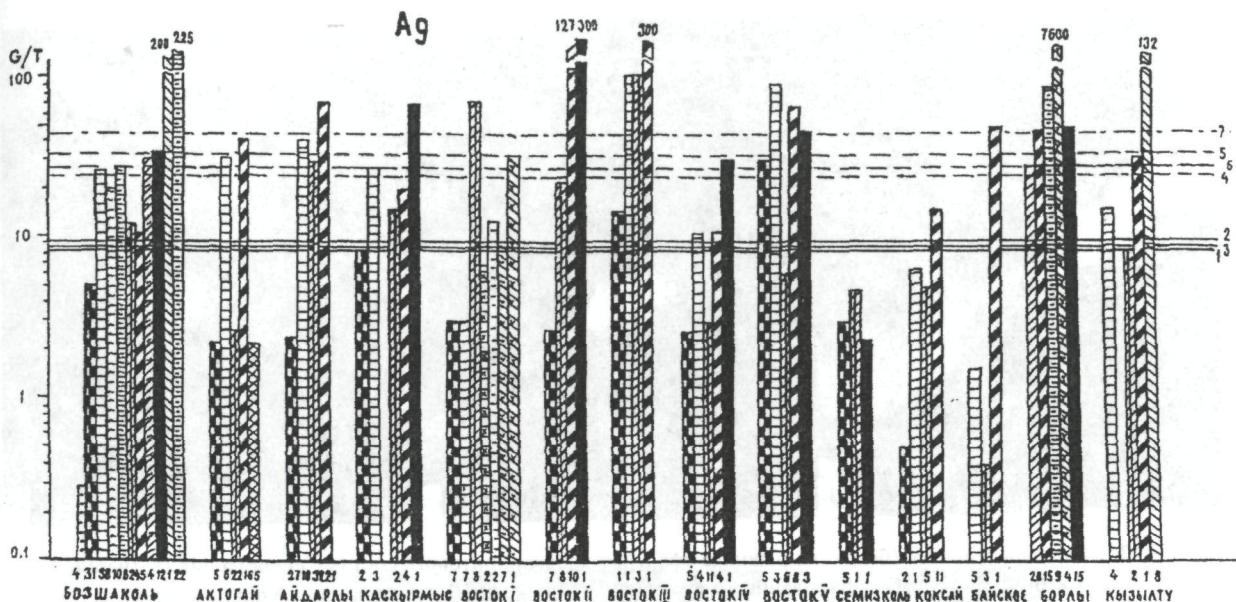


Рис. 2. Среднее содержание серебра в рудных минералах медно-порфировых месторождений Казахстана.

Условные обозначения те же, что и на рис. 1

Значительная доля золота и серебра в рудах МПМ приходится на наиболее распространенный минерал – пирит, а также на халькопирит. Сфalerит, содержащий повышенные количества золота и серебра, мало распространен на МПМ, ввиду чего он не играет большой роли в балансе этих элементов.

Концентрация серебра в минералах кислотной стадии обычно выше, чем в таковых из ассоциаций щелочной стадии. Интересно значительно более низкое содержание серебра в пирите V из поздних цеолит-кальцитовых прожилков (Актогай) по сравнению со средним содержанием его в пиритах МПМ Казахстана, т. е. в процессе поздней переработки руд серебро выносится.

Форма вхождения золота в руды преимущественно минеральная. Почти на всех изученных месторождениях обнаружены включения самородного золота и электрума. Часть золота находится, вероятно, в тонкодисперсном ($<0,1$ мкм) самородном состоянии и рассеяна среди пирита, халькопирита и кварца. Об этом говорят повышенные содержания его, установленные микрорентгеноспектрально в пирите, при отсутствии видимого золота (рис. 3). На некоторых месторождениях отмечены теллуриды: сильванит и предположительно петцит и калаверит.

Формы нахождения в рудах серебра более разнообразны. Оно найдено в составе самород-

ного золота, встречается в виде электрума, кюстелита (?), самородного серебра, а также образует сульфиды, сульфосоли, теллуриды и сульфоселениды. Изоморфно (по микрорентгеноспектральным анализам) серебро присутствует в пирите I – 0,06 мас. % (Байское), в пирите II – 0,10–0,13 мас. % (Кенкудуку, Восток III, Байское), в новообразованном розоватом медиистом пирите – 0,02–0,35 мас. %, развитом по халькопириту на Бозшаколь и Востоке II, т.е. наблюдается накопление серебра в пиритах более поздних генераций.

В халькопирите I примеси серебра установлены на месторождениях Восток IV и Кенкудуку (0,02–0,06 мас. %), в халькопирите II – на месторождениях Бозшаколь, Байское, Восток II и III, Кенкудуку (0,03–0,18 мас. %), в халькопирите IV – 0,08 мас. % (Восток I).

В кубаните CuFe_2S_3 отмечено до 0,01 мас. % серебра (Каскырмыс).

Оранжевые (железистые) борниты I содержат 0,09–0,24 мас. % серебра (Актогай, Кенкудуку, Бозшаколь); коричневые (стехиометрические) борниты – 0,10–0,13 мас. % Ag (Кенкудуку), розовые (медиистые) борниты II – 0,09–0,30 мас. % серебра (Актогай, Каскырмыс). Интересно низкое содержание серебра в розовом борните из ультракислотной стадии месторождения Восток I – 0,02 мас. % (1 проба).

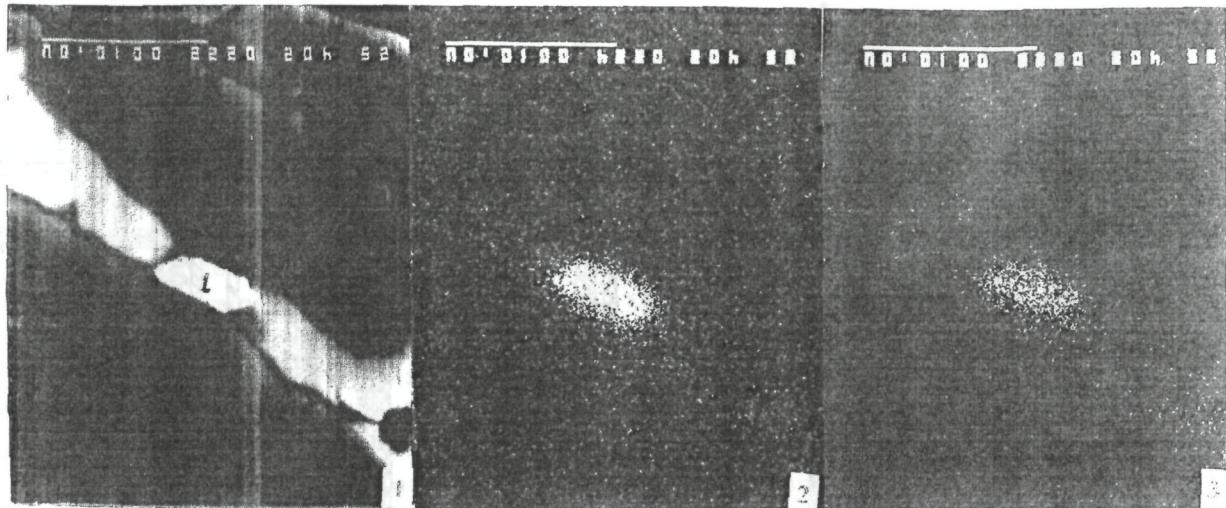


Рис. 3. Самородное золото (белое) в прожилке сфалерит-халькопиритового состава (серое) в пирите (черное).

Актогай. Фото в абсорбированных электронах. Увел. 4000 – 1; то же, в характеристических рентгеновских лучах Au K α , – 2; то же, в характеристических рентгеновских лучах Ag K α , – 3

Халькозин из ультракислотной стадии содержит 0,04–0,05 мас. % серебра (Восток I, Коунрад), дигенит Cu_{1,75–1,80}S – от 0,02 до 0,12 мас. %. Серебро (мас. %) отмечено также в анилите Cu_{1,75–1,80}S – 0,04, джириите Cu_{1,5–1,6}S – 0,06–0,18, спионкопите Cu_{1,30–1,50}S – 0,09–0,27, ярроуите Cu_{1,10–1,20}S – 0,09–0,14, ковеллине CuS – 0,11–0,14, идаите Cu₃FeS₄ – 0,12 и железистом нукундамите (Cu, Fe)₄S₄ – 0,11 (Восток I, ультракислотная стадия).

Повышенные содержания серебра (мас. %) присутствуют в галенитах из месторождений Восток II (0,11–1,88), Бозшаколь (0,05–1,86), Восток IV (0,08), Байское (1,07), Каскырмыс (0,12).

В цинкистых тетраэдритах серебро найдено от 0,23 (Восток II) до 1,26 (Коксай) мас. %. В цинкистых теннантит-тетраэдритах (Айдарлы, Байское) содержание серебра колеблется от 2,41 до 4,01 мас. %, а в цинкистом тетраэдрит-теннантите из Бозшаколя – 3,82 мас. %. Zn-теннантиты из месторождений Восток I, II и Бозшаколь содержат меньше серебра (от 0,08 до 0,72 мас. %). На месторождениях Коксай и Актогай серебро в них не обнаружено. Fe-Zn теннантиты содержат серебра – 0,04–0,38 мас. % (Восток II, Семизколь), Fe-теннантит из Бозшаколя – 0,14–0,24 мас. %, теннантит – 0,15 мас. % (Восток IV). Как видно из приведенных данных, количество серебра увеличивается в сурьмянистых разновидностях блеклых руд.

В люсоните и энаргите Cu₃As₃S₄ содержание серебра колеблется от 0,02 до 0,17 мас. % (Вос-

ток I). Серебро присутствует во многих редких минералах, мас. %: висмутине – 0,01 (Семизколь); айкините – 0,04–0,65 (Восток I, II, Семизколь); виттихените – 0,10–3,73 (Кенкудук, Восток I); неназванном минерале Cu₄BiS₄ – 0,21 (Бозшаколь); неназванном минерале Cu₁₂Bi₃S₁₀ – 0,10–1,24 (Кенкудук); михарайте Cu₄FePbBiS₆ – 0,15 (Восток I); моусоните Cu₆Fe₂SnS₈ – 0,06–0,08 (Байское); теллуромисмутите Bi₂Te₃ – 0,17; тетрадимите Bi₂Te₂S – 0,04 (Восток III); в галеноклаусталите Pb(S, Se) из месторождения Бозшаколь – 0,05, в неназванном селеновом минерале (Cu_{0,38}Fe_{0,37}Pb_{0,018}Bi_{0,08}Ag_{0,01})_{1,0}(S_{0,85}Se_{0,13})_{0,98} – 0,27.

Рассмотрим подробнее минеральные формы золота и серебра, изученные на МПМ Казахстана.

Самородное золото присутствует в рудах щелочной стадии. На месторождении Бозшаколь оно отмечается чаще, чем на других месторождениях. Характерны две морфогенетические разновидности золота: видимое и тонкодисперсное. Размер зерен видимого золота большей частью сотые, редко десятые доли миллиметра. Золото совместно с халькопиритом или без него образует включения непосредственно в пирите I и в тонких прожилках халькопирита, секущих пирит I (рис. 4). Золото присутствует в метакристаллах пирита I², в халькопирите I², а также срастается с зернами карролита в последнем. Золото обнаружено в борните кварц-халькопирит-борнитовой ассоциации щелочной стадии, развитой в цент-

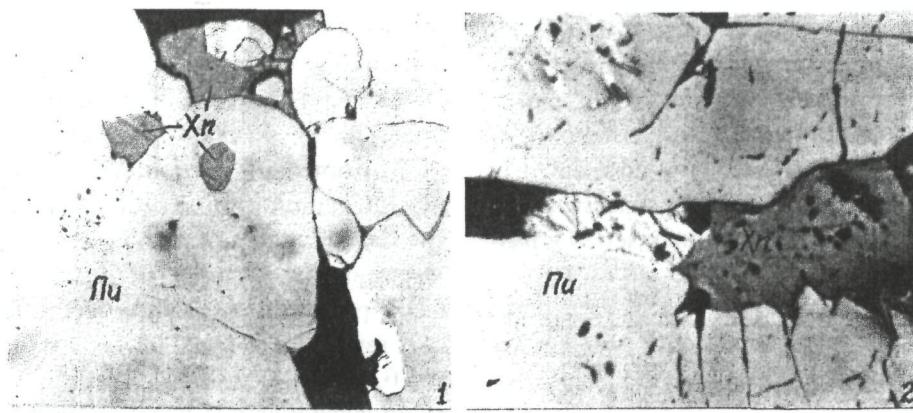


Рис. 4. Самородное золото (белое) в пирите I (Пи) и халькопирите I' (Хп) щелочной стадии месторождения Бозшаколь. Черное – жильный минерал. 1 – ув. 1500, масляная иммерсия, 2 – ув. 310

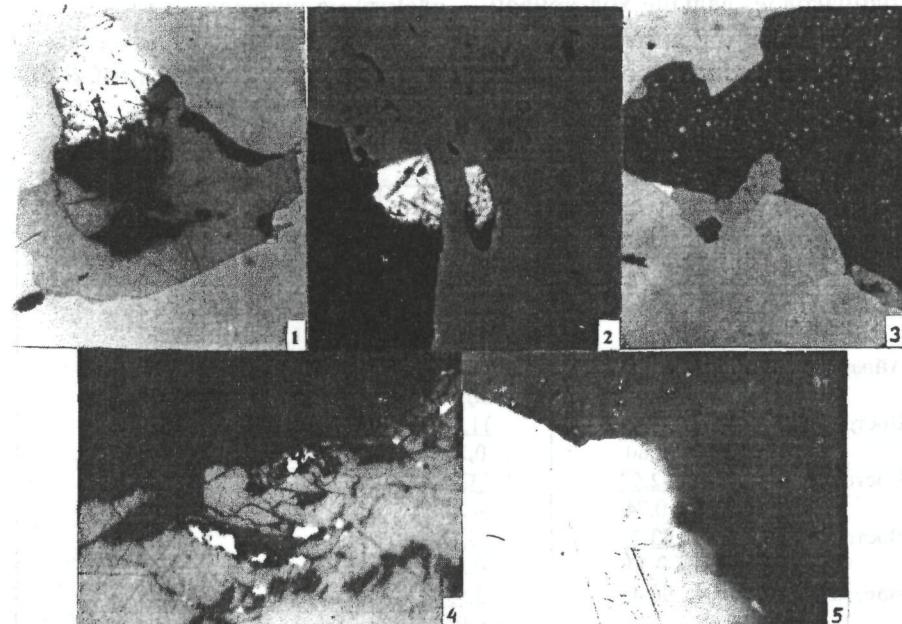


Рис. 5. Самородное золото и электрум в рудах кислотной стадии. 1 – срастания халькопирита II (серое) с самородным золотом (белое) и жильным минералом (черное) в пирите II (светло-серое) Актогай. Аншл. Ув. 800; 2 – электрум (белое) в халькопирите II в контакте с нерудным минералом (черное). Актогай. Аншл. Ув. 2000, масляная иммерсия; 3 – электрум (белое) в срастании с галенитом (серое) в контакте пирита II (светло-серое) со сфалеритом (темно-серое) с эмульсией халькопирита в нем (светло-серые точки). Бозшаколь. Аншл. Ув. 315; 4 – электрум (белое) в блеклой руде (серое) в контакте с нерудным минералом (черное). Красноармейское. Аншл. Ув. 630; 5 – самородное золото (белое) в контакте халькопирита (серое) с кальцитом (темно-серое). Каскырмыс. Аншл. Ув. 400

ральных частях колонки и в контакте халькоzина этой ассоциации с жильными минералами.

В рудах кислотной стадии самородное золото или **электрум** образуют микровключения в пирите II, где находятся в срастаниях с халькопиритом и нерудными минералами (рис. 5, 1). Найдены они в халькопирите II (рис. 5, 2), в сфалерите, в контакте зерен последнего с пиритом и галенитом (рис. 5, 3), в галените (рис. 5, 4), в

блеклой руде. Часто наблюдается приуроченность золота к kontaktам сульфидов с жильными минералами, при этом размер золотин увеличивается (рис. 5, 5).

Форма зерен золота удлиненно-овальная, округлая, ксеноморфная, редко идиоморфная. Изредка устанавливается зональная внутренняя структура видимого золота, внешние зоны обогащены обычно серебром.

В отраженном свете цвет золота изменяется в зависимости от присутствия его в том или ином минерале-хозяине и от состава его. Так, самородное золото в халькопирите ярко-желтое, в борните – розовато-белое (Коксай), в сфалерите – светло-желтое (Бозшаколь). Минерал изотропен. Отражение первых двух названных зерен в различных длинах волн следующее:

λ , нм 440 460 500 540 580 620 660 700

R, % Au в халькопирите 29,6 39,0 56,0 64,0 70,9 74,0 76,8 79,

R, % Au в борните 29,6 39,0 56,0 66,0 71,9 75,0 77,6 79,6

Отражение золота до длины волны 540 нм для обоих замеров одинаковое, дальше ход кривой дисперсии отражения зерна в борните круче, что объясняет наблюдающийся под микроскопом

розоватый оттенок минерала. Это зерно содержит примеси (мас. %) Ag (5,0), меди (3,0) и железа (2,0). Зерно в халькопирите имеет только примесь серебра (8,0 мас. %).

Химический состав самородного золота из руд щелочной стадии приведен в табл. 4.

Самородное золото в рудах щелочной стадии имеет высокую пробу (от 79,50 до 97,87 мас. %). Серебро – постоянная примесь в нем, часто присутствуют медь (от 0,08 до 3 мас. %) и железо (от 0,46 до 3,0 мас. %). Твердость минерала по микровдавливанию колеблется от 60 (замер зерна с пробой 928) до 70 кГс/мм² (проба золота 780, Р = 20 г, n = 6, Бозшаколь).

Химический состав самородного золота и электрума приведен в табл. 5.

Как видно из сравнения табл. 4 и 5, самородное золото в рудах кислотной стадии имеет бо-

Таблица 4. Химический состав самородного золота в рудах щелочной стадии

№ анал.	Месторождение	Au	Ag	Cu	Fe	Сумма
1	Коксай	<u>90,00*</u>	<u>5,00</u>	<u>3,00</u>	<u>2,00</u>	100,00
		0,78	0,08	0,08	0,06	
2	Коксай	<u>92,00</u>	<u>8,00</u>	-	-	100,00
		0,86	0,14			
3	Айдарлы	<u>85,00</u>	<u>10,00</u>	-	<u>3,00</u>	98,00
		0,72	0,19		0,09	
4	Восток III	<u>88,50</u>	<u>11,77</u>	<u>0,20</u>	-	99,87
		0,80	0,20	-		
5	Восток III	<u>82,67</u>	<u>13,61</u>	<u>0,72</u>	-	97,00
		0,74	0,23	0,02		
6	Восток III	<u>83,27</u>	<u>16,73</u>	-	-	100,00
		0,73	0,27			
7	Восток IV	<u>96,45</u>	<u>3,55</u>	-	-	100,00
		0,94	0,06			
8	Восток IV	<u>84,67</u>	<u>15,33</u>	-	-	100,00
		0,75	0,25			
9	Бозшаколь	<u>79,50</u>	<u>18,58</u>	-	-	98,08
		0,71	0,29			
10	Бозшаколь	<u>97,86</u>	<u>0,15</u>	<u>0,25</u>	<u>1,99</u>	100,25
		0,92	-	0,01	0,07	
11	Бозшаколь	<u>82,86</u>	<u>14,94</u>	<u>1,50</u>	<u>0,89</u>	100,19
		0,70	0,23	0,04	0,03	
12	Бозшаколь	<u>87,02</u>	<u>12,52</u>	<u>0,67</u>	<u>0,60</u>	100,81
		0,76	0,20	0,02	0,02	
13	Бозшаколь	<u>84,65</u>	<u>14,47</u>	<u>0,20</u>	<u>0,79</u>	100,31
		0,74	0,24	-	0,02	
14	Бозшаколь	<u>85,19</u>	<u>14,31</u>	-	-	99,50
		0,77	0,23			
15	Бозшаколь	<u>82,72</u>	<u>15,67</u>	<u>0,08</u>	<u>0,46</u>	98,93
		0,70	0,22	-	0,02	
16	Бозшаколь	<u>83,81</u>	<u>13,94</u>	<u>0,31</u>	<u>2,62</u>	100,47
		0,70	0,22	0,01	0,07	

*здесь и в других подобных таблицах в числителе – химический состав, мас. %, в знаменателе – формульные коэффициенты.

Таблица 5. Химический состав самородного золота и электрума
в рудах кислотной стадии МПМ Казахстана, мас. %

№ анал.	Месторождение	Au	Ag	Cu	Fe	Pb	Zn	Сумма	Минерал
1	Актогай	<u>63,00</u> 0,50	<u>35,00</u> 0,50	-	-	-	-	98,00	Электрум
2	Актогай	<u>68,40</u> 0,54	<u>31,60</u> 0,46	-	-	-	-	100,00	Электрум
3	Актогай	<u>73,00</u> 0,60	<u>26,00</u> 0,40	-	-	-	-	99,00	Самородное золото
4	Актогай	<u>72,80</u> 0,62	<u>24,50</u> 0,38	-	-	-	-	97,30	Самородное золото
5	Борлы	<u>68,40</u> 0,56	<u>27,60</u> 0,41	-	<u>1,10</u> 0,03	-	-	97,10	Железистый электрум
6	Байское	<u>72,55</u> 0,60	<u>20,85</u> 0,32	<u>0,11</u> -	<u>2,22</u> 0,06	<u>1,37</u> 0,02	-	97,10	Медьсодержащее свинцовисто-железистое золото
7	Восток III	<u>50,82</u> 0,36	<u>49,18</u> 0,65	-	-	-	-	100,00	Электрум
8	Бозшаколь	<u>50,00</u> 0,35	<u>50,00</u> 0,65	-	-	-	-	100,0	Электрум
9	Бозшаколь	<u>73,52</u> 0,59	<u>25,98</u> 0,38	-	-	-	<u>1,56</u> 0,03	101,05	Цинкистое самородное золото
10	Бозшаколь	<u>74,95</u> 0,61	<u>25,08</u> 0,37	<u>0,04</u> -	<u>0,72</u> 0,02	-	-	100,82	Медь-железосодержащее самородное золото
11	Бозшаколь	<u>73,71</u> 0,62	<u>24,31</u> 0,38	-	<u>0,06</u> -	-	-	98,08	Железосодержащее самородное золото
12	Бозшаколь	<u>73,28</u> 0,59	<u>24,54</u> 0,37	<u>0,10</u> -	<u>1,42</u> 0,04	-	-	99,34	Медьсодержащее железистое самородное золото
13	Бозшаколь	<u>66,84</u> 0,50	<u>25,20</u> 0,35	<u>3,70</u> 0,09	<u>2,51</u> 0,06	-	-	98,25	Железисто-медиистое самородное золото
14	Бозшаколь, центральная часть зерна	<u>75,80</u> 0,62	<u>24,16</u> 0,36	<u>0,64</u> 0,01	<u>0,41</u> 0,01	-	-	100,03	Медь- железосодержащее самородное золото
15	Бозшаколь, периферическая часть этого зерна	<u>69,88</u> 0,55	<u>28,41</u> 0,41	<u>0,82</u> 0,02	<u>0,61</u> 0,02	-	-	99,72	Медь- железосодержащее самородное золото
16	Бозшаколь	<u>72,95</u> 0,57	<u>25,52</u> 0,36	<u>1,67</u> 0,04	<u>1,18</u> 0,03	-	-	101,32	Железисто-медиистое самородное золото
17	Бозшаколь	<u>75,42</u> 0,62	<u>22,40</u> 0,34	<u>0,25</u> 0,01	<u>1,17</u> 0,03	-	-	99,24	Медьсодержащее железистое самородное золото
18	Бозшаколь	<u>65,06</u> 0,52	<u>33,25</u> 0,48	-	<u>0,08</u> -	-	-	98,39	Железосодержащий электрум
19	Бозшаколь	<u>76,17</u> 0,63	<u>20,94</u> 0,34	<u>0,13</u> -	<u>1,80</u> 0,05	-	-	99,04	Медьсодержащее железистое самородное золото
20	Бозшаколь	<u>76,62</u> 0,62	<u>21,95</u> 0,32	<u>0,05</u> -	<u>2,21</u> 0,06	-	-	100,83	Медьсодержащее железистое самородное золото
21	Бозшаколь	<u>79,33</u> 0,66	<u>18,98</u> 0,29	<u>0,32</u> 0,01	<u>1,47</u> 0,04	-	-	100,10	Медьсодержащее железистое самородное золото

лее низкую пробу, чем в рудах щелочной. Пробность золота уменьшается в рудах, образованных более поздними минеральными ассоциациями. Так, на месторождении Актогай в срастаниях с галенитом и гесситом отмечены включения электрума, в котором содержания серебра превышают 30 мас. %. Зерна электрума найдены также на месторождениях Восток III и Бозшаколь. Для золота из руд обеих стадий характерны примеси меди и железа, в рудах кислотной стадии в нем иногда наблюдаются примеси свинца и цинка. В зональных зернах пробность золота уменьшается к периферии.

В рудах ультракислотной стадии самородное золото замечено в дигените в виде тонких (<1–3 мкм в поперечнике) ксеноморфных зерен (Восток I).

Кюстелит? (Au, Ag) обнаружен на месторождении Бозшаколь [14]. Он присутствует в виде ксеноморфных включений в пирите II. Размер зерен до 10 мкм в поперечнике. В отраженном свете минерал ярко-белый с едва заметным желтоватым оттенком, светлее электрума. Светотравлению не подвержен. Изотропен. Относительный рельеф его значительно ниже, чем у пирита. По оптическим свойствам принадлежит предположительно к кюстелиту – разновидности твердого раствора Au–Ag, в котором серебро составляет ~ 80%.

Самородное серебро (Ag) присутствует в рудах кислотной и ультракислотной стадий. В рудах кислотной стадии обнаружено на месторождениях Бозшаколь, Актогай, Айдарлы, Борлы, в Селетинской группе месторождений. Оно образует тонкие включения (< 1–2 мкм в поперечнике) в галените, иногда в срастаниях с последним сечет зерна пирита II. Мощность таких прожилков не превышает 3 мкм. На Бозшаколе отмечены ксеноморфные зерна самородного серебра в блеклой руде. Размеры скоплений 4×8 и 15–20 мкм. В свежеполированном аншлифе минерал ярко-белый, блестящий. На воздухе в результате сильного светотравления быстро тускнеет и покрывается цветной пленкой. Изотропен. Относительный рельеф ниже, чем у блеклой руды.

Ассоциация самородного серебра с сульфидами и сульфосолями, в которых отсутствуют явления замещения их гипогенными минералами, указывает на его гипогенную природу. В рудах ультракислотной стадии самородное серебро

присутствует в виде тонких (< 1–2 мкм) включений в халькозине, дигените, ярроите, ковеллине, которые наблюдаются благодаря ярко-белому цвету и высокому отражению. Микрорентгеноспектральным анализом подтверждено присутствие самородного серебра в рудах кислотной и ультракислотной стадий МПМ Казахстана.

Штернбергит $AgFe_2S_3$ встречен в рудах месторождения Коунрад [18].

Аргентит Ag_2S найден на месторождениях Бозшаколь и Борлы в рудах кислотной стадии. Он образует микровключения (2–6 мкм в поперечнике) в пирите II и в контакте его с нерудным минералом. В свежеполированном аншлифе аргентит белый, на воздухе быстро покрывается темной пленкой. Количественный анализ провести не удалось, минерал сильно окисляется под электронным лучом. Качественным анализом в нем установлены серебро и сера.

Матильдит $AgBiS_2$, обнаружен на месторождении Восток II среди виттихенита, в контакте с айкинитом и халькопиритом. Виттихенит и матильдит образуют сложные тонкие мирамекито-подобные срастания с халькопиритом. Размер зерен приблизительно < 1–4 мкм в поперечнике. В отраженном свете матильдит имеет близкое к галениту отражение, двоотражение заметное, с плеохроизмом от светло-кремового, несколько светлее галенита до серовато-зеленоватого, чуть темнее последнего. Минерал анизотропен.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа следующие, мас. %: Ag – 26,34; Bi – 53,52; Cu – 0,88; Pb – 0,14; S – 17,18; сумма – 98,06. Рассчитанная формула: $(Ag_{0,93}Cu_{0,05})_{0,98}Bi_{0,08}S_{2,04}$, т. е. это свинец-медьсодержащий матильдит.

Неназванный минерал $(Cu, Bi, Ag)_{13}S_8$ найден на месторождении Кенкудук в кварц-мусковитовых прожилках кислотной стадии в близко-одновременных срастаниях с молибденитом и халькопиритом. Размер выделения до 10×15 мкм.

В отраженном свете минерал светло-кремово-серый со слабым двоотражением. Состоит из агрегата тонких зерен, при этом наблюдается тонкоагрегатное таблитчатое строение более крупных зерен. При больших увеличениях микроскопа видно, что светло-кремово-серая фаза содержит тончайшие пластинки (< 1–2 мкм) более светлой голубовато-серой фазы.

Светло-кремово-серый минерал слабо анизотропен с цветным эффектом от коричневато-

серого до серого тона. В масляной иммерсии по краям видны светлые внутренние рефлексы. В голубовато-серой фазе также заметны слабые плеохроизм и анизотропия.

Отражение светло-кремовато-серой преобладающей фазы минерала в различных длинах волн (λ , нм) следующее:

λ , нм	440	460	500	540	580	620	660	700	740
R ₁ , %	34,9	35,5	36,1	36,0	35,0	34,5	34,1	33,3	32,3
R ₂ , %	31,5	31,7	32,3	33,0	33,8	33,1	32,7	32,0	31,4

Две фазы отчетливо видны при исследовании на микрозонде (ув. 7800). Голубовато-серый минерал, развитый в подчиненном количестве, выглядит на микронализаторе темнее.

Проанализирована преобладающая светлая фаза, мас. %: Cu – 39,38; Bi – 36,11; Ag – 7,17; Pb – 0,12; Se – 0,24; S – 16,82; сумма – 99,60. Рассчитанная формула: $(\text{Cu}_{0,38}\text{Bi}_{2,62}\text{Ag}_{1,00}\text{Pb}_{0,01})_{13,01}(\text{S}_{7,94}\text{Se}_{0,05})_{7,99}$.

Для минерала характерны незначительные примеси свинца и селена. Как показал А. А. Годовиков [2], для подобных сульфосимутитов меди и серебра характерны примеси свинца, замещающие медь и серебро. В нашем случае присутствует также примесь селена, изоморфная сере. В литературе подобный минерал пока не описан. Возможно, это новый минерал, однако малое количество материала не дает возможности для более точных исследований его.

Неназванный минерал (Cu, Pb, Bi, Ag) S найден на месторождении Восток II Куйган-Майбулакского рудного поля. Он присутствует в гнезде халькопирита II в виде агрегата зерен размером $\sim 10 \times 300$ мкм, а также в виде гнездообразных скоплений до 0,2 мм в поперечнике в породе. Зерна имеют удлиненно-таблитчатую форму или ксеноморфны. Размер их $\sim 2 \times 10$ мкм. В отраженном свете минерал кремовато-белый. Отражение высокое, значение его в различных длинах волн следующее:

λ , нм	440	460	500	540	580	620	660	700	740
R ₁ , %	51,1	52,0	51,4	50,7	50,2	49,6	49,1	48,6	48,2
R ₂ , %	47,1	47,0	47,0	46,8	46,5	46,2	45,6	44,9	44,4

Двуотражение слабое, эффекты анизотропии бесцветны. Химический состав минерала следующий, мас. %: Cu – 6,62–6,63; Pb – 20,60–20,47; Bi – 48,48–49,33; Ag – 6,23–6,34; Fe – 0,08–0,09;

Cd – 0,03 – отсутств.; S – 16,76–16,79; сумма – 98,78–98,62. Рассчитанная формула: $(\text{Cu}_{0,20}\text{Pb}_{0,20}\text{Bi}_{0,46}\text{Ag}_{0,11})_{0,97}\text{S}_{1,03}$. Минерал содержит незначительную примесь железа, иногда кадмия. В литературе сведений по нему нет.

Полибазит (Ag, Cu)₁₆Sb₂S₁₁ найден на месторождениях Бозшаколь и Актогай в рудах кислотной стадии. На Бозшаколе он находится в срастаниях с тетраэдритом среди галенита, на Актогае – в халькопирите, замещая последний. Размер зерен ~ 3 –10 мкм в поперечнике.

В отраженном свете цвет минерала в воздухе голубовато-белый, в иммерсии он значительно темнее галенита со слабым серо-зеленоватым оттенком, но светлее, чем тетраэдрит. Отражение в желтом свете – $31,0 \pm 3,4$ %. Двуотражение заметное с плеохроизмом в серо-зеленоватых и более темных тонах. Эффекты анизотропии от желтовато-коричневого до тусклого-зеленого цвета. Внутренние рефлексы густо-красные, видны в иммерсии по краям зерен. Относительный рельеф ниже, чем у тетраэдрита и галенита.

Качественный микрорентгеноспектральный анализ на микрозонде JXA-3A показал большое количество серебра, наличие сурьмы в меньшем количестве, чем в тетраэдрите, присутствие серы и примеси меди. Мышиак отсутствует. Эти данные подтверждают диагностику минерала.

Гессит Ag₂Te является одним из распространенных теллуридов на МПМ Казахстана. Наиболее хорошо он изучен на месторождении Бозшаколь, где найдены 4 его генерации, в том числе изотропный гессит [14, 15], а также на месторождении Айдарлы [16] и др., поэтому его описание в этой статье опущено.

Эмпрессит Ag_{5-x}Te₃ найден в рудах кислотной стадии на месторождениях Айдарлы и Селетинское. На месторождении Айдарлы он образует тонкие срастания с тетрадимитом, галенитом и халькопиритом в контакте последнего с нерудным минералом. Размер зерен не превышает 2 мкм в поперечнике.

В отраженном свете эмпрессит белый с голубоватым оттенком. Двуотражение заметное, анизотропия сильная. Качественным анализом в составе минерала установлены серебро и теллур.

Сильванит AuAgTe₄ обнаружен в рудах кислотной стадии на месторождениях Бозшаколь [14] и Селетинское. На Бозшаколе он образует микровключения в пирите II, иногда в срастаниях с

электрумом и гесситом. На Селетинском находится в срастаниях с электрумом среди халькопирита II. Размер зерен от 4 до 10 мкм в попечнике.

В отраженном свете сильванит сиреневато-кремовый. Двуотражение сильное с плеохроизмом в сиреневато-кремовых и сиреневато-коричневых тонах. Эффекты анизотропии сильные от беловато-желтого до темно-коричневого цвета. Отражение в желтом свете (неполяризованный свет) равно $58,1 \pm 3,4\%$. В сильваните видны двойниковые пластинки, расположенные косо к положению угасания. Относительный рельеф минерала ниже, чем у пирита и электрума, но выше, чем у гессита.

Химический состав сильванита, мас. %: Au – 30,00; Ag – 11,80; Te – 58,00; сумма – 99,80 (Бозшаколь). Рассчитанная формула: $\text{Au}_{1,28}\text{Ag}_{0,92}\text{Te}_{3,80}$, т. е. он характеризуется избытком золота по отношению к серебру и теллтуру.

На месторождении Айдарлы найдены теллуриды серебра и висмута [16]. Они представлены *вольнским AgBiTe₂*, *цинкстым вольнским (Ag, Zn)BiTe₂* и *неназванным минералом AgBiTe₂*, развитыми в поздней ассоциации кислотной стадии. Это первая находка теллуридов серебра и висмута в медно-порфировых рудах.

Селенид серебра обнаружен на месторождении Кенкудук [1] в рудах щелочной стадии. В сравнении с другими месторождениями этого типа руды щелочной стадии на Кенкудуке характеризуются почти полным отсутствием пирита. Минералы селена образуют срастания в прожилках халькопирита I среди калишпатизированного гранита. Размер исследованного сростка $\sim 10 \times 15$ мкм.

Неназванный минерал (минерал В) образует скопления тонких (1 мкм и менее в попечнике) удлиненных зерен, ориентированных субпараллельно друг другу и проникающих в селеновый минерал A, который развит в центральной части сростка. Только в единичных случаях размер зерен минерала В достигает 2 мкм в попечнике.

В отраженном свете он серый. Двуотражение заметно с плеохроизмом от серого до темно-серого тона. В масляной иммерсии плеохроизм изменяется от коричневато-серого до темно-серого тона. Эффекты анизотропии в воздухе от ярко-желтого до темно-голубовато-серого цвета, в масле – от желтовато-серого до темно-

серого цвета. Относительный рельеф минерала В выше, чем у минерала A и селенистого висмутина, находящегося по периферии сростка.

Удалось получить только полуколичественный микрорентгеноспектральный анализ минерала B, мас. %: Pb – 7,15; Fe – 20,67; Bi – 23,34; Ag – 9,13; Cu – 7,33; Se – 7,69; S – 8,00; сумма – 81,30.

Минерал B является сульфоселенидом железа, меди, висмута, серебра и свинца с отношением $\text{Fe}:\text{Cu}:\text{Bi}:(\text{Ag}+\text{Pb}):(\text{S}+\text{Se})=3:1:1:1:3$; отношение суммы металлов к сумме анионов равно 6:3 или 2:1; $\text{Ag:Pb}=2,48:1$ и $\text{S:Se}=2,3:1$. Гипотетическая формула минерала следующая: $\text{Fe}_3\text{CuBi}(\text{Ag}, \text{Pb})(\text{S}, \text{Se})_3$. Аналогов ему среди известных минералов пока не найдено.

Итак, на основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Выявлены более высокая сидерофильность золота по сравнению с серебром, в связи с чем золотом обогащены месторождения, связанные с более основными породами (Бозшаколь, Актогай, Борлы, Кызылту и месторождения Куйган-Майбулакского рудного поля). Серебро характерно для всех изученных медно-порфировых месторождений Казахстана.

2. Серебро концентрируется в промежуточных и тыловых зонах щелочной и кислотной стадий гидротермально-метасоматических колонок и выносится из фронтальных. Для месторождений Актогай и Борлы картина обратная. Максимальные концентрации серебра в ультракислотной стадии наблюдаются в аргиллизитах. Во вторичных кварцитах его содержание меньше, чем в исходных породах.

3. Выявлены формы вхождения золота и серебра в руды. Кроме изоморфной и минеральной форм, для самородного золота и электрума обнаружена тонкодисперсная форма.

4. Изучены минеральные формы золота и серебра в рудах. Они представлены самородными элементами, сульфидами, сульфосолями, теллуридами и селенидами. Среди них часть неназванных минералов, изучение которых необходимо продолжить в будущем.

5. Установлены уменьшение пробности самородного золота в рудах кислотной стадии и появление здесь электрума.

6. Микроскопическими исследованиями выявлено, что большая часть минералов золота и

серебра заключена в пирите и халькопирите, которые являются основными рудными минералами МПМ. Следовательно, золотом и серебром будут обогащены промышленные концентраты этих минералов, что необходимо учитывать при технологическом переделе руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герцен Л. Е., Котельников П. Е., Еремеева Е. Я. Первая находка минералов селена на медно-порфировых месторождениях Казахстана // Изв. АН КазССР. Сер. геол. 1989. № 3. С. 45-49.
2. Годовиков А. А. Висмутовые сульфосоли. М.: Недра, 1972. 285 с.
3. Жуков Н. М., Филимонова Л. Е. Пренит-халькопиритовая рудная ассоциация на медно-порфировом месторождении Актогай // Изв. АН КазССР. Сер. геол. 1979. № 6. С. 53-55.
4. Жуков Н. М., Филимонова Л. Е. Метасоматиты и гипогенное оруденение медно-порфирового месторождения Актогай // Геология рудных месторождений. 1982. Т. XXIV, № 2. С. 102-110.
5. Жуков Н. М., Филимонова Л. Е. Гидротермалиты и оруденение медно-порфировых месторождений Центрального Казахстана // Изв. АН КазССР. Сер. геол. 1982. № 6. С. 31-38.
6. Жуков Н. М. Инфильтрационный метасоматизм и природные колонны гидротермалитов. Алматы: Фылым, 1991. 215 с.
7. Жуков Н. М., Герцен Л. Е. Гипогенное происхождение промышленных руд зоны вторичного сульфидного обогащения медно-порфировых руд // Геология и полезные ископаемые. Экспресс-информация. Алматы, 1994. Вып. 1. С. 1-2.
8. Жуков Н. М., Герцен Л. Е. Новое о гидротермалитах медно-порфировых месторождений Казахстана // Геология Казахстана. 1995. № 3. С. 29-46.
9. Жуков Н. М., Герцен Л. Е. Новые данные по гидротермалитам месторождения Бозшаколь // Геология и разведка недр Казахстана. 1996. № 1. С. 26-30.
10. Жуков Н. М., Герцен Л. Е. Геохимия гидротермалитов молибден-медно-порфировых систем // Геология Казахстана. 2001. № 1. С. 59-72.
11. Иванов В. В., Белевитин В. В., Борисенко Л. Ф. и др. Средние содержания элементов-примесей в минералах. М.: Недра, 1973. 208 с.
12. Колесников В. В., Жуков Н. М., Солодилова В. В., Филимонова Л. Е. и др. Медно-порфировые месторождения. Серия: Балхашский сегмент. Алма-Ата: Наука, 1986. 200 с.
13. Минералы Узбекистана. Ташкент: Изд-во АН УзССР. 1975. 250 с.
14. Филимонова Л. Е., Слюсарев А. П. О золото-серебрянной минерализации на месторождении Бощекуль // Изв. АН КазССР. Сер. геол. 1970. № 3. С. 65-68.
15. Филимонова Л. Е., Слюсарев А. П. Минералы теллура в рудах медно-молибденового месторождения Бощекуль // Минералогия и геохимия Центрального Казахстана и Алтая. Алма-Ата: Наука, 1971. С. 152-157.
16. Филимонова Л. Е., Левин В. А., Абулгазина С. Д., Еремеева Е. Я., Митина В. Ф. Минералы теллура в рудах медно-порфирового месторождения Айдарлы // Зап. ВМО. 1986. Ч. 115, вып. 4. С. 459-466.
17. Филимонова Л. Е., Шацкая И. А. Платиноидно-рениево-молибденово-медная формация // Металлогенез Казахстана. Рудные формации. Элементы-спутники в рудах. Алма-Ата: Наука КазССР, 1980. С. 191-201.
18. Юдин И. М. Медное месторождение Коунрад. М., 1969. 150 с.