

УДК 553.08(575.2)  
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-173-181

## СЕРЕБРЯНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ НА СКАРНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ БОЗЫМЧАК (КЫРГЫЗСТАН)

*Н.Т. Пак, М.Е. Альпиев, Е.А. Альпиев*

**Аннотация.** Месторождение Бозымчак является комплексным золотомедным месторождением. Рудные тела приурочены к скарнам, образованным на контакте гранодиоритов ( $C_{2-3}$ ) с карбонатными породами нижнего карбона, и к серпентинитам. Основными рудными минералами являются: халькопирит, борнит, халькозин, золото. Акцентировано внимание на попутной серебряной минерализации, которая в основном представлена самородным серебром, гесситом, электрумом. В окисленных рудах серебро встречается в виде кераргирита. Приведены состав, форма нахождения и характеристика минералов серебра. Серебряная минерализация находится в тесном парагенезисе с минералами меди и золотом. Коэффициенты корреляции между Ag, Au и Cu имеют высокие значения. Содержание серебра в концентрате после флотационного обогащения составляет от 300 до 500 г/т, что повышает рентабельность производства.

**Ключевые слова:** скарны; серпентинит; золотомедная минерализация; серебро; электрум; гессит; корреляция; концентрат.

---

## БОЗУМЧАК (КЫРГЫЗСТАН) СКАРН КЕНИНДЕ КҮМҮШ МИНЕРАЛИЗАЦИЯСЫ

*Н.Т. Пак, М.Е. Альпиев, Е.А. Альпиев*

**Аннотация.** Бозумчак кени комплекстүү алтын-жез кени болуп саналат. Кен тулкусу гранодиориттердин ( $C_{2-3}$ ) астыңкы карбондун карбонаттык тоо тектери менен жанашуусунан пайда болгон скарндар жана серпентиниттер менен чектелген. Негизги кен минералдары: халькопирит, борнит, халькоцит, алтын. Макалада негизинен таза түрдөгү күмүш, гессит, электрум менен берилген күмүш минерализациясына көңүл бурулат. Күмүш кычкылданган рудаларда кераргирит түрүндө кездешет. Күмүш камтыган минералдардын курамы, пайда болуу формасы жана мүнөздөмөлөрү берилди. Күмүш минерализациясы жез жана алтын камтыган минералдары менен тыгыз парагенезде болушу аныкталды. Ag, Au жана Cu ортосундагы корреляция коэффициенттери жогору. Флотациялоо байытуудан кийин концентраттагы күмүштүн курамы 300дөн 500 г/т чейин жетет, бул өндүрүштүн рентабелдүүлүгүн жогорулатат.

**Түйүндүү сөздөр:** скарндар; серпентинит; алтын-жез минерализациясы; күмүш; электрум; гессит; корреляция; концентрат.

---

## SILVER MINERALIZATION AT SKARN DEPOSIT BOZYMCHAK (KYRGYZSTAN)

*N. T. Pak, M. E. Alpiev, E. A. Alpiev*

**Abstract.** The Bozymchak deposit is a complex gold and copper deposit. Ore bodies are predominantly skarn, formed by contacts of granodiorites ( $C_{2-3}$ ) with carbonate rocks of the Lower Carboniferous, and serpentinites. The main ore minerals are chalcopyrite, bornite, chalcocite and gold. The article focuses on the accompanying silver mineralization, represented mainly by native silver, hessite and electrum. Silver occurs in oxidized ores as kerargyrite. The composition, form of occurrence and characteristics of silver minerals are given. Silver mineralization is in close paragenesis with copper and gold minerals. The correlation between Ag, Au and Cu has high values. The silver content in the concentrate after flotation enrichment ranges from 300 to 500 g/t, which increases the profitability of production.

**Keywords:** skarns; serpentinite; gold-copper mineralization; silver; electrum; hessite; correlation; concentrate.

**Введение.** Бозымчак является представителем комплексного золотомедного месторождения в скарнах, где кроме основных компонентов – золота и меди – имеет значение и серебро. В имеющихся научных публикациях и отчетах, касающихся геологии и минералогии месторождения Бозымчак, практически отсутствует информация о серебряной минерализации. Чаще всего приводится только среднее содержание серебра в рудах. Между тем серебро является постоянно присутствующим попутным компонентом золотомедных руд месторождения Бозымчак. Еще в советское время запасы серебра по категории  $C_2$  составляли 235 т, при среднем содержании 13,2 г/т, а в медном концентрате после флотации одной из технологических проб содержание серебра составило 354 г/т. Месторождение было открыто в 1951 г., и после проведения разведочных работ в 1960–1970-х гг. по категории  $C_2$  запасы меди составляли 203,4 тыс. т при среднем содержании 1,12 %; золота – 34,8 т при среднем содержании 1,96 г/т [1]. В это время тематические и научные работы проводили: Д.С. Сатыкеев [2], Р.Д. Дженчураева [3], И.А. Мезгин, К.Т. Мустафин, С.К. Мустафин и др., а позже – Е.А. Альпиев, М.Е. Альпиев [4, 5], Н.Т. Пак и др. [6], Е.А. Ивлева и др. [7], Bo Zu et al. [8], Abzalov et al. [9] и др. В настоящее время месторождение Бозымчак разрабатывается карьерным способом компанией «KAZ Minerals Bozymchak».

**Геологическое строение.** Месторождение Бозымчак находится в западной части Кыргызстана в пределах Чаткальского сектора Среднего Тянь-Шаня (рисунок 1). Оно расположено в переходной зоне или на сочленении Чаткальской и Кураминской структурно-формационных зон, которые являются восточным окончанием позднепалеозойского Бельтау-Кураминского вулканоплутонического пояса [7].

Месторождение приурочено к северному экзоконтакту интрузии Джалгызурюкского массива с карбонатными породами девона и карбона. Здесь сформированы рудоносные скарны, повторяющие линию контакта в виде подковообразной дуги. В пределах месторождения выделено четыре основных промышленных участка: Юго-Западный, Центральный, Восточный и Даван (рисунок 2).

Формирование месторождения Бозымчак происходило в средне-позднекарбовое время и связывается с переходным режимом от субдукционной обстановки к коллизии и с началом коллизии [7].

Осадочные толщи девон-каменноугольного возраста на месторождении представлены преимущественно карбонатными породами – известняками, доломитами, доломитистыми известняками (рисунок 2). Реже встречаются терригенные и кремнистые породы в виде отдельных пачек или прослоев. Породы прорваны интрузией гранодиоритов Сандалаш-Чаткальского комплекса ( $C_{2-3}$ ). Возраст гранодиоритов в районе месторождения Бозымчак по циркону составляет:  $303,8 \pm 1,5$ – $304,8 \pm 1,6$  млн лет [8].

При внедрении гранодиоритов в карбонатные породы сформировались контактово-метасоматические образования: магнезиальные и известковые скарны. Основная масса скарнов образована в постмагматический этап и представлена собственно известковыми скарнами. Это преимущественно гранатовые, пироксеновые и волластонитовые скарны в разных количественных соотношениях. Основной разновидностью являются гранат-волластонитовые скарны, представляющие большую часть приповерхностных залежей участка Центральный. На участках Восточный и Даван в составе залежей начинают преобладать уже гранат-пироксеновые скарны и серпентиниты.

Скарновые тела образуют подковообразную залежь согласно контакту с интрузивными породами (рисунок 2) и имеют протяженность около 2 км, мощность 7–85 м и прослежены на глубину до 400 м. Залегание скарнов крутое, часто имеет падение под гранодиориты. Отдельные рудные тела обычно имеют мощность до 8–30 м.

На месторождении широко проявлены процессы серпентинизации с образованием серпентинитов. Распространение серпентинитов увеличивается к восточной части месторождения и с глубиной (участки Восточный и Даван). Это связано с большим развитием здесь доломитов, представляющих нижние части стратиграфического разреза. Серпентин развивается как по доломитам, так и по магнезиальным и преобразованным скарнам. Внешне это темно-зеленые, почти черные породы, сложенные волокнистым серпентином, иногда с примесью карбонатов и талька и реликтами магнезиальных скарнов.

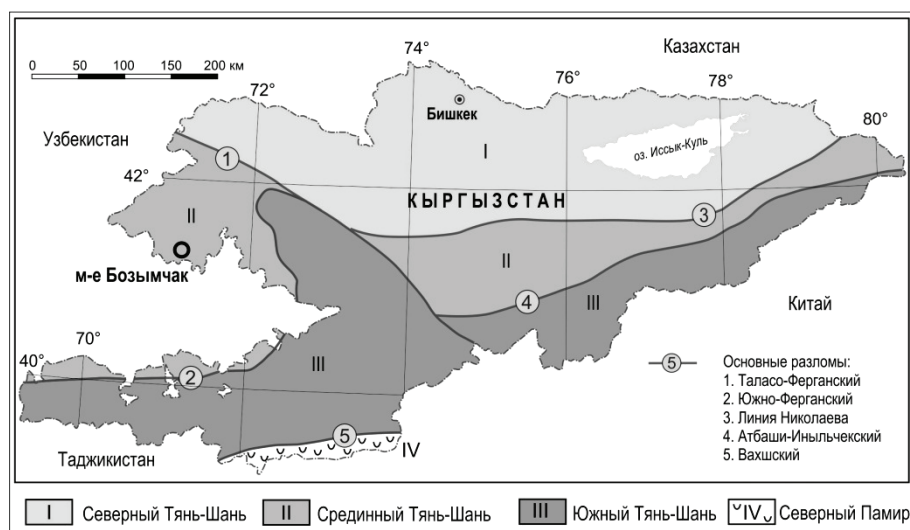


Рисунок 1 – Обзорная схема размещения месторождения Бозымчак

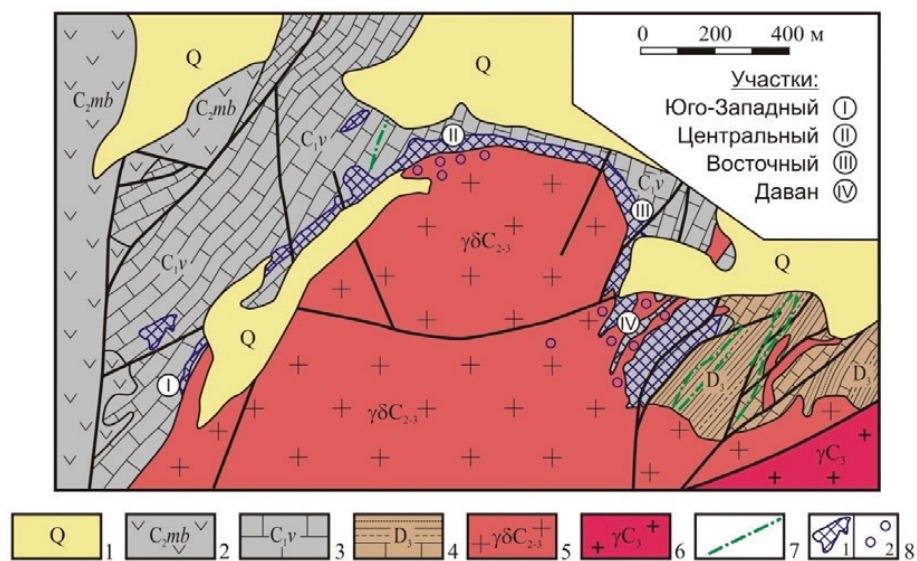


Рисунок 2 – Схематическая геологическая карта месторождения Бозымчак:  
 1 – четвертичные отложения; 2 – минбулакская свита, андезиты, дациты и их туфы;  
 3 – доломиты, известняки; 4 – песчаники, известняки, доломиты; 5 – гранодиориты;  
 6 – граниты; 7 – дайки порфиров; 8 – скарны рудоносные (1), эндоскарны (2)

**Рудная минерализация.** Рудные образования месторождения Бозымчак представлены сульфидизированными метасоматитами. В первую очередь это скарны различного состава. Промышленное содержание меди, золота и серебра чаще связано с гранат-волластонитовыми скарнами, реже с гранатовыми, гранат-пироксеновыми скарнами. Также рудная минерализация находится в серпентинизированных породах и серпентинитах. Соответственно выделяются скарновый и серпентинитовый типы оруденения.

Основными рудными минералами меди месторождения являются: халькопирит, борнит, халькозин. Сульфиды образуют гнезда различного размера, прожилки и вкрапленность. Содержание сульфидов в рудах неравномерное и колеблется от первых процентов до десятков процентов, иногда встречаются штучные образцы, содержащие сульфиды до 50–70 %. Также на месторождении встречаются: ковеллин, галенит, сфалерит, молибденит, арсенопирит, пирит, магнетит, пирротин и другие. В зоне окисления, которая не имеет широкого развития, появляются малахит, азурит, редко другие минералы.

Золото в основном наблюдается только под микроскопом, чаще всего оно встречается в борните и в халькопирите. Очень редко включения золота наблюдались в арсенопирите, пирите и др. Размеры наблюдаемых под микроскопом золотин колеблются от 1 микрона до 0,3 мм. Формы золотин: комковидные, пластинчатые и ветвистые. Также золото находится в сульфидах в тонкодисперсном виде, размером менее 1 микрона.

Руды, кроме основных компонентов – золота, меди и серебра – содержат компоненты в виде примесей: молибден, теллур, селен, индий, рений, бор и др.

**Серебряная минерализация.** Специализированные исследования серебряной минерализации ранее не проводились, поэтому в данной статье авторы приводят имеющиеся разрозненные данные и результаты собственных исследований. Обычные содержания серебра в рудах составляют первые десятки грамм на тонну. Средние содержания полезных элементов по участкам месторождения Бозымчак приведены в таблице 1. Руды характеризуются преобладанием серебра над золотом (рисунок 3). В целом на трех участках усредненные соотношения серебра к золоту составляют 6,6–7,8, а на участке Даван – 2,5.

Как видно на рисунке 3, максимальные средние содержания Au, Ag и Cu приходятся на участок Восточный. Содержания серебра на участке Даван намного ниже, чем на других участках. Содержания серебра в рудах месторождения Бозымчак обусловлены наличием минералов серебра или его примесей в составе других минералов. В частности, встречены: самородное серебро, гессит, электрум, смешанные фазы с теллуrom и золотом и др. Минеральный состав авторами изучался в минералогической лаборатории «KAZ Minerals Bozymchak». Исследования проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA 3 LMU (TESCAN), и системой энергодисперсионного микроанализа INCA X-MAX в лаборатории СП ЗАО «ИВС» (Санкт-Петербург) [10], а также в Институте минералогии Уральского отделения РАН [11].

Таблица 1 – Средние содержания меди, золота и серебра на месторождении Бозымчак [1]

№ п/п	Участок	Категория	Cu, %	Au, г/т	Ag, г/т
1	Юго-Западный	C <sub>2</sub>	0,89	1,6	11,4
2	Центральный	C <sub>2</sub>	1,07	2	13,1
3	Восточный	C <sub>2</sub>	2,39	2,3	17,9
4	Даван	P <sub>1</sub>	1	2	5
	Среднее	C <sub>2</sub>	1,14	1,96	13,2
	Среднее	C <sub>2</sub> +P <sub>1</sub>	1,12	1,96	11,7

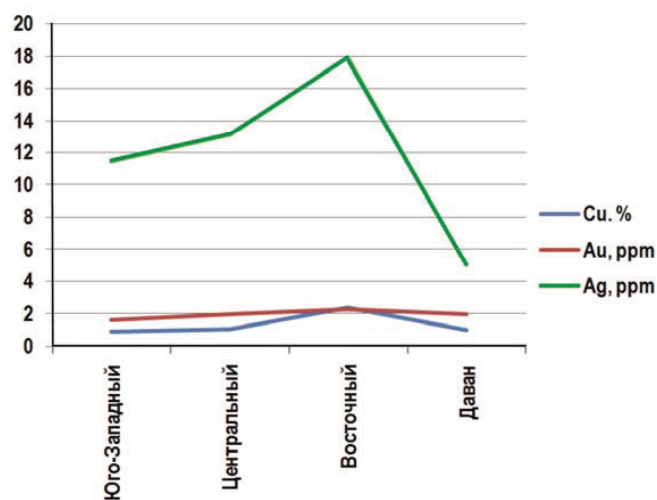


Рисунок 3 – Средние содержания элементов на месторождении Бозымчак по участкам

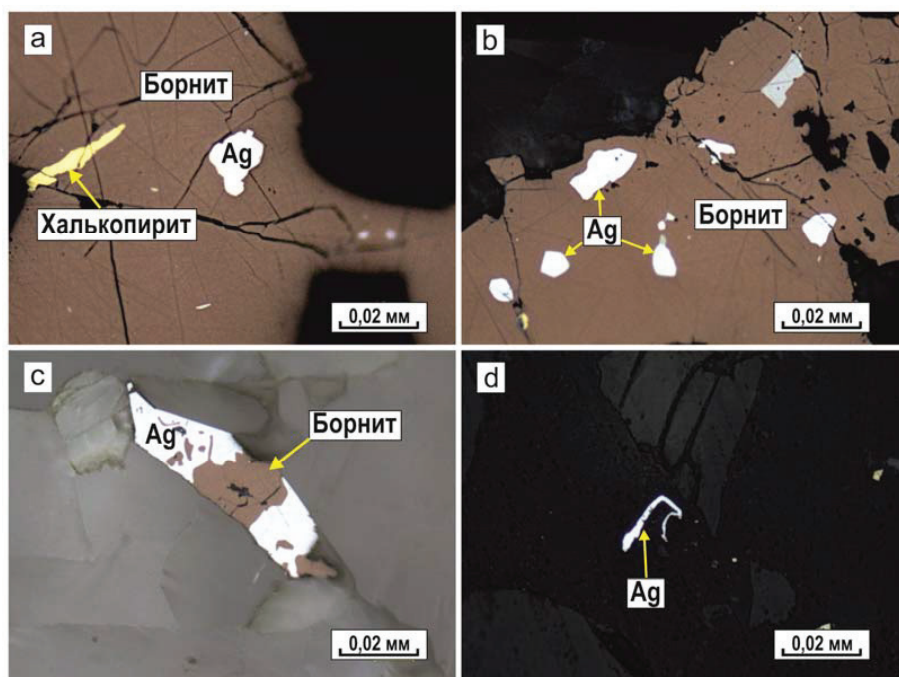


Рисунок 4 – Микрофотографии аншлифов в отраженном свете:  
а – выделения халькопирита и серебра в борните; б – вкрапленность серебра в борните;  
с – тесное срастание серебра и борнита среди нерудного матрикса;  
д – выделение серебра сложной формы в нерудном минерале

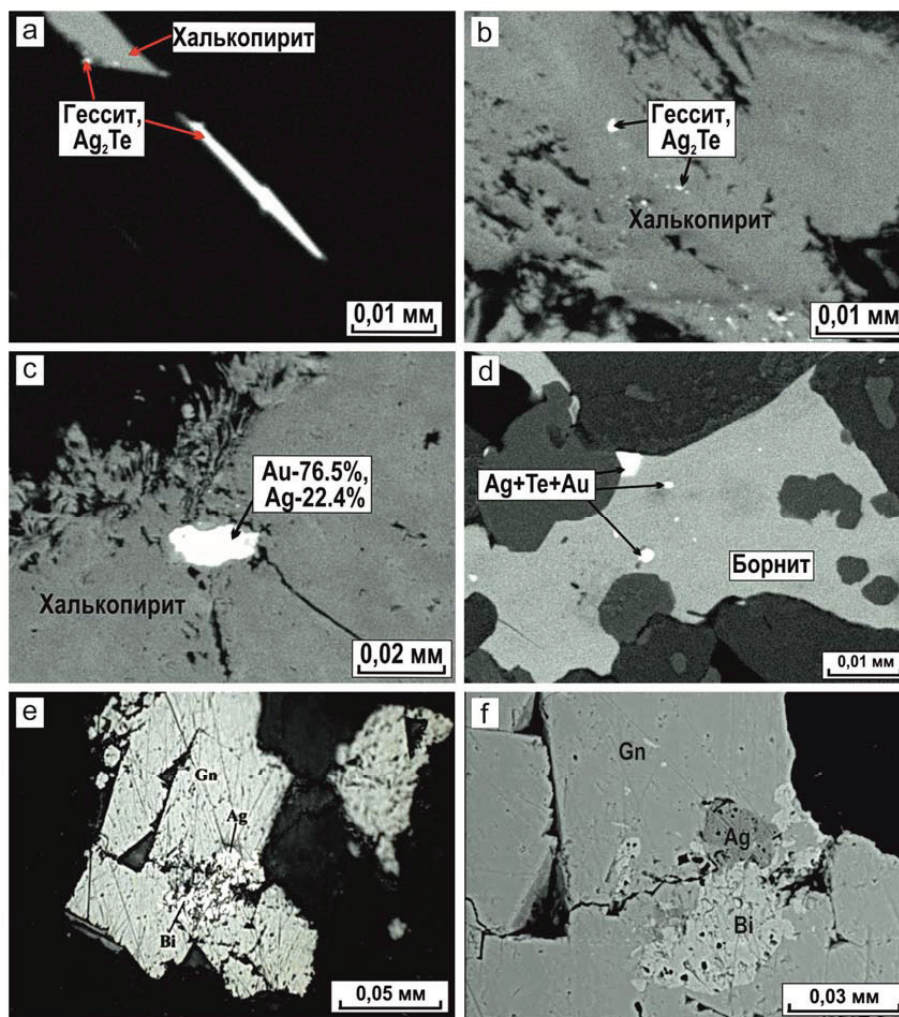


Рисунок 5 – Микрофотографии серебряной минерализации:  
 а – выделения гессита ( $Ag_2Te$ ) и халькопирита. Изображение обратно рассеянных электронов (BSE);  
 б – мелкие включения гессита в халькопирите (BSE); в – выделение электрума овальной формы в халькопирите (BSE); д – выделения фаз серебра с теллурием и золотом в борните (BSE);  
 е, ф – сростание самородного серебра с самородным висмутом в галените (Gn);  
 е – отраженный свет; ф – (BSE)

Таблица 2 – Результаты анализа СЭМ серебряных минералов и висмута (мас. %) [11]

№ п/п	Минерал	Ag	Au	Cu	Bi	Hg	Сумма	Формула
1	Электрум	35,4	62,71	1,89			100	$Au_{0,47}Ag_{0,49}Cu_{0,04}$
2	Электрум	34,61	65,39				100	$Au_{0,51}Ag_{0,49}$
3	Электрум	38,54	61,46				100	$Au_{0,47}Ag_{0,53}$
4	Электрум	33,07	63,57	2,67			99,31	$Au_{0,48}Ag_{0,46}Cu_{0,06}$
5	Электрум	29,81	70,19				100	$Au_{0,56}Ag_{0,44}$
6	Серебро самородное	93,64	5,09			2,07	100,8	$Ag_{0,96}Au_{0,03}Hg_{0,01}$
7	Висмут самородный				99,56		99,56	$Bi_{1,0}$

В первую очередь на месторождении развито самородное серебро. Оно находится в виде включений в сульфидах – халькопирите, борните, галените и др. Также оно образует сростки с борнитом, самородным висмутом, отдельные включения серебра находятся в нерудном минерале (рисунки 4, 5). Размеры отдельных зерен составляют от 1 до 50 микрон. По форме серебро бывает изометричным, вытянутым или неправильной формы. В составе серебра может присутствовать примесь золота и ртути (таблица 2).

Серебро совместно с самородным висмутом образует включения в галените (рисунок 5, е, ф). Размер выделений серебра – до 8 мкм.

Серебро довольно часто образует минеральную форму с самородным золотом – электрум (рисунок 5, с). Так же как и самородное серебро, электрум выделяется в виде включений в сульфидах. Размеры электрума достигают первые десятки микрон, по форме он более изометричен, чем самородное серебро или теллуриды серебра. По данным СЭМ анализа содержание серебра в электруме составляет от 30 до 38 % (таблица 2). В электруме имеются незначительные примеси меди, иногда ртути.

Серебро на месторождении Бозымчак также присутствует в виде теллуридов серебра – гессита, который образует отдельные включения среди нерудных минералов, в пирите, халькопирите и борните (рисунок 5). Встречены отдельные мелкие минеральные вкрапления, имеющие сложный состав из 3-х элементов (18,7–62,9 % Ag; 12,3–38,9 % Te; 0–23,7 % Au). Иногда серебро ассоциирует с теллуридами висмута – тетрадимитом и теллуrowисмутитом. Во включениях в халькопирите гессит срастается с виттихенитом, серебристым золотом и самородным висмутом, в пирите – с халькопиритом, сфалеритом и содержит включения галенита и самородного висмута. Тетрадимит обнаружен в виде включения в халькопирите, при этом окаймлен виттихенитом. Размер сечений выделений теллуридов варьирует от 3 до 50 мкм. В составе тетрадимита наблюдается небольшая примесь селена, состав гессита незначительно варьирует (таблица 3).

Предположительно можно выделить две генерации серебряной минерализации. Ранние – проявлены в виде изометричных включений в борните, поздние – выполняют трещинные структуры в борните и халькопирите. Нередко наблюдается приуроченность поздней генерации к зонам развития ковеллиновых замещений борнита.

Серебросодержащие фазы с помощью СЭМ были зафиксированы в минералах зоны окисления. Такие фазы обнаружены в малахите, который образовался в результате разложения и преобразования первичных медных минералов. При этом серебро, содержавшееся в сульфидах, осталось в малахите в виде включений. Часть такого серебра псевдоморфно замещается кераргиритом ( $\text{AgCl}$ ), который является гипергенным минералом зон окисления.

Для определения форм нахождения серебра в рудах были проведены технологические исследования с помощью фазового анализа серебра в руде. В таблице 4 приведены результаты исследований скарных руд гранат-пироксен-волластонитового состава участка Центральный по комбинированной обогатительно-гидрометаллургической технологии. Проба была отобрана в рассечке № 2 штольни № 6 Центрального участка. Результаты фазового анализа показали, что подавляющая часть серебра (62,43 %) находится в тонкодисперсном виде и заключено в сульфидах. Меньшая часть серебряных минералов имеет более крупные размеры и доступна микроскопическому наблюдению. Данное обстоятельство учитывается при разработке технологической схемы обогащения руд. Серебро хорошо поддается флотационному обогащению, его содержания во флотационном концентрате составляют от 300 до 500 г/т, что увеличивает рентабельность производства.

Минералогические исследования показали тесные ассоциации минералов серебра с минералами меди. Это отразилось в высоких значениях коэффициентов корреляции серебра с медью, а также с золотом (таблица 5). Наблюдаемые тесные парагенетические ассоциации минералов серебра с сульфидами меди и высокие коэффициенты корреляции с медью и золотом говорят об их совместном образовании в стадию сульфидизации.

Таблица 3 – Результаты анализа СЭМ теллуридов (мас. %) [11]

№ п/п	Минерал	S	Cu	Se	Bi	Te	Ag	Сумма	Формула
1	Тетрадимит	4,13	0,68	1,7	55,31	38,18		100	$Bi_{1,77}Te_{2,1}(S_{0,86}Se_{0,14})_{1,0}$
2	Гессит		1,02			37,06	61,42	99,49	$Ag_{1,96}Te$
3	Гессит		1,7			36,47	61,83	100	$Ag_{2,01}Te$

Примечание. Формула тетрадимита рассчитана на сумму анионов  $(Te+S+Se)/3$ , гессита – на  $Te_1$ . СЭМ.

Таблица 4 – Результаты фазового анализа серебра скарновых руд Центрального участка [12]

№ п/п	Форма нахождения серебра	Содержание Ag	
		г/г	отн., %
1	Ag свободное:		
	- с чистой поверхностью	0,25	2,65
	- покрытое окисными пленками	0,20	2,12
2	Ag в сростках:		
	- в открытых сростках (цианируемое)	0,4	4,23
	- покрытое окисными пленками и заключенное в кислоторастворимых минералах	1,9	20,11
3	Ag тонкодисперсное:		
	- заключенное в сульфидах	5,9	62,43
	- ассоциированное с породообразующими минералами (в т. ч. в силикатах)	0,8	8,46
	Исходное содержание	9,45	100,0

Таблица 5 – Корреляция серебра с медью и золотом в серпентинитовых рудах месторождения Бозымчак

Участки	Ag-Cu	Ag-Au	Au-Cu	К-во проб
Юго-Западный	0,96	0,62	0,61	111
Центральный	0,80	0,73	0,68	700
Восточный	0,84	0,63	0,59	1106
Даван	0,79	0,65	0,64	2026
Ср. взвеш.	<b>0,81</b>	<b>0,66</b>	<b>0,63</b>	



**Заключение.** Исследование минералов серебра на месторождении Бозымчак показало малое количество разновидностей. Изучение аншлифов в отраженном свете обычным и сканирующим электронным микроскопом выявили только самородное серебро, электрум, гессит.

Фазовый анализ форм нахождения серебра показал, что подавляющая часть серебра (62,4 %) находится в виде тонкодисперсных включений в сульфидах – в халькопирите и борните, реже в галените, пирите и др.

Незначительная часть серебра находится в минералах зоны окисления – в малахите, виттихените, образованных в результате замещения медных минералов (халькопирита, борнита и др.). Здесь же в окисленных рудах был встречен кераргирит (AgCl), вероятно как продукт замещения самородного серебра.

Высокие значения корреляции серебра с золотом и медью, наблюдаемые тесные парагенетические ассоциации с сульфидами говорят об их совместном формировании как в пространстве, так и во времени в стадию сульфидизации. Таким образом, наличие сульфидной медной минерализации, хорошо наблюдаемой визуально, является прямым поисковым признаком золотой и серебряной минерализации, наблюдаемой только под микроскопом.

Поступила: 14.10.22; рецензирована: 28.10.22; принята: 31.10.22.

#### *Литература*

1. *Никоноров В.В.* Рудные месторождения Кыргызстана / В.В. Никоноров. Бишкек, 2009. 482 с.
2. *Сатыкеев Д.С.* Скарны месторождения Бозымчак и особенности распределения в них золота: дис. ... канд. геол.-мин. наук / Д.С. Сатыкеев. Фрунзе, 1968. 235 с.
3. *Дженчураева Р.Д.* Скарны Срединного Тянь-Шаня / Р.Д. Дженчураева. Фрунзе: Илим, 1983. 308 с.
4. *Альпиев Е.А.* Исследования вещественного состава руд Бозымчакского золотомедного месторождения как важных технолого-минералогических критериев для прогнозирования однотипных скарновых объектов в пределах Чаткальской металлогенической области / Е.А. Альпиев // Горно-геологический журнал. Житикара, 2010. № 3–4 (23–24). С. 34–44.
5. *Альпиев Е.А.* Новые данные по минералогическому составу серпентинитовых руд медноскарнового месторождения Бозымчак / Е.А. Альпиев, М.Е. Альпиев // Горно-геологический журнал. 2015. № 3–4 (43–44). С. 5–18.
6. *Пак Н.Т.* Модель формирования золото-медного скарнового месторождения Бозымчак (Кыргызстан) / Н.Т. Пак, Е.А. Ивлева, Е.А. Альпиев, М.Е. Альпиев // Проблемы геологии и расширение минерально-сырьевой базы стран Евразии: матер. междунауч. конф. Алматы, 28–29 ноября 2019 г. Алматы, 2019. С. 201–209.
7. *Ивлева Е.А.* Региональные предпосылки размещения золото-медного оруденения в Гава-Сумсарском рудном районе / Е.А. Ивлева, Н.Т. Пак, Е.А. Альпиев // Известия НАН КР. 2019. № 3. С. 113–120.
8. *Bo Zu.* Multiple episodes of Late Paleozoic Cu-Au mineralization in the Chatkal-Kurama terrane: New constraints from the Kuru-Tegerek and Bozymchak skarn deposits, Kyrgyzstan / Bo Zu, Reimar Seltmann, Chunji Xue, Tao Wang, Alla Dolgoplova, Chao Li, Limin Zhou, Nikolay Pak, Elena Ivleva, Mingchun Chai, Xiaobo Zhao // Ore Geology Reviews. Vol. 113. October 2019. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103077.
9. *Abzalov M.* The geology of the Bozymchak Cu-Au skarn deposit, Tien Shan belt, Central Asia: emphasis on the geochemical characteristics of the granitoids / M. Abzalov, R. Djenchuraeva, Ye. Alpiyev, S. Abzalov // Applied Earth Science. 2019. 18 p. DOI: 10.1080/25726838.2019.1634897.
10. *Бобракова А.А.* Проведение технологических исследований обогатимости пяти типов руд месторождения Бозымчак / А.А. Бобракова, А.В. Купцова // РИВС. СПб., 2016. С. 201.
11. *Глотова Е.В.* Технологические исследования золото-медной пробы руды месторождения Бозымчак. Этап 1–2. Синтер-Казахстан / Е.В. Глотова, В.Ф. Дробышев. Чита, 2015. 67 с.
12. *Иванов Г.И.* Разработка технологии переработки золотосодержащих руд месторождения Бозымчак с использованием обогатительных и гидрометаллургических методов / Г.И. Иванов, Л.Б. Кушакова и др. Усть-Каменогорск, 2013. 136 с.