УДК 549, 553.08 DOI: 10.35597/2313-545X-2019-5-2-57-68

МИНЕРАЛОГИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА МУРТЫКТЫ, ЮЖНЫЙ УРАЛ

Ю.А. Падучина[1], Н.С. Чухарева[2], К.А. Новоселов[1], Е.Е. Паленова[1], Е.В. Белогуб[1], И.А. Блинов[1], Д.А. Артемьев[1], М.А. Рассомахин[1]

[1] Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; padushina@mail.ru

[2]Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, ул. 8 Июля 10, г. Миасс, Челябинская обл., 456316 Россия

PRECIOUS METAL MINERALOGY OF THE MURTYKTY GOLD DEPOSIT, SOUTH URALS

Yu.A. Paduchina[1], N.S. Chukhareva[2], K.A. Novoselov[1], E.E. Palenova[1], E.V. Belogub[1], I.A. Blinov[1], D.A. Artemyev[1], M.A. Rassomakhin[1]

[1]Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; padushina@mail.ru

[2]South Ural State University, Miass branch, ul. 8 Iyulya 10, Miass, Chelyabinsk oblast, 456316 Russia

В статье рассмотрена минералогия руд месторождения Муртыкты на Южном Урале, основное внимание уделено формам нахождения благородных металлов. Руды представлены пирит-содержащими кварц-хлоритовыми (±серицит, ±карбонат ряда доломит-анкерит) сланцами со значительно варьирующими соотношениями между породообразующими минералами. Основным рудным минералом является пирит, второстепенными – сфалерит и галенит. В подчиненном количестве встречается халькопирит, редкие минералы – пирротин, арсенопирит, алтаит, колорадоит, гессит, петцит, калаверит, волынскит, раклиджит, золото. Состав самородного золота варьирует от высокопробного до высокосеребристого, примесь серебра составляет от 6.11 до 35.32 мас. %. Значительная часть Au и Ag находится в теллуридной форме, представленной гесситом Ag_2Te, петцитом Ag_3AuTe_2, калаверитом $AuTe_2$ и волынскитом $AgBiTe_2$. Упорность сульфидных руд связана с разнообразием форм нахождения благородных металлов.

Илл. 8. Табл. 6. Библ. 15.

Ключевые слова: минералы благородных металлов, золото, теллуриды, месторождение Муртыкты, Южный Урал.

Ore mineralogy of the Murtykty gold deposit is presented in the paper and main attention is paid to the mode of occurrence of precious metals. Ores are pyrite-bearing quartz-chlorite (±sericite, ±carbonate of the dolomite-ankerite series) metasomatites with variable ratios between rock-forming minerals. Pyrite is the major sulfide; sphalerite, galena and chalcopyrite are secondary in abundance. Rare minerals include pyrrhotite, arsenopyrite, altaite, coloradoite, hessite, petzite, calaverite, volynskite, rucklidgeite, and native gold. The Ag content of native gold ranges from 6.11 to 35.32 wt. %. Significant amount of Au and Ag occurs in a telluride form: hessite Ag_2Te, petzite Ag_3AuTe_2, calaverite $AuTe_2$, and volynskite $AgBiTe_2$. The refractory features of sulfide ores are caused by diverse modes of occurrences of precious metal.

Figures 8. Tables 6. References 15.

Key words: minerals of precious metals, gold, tellurides, Murtykty deposit, South Urals.

Введение

На сегодняшний день месторождение Муртыкты является одним из приоритетных по разведанным запасам золота в Республике Башкортостан. Оно расположено в Учалинском районе, в 25 км к северо-востоку от г. Учалы и одноименного гигантского колчеданного месторождения. Месторождение известно с 1890 г., в разные годы отрабатывалось старательским способом с поверхности и изучалось разными геологическими коллективами (Макарова, 2013). В настоящий момент Башкирская золотодобывающая компания ведет доизучение месторождения с попутной добычей руд. При разработке технологической схемы установлено, что для руд характерна пространственная изменчивость и они являются упорными. Отношение $Au_{цн}/Au_{общ.}$ ($Au_{цн}$– доля золота, извлекаемого при цианировании), которое можно рассматривать как критерий упорности руд, составляет примерно 0.5. Как известно, основная причина упорности золотых руд заключается в их вещественном, прежде всего, минералогическом составе (Мостович, 1923; Yannopoulos, 1991; Chryssoulis, McMullen, 2016). В этой связи в статье детально рассмотрена минералогия руд месторождения Муртыкты, и основное внимание уделено форме нахождения благородных металлов.

Краткая характеристика геологического строения

Месторождение Муртыкты расположено в северо-восточной части Магнитогорского мегасинклинория, в зоне Тунгатаровского разлома (рис. 1). Региональная структурная позиция месторождения определяется приуроченностью к узлам пересечения разломов, в которых контролирующие золото структурные узлы включают взбросо-надвиговые нарушения северо-восточного простирания. Месторождение Муртыкты относится к полигенно-полихронному вулканогенно-осадочно-гидротермальному генетическому типу (Знаменский, 2010).

Рудовмещающими на месторождении являются вулканогенно-осадочные породы ирендыкской и карамалыташской свит (D_2) (Сазонов и др., 1999; Novoselov, Belogub, 2005; Серавкин и др., 2013), которые были сформированы в островодужную стадию развития региона. Золотое оруденение локализовано в зоне интенсивного рассланцевания, в пределах которой породы сильно хлоритизированы, окварцованы, серицитизированы, насыщены пиритом и карбонатизированы (Салихов и др., 2003). Для месторождения характерно пространственное совмещение золотоносной пиритовой минерализации, сингенетичной вмещающим породам, и эпигенетичного прожилково-вкрапленного сульфидного и жильно-прожилкового кварц-сульфидного оруденения позднепалеозойского возраста (Знаменский, 2010).

Сланцеватость и основные разрывные нарушения, преимущественно, субвертикальные, имеют субмеридиональное простирание (рис. 2). Сланцеватость согласна с направлением зоны Главного Уральского разлома. На месторождении выделены три рудные зоны: Западная (включая участок Ик-Давлят), Промежуточная и Восточная. Запасы категории $C_1 + C_2$ оцениваются в 4.372 млн т руды, золота – 27.854 т, серебра – 52.9 т, забалансовые запасы – 524 тыс. т руды, 2 т золота и 4 т серебра. Также на месторождении были подсчитаны запасы попутных компонентов по категории C_2 – цинка, серы, кадмия, индия, теллура (http://www.mineral.ru/News/45147.html).

Материалы и методы исследования

Штуфные и точечные пробы для изучения отбирались из керна скважин, разведочных борозд и карьеров Западной и Промежуточной зон. Также были использованы дубликаты бороздовых и керновых проб, из которых извлекался тяжелый концентрат.

Все исследования проведены в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс). Оптические исследования проводились с помощью поляризационного микроскопа AxioScope A.1 с цифровой приставкой. Для определения химического состава минералов использовался растровый электронный микроскоп Tescan Vega3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act (аналитики И.А. Блинов, М.А. Рассомахин). Химический состав пирита и сфалерита (40 анализов) был также оценен методом масс-спектрометрии (Agilent 7700x) с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией вещества (New Wave Research UP-213), программным комплексом MassHunter (аналитик Д.А. Артемьев).

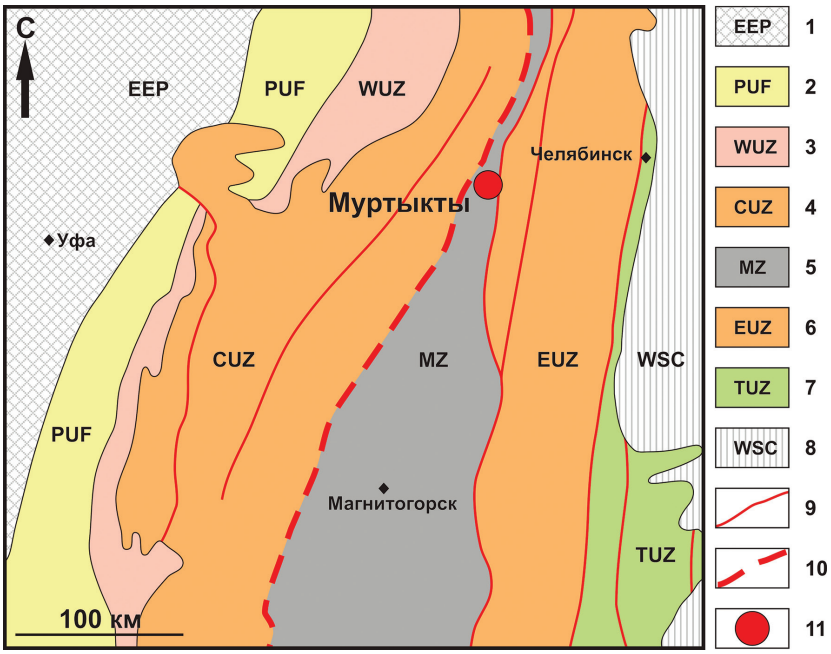

Рис. 1. Положение месторождения Муртыкты на тектонической карте Южного Урала (по Геологическая..., 2001, с упрощениями).

1 – Восточно-Европейская платформа; 2 – Предуральский прогиб; 3 – Западно-Уральская зона; 4 – Центрально-Уральская зона; 5 – Магнитогорская зона; 6 – Восточно-Уральская зона; 7 – Зауральская зона; 8 – Западно-Сибирская плита; 9 – региональные разломы; 10 – Главный Уральский разлом; 11 – месторождение Муртыкты.

Fig. 1. Position of the Murtykty deposit in tectonic map of the Southern Urals (modified after Geological…, 2001).

1 – East European platform; 2 – Pre-Uralian foredeep; 3 – West Uralian zone; 4 – Central Uralian zone; 5 – Magnitogorsk zone; 6 – East Uralian zone; 7 – Trans-Uralian zone; 8 – West Siberian plate; 9 – regional faults; 10 – Main Uralian fault; 11 – Murtykty deposit.

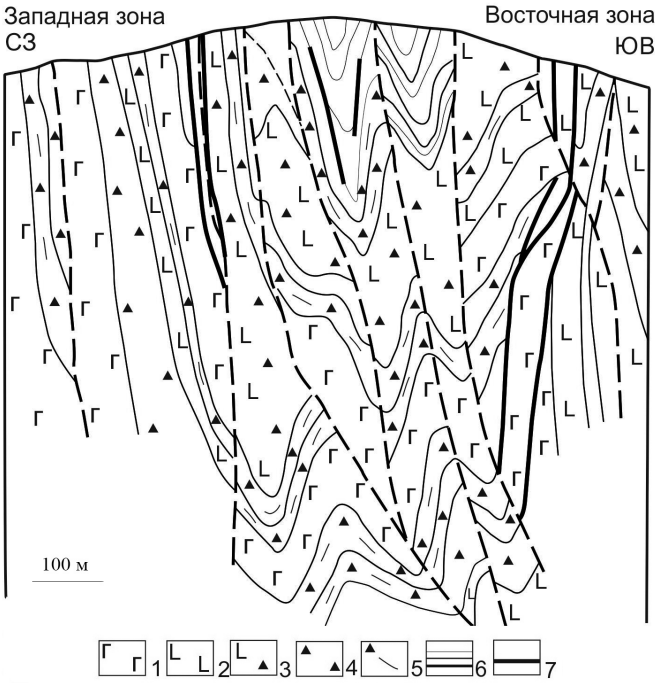

Рис. 2. Геологический разрез месторождения Муртыкты (Е.С. Знаменский, 1992, с упрощениями).

1 – долериты и долеритовые порфириты; 2 – базальтовые и андезибазальтовые порфириты; 3 – туфы и туффиты основного состава; 4 – туфогравелиты; 5 – переслаивание кремнистых сланцев, туфопесчаников и туфогравелитов; 6 – кремнистые сланцы с прослоями вулканомиктовых пород; 7 – зоны оруденения.

Fig. 2. Cross-section of the Murtykty deposit, simplified after E.S. Znamensky (1992).

1 – dolerites and dolerite porphyrites; 2 – porphyry basalts and basaltic andesites, 3 – mafic tuffs and tuffites; 4 – tuff gravelites; 5 – alternation of siliceous shales, tuff sandstones and tuff gravelites; 6 – siliceous shales with interlayers of volcanomictic rocks; 7 – mineralized zones.

Результаты работ

Минералы Au и Ag. Золотоносная минерализация в пределах рудного поля охватывает сильно измененные вулканогенно-осадочные породы различного состава. Вмещающие породы Западной зоны месторождения Муртыкты представлены пирит- и карбонатсодержащими сланцами кварц-серицит-хлоритового, хлорит-серицитового и серицит-хлоритового состава, образованными по вулканитам основного состава, вулканомиктовым песчаникам и алевропелитам. Также в разрезе присутствуют кремнистые пелитолиты. Среди вмещающих пород Промежуточной зоны преобладают пиритсодержащие хлоритовые сланцы с подчиненным количеством кварца, серицита и карбонатов, образованные по базальтоидам и вулканомиктовым осадкам (Белогуб, 2018ф). Во всех изученных пробах основными минералами являются кварц, серицит, хлорит, подчиненное значение имеют карбонаты, среди которых преобладают промежуточные члены ряда доломит-анкерит. Слоистые силикаты представлены хлоритом и серицитом. В рудах Западной Зоны хлорит имеет меньшее распространение по сравнению с Промежуточной зоной.

Главным рудным минералом является пирит, подчиненное значение имеют сфалерит, галенит и халькопирит (табл. 1). Текстура руд зависит от вмещающей матрицы. В сланцах преобладает вкрапленная рудная минерализация различной интенсивности – от рассеянной до густой. Сульфидная вкрапленность может быть как равномерной, так и линзовидно-полосчатой, шлировидной. Участками наблюдаются массивные руды. В рудах Западной зоны, где высока доля кремнистых пород, сульфидные агрегаты часто формируют жильную, прожилковую, гнездовую текстуру (рис. 3). В участках скопления прожилков сульфиды играют роль цемента брекчии, связывая обломки кремнистых пелитолитов.

Минералы благородных металлов представлены самородным золотом и теллуридами золота и серебра.

Самородное золото представлено близизометричными зернами, реже – просечками. Оно находится в трещинах катаклаза и межзерновом пространстве пирита совместно с халькопиритом, галенитом, сфалеритом, теллуридами, реже блеклой рудой, а также в виде включений в пирите, сфалерите и галените (рис. 4). Размер зерен варьирует от субмикроскопического до ~500 мкм, преобладающий размер сечений 5–6 мкм.

Состав самородного золота варьирует. По классификации (Петровская, 1973) по содержанию Ag самородное золото варьирует от высокопробного до высокосеребристого (единичные анализы) (рис. 3). В целом по месторождению, среднеарифметическое содержание Au в минерале составляет 87.4 мас. %

Таблица 1

Минеральный состав руд Промежуточной и Западной зон месторождения Муртыкты

Table 1

Mineral composition of ores of the middle and western zone of the Murtykty deposit

	Главные		Второстепенные		Редкие
	Рудные	Нерудные	Рудные	Нерудные	Галенит, халькопирит, пирротин, теннантит, тетраэдрит, алтаит, гессит, петцит, золото, колорадоит, калаверит, волынскит, раклиджит, магнетит, гематит, гётит
Западная зона	Пирит	Кварц, мусковит, хлорит	Сфалерит, рутил	Доломит/анкерит, кальцит, сидерит	
Промежуточная зона					
5 рудное тело	Пирит, сфалерит	Хлорит, кварц	Галенит, халькопирит, рутил,	Мусковит, анкерит, кальцит	Арсенопирит, пирротин, гётит, золото, алтаит, петцит, гессит
7 рудное тело	Пирит, сфалерит, галенит	Хлорит, кварц, мусковит	Халькопирит, рутил	Сидерит, кальцит, доломит/анкерит	Пирротин, арсенопирит, золото, гессит, халькозин

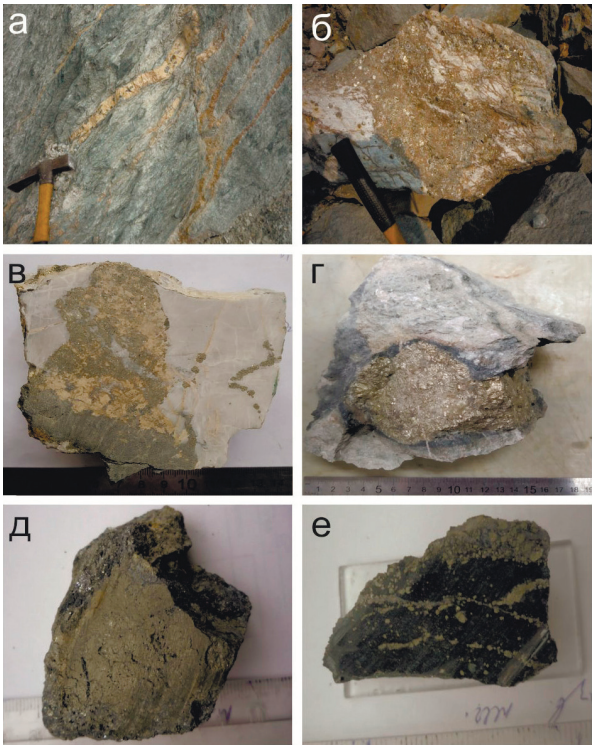

Рис. 3. Текстуры руд месторождения Муртыкты:

а, б – прожилковые руды в кварц-карбонатных породах; в – полиметаллическая минерализация в кремнистом метапелите; г – гнездо массивных сульфидов в жильной матрице; д – массивная полиметаллическая руда; е – полиметаллическая прожилковая минерализация в хлоритовых сланцах.

Fig. 3. Textures of the ores of the Murtykty deposit:

а, б – veined ores in quartz-carbonate rocks; в – polymetallic mineralization in siliceous metapelites; г – a pocket of massive sulfides in vein matrix; д – massive polymetallic ore; е – polymetallic vein mineralization in chlorite schists.

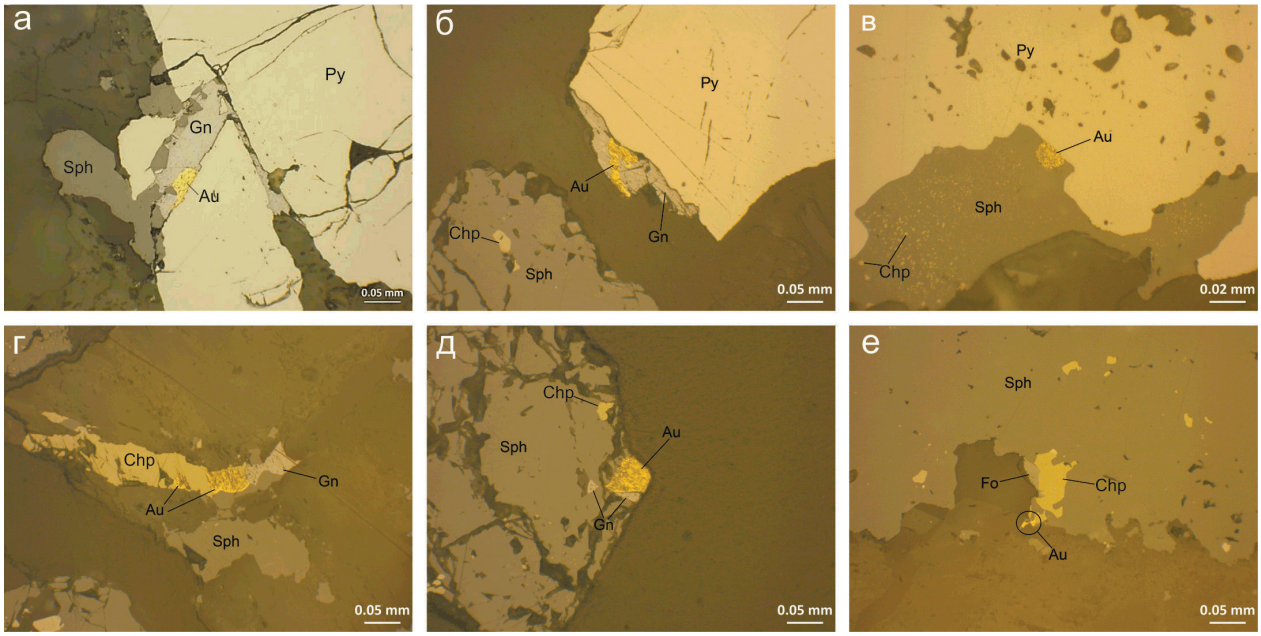

Рис. 4. Морфология золота месторождения Муртыкты:

а – сросток галенита (Gn) со сфалеритом (Sph) и включением золота (Au), выполняющий трещину в пирите (Py); б – сросток золота с галенитом на контакте пирита и нерудного минерала; в – включение золота на контакте сфалерита и пирита; г – сросток золота с халькопиритом (Chp), галенитом, сфалеритом в нерудной массе; д – сросток золота с галенитом на контакте сфалерита и кварца; е – включение золота в срастании с халькопиритом и блеклой рудой (Fo) на контакте сфалерита и нерудной матрицы. Отраженный свет.

Fig. 4. Morphology of native gold of the Murtykty deposit:

а – intergrowth of galena (Gn) and sphalerite (Sph) with inclusion of gold (Au) in fractured pyrite (Py); б – intergrowth of gold and galena at the contact of pyrite with gangue mineral; в – inclusion of gold at the contact of sphalerite and pyrite; г – intergrowth of gold with chalcopyrite (Chp), galena, sphalerite in gangue matrix; д – intergrowth of gold and galena at the contact of sphalerite and quartz; е – inclusion of gold intergrown with chalcopyrite and fahlore (Fo) at the contact sphalerite and gangue matrix. Reflected light.

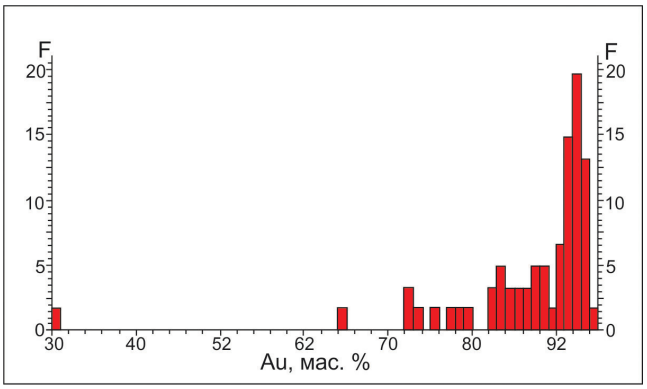

Рис. 5. Гистограмма содержаний Au в самородном золоте (N = 61).

Fig. 5. Histogram of distribution of Au contents of native gold (N = 61).

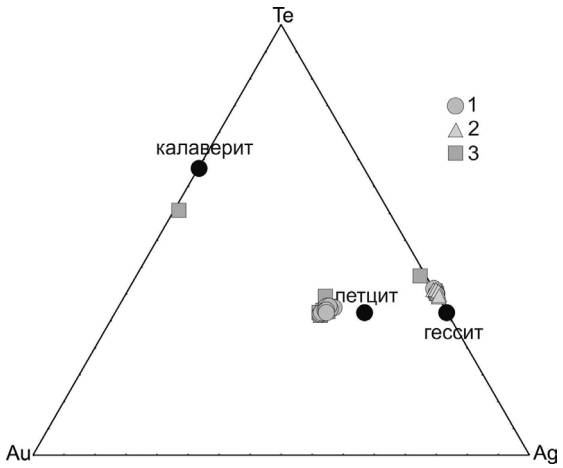

Рис. 6. Состав теллуридов Ag, Au (мас. %) Западной и Промежуточной зон месторождения Муртыкты: 1 – 5 рудное тело, 2 – 7 рудное тело, 3 – Западная зона.

Fig. 6. Composition of Ag, Au (wt. %) tellurides of Zapadnaya (*Western*) and Promezhutochnaya (*Intermediate*) zones of the Murtykty deposit: 1 – 5 ore solid, 2 – 7 ore solid, 3 – Western zone.

при стандартном отклонении 6.9, медианное значение 90.8 (рис. 5). Наиболее высокопробным является золото рудного тела 5 Промежуточной зоны: максимальное содержание Ag в нем 20.04 мас. %. Золото рудного тела 7 отличается наиболее высокими концентрациями Ag – 35.32 мас. %.

Теллуридная минерализация представлена гесситом Ag_2Te, петцитом Ag_3AuTe_2, калаверитом $AuTe_2$ и волынскитом $AgBiTe_2$ (табл. 2, рис. 6.). Кроме теллуридов Au и Ag в рудах диагностированы также алтаит PbTe, колорадоит HgTe и раклиджит $PbBi_2Te_4$. Последний содержит существенную примесь Ag (табл. 2, ан. 21, 22). Теллуриды образуют тонкие ангедральные, изометричные включения в пирите, реже – галените или сфалерите. Также они распространены в межзерновом пространстве и трещинах катаклаза пирита. Теллуриды образуют срастания между собой, а также с галенитом, сфалеритом, золотом, халькопиритом, блеклой рудой (рис. 7). Размер зерен теллуридов не превышает 100 мкм.

Химический состав пирита и сфалерита. Содержания Au в пирите руд Промежуточной зоны (табл. 3) составляют (средние по 24 анализам/максимальные, г/т) 7.3/59.4, Ag – 7.0/27.1. В мелкокристаллическом вкрапленном пирите распределение Au равномерное. В более крупнокристаллическом зональном пирите с пористой каймой пористая кайма обогащена Au по сравнению с однородным центром на порядок и более, но динамика изменения содержаний Au при абляции в конкретной точке показывает его равномерное распределение. Намечается положительная корреляция Au с As и Ag, а Ag – с Te (рис. 8а–г) и элементами полиметаллической ассоциации. Содержания Au в сфалерите Промежуточной зоны (табл. 4) составляют (среднее по 9 анализам/максимальное, г/т): Au – 33.3/152, Ag – 331/1360. Золото в сфалерите распределено неравномерно. Динамика абляции и положительная корреляция с Te указывает на то, что Au и Ag в сфалерите преимущественно входят в состав микро- и нановключений самородного золота и теллуридов.

Пирит из руд Западной зоны (табл. 5) отличается более низкими содержаниями (средние по 16 анализам/максимальные, г/т) Au – 1.6/6.6 и Ag – 3.2/24.7. Для Au в пирите характерна слабая положительная корреляция с As и Te, а Ag обнаруживает положительную корреляцию с Pb (рис. 8д–з). Золото в пирите распределено неравномерно. Динамика абляции свидетельствует о том, что в некоторых зернах, по-видимому, присутствуют включения самородного золота, в то время как в других золото равномерно распределено в объеме зерна. Сфалерит Западной зоны (табл. 6) содержит (средние по 16 анализам/максимальные, г/т) 0.5/4.7 Au и 2.7/4.4 Ag. В случае повышенных концентраций Au и Ag динамика абляции говорит о присутствии включений их собственных минералов. Поведение Au и Ag в пирите и сфалерите Западной и Промежуточной зон месторождения Муртыкты сходно.

Таблица 2

Table 2

Химический состав теллуридов Au и Ag месторождения Муртыкты (мас. %)

Chemical composition of Au-Ag tellurides of the Murtykty deposit (wt. %)

№	Анализ	Ag	Te	Au	Cu	Fe	Pb	Bi	Zn	S	Сумма	Формула
Западная зона												
1	17407c	41.88	33.01	25.11	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_3Au_{0.99}Te_{2.00}$
2	17406b	41.02	32.45	25.55	–	–	–	–	–	–	99.03	$Ag_{2.99}Au_{1.02}Te_{2.00}$
3	18445d	42.30	34.80	22.90	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{2.88}Au_{0.85}Te_{2.00}$
4	18507m	40.79	33.00	25.68	–	–	–	–	–	–	99.47	$Ag_{2.92}Au_{1.01}Te_{2.00}$
5	19169g	42.12	33.05	23.78	–	1.05	–	–	–	–	100.00	$Ag_{3.02}(Au_{0.93}Fe_{0.15})_{1.08}Te_{2.00}$
6	19169d	42.34	33.52	24.14	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{2.99}Au_{0.93}Te_{2.00}$
7	19225c	41.76	38.20	23.47	–	–	–	–	–	–	99.15	$Ag_{2.91}Au_{0.90}Te_{2.00}$
8	19225g	41.56	33.92	25.07	–	–	–	–	–	–	100.77	$Ag_{2.88}Au_{0.95}Te_{2.00}$
9	19225k	41.54	34.14	25.26	–	–	–	–	–	–	100.84	$Ag_{2.89}Au_{0.96}Te_{2.00}$
10	19225p	41.38	34.04	25.44	–	–	–	–	–	–	100.48	$Ag_{2.91}Au_{0.98}Te_{2.00}$
11	19225t	41.55	33.66	25.49	–	–	–	–	–	–	100.82	$Ag_{2.91}Au_{0.98}Te_{2.00}$
12	19225a'	41.77	33.78	23.90	–	–	–	–	–	–	99.28	$Ag_{2.94}Au_{0.92}Te_{2.00}$
13	17407d	61.92	37.36	–	0.72	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.96}Cu_{0.04}Te_{1.00}$
14	17406a	62.71	38.10	–	–	–	–	–	–	–	100.80	$Ag_{1.95}Te_{1.00}$
15	19169f	56.44	41.26	1.40	–	0.90	–	–	–	–	100.00	$(Ag_{1.62}Fe_{0.05}Au_{0.02})_{1.69}Te_{1.00}$
16	19225b	62.20	37.94	–	–-	–	–	–	–	–	100.14	$Ag_{1.94}Te_{1.00}$
17	19225h	62.67	38.14	–	–	–	–	–	–	–	100.81	$Ag_{1.94}Te_{1.00}$
18	19225j	62.32	37.82	–	–	–	–	–	–	–	100.14	$Ag_{1.95}Te_{1.00}$
19	19225q	61.73	38.20	–	–	–	–	–	–	–	99.93	$Ag_{1.91}Te_{1.00}$
20	19169n	0.57	57.35	42.08	–	–	–	–	–	–	100.00	$(Au_{0.95}Ag_{0.02})_{0.97}Te_{2.00}$
21	19170b	19.45	46.33	–	–	–	–	34.22	–	–	100.00	$Ag_{0.99}Bi_{0.90}Te_{2.00}$
22	19169i	1.08	41.03	–	–	–	15.54	38.51	–	3.85	100.00	$(Pb_{0.68}Ag_{0.09})_{0.77}Bi_{1.67}(Te_{2.91}S_{1.09})_{4.00}$
23	19169b	1.36	43.79	–	2.17	–	16.39	33.01	3.27	–	100.00	$(Pb_{0.92}Bi_{0.53}Cu_{0.4}Ag_{0.15})_{2.00}$ $(Bi_{1.31}Zn_{0.58})_{1.89}Te_{4.00}$
Рудное тело 5												
24	19019a	42.29	34.93	23.16	–	–	–	–	–	–	100.39	$Ag_{2.86}Au_{0.86}Te_{2.00}$
25	19019c	40.94	32.78	25.48	–	–	–	–	–	–	99.20	$Ag_{2.95}Au_{1.01}Te_{2.00}$
26	19019r	43.20	34.36	22.19	–	–	–	–	–	–	99.73	$Ag_{2.97}Au_{0.84}Te_{2.00}$
27	19022b	41.38	33.31	25.31	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{2.94}Au_{0.98}Te_{2.00}$
28	19022k	41.81	34.64	23.54	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{2.86}Au_{0.88}Te_{2.00}$
29	18337e	41.44	33.72	24.09	–	–	–	–	–	–	99.25	$Ag_{2.91}Au_{0.93}Te_{2.00}$
30	18337b	42.48	33.98	22.94	–	–	–	–	–	–	99.40	$Ag_{2.96}Au_{0.87}Te_{2.00}$
31	18444h	41.96	34.27	22.83	–	–	–	–	–	–	99.06	$Ag_{2.90}Au_{0.86}Te_{2.00}$
32	18444b	41.93	33.73	24.04	–	–	–	–	–	–	99.70	$Ag_{2.94}Au_{0.92}Te_{2.00}$
33	19033a	42.34	33.13	24.44	–	–	–	–	–	–	99.92	$Ag_{3.02}Au_{0.96}Te_{2.00}$
34	19019d	62.67	37.80	–	–	–	–	–	–	–	100.46	$Ag_{1.96}Te_{1.00}$
35	19019p	62.02	37.47	–	–	–	–	–	–	–	99.50	$Ag_{1.96}Te_{1.00}$
36	19019q	61.62	39.03	–	–	–	–	–	–	–	100.65	$Ag_{1.87}Te_{1.00}$
37	18444a	62.43	37.57	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.97}Te_{1.00}$
38	18337c	62.34	37.43	–	–	–	–	–	–	–	99.77	$Ag_{1.97}Te_{1.00}$
Рудное тело 7												
39	19127f	62.02	37.98	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.93}Te_{1.00}$
40	19127c	62.16	37.84	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.94}Te_{1.00}$
41	19126p	62.45	37.55	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.97}Te_{1.00}$
42	19126l	61.16	38.62	–	–	–	–	–	–	–	99.78	$Ag_{1.87}Te_{1.00}$
43	19126f	62.24	36.76	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_2Te_{1.00}$
44	19126g	62.61	37.39	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.98}Te_{1.00}$
45	19126h	62.51	37.49	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.97}Te_{1.00}$
46	19127f	62.02	37.98	–	–	–	–	–	–	–	100.00	$Ag_{1.93}Te_{1.00}$
47	19126a	62.28	36.89	–	–	–	–	–	–	–	99.16	$Ag_2Te_{1.00}$

Примечание. Анализы 1–12, 24–33 – петцит, 21 – волынскит, 22, 23 – раклиджит, 13–19, 34–47 – гессит, 20 – калаверит. Формулы рассчитаны на один (гессит), два (петцит, калаверит, волынскит) и четыре (раклиджит) атома Te.

Note. Analyses 1–12, 24–33 – petzite, 21 – volynskite, 22, 23 – rucklidgeite, 13–19, 34–47 – hessite, 20 – calaverite. Formulas are recalculated to one (hessite), two (petzite, calaverite, volynskite), and four (rucklidgeite) Te atoms.

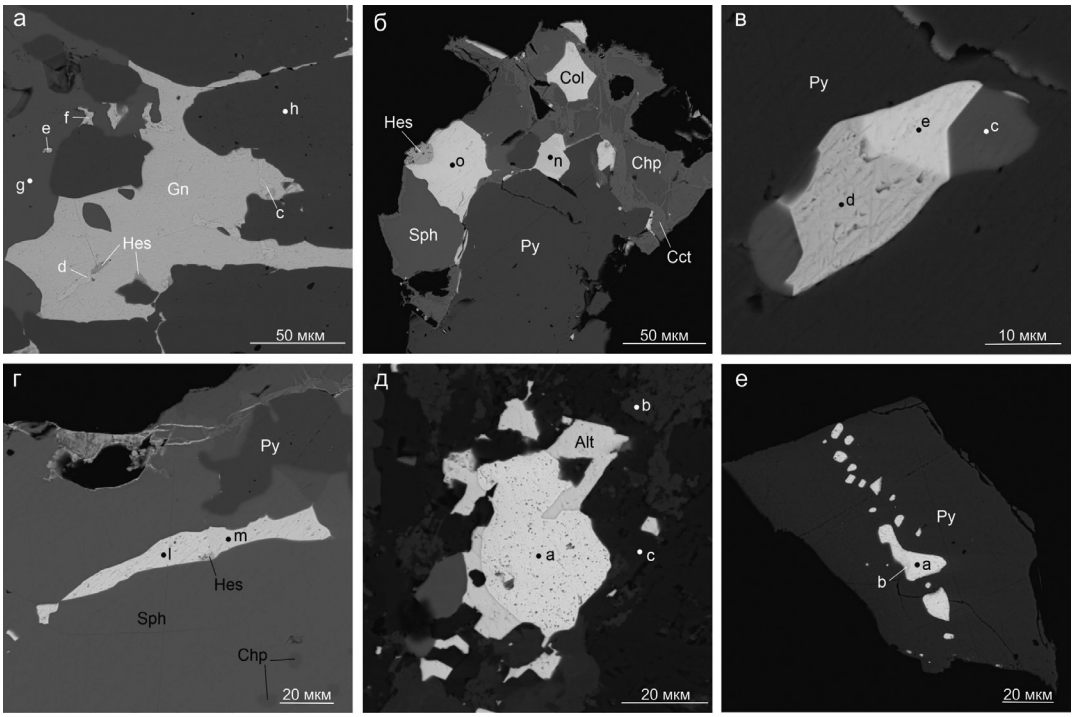

Рис. 7. Морфология теллуридов и золота Западной зоны:

а – включения гессита (Hes) и золота (c, d, e, f) в галените и сфалерите; б – сложное срастание сфалерита, пирита, халькопирита, халькозина (Cct), гессита, калаверита (n) и колорадоита (o); в – сложное срастание петцита (d), колорадоита (e) и теннантита (c) в пирите; г – сросток алтаита (l) с галенитом (m) и гесситом в сфалерите; д – золото (a)-алтаитовый (Alt) сросток в карбонатной (b, c) массе; е – включения алтаита (a) в пирите и алтаит в срастании с гесситом (b). BSE-фото. Условные обозначения см. также на рис. 2.

Fig. 7. Morphology of tellurides and native gold of Zapadnaya zone:

а – inclusions of hessite (Hes) and gold (c, d, e, f) in galena and sphalerite; б – complex intergrowth of sphalerite, pyrite, chalcopyrite, chalcocite (Cct), hessite (Hes), calaverite (n), and coloradoite (o); в – complex intergrowth of petzite (d), coloradoite (e), and tennantite (c) in pyrite; г – intergrowths of altaite (l) with galena (m) and hessite (Hes) in sphalerite; д – gold (a)-altaite (Alt) inclusions in carbonates (b, c); е – inclusions of altaite (a) in pyrite and altaite intergrown with hessite (b). BSE-images. For symbols, also see Fig. 2.

Обсуждение и выводы

Таким образом, минеральный состав руд Промежуточной и Западной зон немного различается, что может отражать зональность месторождения (латеральную и/или вертикальную). В рудах как Западной, так и Промежуточной зоны золото и серебро образуют собственные минералы (самородное золото и теллуриды). Кроме того, частично благородные металлы связаны с сульфидами. При этом для золота в пирите фиксируется устойчивая слабая связь с Au, для Ag – с Te. В сфалерите золото коррелирует с Ag и Te. В то же время корреляция Au и Ag как в пирите, так и в сфалерите ниже уровня значимости.

Для пирита месторождения Муртыкты, в целом, характерна неравномерная примесь As, проявленная как в масштабе месторождения, так и в масштабе зерна. Устойчивая ассоциация золота с мышьяковистым пиритом объясняется как присутствием в нем нановключений Au^0, так и структурной примесью Au^{+1} (Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014). В соответствии с исследованиями (Reich et al., 2005) молярное отношение Au/As позволяет предсказать форму «невидимого» золота в пирите. Если отношение Au/As > 0.02, то золото образует нановключения, в противном случае оно входит в структуру пирита. Используя эту закономерность, можно предположить, что пирит месторождения Муртыкты, помимо включений собственных минералов, содержит структурную примесь Au, т.к. содержания As в нем на три и более порядка превышают содержания Au. В сфалерите Au и Ag присутствуют преимущественно в форме включений самородного золота, электрума и теллуридов. Указанные закономерности подтверждаются динамикой изменения содержаний благородных металлов при абляции.

Таблица 3

Содержания некоторых элементов в пирите Промежуточной зоны (г/т) по данным ЛА-ИСП-МС

Table 3

Content of selected elements of pyrite from the Promezhutochnaya zone (ppm) according to LA-ISP-MS

№ п/п	Au	Ag	Cu	Zn	As	Se	Sb	Te	Hg	Pb	Bi
1	8.90	5.94	56.4	<3.7	3800	2.62	5.04	16.9	0.62	39.5	1.57
2	16.6	58.0	329	9.50	4370	4.60	3.44	61.5	<0.31	43.3	0.798
3	3.36	0.449	36.9	1.66	1515	6.19	2.02	18.9	<0.37	28.9	0.596
4	5.71	0.434	9.80	2.80	3520	4.60	2.28	11.5	<0.52	26.7	0.76
5	2.75	0.455	6.48	1.22	1387	4.61	1.77	16.2	<0.40	24.4	0.568
6	7.13	0.687	33.7	<2.70	3110	5.30	4.22	35.9	<1.60	68.9	0.79
7	3.91	2.40	28.3	<1.40	1136	4.91	1.76	26.7	<0.65	31.7	1.17
8	24.5	1.91	740	4.22	10400	2.92	3.37	19.7	<0.47	49.8	1.29
9	32.8	2.65	69.3	37.0	17000	1.72	5.64	11.1	<0.38	44.6	1.26
10	4.11	2.02	377	0.78	1563	3.29	2.78	15.2	<0.36	26.1	0.636
11	0.106	0.511	0.89	2.35	307	24.0	0.014	5.04	<0.53	0.98	<0.011
12	0.086	0.337	7.40	1.17	558	17.4	0.046	12.5	<0.59	5.03	<0.0074
13	6.18	27.1	1548	333	3910	39.0	45.7	900	1.09	4440	24.3
14	7.50	19.8	938	1930	2786	11.6	23.8	382	0.48	1450	8.81
15	0.292	0.276	36.2	<3.10	123	13.5	0.109	7.15	<1.30	5.49	0.146
16	0.002	0.001	<0.2	<1.10	477	24	0.017	2.71	<0.58	0.021	<0.014
17	0.655	0.708	292	7.27	253	16.1	0.521	42.5	<0.40	36.4	0.0287
18*	0.012	0.033	0.503	0.84	540	21.2	0.054	12.1	<0.57	8.5	<0.0062
19**	7.33	3.47	35	13.4	2312	<1.1	15.4	12.4	<1.20	189	3.67
20*	0.65	2.58	6.96	0.97	246	2.9	0.69	6.97	<0.55	110	0.63
21**	59.4	2.12	43.5	12.1	7730	7.3	17.1	55	<2.80	199	2.30
22**	22.8	20.8	28.1	2410	6030	4.57	5.93	34.9	0.88	99.4	2.47
23*	2.12	9.10	386	520	217	15	0.29	26.2	<0.85	22.7	0.192
24**	10.7	0.77	9.60	<3.90	1990	5.20	3.52	24.4	<2.50	50.1	1.02
Среднее	7.30	6.80	218.2	293.8	3136.7	10.5	6.10	73.2	0.80	291.7	2.70
Ст. откл.	8.90	13.2	383.2	701.4	3924.1	9.40	10.4	191.4	0.30	930.0	5.40

Примечание. * – центр зерна, ** – пористая кайма. Здесь и в табл. 4–6, ст. откл. – стандартное отклонение. Цветом выделены разные зерна. При расчете средних значений ураганные содержания золота ан. 21 исключены.

Note. * – grain center, ** – porous rim. Different grains are highlighted in color. Here and in Tables 4–6, ст. откл. – standard deviation. Anomalous Au content of analysis 21 is ignored from calculation of average values.

Таблица 4

Содержания некоторых элементов в сфалерите Промежуточной зоны (г/т) по данным ЛА-ИСП-МС

Table 4

Content of selected elements of sphalerite of the Promezhutochnaya zone (ppm) according to LA-ISP-MS

№ п/п	Au	Ag	Fe	Cu	As	Se	Sb	Te	Hg	Pb	Bi
1	0.137	1.09	1427	621	0.87	25.7	0.72	0.26	159	10.2	0.654
2	50.0	450	7000	409	45.6	21.6	2.33	280	126	24.8	2.03
3	152	1360	2560	289	3.57	47.2	3.96	850	141	15700	24.8
4	78.0	530	1132	385	2.26	25.9	1.85	546	195	18.3	1.12
5	1.27	530	34200	892	34.4	22.3	3.15	410	168	50.7	3.01
6	6.70	61.0	1890	770	3.20	18.2	2.88	41.0	150	25.6	1.63
7	0.127	1.88	2090	541	1.86	21.5	1.85	1.82	155	16.4	0.98
8	11.1	42.8	1340	680	1.92	21.4	1.95	75.0	155	67.0	1.50
9	0.135	2.08	1970	346	1.11	23.0	1.39	1.14	155	17.7	0.92
Среднее	33.3	331.0	5956.6	548.1	10.5	25.2	2.20	245.0	156.0	1770.1	4.10
Ст. откл.	52.3	451.9	10740.1	207.4	17.0	8.60	1.00	302.9	18.6	5223.8	7.80

Примечание. Ввиду небольшой выборки и значительных вариаций содержаний золота ураганные значения из расчета среднего не исключены.

Note. Because of low amount of analyses and significant variations in Au content, the anomalous Au values are not excluded from the average values.

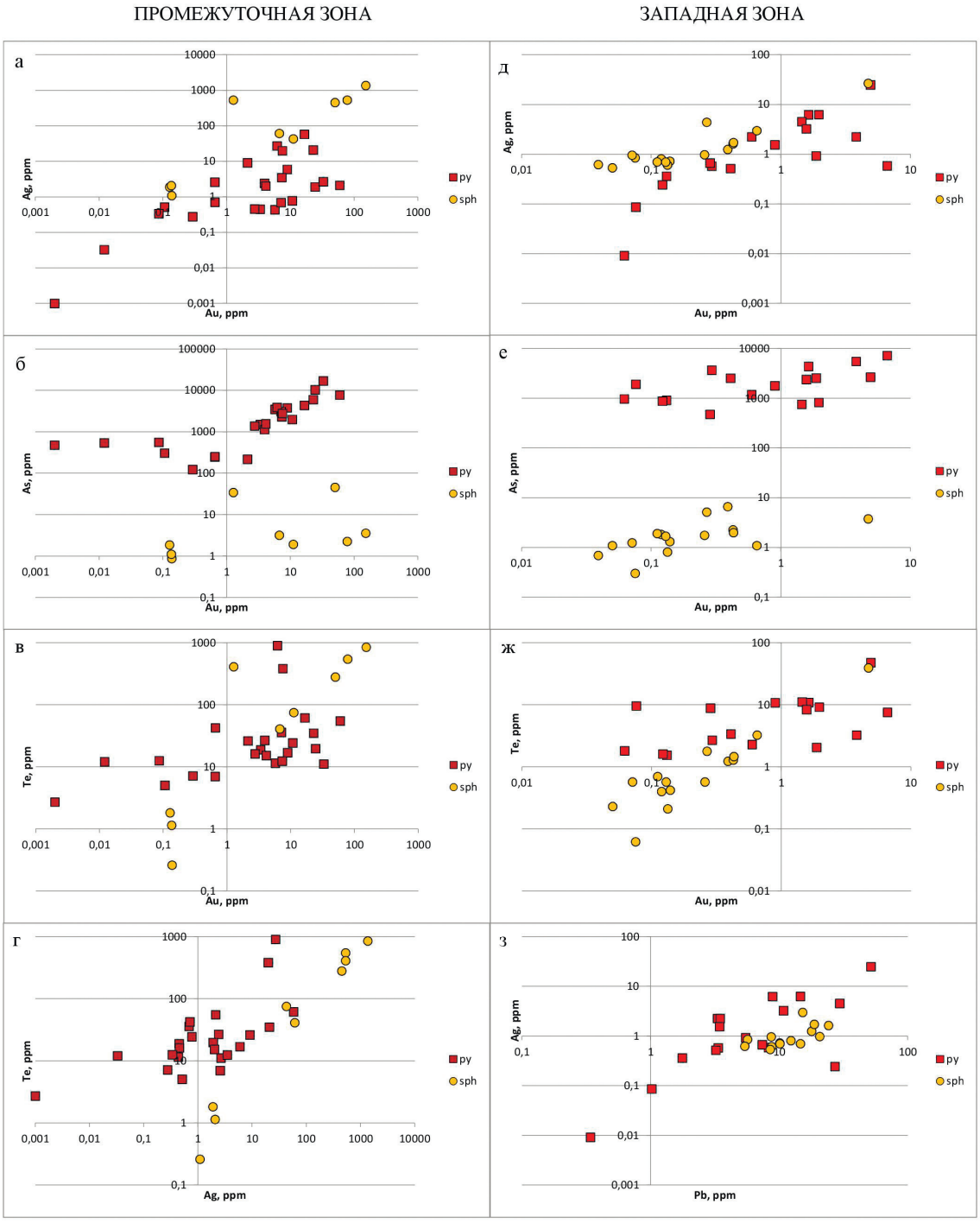

Рис. 8. Бинарные диаграммы состава руд Промежуточной (а–г) и Западной (д–з) рудных зон.

Fig. 8. Binary diagrams of ore composition of Promezhutochnaya (a–g) and Zapadnaya (d–W) ore zones.

В настоящий момент очевидно, что упорность сульфидных руд месторождения Муртыкты связана с большим разнообразием минеральных форм благородных металлов. Оптико-микроскопическая оценка отношения самородной и теллуридной форм золота и серебра в рудах позволяет предполагать существенную долю золота в упорной к цианированию теллуридной форме. Для серебра же эта доля может быть преобладающей. Это подтверждается данными о составе кека чанового выщелачивания, где при извлечении ниже 60 % выявлены только очень тонкие включения теллуридов

Таблица 5

Содержания некоторых элементов в пирите Западной зоны (г/т) по данным ЛА-ИСП-МС

Table 5

Content of selected elements of pyrite of Zapadnaya zone (ppm) according to LA-ISP-MS

№ п/п	Au	Ag	Cu	Zn	As	Se	Sb	Te	Hg	Pb	Bi
1	0.60	2.30	2.90	0.70	1183	86.2	0.10	2.30	0.00	3.30	0.30
2	3.80	2.30	6.60	0.90	5540	8.90	0.20	3.30	–0.10	3.50	0.70
3	0.10	0.00	0.20	0.80	973	81.8	0.00	1.80	0.00	0.30	0.00
4	1.90	0.90	8.50	1.70	2561	15.2	0.10	2.10	0.00	5.50	0.40
5	1.60	6.20	3.30	0.70	4400	68.1	0.40	10.9	0.00	8.90	2.50
6	0.90	1.50	15.5	0.80	1788	83.8	0.30	10.8	–0.10	3.40	1.00
7	0.30	0.60	1.90	1.80	3692	72.2	0.10	2.70	0.00	3.40	0.30
8	2.00	6.30	8.90	0.60	830	75.1	0.70	9.20	0.10	14.6	1.70
9	0.40	0.50	2.40	0.90	2550	59.6	0.10	3.40	0.00	3.20	0.70
10	1.40	4.50	14.4	0.90	757	108.7	3.10	11.1	–0.10	29.5	4.10
11	6.60	0.60	16.5	0.80	7270	22.4	0.00	7.60	0.00	8.20	1.10
12	0.10	0.40	0.70	0.90	914	70.1	0.10	1.50	0.20	1.80	0.90
13	0.10	0.20	19.4	8.80	882	55.5	0.10	1.60	0.30	27.1	0.30
14	4.90	24.7	3.00	0.80	2662	50.8	0.30	48.0	0.50	51.6	5.10
15	0.10	0.10	2.70	1.00	1929	72.4	0.00	9.60	0.10	1.00	0.30
16	0.30	0.70	21.1	1.00	477	30.6	0.20	8.80	–0.30	7.40	0.40
Среднее	1.60	3.20	8.00	1.40	2401	60.1	0.40	8.40	0.00	10.8	1.20
Ст. откл.	1.90	5.90	6.90	1.90	1885	27.2	0.70	10.9	0.20	13.5	1.40

Таблица 6

Содержания некоторых элементов в сфалерите Западной зоны (г/т) по данным ЛА-ИСП-МС

Table 6

Content of selected elements of sphalerite of Zapadnaya zone (ppm) according to LA-ISP-MS

№ п/п	Au	Ag	Fe	As	Se	Sb	Te	Hg	Pb	Bi
1	0.10	0.70	8300	1.30	14.8	1.50	0.40	211.0	10.1	0.10
2	0.30	4.40	2818	5.20	9.80	0.8	1.80	233.7	630.0	0.00
3	0.10	0.80	2592	0.30	11.6	0.4	0.10	172.0	5.70	0.00
4	0.40	1.30	3700	6.60	9.60	2.3	1.20	211.2	17.9	0.20
5	0.10	0.80	3270	1.80	4.30	1.2	0.40	238.9	12.3	0.10
6	0.10	0.70	5820	1.90	55.1	1.7	0.70	243.4	14.6	0.20
7	4.70	26.7	2850	3.80	167.0	3.2	39.3	174.0	39400.0	34.2
8	0.30	1.00	4700	1.80	43.5	1.9	0.60	197.0	20.6	0.20
9	0.10	0.60	3270	0.80	52.4	0.8	0.20	234.3	8.70	0.10
10	0.40	1.60	2547	2.30	28.0	3.4	1.30	232.4	24.2	0.30
11	0.10	0.70	6800	1.70	11.5	1.2	0.60	169.9	10.1	0.10
12	0.40	1.70	11800	2.00	20.0	1.2	1.50	216.9	18.7	0.10
13	0.10	0.50	4090	1.10	16.3	0.9	0.20	221.3	8.50	0.10
14	0.10	1.00	3680	1.20	10.5	1.3	0.60	204.5	8.70	0.10
15	0.00	0.60	2760	0.70	66.3	0.6	–0.10	185.3	5.40	0.00
16	0.70	3.00	3630	1.10	41.5	1.1	3.30	205.6	15.2	0.20
Среднее	0.50	2.90	4539	2.10	35.1	1.5	3.30	209.5	12.9	2.30
Ст. откл.	1.10	6.20	2450	1.60	38.9	0.8	9.30	23.7	5.60	8.20

Примечание. При расчете средних значений ураганные содержания свинца в анализах 2 и 7 исключены.
Note. Anomalous Au contents of analyses 2 and 7 are ignored from calculation of average values.

Au и Ag в пирите, но не обнаружено самородное золото. Доля «невидимого» золота в сульфидах также может быть существенной.

Авторы благодарны геологам и руководству АО «Башкирская золотодобывающая компания» за содействие. Работы поддержаны Госбюджетной темой темой ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

Литература

Белогуб Е.В. (2018ф) Информационный отчет по результатам минералого-петрографического изучения руд и вмещающих пород месторождения Муртыкты (Башкортостан) в 2017–2018 гг. Миасс, 47 с.

Геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист N-40 (41) (под ред. В.И. Козлова) (2001). Уфа.

Знаменский С.Е. (1992) Структура и закономерности размещения золото-полиметаллического оруденения Ильинского рудного поля. Ч.1. Уфа, БФАН СССР, 80 с.

Знаменский С.Е. (2010) Геологические условия образования и генезис золото-сульфидных месторождений Магнитогорской мегазоны. *Магматизм и метаморфизм в истории земли. XI Всероссийское петрографическое совещание.* Екатеринбург, УГГУ, 257–258.

Макарова В.Н. *(*2013) Геотуризм и «золотая пыль» столетий. *Археография Южного Урала: окружающая среда, природные ресурсы и геологические памятники в истории, культуре и жизнеобеспечении народов Евразии. Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной году окружающей среды.* Уфа, ИЭИ УНЦ РАН, 54–62.

Мостович В.Я. (1923) Цианирование теллуридов золота. *Известия Томского Технологического Института,* **44**, 56–87.

Петровская Н.В. (1973) Самородное золото. М., Наука. 348 с.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (1999) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГГА, 570 с.

Салихов Д.Н., Ковалев С.Г., Беликова Г.И., Бердников П.Г. (2003) Полезные ископаемые Республики Башкортостан (золото). Ч. 1. Уфа, Экология, 222 с.

Серавкин И.Б., Знаменский С.Е., Родичева З.И. (2013) Зональность размещения золоторудных месторождений Южного Урала. *Геологические условия образования и генезис. Геологический сборник № 10*, Уфа, 225–235.

Chryssoulis S.L., McMullen J. (2016) Mineralogical Investigation of Gold Ores. *Gold ore processing (Second edition) (ed. M.D. Adams)*. Amsterdam, Elsevier, 57–93.

Deditius A., Reich M., Kesler S., Utsunomiya S., Chryssoulis S., Walshe J., Ewing R. (2014) The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* **140**, 644–670.

Novoselov K., Belogub E. (2005) Gold-polymetallic mineralisation of the Il'inskoe ore field (South Urals). *Mineralogy and Petrology,* **43**, 138–142.

Reich M., Kesler S., Utsunomiya S., Christopher S., Palenik C., Chryssoulis S., Ewing R. (2005) Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* **69**(11), 2781–2796.

Yannopoulos J.C. (1991) The extractive metallurgy of gold. Van Nostrand Reinhold, 282 p.

Reference

Belogub E.V. (2018f) [Unpublished information report on results of mineralogical and petrographic study of ores and host rocks of the Murtykty deposit (Bashkortostan) in 2017–2018]. Miass, 47 p. (in Russian)

Chryssoulis S.L., McMullen J. (2016) Mineralogical Investigation of Gold Ores. *Gold ore processing (Second edition) (ed. M.D. Adams)*. Amsterdam, Elsevier, 57–93. DOI. 10.17580/tsm 57-93

Deditius A., Reich M., Kesler S., Utsunomiya S., Chryssoulis S., Walshe J., Ewing R. (2014) [The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits]. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* **140**, 644-670.

Geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000, sheet N-40(4) (2001). Edited by V.I. Kozlov, Ufa.

Makarova V.N. (2013) [Geotourism and «golden dust» of the centuries]. *Arkheografia Yuzhnogo Urala: okruzhayushchaya sreda, prirodnye resursy i geologicheskie pamyatniki v istorii, culture i zhizneobespechenii narodov Evrazii. Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy godu okruzhayushcheey sredy* [*Archeography of the South Urals: the environment, natural resources and geological monuments of history, culture and livelihoods of the peoples of Eurasia. Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the year of the environment]*, Ufa, IEI UNZ RAN, 54–62. (in Russian)

Mostovich V.Ya. (1923) [Cyanidation of gold tellurides]. *Izvestiya Tomskogo Tkhnologicheskogo Instituta [Proceedings of Tomsk Technological Institute]*, **44**, 56–87. (in Russian)

Novoselov K., Belogub E. (2005) Gold-polymetallic mineralisation of the Il'inskoe ore field (South Urals). *Mineralogy and Petrology,* **43**, 138–142.

Petrovskaya V.N. (1973) [Native gold]. Moscow, Nauka, 348 p. (in Russian)

Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. (1999) [Urals gold deposits]. Ekaterinburg, UGGGA, 570 p. (in Russian)

Salikhov D.N., Kovalev S.G., Belikova G.I., Berdnikov P.G. (2003) [Minerals of the Republic of Bashkortostan (gold)]. Part 1. Ufa, Ekologiay, 222 p. (in Russian)

Seravkin I.B., Znamensky S.E., Rodicheva Z.I. (2013) [Zonality of location of gold deposits in the Southern Urals]. *Geological conditions of formation and genesis. Geological collection no. 10.* Ufa, 225–235. (in Russian)

Reich M., Kesler S., Utsunomiya S., Christopher S., Palenik C., Chryssoulis S., Ewing R. (2005) Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* **69**(11), 2781–2796.

Yannopoulos J.C. (1991) The extractive metallurgy of gold. Van Nostrand Reinhold, 282 p.

Znamenskiy S.E. (1992) [Structure and laws of distribution of gold-polymetallic mineralization of the Il'inskoe ore field]. Part 1. Ufa, BNTs UrO RAN, 80 p. (in Russian)

Znamenskiy S.E. (2010) [The Geological conditions of formation and Genesis of gold-sulfide deposits of the Magnitogorsk megazone]. *Magmatism and metamorphism in the history of the earth. XI all-Russian petrographic meeting. Ekaterinburg, UGGU,* 257–258. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 21 мая 2019 г.