

УДК 553.435/.44 (571.52)

## МИНЕРАЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ И МЕДНЫХ РУД КЫЗЫЛ-ТАШТЫГСКОГО КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

<sup>1</sup>Кужугет Р.В., <sup>2,3</sup>Анкушева Н.Н.

<sup>1</sup>Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, e-mail: rkzhuget@mail.ru;

<sup>2</sup>Институт минералогии УрО РАН, Миасс;

<sup>3</sup>Южно-Уральский госуниверситет, филиал, Миасс, e-mail: ankusheva@mail.ru

В статье детально изучены минералого-геохимические особенности и условия формирования медно-цинковых и медных руд Кызыл-Таштыгского колчеданно-полиметаллического месторождения, которые являются продуктами одностадийного оруденения, но разобщёнными в пространстве. Для медно-цинковой стадии впервые выявлены Se-галенит, S-клаусталит, Se, S-содержащий теллуриовисмутит, раклиджит, Se-содержащий раклиджит, и их наличие предполагает, что руды данной стадии отлагались при вариациях фугитивности серы, селена и теллура. Кристаллизация минеральных ассоциаций происходила из водных растворов с хлоридами Na и K при давлении 0,9 кбар. Медно-цинковые руды отлагались при температурах 280–243°C, из растворов с солёностью 3,5–6,5 мас. % NaCl-экв, медные руды – при 261–237°C и солёности 5,4–8 мас. % NaCl-экв. Повышенные концентрации солей и присутствие калия в растворах предполагают глубинный источник минералообразующих растворов.

**Ключевые слова:** Кызыл-Таштыг, медно-цинковые руды, медные руды, флюидные включения, кварц, Тува

## MINERALOGY AND FORMATION CONDITIONS OF COPPER-ZINC AND COPPER ORES OF THE KYZYL-TASHTYG PYRITE-POLYMETALLIC DEPOSIT (EAST TUVA)

<sup>1</sup>Kuzhuget R.V., <sup>2,3</sup>Ankusheva N.N.

<sup>1</sup>Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, e-mail: rkzhuget@mail.ru;

<sup>2</sup>Institute of Mineralogy, UB RAS, Miass;

<sup>3</sup>South Ural State University, Miass, e-mail: ankusheva@mail.ru

The paper studies in detail the mineralogical and geochemical features and conditions of formation of copper-zinc and copper ores in the Kyzyl-Tashtyg pyrite-polymetallic deposit, which are spatially separated products of the one-stage mineralization. For the copper-zinc stage, Se-galena, S-clausthalite, Se and S-bearing tellurobismuthite, rucklidgeite, Se-bearing rucklidgeite have been first revealed; and their presence suggests that the ore of this stage was deposited at variations in  $f(S_2)$ ,  $f(Se_2)$ , and  $f(Te_2)$ . The mineral assemblages crystallized from aqueous solutions of NaCl and KCl at a pressure of 0,9 kbar. Copper-zinc ore deposited at temperatures of 280–243°C, from solutions with a salinity of 3,5–6,5 wt. % NaCl equivalent; copper ore – at 261–237°C and from solutions with a salinity of 5,4–8 wt. % NaCl equivalent. The elevated concentrations of salts and presence of potassium in the solutions suggests a deep source of the mineralizing solutions.

**Keywords:** Kyzyl-Tashtyg, copper-zinc ore, copper ore, fluid inclusions, quartz, Tuva

### Положение месторождения в региональных структурах

Кызыл-Таштыгское колчеданно-полиметаллическое месторождение расположено в центральной части хребта Академика Обручева, в 190 км к северо-востоку от г. Кызыла. Месторождение локализуется в северной прибортовой части внутреннего прогиба Кызыл-Таштыгской вулканотектонической депрессии, расположенной в юго-восточной части Улугойской колчеданоносной зоны, среди нижнекембрийских существенно вулканогенных отложений верхнетуматтайгинской подсвиты ( $C_1m_2$ ); Кызыл-Таштыгская вулканотектоническая депрессия приурочена к зоне сопряжения выступа докембрийского фун-

дамента с раннекембрийскими структурами. Период её формирования охватывает время накопления верхнетуматтайгинской подсвиты и, частично, сыынакской (тапсинской) свиты ( $C_1sn$ ) с археоциатами. Данная структура считается главнейшей рудоносной структурой района, известной как Кызыл-Таштыгское рудное поле, которое включает в себя Кызыл-Таштыгское, Дальнее месторождения и ряд рудопроявлений (Южное, Перевальное, Рудоносное и др.). Кызыл-Таштыгская депрессия размером 4×12 км ограничена с севера Кызыл-Таштыгским, а с юга – Караадырским глубинными разломами и характеризуется широким набором вулканогенных и вулканомиктовых фаций (рис. 1).

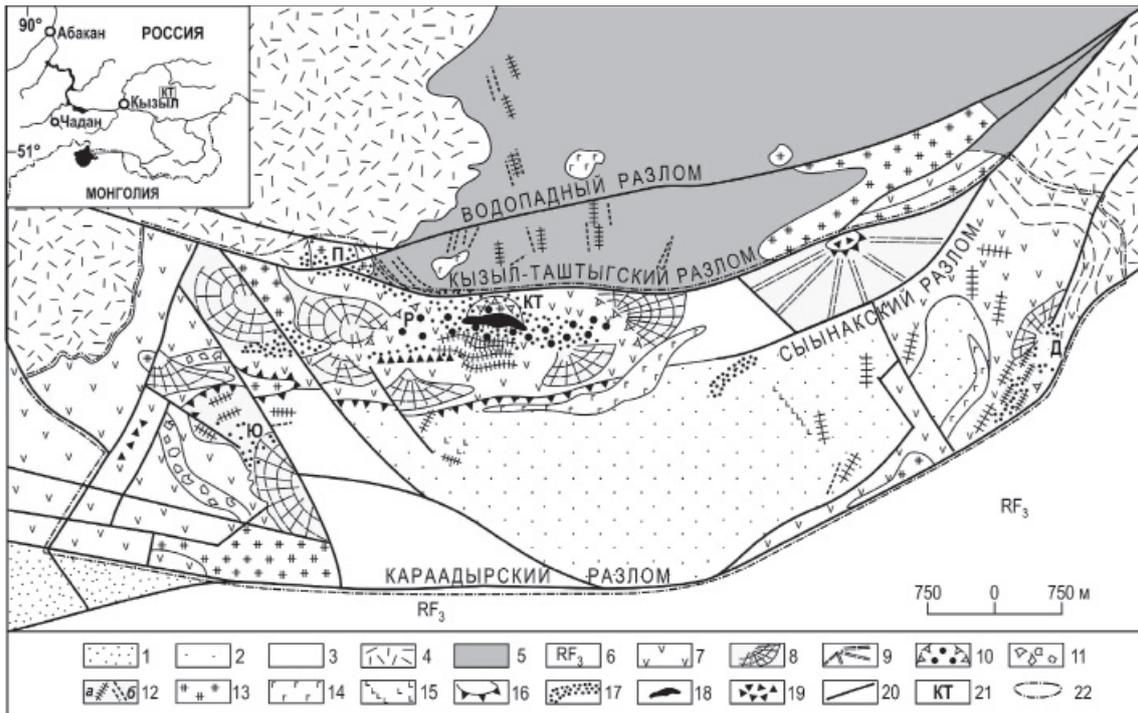


Рис. 1. Схема геологического строения Кызыл-Таштыгского рудного поля по данным [7]:  
 1 – песчаники и алевролиты таштыгхемской свиты ( $C_3ts$ ); 2 – туфы, песчаники, алевролиты и известняки (с горизонтами основных и кислых лав) сыынакской свиты ( $C_3sn$ );  
 3 – вулканогенно-осадочные породы верхней подсвиты туматтайгинской свиты ( $C_3tm_2$ );  
 4–5 – вулканические поднятия: 4 – фрагменты риолит-дацитовых плато верхней подсвиты туматтайгинской свиты ( $C_3tm_2$ ); 5 – базальтовое плато нижней подсвиты туматтайгинской свиты ( $C_3tm_2$ ); 6 – расланцованные песчаники и алевролиты, известковистые сланцы охемской свиты ( $RF_3oh$ ); 7 – базальтовые, андезит-базальтовые покровы; 8 – риолит-дацитовые купола;  
 9 – постройки андезит-дацит-риолитового состава; 10 – кальдерная депрессия с вулканогенно-терригенными отложениями; 11 – глыбовые брекчии, вулканоклювий;  
 12–14 – поздние субвулканические и гипабиссальные интрузии и дайки: 12 – дайки и силлы диабазов (а), риолитов и дацитов (б); 13 – крупные субвулканические и гипабиссальные интрузии риолитов, жерловины с вулканическими брекчиями кислого и смешанного состава;  
 14 – габбро-диабазы, габбро-диориты; 15 – долериты; 16 – надвиги; 17 – рудные зоны серицит-кварцевых метасоматитов; 18 – колчеданно-полиметаллические рудные тела;  
 19 – рудокластиты; 20 – разрывные нарушения; 21 – месторождения (КТ – Кызыл-Таштыгское, Д – Дальнее) и рудопроявления (Ю – Южное, П – Перевальное, Р – Рудоносное);  
 22 – контур Кызыл-Таштыгского рудного поля

Она имеет мозаично-блоковое строение и состоит из внутреннего прогиба и краевых поднятий, осложнённых локальными вулканотектоническими структурами. Внутренний прогиб представлен полным разрезом верхнетуматтайгинской подсвиты (до 2000 м) и сыынакской свиты (до 1300 м), а краевые поднятия – отложениями верхнетуматтайгинской подсвиты сокращённой мощности. В бортах депрессии породы имеют залегание с углами падения пластов 40–80°, а в осевой части – субгоризонтальное [8; 7].

Локальные вулканические и вулканотектонические структуры в пределах Кызыл-Таштыгской депрессии широко распространены. Одна из них, вмещающая

Кызыл-Таштыгское месторождение, детально изучена и представлена небольшой по размеру (1×0,6 км) межкупольной депрессией. Она характеризуется наиболее полным и пестрым вулканогенно-осадочным разрезом и насыщена субвулканическими интрузиями и зонами гидротермалитов. Эта структура Б.И. Берманом [1] и В.В. Зайковым [7] интерпретируется как кальдерная депрессия (кальдера обрушения). В центре её Б.И. Берманом установлена жерловина, сложенная серицитизированными вулканическими брекчиями кислого состава. По мнению В.В. Зайкова [7], данный аппарат имеет сходство с маарами – плоскодонными кратерами взрыва без конуса.

Для Кызыл-Таштыгского рудного поля характерно наличие полихронного и полигенного колчеданно-полиметаллического оруденения. *Вулканогенное гидротермально-осадочное* существенно колчеданное оруденение раннекембрийского возраста отмечается в виде горизонтов и пачек минерализованных пород и седиментных колчеданных руд в разрезе верхнетуматтайгинской подсвиты ( $\epsilon_1 m_2$ ) и сосредоточены они в трёх литолого-стратиграфических уровнях. Для обломочных (слоистых и массивных) колчеданных руд до 10 см свойственны все признаки рудокластов. Источниками сингенетических руд, судя по масштабу их распространения, типам руд, структурно-текстурным, типоморфным особенностям и парагенезисам рудных минералов, могут служить не обнаруженные к настоящему времени колчеданные объекты. В.В. Зайков предполагает, что образование рудокластов произошло при разрушении придонных сульфидных построек лавовыми потоками [6; 8; 7]. Горизонты рудокластитов практического значения не имеют. В данной статье рассматривается более позднее (эпигенетическое) промышленное *вулканогенно-гидротермальное колчеданно-полиметаллическое оруденение*.

#### Геологическое строение и возраст месторождения

По данным [1; 4] современная пространственная ориентировка разломов и рудных тел близка к первоначальной, т.е. к моменту рудоотложения вулканогенные породы туматтайгинской свиты уже имели наклонное положение и падали на юг под углами 20–80°. Возраст единичных цирконов из риодацитов, определённый U-Pb методом – раннекембрийско-среднекембрийский и составляет  $510 \pm 14$  млн лет [3]. По данным [8], более поздние дацит-порфиновые дайки рассекают ранние серноколчеданные руды и замещаются медно-цинковыми рудами, что свидетельствует об их «внутрирудном» характере. Далее происходило образование полиметаллических руд. Цирконы из дацит-порфиновых даек имеют как кембрийский (519–499 млн лет), так и преобладающий раннеордовикский (476 млн лет) возраст [3]. Таким образом, нижняя возрастная граница образования серноколчеданных руд соответствует раннему и среднему кембрию (510 млн лет), верхняя – раннему ордовику (476 млн лет).

О геодинамической позиции формирования Кызыл-Таштыгского месторождения

существует несколько точек зрения. По мнению [8], палеотектоническая позиция Кызыл-Таштыгского месторождения соответствует палеорифтовой зоне «Тувинно-Байкальского линеамента», заложенного на склоне зрелой континентальной коры. По данным В.В. Зайкова [7], колчеданосные зоны Тувы, в т.ч. вмещающая Кызыл-Таштыгское месторождение, развивались в рифтах Саяно-Тувинского окраинного моря. На основе петролого-геохимических данных В.А. Симонова с коллегами получен вывод о том, что вмещающие месторождение базальты сформировались в условиях древне-задугового бассейна [9; 10].

Палеотектоническая реконструкция, основанная на раннеордовикском возрасте «внутрирудных» даек дацит-порфиоров, указывает на то, что Кызыл-Таштыгское месторождение формировалось в период широко проявленных в Алтае-Саянской области позднекембрийско-ордовикских аккреционно-коллизийных событий. В частности, в раннем ордовике магматизм и рудообразование происходили в условиях трансформации в сдвигово-раздвиговом (pull-apart) бассейне, наложенном на вендраннекембрийские островодужные магматические комплексы [3]. В свою очередь, формирование этого бассейна являлось следствием косой коллизии Тувинно-Монгольского микро-континента с Озёрно-Тувинской островной дугой [5].

Породы в пределах рудного поля подверглись региональному метаморфизму фации зелёных сланцев, околорудные породы месторождения затронуты гидротермальными изменениями кварц-серицитовая формации. Вулканы превращены в аргиллизиты и вторичные кварциты. Промышленное оруденение генетически связано с дацит-риолитовыми интрузиями. Все рудные тела месторождения компактно размещаются в пределах узкой полосы протяжённостью 1200 м, шириной 130–250 м. Рудная минерализация контролируется узлом пересечения субширотных, северо-западных и северо-восточных разломов, усложняющих и секущих вулканическое жерло (сложенное взрывными брекчиями риолитов) и вмещающие породы согласно их напластованию, часть из них – кососекущие. Системы разрывов обуславливают блоковое строение месторождения.

Слабый метаморфизм серноколчеданных руд, по нашему мнению, предполагает их близкий возраст к медно-цинковым и полиметаллическим рудам, т.е. возраст

последних соответствует верхней границе формирования серноколчеданных руд – раннему ордовику. Формирование серноколчеданных и полиметаллических руд Кызыл-Таштыгского месторождения происходило, вероятно, после завершения активной фазы позднекембрийско-ордовикских аккреционно-коллизийных событий в сдвигово-раздвиговых зонах (рифтогенной деструкции) активной континентальной окраины, т.е. трансформных (трансформно-сдвиговых) обстановках. Отметим, что в окраинно-континентальных обстановках трансформных сдвигово-раздвиговых зон (внутриконтинентальных рифтов) сформировались месторождения типа *куроко* одного из крупнейших на Земле Иберийского колчеданного пояса (Испания (Рио-Тинто, Тарсис), Португалия (Алжуштрел, Невес-Корво)), а также месторождение Волверин (Юкон, Канада) [15; 13].

Кызыл-Таштыгское месторождение относится к типу *куроко* (рудно-алтайскому рудно-формационному типу), по степени нарушенности руд – к слабометаморфизованным объектам. Рудовмещающая часть разреза туматтайгинской свиты сложена вулканогенными и осадочными породами: лавами и туфами кислого и основного состава, песчаниками, углеродистыми алевролитами, силицитами [8].

Промышленные руды Кызыл-Таштыгского месторождения отнесены к вулканогенно-гидротермальному типу (с проявлениями гидротермально-метасоматических разностей, которые заполняли трещинные зоны). Предшественниками [8] и нашими исследованиями установлено 6 стадий колчеданно-полиметаллического оруденения на месторождении: дорудная *кварц-серицитовая* (1) с кварцем, серицитом, альбитом, пиритом, хлоритом, кальцитом, доломитом); продуктивные: *серноколчеданная* (2) – пирит, кварц, хлорит ± сфалерит ± халькопирит ± кальцит), *медно-цинковая* (3) – халькопирит, сфалерит, пирит, кварц, доломит, кальцит, хлорит, галенит, Se-галенит, S-клаусталит PbSe ± теннантит-тетраэдрит ± раклиджит  $PbBi_2Te_4$  ± теллу-ривисмутит  $Bi_2Te_3$ , *полиметаллическая* (4) – галенит, халькопирит, сфалерит, пирит, доломит, кварц, барит, кальцит, хлорит, Zn-теннантит-тетраэдрит (Ag до 1,35 мас.%), золото, электрум ± магнетит ± кервеллеит  $Ag_4TeS$ , *полиметаллически-баритовая* (5) – барит, пирит, галенит, халькопирит, сфалерит, минералы группы теннантит-тетраэдрита, доломит, анкерит, кальцит, золото,

электрум ± акантит  $Ag_2S$ ; пострудная *кварц-карбонатная* (6) – кальцит, доломит, кварц. Минеральные ассоциации руд месторождения разделены во времени тектоническими сдвигами с дроблением руд и образованием брекчиевых текстур.

В процессе разведки на месторождении выявлены и разведаны 47 рудных тел. Наиболее крупными залежами, в которых концентрируется основная масса руд, являются тела № 1–3, 5 полиметаллических руд (сложенные рудами полиметаллической, в меньшей степени – медно-цинковой стадий), № 34, 36 медных руд и № 4 – серноколчеданных руд. Остальные рудные тела характеризуются незначительными параметрами и самостоятельного значения не имеют. Зона окисления развита слабо [8]. Рудные тела № 1, 2 и 4 образуют единую «главную» залежь месторождения (с размерами 400×180 м) до глубины 70–120 м, ниже они разобщаются. Главная рудная залежь имеет зональное строение. Сплошные серноколчеданные руды тела № 4 в центральной части залежи сменяются на флангах медно-цинковыми и полиметаллическими рудами тел № 1 и 2. Колчеданная залежь № 4 имеет штокообразную форму, со сложным выклиниванием по падению, представляет собой серию линейно-вытянутых и уплощенных тел, заполняющих внутрижерловые трещины субширотной системы. Размеры тела в плане 50×320 м, длина по падению 200 м. Линзообразные тела полиметаллических руд имеют субширотное (260–300°) простирание, падают на юг под углами от 15–20° до 65–85° и приурочены к межпластовым и секущим зонам расщепления. Они имеют четкие границы с вмещающими породами, часто с секущими контактами. Мощность залежей 1,4–74,8 м, длина по падению – 300–520 м, по простиранию – 280–710 м. Глубина залегания от 0 до 530 м от дневной поверхности.

#### Минеральный состав медно-цинковых руд

Руды медно-цинковой стадии представлены медно-цинковым и медным типами, которые являются продуктами одностадийного оруденения, но разобщенными в пространстве [8]. В свою очередь, в медно-цинковых рудах выделяются следующие разновидности: пирит-халькопирит-сфалеритовые (собственно медно-цинковые), пирит-сфалеритовые и сфалерит-пиритовые. Последние образовались за счёт обогащения ранних серноколчеданных руд

более поздним сфалеритом медно-цинковой стадии. Пирит-сфалеритовые и сфалерит-пиритовые руды на месторождении наименее распространены. Существенно медные разновидности руд слагают обособленные тела, расположенные на глубоких горизонтах месторождения.

Руды медно-цинковой стадии рассекают и цементируют серноколчеданные руды и, в свою очередь, рассекаются полиметаллическими рудами. Руды медно-цинковой стадии в рудных телах (№ 1–3, 5) образуют единые залежи с полиметаллическими рудами, при этом жильные и линзообразные тела медно-цинковых руд мощностью от 20–40 см до 20–25 м секутся полиметаллическими рудами. Количество самостоятельных (изолированных) залежей медно-цинковой стадии достигает 9, и они располагаются в пределах участка протяжённостью 460 м. Морфологически они образуют прожилки (мощностью от 0,3 до 4 см) и жильно-прожилковые зоны от 1 до 5 м в серноколчеданных рудах, а также жильные и линзообразные тела (мощностью от 15 до 90 м) на флангах серноколчеданных руд, «соединяя» полиметаллические руды. Наиболее крупным считается рудное тело № 34, сложенное медными рудами.

Образцы медно-цинковых руд для изучения были отобраны в районе скважины № 22, где медно-цинковая рудная минерализация рассекает серноколчеданные массивные руды тела № 4 около контакта с полиметаллическими рудами рудного тела № 2. Здесь рудная минерализация медно-цинковых руд представлена сфалерит-халькопиритовыми жилами (мощностью 0,5–5 м, длиной > 20 м) и прожилками (мощностью 0,3–4 см). Простираение жил северо-западное, залегание близко к вертикальному. Для руд характерны массивные, полосчато-массивные текстуры и мелко-среднезернистые структуры. Полосчато-массивные текстуры обусловлены тонкими халькопиритовыми полосами в сфалеритовой массе. В незначительных количествах отмечаются гнезда кварца и доломита с размерами выделений до 1 см. Медно-цинковые руды сложены сфалеритом (Fe 0,30–5,34 мас.%, Cd до 0,42 мас.%), халькопиритом, пиритом, кварцем, Fe–Mn-доломитом (FeO до 4,17 мас.%, MnO – 2,01 мас.%), кальцитом (MnO до 0,54 мас.%, FeO – 0,36 мас.%), в подчиненном количестве – Zn-теннантит-тетраэдритом, хлоритом, реже – галенитом, Se-галенитом (Se до 10,15 мас.%) (рис. 2). Соотношения между сфалеритом и халько-

пиритом различные, но в целом выделения сфалерита составляют 50–70%.

Массивные медные руды отобраны в районе скважины № 67, где они рассекают и цементируют серноколчеданные руды рудного тела № 4. Рудная минерализация представлена жилой сложной формы (мощностью в раздувах до 4 м, длиной > 11 м) северо-западного простирания и близкого к вертикальному залегания. Для медных руд характерны массивные, гнездово-вкрапленные текстуры, мелко-среднезернистые и крупнозернистые структуры. Они сложены халькопиритом, пиритом, Fe–Mn-доломитом (FeO до 7,96 мас.%, MnO – 4,17 мас.%), Fe-доломит (FeO до 5,24 мас.%, MnO – 0,63 мас.%), в подчиненном количестве – кварцем, сфалеритом (Fe от 0,25 до 2,67 мас.%, Cd – 0,55 мас.%), хлоритом, кальцитом (FeO до 0,69 мас.%, MnO – 0,81 мас.%, MgO – 0,33 мас.%), Zn-теннантит-тетраэдритом, реже – галенитом, Se-галенитом (Se до 14,38 мас.%), S-клаусталитом (S от 1,31 до 6,05 мас.% Te – 1,42 мас.%), Se-содержащим раклиджитом (Se до 1,22 мас.%), Se, S-содержащим теллуровисмутитом (S до 1,19 мас.%, Se – 1,37 мас.%).

В медно-цинковых и медных рудах содержания пирита составляют от 20 до 45%, и для него характерны 2 генерации. Пирит-I с размером зёрен от 5 до 8 мм образует неправильные зёрна, зернистые агрегаты совместно со сфалеритом и халькопиритом, реже кубические кристаллы. Пирит-II характеризуется большим многообразием кристаллографических форм, встречаясь в виде кубооктаэдров и пентагондодекаэдров. Размер выделений пирита-II в медно-цинковых рудах от 5 мкм до 0,8 см, медных рудах – от 10 мкм до 1,5 см. Халькопирит также образует 2 генерации (рис. 2). Халькопирит-I образует землистые агрегаты (размер выделений от 2 мкм до 3 см; в медных рудах до 15 см) со сфалеритом, пиритом-I и -II. В медных рудах халькопирит-I преобладает при содержании пирита до 30%, сфалерита – 5%. Для сфалерита (размеры зёрен от 5 мкм до 5 мм) характерна одна генерация, которая практически всегда насыщена эмульсионными выделениями халькопирита-II, которые располагаются в виде беспорядочных или линейных включений либо «обрисовывают» кристаллографические зоны роста зёрен сфалерита. Размеры эмульсионных включений халькопирита-II варьируют от 1–2 мкм до 30 мкм в поперечнике.

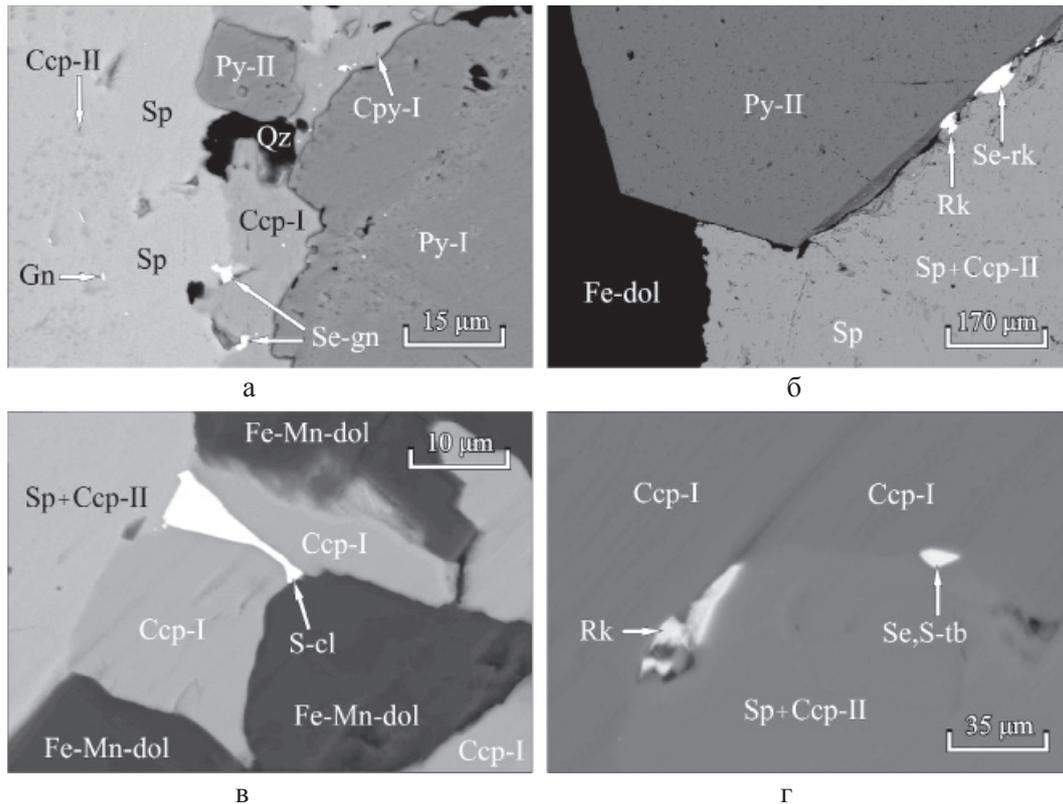


Рис. 2. Взаимоотношения минералов в медно-цинковых и медных рудах:  
 а – ксеноморфные зёрна *Se*-галенита (*Se-gn*) на контакте халькопирита-I (*Ccp-I*) и сфалерита (*Sp*) с халькопиритом-II (*Ccp-II*), галенитом (*Gn*) в медно-цинковых рудах (обр. КТ-15-30) в ассоциации с пиритом-I, -II (*Py-I*, *Py-II*) и кварцем (*Qz*); б – зёрна раклиджита (*Rk*) и *Se*-раклиджита (*Se-rk*) на контакте идиоморфного зерна пирита-II (*Py-II*) и сфалерита (*Sp*) с халькопиритом-II (*Ccp-II*) в медных рудах. Здесь и в-г обр. КТ-15-30; в – халькопирит-I (*Ccp-I*), *S*-клаусталит (*S-cl*) и сфалерит (*Sp*) с халькопиритом-II (*Ccp-II*) в *Fe-Mn*-доломите (*Fe-Mn-dol*); г – *Se*, *S*-содержащий теллуrowисмутит (*Se, S-tb*) и раклиджит (*Rk*) на контакте халькопирита-I (*Ccp-I*) и сфалерита (*Sp*) с халькопиритом-II (*Ccp-II*). Фотографии в отражённых электронах сделаны на сканирующем электронном микроскопе MIRA LM (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Н.С. Карманов)

Взаимоотношения между минералами в медно-цинковых и медных рудах позволяют установить следующую последовательность образования: халькопирит-I ± сфалерит (+ эмульсионный халькопирит-II) + пирит-I → пирит-II + галенит + *Fe-Mn*-доломит + *Fe*-доломит + кварц + кальцит ± хлорит + *Zn*-теннантит-тетраэдрит + *Se*-галенит → *S*-клаусталит → *Se*, *S*-содержащий теллуrowисмутит + раклиджит (курсивом выделены минералы, описанные авторами впервые для медно-цинковой стадии).

**Условия образования медно-цинковых руд**

Исследования флюидных включений в кварце проводились в микротермокамере TMS-600 (Linkam), позволяющей про-

изводить измерения температур фазовых переходов в интервале – 196 до +600 °С, с микроскопом Olympus (лаборатория термобарогеохимии Южно-Уральского государственного университета, г. Миасс, аналитик Н.Н. Анкушева). Программное обеспечение LinkSys V-2.39. Погрешность измерительной аппаратуры составляет ± 0,1 °С при 20...+80 °С и ± 1 °С за пределами этого интервала. Солевой состав растворов во включениях оценивался по температурам эвтектик [2]. Температуры гомогенизации включений фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере. Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз [11]. Обработка результатов выполнена в программе Statistica 6.1. Результаты термобарогеохимических исследований приведены на рис. 3.

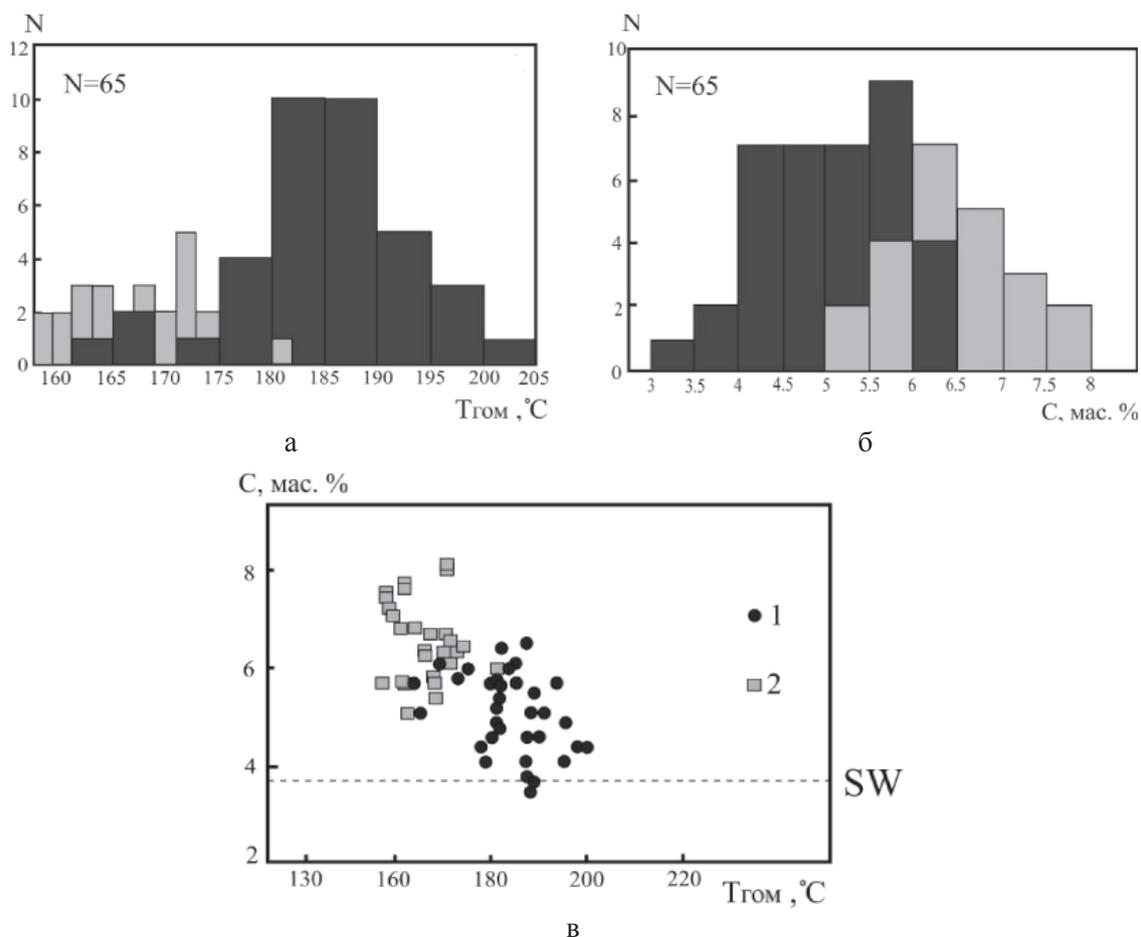


Рис. 3. Результаты исследований флюидных включений:  
 а, б – распределение значений температур гомогенизации (а) и солёности (б) включений.  
 Черное – кварц-А (медно-цинковых руд), серое – кварц-Б (медных руд);  
 в – соотношение солёности и температур гомогенизации включений:  
 1 – кварц-А; 2 – кварц-Б; SW – солёность морской воды при 25 °С

Проведены микротермометрические исследования флюидных включений в кварце медно-цинковых (кварц-А, обр. КТ-15-30,  $n = 25$ ) и медных (кварц-Б, обр. КТ-15-33,  $n = 40$ ) руд. Кварц средне-крупнозернистый, молочно-белый, участками полупрозрачный. Включения имеют размеры до 10–15 мкм, округлую или вытянутую форму, редко с отростками. Объем газового пузырька при 25 °С составляет 10–15 % общего объема включения. Вторичные включения располагаются в виде цепочек или скоплений и приурочены к трещинам в кварце.

Включения в кварце-А характеризуются температурами эвтектики –21,3...–22,1 (  $n = 7$ ) и –23,2...–23,5 °С (  $n = 2$ ), что указывает на присутствие в растворах водно-солевых систем с хлоридами Na и K. Концентрации солей в пересчете на NaCl-эквивалент составили 3,5–6,5 мас. % (  $n = 40$ ). Распределение значений солёности одномодальное

с широким пиком 4–6 мас. % (рис. 3, б). Гомогенизация включений в жидкую фазу происходила при 200–163 °С (  $n = 40$ ). Распределение значений также одномодальное с пиком 180–190 °С (рис. 3, а).

Включения в кварце-Б содержат растворы с температурами эвтектики –21,5...–22,0 (  $n = 5$ ), указывающими на содержание хлоридов Na во флюиде. Включения гомогенизировались в жидкую фазу при 181–157 °С (  $n = 25$ ). Распределение значений на гистограмме полимодальное с небольшими пиками 160–165 и 170–175 °С (рис. 3, а). Концентрации солей составляют 5,4–8 мас. % NaCl-экв. (  $n = 25$ ). Распределение значений солёности одномодальное с пиком 6–6,5 мас. % (рис. 3, б).

#### Выводы

Состав минеральных ассоциаций руд Кызыл-Таштыгского месторождения

отражает типы руд, характерные для месторождений типа *куруко*, разделенные во времени чередованием открытия и закрытия тектонических трещин с дроблением руд. Оруденение месторождения контролирует трубка взрыва с телами взрывных брекчий риолитового состава. Установлено, что медно-цинковые и полиметаллические руды Кызыл-Таштыгского месторождения имеют раннеордовикский возраст, т.к. дайки дацит-порфирирового состава с возрастом 476 млн лет замещаются медно-цинковыми рудами [3]. Мы предполагаем, что формирование колчеданно-полиметаллического оруденения Кызыл-Таштыгского месторождения происходило после завершения активной фазы позднекембрийско-ордовикских аккреционно-коллизионных условий в сдвигово-раздвиговых зонах (рифтогенной деструкции) активной континентальной окраины в трансформно-сдвиговых условиях.

Руды медно-цинковой стадии представляют собой линзообразные тела, жилы и жильно-прожилковые зоны с относительно простым минеральным составом, представленным сфалеритом, халькопиритом и пиритом, в меньшей степени – доломитом, кварцем, кальцитом, реже – хлоритом, Zn-теннантит-тетраэдритом, галенитом, Se-галенитом. В медных рудах обнаружены S-клаусталит, Se, S-содержащий теллурувисмутит, раклиджит, Se-содержащий раклиджит, которые являются поздними и редкими минералами.

Минералогические особенности медно-цинковых руд предполагают вариации  $\lg f(S_2) = 10^{-16} - 10^{-11}$  и  $\lg f(Se_2) = 10^{-25} - 10^{-18}$  (при  $T = 200^\circ\text{C}$ ), медных руд –  $\lg f(S_2) = 10^{-25} - 10^{-9}$ ,  $\lg f(Fe_2) = 10^{-16} - 10^{-11}$  и  $\lg f(Se_2) = 10^{-21} - 10^{-15}$  (при  $T = 200^\circ\text{C}$ ). Наличие поздних минералов Se и Te указывают на повышение  $f(Se_2)$  и  $f(Te_2)$  в конце рудообразования.

По результатам исследования флюидных включений было установлено, что минеральные ассоциации медно-цинковых руд отлагались из водных растворов с хлоридами Na и K с солёностью 3,5–6,5 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации флюидных включений составляют 200–163 °C. Кристаллизация минеральных ассоциаций медных руд происходила из водных растворов с хлоридами Na с солёностью 5,4–8 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации флюидных включений составляет 181–157 °C. Давление при отложении медно-цинковой стадии и кварцевых прожилков, образовавшихся после полиме-

таллических руд, оценено в 0,91 кбар [8]. Поправка на давление определялась с помощью диаграммы поправок  $\Delta T$  к температуре гомогенизации на давление [14]. При таких давлениях и концентрации солей поправка составляет 80 °C, а температуры минералообразования медно-цинковых руд – 280–243 °C, медных руд – 261–237 °C.

Отметим, что руды более ранней серноколчеданной стадии месторождения происходили из растворов NaCl–H<sub>2</sub>O состава с солёностью 7–10 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце – 400–305 °C [12].

По данным [9; 10], барит-полиметаллические руды образовались из растворов состава NaCl–H<sub>2</sub>O и NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O с солёностью 3–8,5 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации флюидных включений в барите составляют 270–150 °C. С учётом поправки на давление ~ 0,91 кбар, (80 °C), температуры минералообразования данной стадии составили 350–230 °C.

Данные о составе самородного золота (атомного количества Ag в золоте) и данные по железистости ( $X_{FeS}$ ) сосуществующего с самородным золотом сфалерита позволили оценить температуры образования полиметаллической стадии (265–162 °C) и летучесть серы ( $fS_2 = 10^{-20} - 10^{-18}$ ) электрум-сфалеритовым геотермометром, а поздней полиметаллически-баритовой стадии – 250–183 °C,  $f(S_2) = 10^{-21} \dots 10^{-20}$ . Они рассчитывались по формулам [16]:

$$T^\circ\text{K} = \{28765 + 22600 (1 - N_{Ag})^2 - 6400 (1 - N_{Ag})^3\} / \{49,008 - 9,152 \log X_{FeS} + 18,2961 \log N_{Ag} + 5,5 (1 - N_{Ag})^2\}; \log fS_2 = 14,32 - 15,460/T - 2 \log X_{FeS}.$$

Таким образом, термобарогеохимические исследования руд Кызыл-Таштыгского месторождения фиксируют тенденцию понижения температур минералообразования и солёности гидротермальных растворов от ранней серноколчеданной стадии к поздним барит-полиметаллическим рудам. Общий интервал температур формирования составляет 400–162 °C (серноколчеданная стадия – 400–305 °C, медно-цинковая стадия – 280–243 °C, полиметаллическая стадия – 350–162 °C, полиметаллически-баритовая стадия – 250–183 °C). Солёность растворов также уменьшается от серноколчеданных (7–10 мас. %) к медно-цинковым (4–8 мас. %) и барит-полиметаллическим (3–8,5 мас. %) рудам.

Близкие термобарогеохимические параметры указывают на единый источник флюидов. Повышенные концентрации солей

(до 10 мас. %) и присутствие калия в растворах свидетельствуют об участии глубинного магматического флюида.

*Авторы благодарны руководству и сотрудникам ООО «Лунсин» за помощь при проведении экспедиционных работ, а также к.г.-м.н. А.А. Монгушу, к.г.-м.н. А.М. Сугорактовой за консультации при написании статьи и обсуждение результатов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-35-00244 мол\_а) и госбюджетной темы Института минералогии УрО РАН (№ АААА-А16-116021010244-0).*

#### Список литературы

1. Берман Б.И. Геология и генезис полиметаллических месторождений Кызыл-Таштыгского рудного поля (Восточная Тува): автореф. дис. ... канд. геолог.-минер. наук. – М.: 1966. – 20 с.
2. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. – 1997. – № 8. – С. 16–28.
3. Гусев Н.И., Тимашков А.Н., Толмачева Е.В., Родионов Н.В., Крылова А.Л. Возраст и геодинамическая обстановка формирования полиметаллического оруденения в Восточной Туве // Геология, тектоника и минерагения Центральной Азии: Тез. докл. (CDROM). – СПб., 2011. – С. 1–4.
4. Дистанов Э.Г. Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири / Ред. В.А. Кузнецов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 351 с.
5. Добрецов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика. – 2007. – Т.48. – № 1. – С. 93–108.
6. Зайков В.В. Рудоносные вулканические комплексы протерозоя и кембрия Тувы. – Новосибирск: Наука, 1976. – 126 с.
7. Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданосных зон Урала и Сибири. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 2006. – 429 с.
8. Кузбный В.С., Макаров В.А., Калеев Е.А. и др. Кызыл-Таштыгский колчеданно-полиметаллический рудный узел Восточной Тувы. – Красноярск, 2001. – 292 с.
9. Симонов В.А., Зайков В.В., Ковязин С.В. Палеогеодинамические условия развития гидротермальных систем Кызыл-Таштыгского месторождения (Восточная Тува) // Металлогения древних и современных океанов – 1999. – Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. – С. 16–23.
10. Симонов В.А., Котляров А.В. Физико-химические параметры палеогидротермальных систем колчеданно-полиметаллического месторождения Кызыл-Таштыг, Восточная Тува // Металлогения древних и современных океанов – 2013. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2013. – С. 152–155.
11. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O–NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignana-Siena. – 1994. – P. 117–130.
12. Melekestseva I.Yu., Ankusheva N.N., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Simonov V.A. Massive sulfides from ancient and modern margins of the Asian paleocean and Pacific: Textures, mineralogy and fluid inclusion data // Marine minerals of the Pacific: Science, Economics, and the Environment: 37th Underwater Mining Institute. – Tokyo, 2007. – P. 177–187.
13. Piercey S.J., Peter J.M., Mortensen J.K., Paradis S., Murphy D.C., Tucker T.L. Petrology and U-Pb Geochronology of Footwall Porphyritic Rhyolites from the Wolverine Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Yukon, Canada: Implications for the genesis of Massive Sulfide Deposits in Continental Environments // Economic Geology. – 2008. – Vol. 103. – P. 5–33.
14. Potter R.V. Pressure correction for fluid-inclusion homogenization temperatures, based on the volumetric properties of the system NaCl-H<sub>2</sub>O // U.S. Geological Survey J. Research. – 1977. – Vol. 5. – P. 603–607.
15. Rosa, D.R.N., Inverno, C.M.C., Oliveira, V., and Rosa, C.J.P. Geochemistry of Volcanic Rocks, Albernoa Area, Iberian Pyrite Belt, Portugal // International Geol. Rev. – 2004. – Vol. 46. – № 4. – P. 366–383.
16. Shikazono N. A comparison of temperatures estimated from the electrum – sphalerite – pyrite – argentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au-Ag vein-type deposits in Japan // Econ. Geol. – 1985. – Vol. 80. – № 5. – P. 1415–1424.