

УДК 553.462'43'41:553.2 (571.52)

## ЗОЛОТО-МОЛИБДЕН-МЕДНОПОРФИРОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ АК-СУГ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ, *PT*-ПАРАМЕТРЫ И СОСТАВ РУДОНОСНОГО ФЛЮИДА

© 2023 г. Р. В. Кужугет<sup>а, \*</sup>, Н. Н. Анкушева<sup>а, b</sup>, А. К. Хертек<sup>а</sup>, А. О. Монгуш<sup>а</sup>, Ю. В. Бутанаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
ул. Интернациональная, 117а, Кызыл, Республика Тыва, 667007 Россия

<sup>b</sup> Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Ильменский заповедник, 1, Миасс, 456317 Россия

\*E-mail: rkuzhuget@mail.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 16.10.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

Для золото-молибден-меднопорфирового месторождения Ак-Суг установлено, что рудная минерализация отлагалась в три этапа. В первый этап формировалось медно-порфировое оруденение с простыми сульфидами в кварц-серицитовых и кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах, во второй этап – золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевая субэпитеpмальная минерализация в кварц-серицитовых метасоматитах, в третий – Au–Ag минеральные ассоциации IS-типа с селенидами, теллуридами, сульфосолями Sb и As в аргиллизитах. Изучение флюидных включений (микротермометрия, рамановская спектроскопия) в кварце и минеральная термометрия (парагенезис теллуридов Au и Ag) показали, что медно-порфировое оруденение отлагалось из углекислотно-водно-хлоридного (Na–K ± Fe) флюида с концентрациями солей 20.1–32.8 мас. % NaCl-экв. при 435–375°C, субэпитеpмальная минерализация – из углекислотно-водно-хлоридного (Na–K ± Fe ± Ca ± Mg) флюида с концентрациями солей 7.5–15 мас. % NaCl-экв. при 415–325°C. Эпитеpмальные минеральные ассоциации отлагались при  $P \sim 0.55$  кбар из углекислотно-водно-хлоридного (Na–K ± Fe ± Ca ± Mg) флюида с концентрациями солей 1.4–12.6 мас. % NaCl-экв. при 370–200°C, при этом наиболее поздние низкотемпературные (240–190°C) и разбавленные (3.5–4.9 мас. %) флюиды характеризуются вариациями хлоридов Na и K, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ca, Mg, карбонатов и сульфатов Na, K и Mg. Изотопный состав S флюида разных минеральных ассоциаций характеризуется околонулевыми значениями от –2.7 до +0.3‰, что позволяет утверждать, что они являются производными единой порфировой системы. Значения δ<sup>18</sup>O флюида медно-порфирового (7.4‰) и субэпитеpмального (7.0‰) этапов указывают на его магматогенный генезис; а эпитеpмального (от +1.2 до +7.2‰) – на смешение магматического флюида с метеорными водами (от 0.4 до 5.7‰). Полученные изотопные данные в сочетании с минералого-геохимическими особенностями и условиями образования руд позволили проследить закономерности эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов месторождения Ак-Суг при переходе от медно-порфирового к эпитеpмальному этапу.

**Ключевые слова:** золото-молибден-меднопорфировые месторождения, Au–Ag эпитеpмальное оруденение, порфирово-эпитеpмальные системы, кварц, флюидные включения, стабильные изотопы, Тува

**DOI:** 10.31857/S0016777023070031, **EDN:** GCTUMY

### ВВЕДЕНИЕ

Из месторождений медно-порфирового семейства добывается большое количество Cu, Mo и Re. Это штокверковые объекты, преимущественно локализованные в пределах орогенных вулканоплутонических поясов, с невысокими и средними содержаниями Cu и Mo в рудах (десятые доли % для Cu и сотые–тысячные – для Mo), которые компенсируются большими объемами прожилково-вкрапленных руд. Месторождения

медно-порфирового типа образуются в различных геодинамических обстановках: субдукционных, коллизионных и постсубдукционных (постколлизионных) (Richards, 2009, 2013; Sillitoe, 2010; Hou et al., 2011 и др.). Месторождения медно-порфирового типа содержат также Au, Ag, Se и Te. Соотношения Ag/Au в них колеблются от 10 до 500 и более, чаще – 60–100. Концентрации Au в них обычно низкие – от сотых до первых десятых г/т, редко до 0.5–1 г/т и более, но благодаря

огромным запасам ресурсы Au значительны. По запасам Au известны крупные месторождения – Грасберг в Индонезии (2900 т), Пиббл в США (3050 т), Ою Толгой в Монголии (3000 т), Бингхем Каньон в США (более 1600 т), Кальмакыр в Узбекистане (более 1200 т) и др. (Спиридонов, 2010; Кудрявцев и др., 2012; Нагорная, 2013 и др.). Наиболее золотоносными являются бедные молибденом медно-порфировые месторождения, локализованные в энсиматических палеоостровных дугах (Kesler, 1973; Tittley, 1978).

Кроме того, медно-порфировые месторождения – Санто-Томас II (Филиппины), Елаците (Болгария), Бошекуль (Казахстан), Кальмакыр (Узбекистан) – содержат значимые количества Pd до 3.4 г/т, Pt до 0.35 г/т, соотношения Pd/Pt в них колеблются от 0.8 до 65, т.е. Pd преобладает над Pt (Tarkian, Koopman, 1995; Tarkian et al., 2003; Augé et al., 2005; Economou-Eliopoulos, 2010; Pašava et al., 2010; Sillitoe, 2010; Economou-Eliopoulos et al., 2017). На месторождении Скуриес (Греция) запасы Pd оцениваются около 15 т, Pt – 3.5 т, Елаците (Болгария) – 13 и 3.7 т соответственно (Economou-Eliopoulos, 2005). Повышенные содержания Pd и Pt характерны для медно-порфировых месторождений, связанных с известково-щелочными и щелочными интрузиями, которые преимущественно образуются в постколлизийных обстановках (Richards, 2009; Park et al., 2015). Некоторые исследователи отмечают, что в медно-порфировых месторождениях образование минералов Pd и Pt характерно для раннего медно-порфирового этапа (Auge et al., 2005; Economou-Eliopoulos, 2010; Tarkian et al., 2003), другие авторы – для переходного субэпитептермального (постпорфирового, доэпитептермального) этапа (LeFort et al., 2011; Eliopoulos et al., 2014).

Медно-порфировые месторождения иногда совмещают Au–Ag эпитептермальные, полиметаллические (Zn–Cu–Pb–Ag ± Au) и другие типы оруденения, которые могут быть как производными единой порфирово-эпитептермальной системы (ПЭС, telescoped porphyry Cu systems) (Sillitoe, 2010), так и совмещенными пространственно разновременными образованиями. ПЭС интересны с экономической и генетической точек зрения, поскольку совмещают месторождения разных генетических и геолого-промышленных типов.

Возраст медно-порфировых месторождений варьирует от протерозоя до кайнозоя, но в подавляющем большинстве они имеют кайнозойский и мезозойский возраст (месторождения Тихоокеанского кольца и Средиземноморского пояса). В этот период возникли такие уникальные по запасам Cu месторождения, как Чукикамата (35 млн т Cu и более 500 тыс. т Mo) и Эскондида (более 25 млн т Cu) в Чили, Грасберг (более 25 млн т Cu) в Индонезии и др. В научной литературе хорошо освещены и

всесторонне изучены многочисленные мезозойские (250–60 млн лет) и кайнозойские (менее 60 млн лет) месторождения прежде всего Тихоокеанского кольца (Северная и Южная Америка), Востока России, Филиппин, Индонезийских островов и Средиземноморского (Альпийско-Гималайского) пояса (Болгарии, Сербии, Румынии, Македонии, Греции, Турции, Армении, Ирана, Пакистана и Китая (Тибет)) (Lindgren, 1933; Hedenquist et al., 1998; Hedenquist, Richards, 1998; Bogdanov et al., 2005; Волков и др., 2006; Chen et al., 2009; Sillitoe, 2010; LeFort et al., 2011; Cooke et al., 2011; Nagornaya et al., 2012; Бакшеев и др., 2014; Eliopoulos et al., 2014; Voudouris et al., 2017; Marushchenko et al., 2018; Буханова, 2019 и др.).

Для палеозоя (540–250 млн лет) медно-порфировые месторождения менее характерны, т.к. наиболее древние представители из-за длительного развития эрозионных процессов обычно не сохраняются и/или значительно эродированы. Палеозойские медно-порфировые месторождения развиты в орогенах Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП), Уральского орогенного пояса и Австралии, и они, как правило, меньше по масштабам. В научной литературе хорошо описаны палеозойские медно-порфировые месторождения Полярного и Южного Урала (Грабежев и др., 1995, 2016, 2017; Грабежев, 2014; Shatov et al., 2014; Plotinskaya et al., 2017, 2018; Tessalina, Plotinskaya, 2017; Викентьев и др., 2017, 2023; Знаменский и др., 2019 и др.), Южной Монголии (Porter, 2016; Crane, Cavalieris, 2012), Казахстана (Kudryavtsev, 1996; Seltnann et al., 2014; Cao et al., 2016; Chen et al., 2015), Узбекистана (Golovanov et al., 2005; Cheng et al., 2017; Zhao et al., 2017), Кыргызстана (Jenchuraeva, 1997), Китая (Shen et al., 2014; Wang et al., 2014, 2017), Австралии (Lickfold et al., 2007; Wilson et al., 2007), возраст оруденения и петрогеохимия магматических пород объектов юга Сибири (Berzina et al., 2003, 2016; Pollard et al., 2017; Soloviev et al., 2022).

Для палеозойских медно-порфировых месторождений связи с эпитептермальными типами оруденения менее характерны. Для Уральского орогенного пояса установлено, что на месторождениях Березняковское, Биксизак, Томинское, Михеевское, Талицкое и др. наблюдаются закономерности эволюции температур, состава и концентрации флюидов при переходе от порфирового к эпитептермальному этапу (Плотинская, 2023). В ЦАОП упоминаются только брекчиевые трубы медно-порфирового месторождения Нурказган (Казахстан) с высокосульфидным (high-sulfidation (HS)) типом оруденения (Seltnann et al., 2014). В целом непосредственно в рудном штокверке некоторых месторождений Казахстана и Узбекистана развиты минеральные ассоциации, которые можно отнести к HS- и intermediate-sulfidation (IS) типам (Seltnann et al., 2014).

По ранне- и среднекембрийским (499–518 млн лет) золото-молибден-медно-порфировым месторождениям Ак-Суг и Кызык-Чадр Саяно-Тувинского сегмента ЦАСП информация по условиям образования и развития эпitherмальной минерализации практически отсутствует.

Цель исследования заключается в выявлении закономерностей эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов месторождения Ак-Суг при переходе от медно-порфировых минеральных ассоциаций к эпitherмальным.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Золото-молибден-меднопорфировое месторождение Ак-Суг находится в 240 км северо-восточнее г. Кызыла в верховьях реки Ак-Суг на южных склонах Восточного Саяна (Соругский хребет) в северо-восточной, наиболее удаленной и ненаселенной части Республики Тыва. В региональном плане месторождение локализовано в Саяно-Тувинском сегменте северной части ЦАОП. Его западной границей являются каледонские структуры Западного Саяна, на севере и северо-востоке – раннебайкальские и раннекаледонские структуры Восточного Саяна на южной окраине Сибирского кратона. На востоке и юго-востоке его границы охватывают северо-западную окраину докембрийского Тувино-Монгольского микроконтинента, являющегося крупнейшим тектоническим блоком ЦАОП, а на юге граничит с ранними каледонидами Озерной островодужной зоны Западной Монголии (фиг. 1).

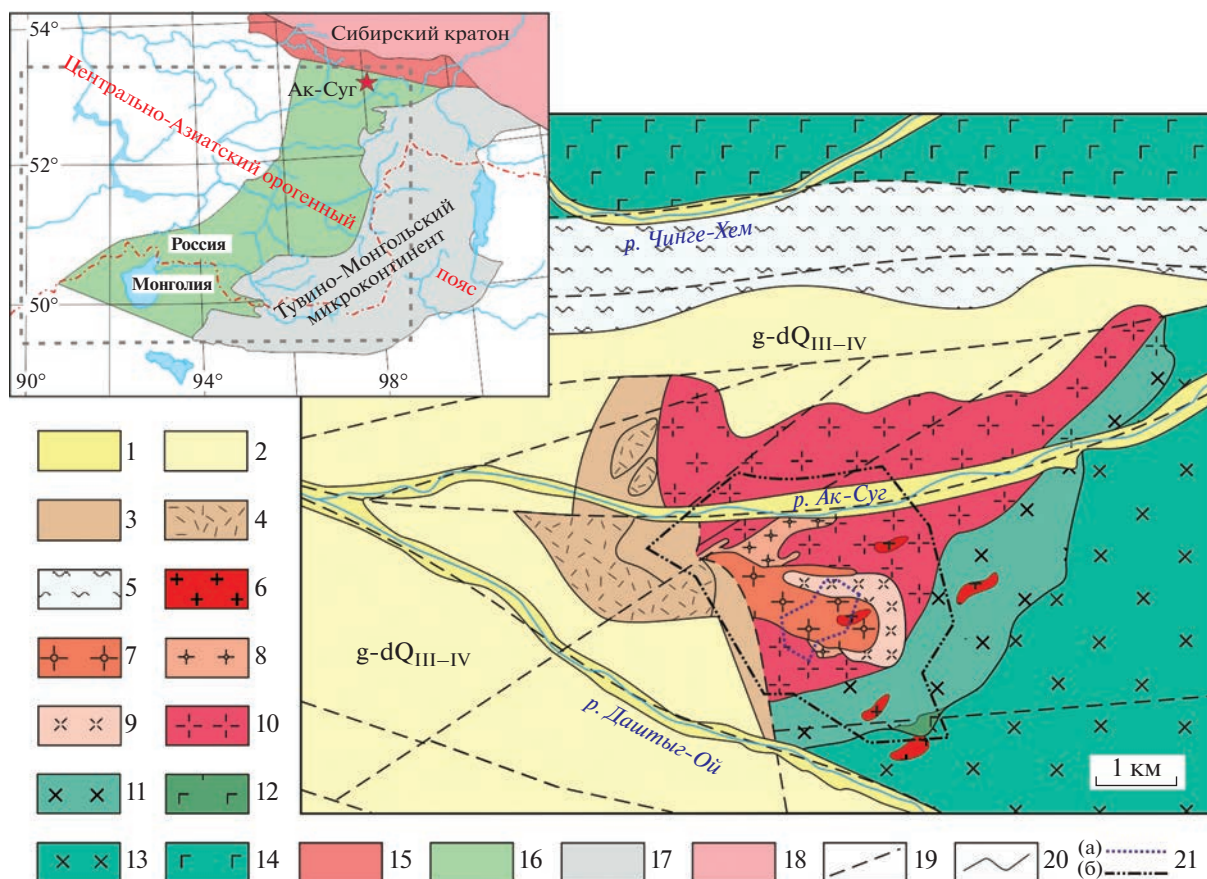
Саяно-Тувинский сегмент ЦАОП представляет собой аккреционно-коллизийную структуру, возникшую при геодинамической эволюции и закрытии Палеоазиатского океана (Berzin et al., 1994; Berzin, Kungurtsev, 1996; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003). В нем выделяются Восточно-Тувинская задуговая, Саяно-Тувинская преддуговая и Таннуольско-Хамсаринская островодужная зоны. В свою очередь, Таннуольско-Хамсаринская островодужная система разделяется на Хамсаринскую, Ондумскую и Таннуольскую зоны. Эволюция геолого-тектонических структур региона имела длительный характер и происходила многоэтапно с последовательной сменой геодинамических режимов (океанический с примитивными островодужными комплексами ~1000–600 млн лет, островодужный – 570–518 млн лет, аккреционно-коллизийный – 510–450 млн лет и т.д.) (Rudnev et al., 2015), с каждым из которых сопряжен комплекс магматических и рудных формаций. Длительный характер эволюции Саяно-Тувинского сегмента ЦАОП обусловил проявление в регионе верхнепротерозойских и палеозойских породных комплексов: островодужных вулканоплутонических

ассоциаций офиолитовых поясов, пород чехла и фундамента микроконтинента, отложений морских и океанических бассейнов (Berzin et al., 1994; Berzin, Kungurtsev, 1996; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003).

Саяно-Тувинский сегмент ЦАОП выделяется в качестве самостоятельной области с медно-порфировым оруденением. В металлогеническом отношении район характеризуется разнотипной рудной минерализацией, контролирующей интрузивными телами либо глубинными тектоническими зонами. В Ак-Сугском рудном узле, кроме одноименного месторождения, выявлено несколько рудопроявлений медно-порфирового типа в интрузивных породах Ак-Сугского комплекса ( $E_{1ak}$ ) – Кадырой, Гребешковый, Даштыг и др., эпitherмального Au–Ag intermediate sulfidation (IS) типа в гидротермально-измененных нижнекембрийских эффузивно-осадочных породах – жильное рудопроявление Биче-Кадыр-Оос.

Месторождение Ак-Суг расположено на южном склоне Восточного Саяна в тектонически активной зоне области сопряжения докембрийских и раннекаледонских структур – зоне Кандатского разлома, разделяющего Хамсаринскую (Тува) и Кизирскую (Восточный Саян) структурно-фациальные зоны ранних каледонид. Оруденение приурочено к многофазному Ак-Сугскому плутону, который локализован на пересечении Даштыгойского грабена северо-западного направления с зоной интенсивной трещиноватости субширотного Ак-Сугского разлома. Ак-Сугский плутон находится в Хамсаринской зоне – краевой северо-восточной части венд-раннекембрийской Таннуольско-Хамсаринской островодужной зоны, сформировавшейся при субдукции Палеоазиатского океана (Berzin, Kungurtsev, 1996). Плутон сложен полнокристаллическими среднезернистыми породами (габброиды, диориты, тоналиты), вмещающими штоко- и дайкообразные тела (малые интрузии, рудоносный комплекс) порфировых пород, с которыми пространственно и во времени ассоциирует Cu–Mo оруденение (см. фиг. 1). Малые рудоносные интрузии сложены мелко- и среднезернистыми тоналитами и тоналит-порфирами. Интрузивные породы на месторождении пропилитизированы, но чаще подвергнуты кварц-серпичитовым и аргиллизитовым изменениям. Магматические породы плутона и малых рудоносных интрузий относятся к известково-щелочной серии пониженной щелочности с доминированием Na над K. Поздняя магматическая ассоциация представлена лейкогранитами и аплитами высококальциевой известково-щелочной серии (Berzina et al., 2016).

Вулканогенные и осадочные породы толтаковской свиты на западном фланге месторождения отнесены к среднему девону, однако возраст сви-



**Фиг. 1.** Схема геологического строения месторождения Ак-Суг (по Забелин, 1992) с изменениями авторов: 1 – аллювиальные отложения ( $Q_{IV}$ ); 2 – моренные и делювиальные отложения ( $Q_{III-IV}$ ); 3, 4 – вулканогенно-осадочные породы толтаковской свиты ( $D_{1tl}$  (?)); 3 – риолит-дациты и риолиты, 4 – туфопесчаники, конгломераты; 5 – кислые и основные эффузивы, сланцы хамсаринской свиты ( $E_{1hm}$ ); 6–12 – аксутский комплекс ( $E_{1-2ak}$ ): 6 – лейкограниты и аплиты, 7 – рудоносные тоналит-порфиры II, 8 – рудоносные тоналит-порфиры I, 9 – порфировидные тоналиты, 10 – массивные тоналиты, 11 – роговообманковые кварцевые диориты, 12 – габбро; 13–14 – майнский комплекс ( $E_{1mn}$ ): 13 – диориты, 14 – габбро; 15 – раннебайкальские и раннекаледонские структуры Восточного Саяна; 16 – венд-нижнекембрийские осадочно-вулканические и вулканогенно-плутонические комплексы ( $V-E_1$ ) Таннуола-Хамсаринской островодужной зоны; 17 – метаморфические комплексы Тувино-Монгольского микроконтинента; 18 – метаморфические комплексы Сибирского кратона (AR-PR); 19 – разрывные нарушения; 20 – геологические границы; 21 – контур кварцевого ядра (а) и месторождения (б).

ты остается дискуссионным, т.к. отсутствует палеонтологическое обоснование возраста свиты (Забелин, 1992).

На месторождении Ак-Суг U-Pb возраст рудоносных интрузий по циркону варьирует от  $515 \pm 4$  до  $499 \pm 6$  млн лет (Berzina et al., 2016), Re-Os возраст молибденита – 518, 517, 516 и 511 млн лет (Berzina et al., 2003; Pollard et al., 2017)), что предполагает образование оруденения при смене геодинамической обстановки от островодужной (570–518 млн лет) к аккреционно-коллизивной (510–450 млн лет).

Прожилково-вкрапленные руды месторождения Ак-Суг приурочены к многофазному штокообразному телу порфировых пород, локализуясь как в рудоносных порфирах, так и среди вмещающих пород плутона. Рудный штокверк месторожде-

ния с концентрированным оруденением имеет нечеткие границы, условно проводимые по изолинии содержания условной меди в 0.4%. Он локализуется в виде кольцеобразной залежи ( $1.3 \times 1.1$  км) с зауженной западной и широкими южной и восточной частями кольца. На месторождении выделено кварцевое ядро ( $350 \times 500$  м), северная и южная залежи.

Северная залежь (длина – 1300 м, средняя горизонтальная мощность – 300 м) рудного штокверка сложена богатыми рудами, приуроченными преимущественно к кварц-серицитовым метасоматитам, и сложными по составу пирит-халькопирит-молибденит-борнитовыми рудами с теннантитом и энаргитом и включает в себе основные запасы месторождения. Залежь круто

(90–85–700, реже до 650) опускается на север, где она прослеживается до глубины 900 м.

Южная залежь (1 × 0.5 км) сложена прожилковой пирит-халькопиритовой или халькопирит-борнитовой минерализацией в аргиллизированных породах, реже кварц-серицитовых метасоматитах, по площади значительно превосходит Северную залежь, но характеризуется менее богатыми рудами. Она облекает “кварцевое ядро” с юга, востока и запада и имеет пологое падение на юг (10–650, редко до 750), и рудная минерализация прослеживается до глубины 400 м.

Балансовые запасы месторождения Ак-Суг, утвержденные ГКЗ РФ в 2014 г., составляют (по категориям): Cu – 6.24 млн т (B + C<sub>1</sub>) и 512.1 тыс. т (C<sub>2</sub>), Mo – 141.4 (B + C<sub>1</sub>) и 7.2 (C<sub>2</sub>) тыс. т, Au – 83 т (C<sub>2</sub>), Ag – 288.5 т (C<sub>2</sub>) и Re – 83.3 т (C<sub>2</sub>). Среднее содержание Cu на месторождении варьирует от 0.67 до 1.37%, Mo – 0.019–0.008%, Ag – 1.31–1.26 г/т, Au – 0.18–0.07 г/т, Re – 0.29–0.16 г/т. Среднее отношение в рудах Cu/Mo – 70–40, Ag/Au – 7–10 (Berzina et al., 2016; Pollard et al., 2017). В некоторых пробах отмечаются повышенные содержания Pt – до 0.096 г/т и Pd – до 0.924 г/т (Sotnikov et al., 2001; Кужугет и др., 2015).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы руд и гидротермально измененных пород отобраны с поверхности месторождения из геологоразведочных каналов (глубиной до 2 м). Для определения минерального состава, текстурно-структурных особенностей руд и гидротермально измененных пород и взаимоотношений минералов полированные шлифы и аншлифы были изучены при помощи микроскопов Olympus BX41 и ПОЛАМ П-213М в ТувИКОПР СО РАН.

Химический состав минералов определен в ИГМ СО РАН на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450 + XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd). Составы самородного золота и других минералов были исследованы при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и времени набора спектров в реальном времени 30 с.

Для характеристики золота и минералов (кубических твердых растворов) системы Au–Ag использована терминология, принятая в работах (Вернадский, 1914; Петровская, 1973; Спиридонов, 2010): самородное золото (1000–700‰: весма высокопробное – 1000–950‰, высокопробное – 950–900‰, среднепробное – 900–800‰, низкопробное – 800–700‰), электрум (700–300‰) и кюстелит (300–100‰) и Au-содержащее серебро с пробностью < 100‰.

РТ-условия отложения рудных минеральных ассоциаций изучены методом термометрии, а

также с помощью геотермометров, геофугометров и по минеральным парагенезисам. Флюидные включения в кварце анализировались в термокамере TMS-600 Linkam с ПО LinkSystem 32 DV-NC и оптическим микроскопом Olympus BX51 с измерениями температур фазовых переходов в диапазоне от –196 до 600°C (ЮУрГУ, г. Миасс). Термометрические измерения были откалиброваны с использованием стандартов включения синтетической жидкости для точек замерзания чистого CO<sub>2</sub> (–56.6°C) и чистой H<sub>2</sub>O (0°C). Воспроизводимость калибровок составляет ±0.6°C для нагрева и ±0.2°C – для замораживания. Интерпретация температур эвтектики флюидных включений проведена с использованием работы А.С. Борисенко (1982). Концентрация солей растворов во включениях определена по температуре плавления льда (Atkinson, 2002; Vodnar, 1993; Vodnar, Vituk, 1994). Состав газовой фазы флюидных включений уточнен в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) при помощи рамановского спектрометра Horiba Jobin Yvon LabRam HR800 в сочетании с CCD-детектором и микроскопом Olympus BX40 с использованием 532-нм Nd:YAG-лазера. Монохроматор откалиброван по кремниевой полосе (520.7 см<sup>-1</sup>). Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica.

Изотопный состав серы сульфидов проанализирован в ИГМ СО РАН на газовом масс-спектрометре Finnigan MAT Delta в режиме двойного напуска (аналитик В.Н. Реутский). Значения δ<sup>34</sup>S (‰) приведены относительно стандарта CDT.

Изотопные составы кислорода в кварце определены в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) на газовом масс-спектрометре Finnigan MAT 253 с использованием двойной системы напуска (аналитик В.Ф. Посохов). Измерения откалиброваны с использованием международных стандартов NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит) (Coplen, 1988). Погрешность полученных значений составила не более 0.2–0.3‰. Значения δ<sup>18</sup>O приведены в промилле (‰) относительно стандарта SMOW.

## МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

Медно-порфировое оруденение месторождения Ак-Суг сопровождается ореолами гидротермально измененных пород, развитых по рудоносным порфирам и вмещающим гранитоидам. Метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется с типовой зональностью метасоматической колони медно-порфирового месторождения и имеет вид (от центра к периферии): “кварцевое ядро” → → кварцевые ± кварц-калишпатовые метасоматиты → серицит-кварцевые (филлизитовые) и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты → аргиллизиты → пропициты (Забелин, 1992).

Интрузивные породы в центральной части месторождения интенсивно переработаны до состояния вторичных кварцитов, в их состав входит кварц 80–95%, серицит – 5–15%, альбит – 2–5%, рутил  $\leq$  1%. К ним приурочена бедная молибденовая минерализация.

Кварц-калишпатовые изменения проявлены калишпатизацией и окварцеванием гранитоидов, в центральной части месторождения они накладываются на вторичные кварциты в виде кварц-калишпатовых прожилков мощностью до 2 см и образуют штокверковые зоны.

Серицит-кварцевые (филлизитовые) и кварц-серицит-хлоритовые изменения выражены интенсивной серицитизацией, окварцеванием и хлоритизацией, иногда проявлены карбонатизация и альбитизация. Эти породы на месторождении являются преобладающими типами метасоматитов, образованных по рудоносным тоналит-порфирам. Они сложены кварцем (40–50%), серицитом (40–45%), альбитом (7–10%), карбонатом (1–2%); мусковит, пиррофиллит, диаспор, андалузит, рутил и апатит  $\leq$  1%. Около 80% запасов руд месторождения сосредоточено в кварц-серицитовых и кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах. Пропилитизированные породы и пропилиты преимущественно развиты по кварцевым диоритам на периферии месторождения. Пропилитизация в породах проявлена интенсивными процессами хлоритизации, эпидотизации и карбонатизации. В породе содержание кварца составляет 20–25%, альбита – 40–50%, серицита – 10%, эпидота – 10%, актинолита – 2%, карбоната –  $\leq$  1%, рудных минералов – 1–2% (сфен, гематит, пирит). К пропилитам приурочена убогая прожилково-вкрапленная пиритовая минерализация.

Картина зональности на отдельных участках усложняется наложенной аргиллизацией, а также контактом пропилитов с породами “кварцевого ядра”. Аргиллизиты не образуют какой-то определенной зоны, а встречаются в виде отдельных участков в зонах кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов. Для аргиллизитов характерна следующая ассоциация минералов: гидросерицит (30–40%), кварц (20–30%), каолинит, диксит (25–30%), хлорит и кальцит (3–10%). В аргиллизитах широко развиты поздние кварцевые и сульфидно-кварцевые прожилки с Au–Ag минерализацией.

Рудная минерализация на месторождении Ак-Суг отлагалась в три этапа: с первым этапом связано формирование медно-порфировой минерализации, со вторым – субэпитептермальной (переходной к эпитептермальной) золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевой минерализации, с третьим – эпитептермальной Au–Ag минерализации (фиг. 2).

По данным предшественников (Забелин, 1992; Берзина и др., 2007; Pollard et al., 2017) и собствен-

ным наблюдениям авторов, медно-порфировая минерализация месторождения Ак-Суг представлена двумя минеральными ассоциациями.

Первая сульфидно-кальцит-кварцевая ассоциация с пиритом, халькопиритом, борнитом  $\pm$  молибденитом образует прожилки (мощностью до 1.5 см) в кварц-калишпатовых метасоматитах (см. фиг. 2).

Вторая галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая ассоциация (2), широко развита в виде прожилков (мощностью до 30 см) в кварц-серицитовых метасоматитах. Содержания сульфидов в кварцевых прожилках и жилах варьируют от 10 до 25%. Основными рудными минералами являются халькопирит, молибденит и пирит, менее распространены теннантит, галенит (Se до 1 мас. %) и сфалерит (Fe до 0.24 мас. %), который содержит мелкие эмульсионные включения халькопирита (фиг. 3).

Молибденит выделяется в виде чешуек и их агрегатов в кварце размером от 10–70 мкм до 0.2–0.7 см.

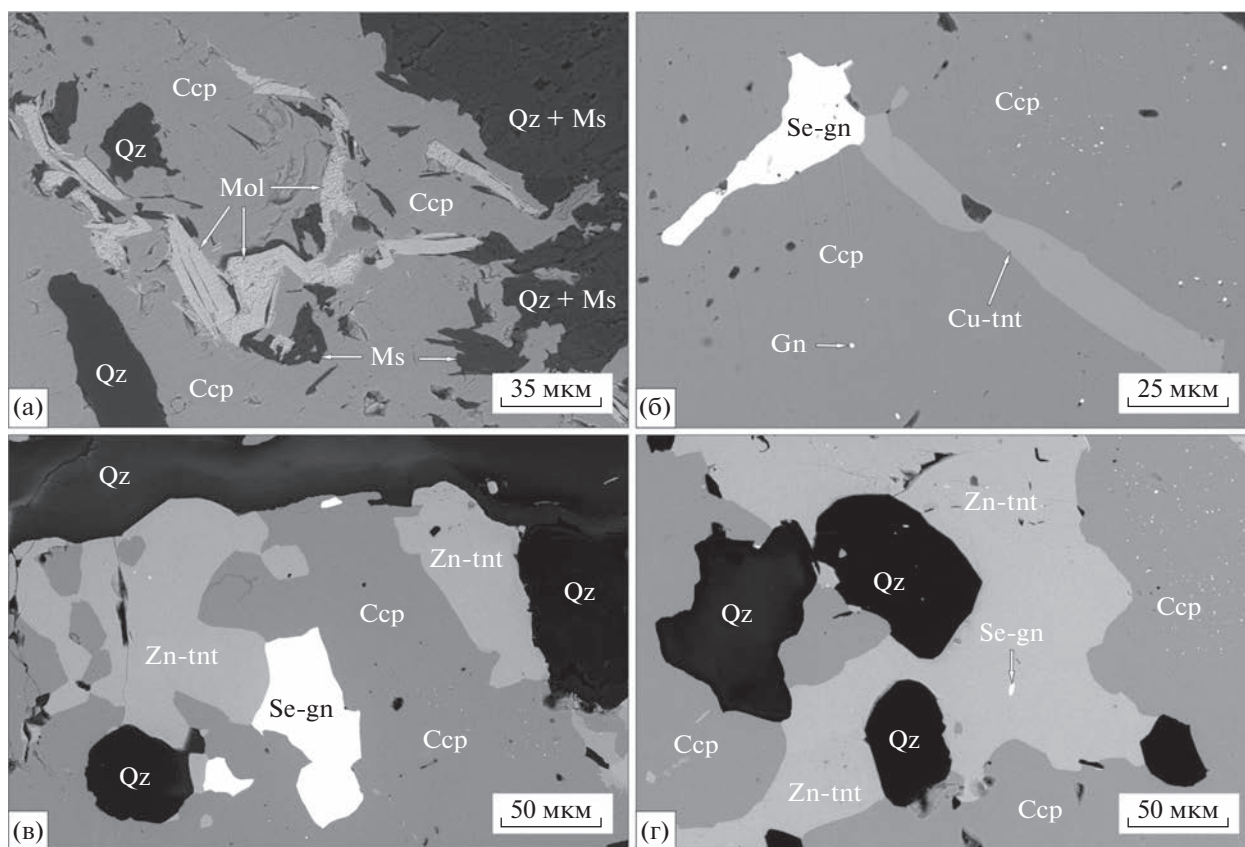
Блеклые руды по химическому составу относятся к Cu-теннантиту, Fe-теннантиту и Zn-теннантиту. Химический состав Cu-теннантита ( $n = 3$ , здесь и далее формулы блеклых руд рассчитаны на 29 формульных коэффициентов)  $Cu_{10}(Zn_{0.36-0.58}Fe_{0.16-0.71}Cu_{0.78-1.32})_{1.85-2.01}(As_{3.90-4.04}Sb_{0.03-0.09})_{3.99-4.07}S_{12.97-13.00}$ , Fe-теннантита ( $n = 2$ ) –  $Cu_{10}(Zn_{0.18-0.57}Fe_{0.75-1.03}Cu_{0.70-1.01})_{2.16-2.22}(As_{3.85-3.99}Sb_{0.06-0.26})_{4.05-4.11}S_{12.73-12.88}$ , Zn-теннантита ( $n = 2$ ) –  $Cu_{10}(Zn_{0.73-0.86}Fe_{0.71-0.80}Cu_{0.25-0.65})_{1.91-2.04}(As_{3.31-3.71}Sb_{0.34-0.76})_{4.05-4.07}S_{12.91-13.03}$ . Эти блеклые руды характеризуются слабой зональностью, обусловленной увеличением содержания Sb к их внешним зонам зерен. По химическому составу прослеживается их эволюция от Cu-теннантита до Zn-теннантита через Fe-теннантит (Kuzhuget et al., 2018).

Субэпитептермальная золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевая минерализация (3), наложена на медно-порфировую минерализацию и образует прожилки (до 1 см) и гнезда (до 0.5 см) в кварц-серицитовых метасоматитах. Рудные минералы представлены халькопиритом, борнитом, энаргитом, пиритом, галенитом (Se – до 13.61 мас. %, Ag – до 1.74 мас. %), клаусталитом (S до 5.73 мас. %, Ag до 0.72 мас. %), гесситом, меренскиитом  $PdTe_2$ , темагамитом  $Pd_3HgTe_3$ , арсенопалладинитом  $Pd_8As_3$ , сопчеитом  $Ag_4Pd_3Te_4$ , S-кавацулитом, Se-тетрадимитом, айкинитом, виттихенитом, Vi-теннантитом (до 15 мас. % Vi), Zn-теннантитом, золотом, гесситом, баритом  $\pm$  молибденит  $\pm$  кобальтин.

Мельчайшие включения (до 5 мкм) меренскиита отмечены в борните, кварце, халькопирите и

Минерал	Этапы					
	Медно-порфировый		Субэпитеермальный		Эпитеермальный	
	Гидротермальные минеральные ассоциации					
	1	2	3	4	5	6
Кварц						
Кальцит						
Пирит						
Борнит						
Халькопирит						
Молибденит						
Галенит						
Сфалерит						
Блеклые руды						
Теллурувисмутит $\text{Bi}_2\text{Te}_3$						
Золото						
Электрум						
Клаусталит $\text{PbSe}$						
Гессит $\text{Ag}_2\text{Te}$						
Алтаит $\text{PbTe}$						
Барит						
Меренскиит $\text{PbTe}_2$						
Арсенопаладинит $\text{Pb}_8\text{As}_3$						
Сопчеит $\text{Ag}_4\text{Pb}_3\text{Te}_4$						
Теагамит $\text{Pb}_3\text{HgTe}_3$						
Энарцит $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$						
Кобальгин $\text{CoAsS}$						
Цумоит $\text{BiTe}$						
Кавацулит $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$						
Тетрадимит $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$						
Виттихенит $\text{Cu}_3\text{BiS}_4$						
Айкинит $\text{CuPbBiS}_3$						
Петцит $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$						
Калаверит $\text{AuTe}_2$						
Сильванит $(\text{AgAu})_2\text{Te}_4$						
Штютцит $\text{Ag}_{5-x}\text{Te}_3$						
Мутманнит $\text{AgAuTe}_2$						
Эмпресит $\text{AgTe}$						
Науманнит $\text{Ag}_2\text{Se}_2$						
Акантит $\text{Ag}_2\text{S}$						
Штрмейерит $\text{CuAgS}$						
Mg-анкерит						
Mg-сидерит						
Касситерит						

Фиг. 2. Схема последовательности минералообразования месторождения Ак-Суг.



**Фиг. 3.** Взаимоотношения минералов галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевой ассоциации в кварц-серичитовых метасоматитах: а – халькопирит (Ccp), молибденит (Mol) с кварцем (Qz) и серицитом (Ms); б – ксеноморфные зерна галенита (Gn), Se-галенита (Se-gn) и Cu-теннантита (Cu-tnt) в халькопирите (Ccp); в – срastание Zn-теннантита (Zn-tnt) с халькопиритом (Ccp), галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) в кварце (Qz); г – срastание Zn-теннантита (Zn-tnt) с халькопиритом (Ccp) в ассоциации с галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) и кварцем (Qz). Снимки в режиме BSE.

блеклых рудах (фиг. 4а–в). Для минерала характерна примесь Pt до 1.09 мас. % (табл. 1).

Мелкие включения темагамита (до 3 мкм) находятся в халькопирите и меренскиите (фиг. 4в). Выделения арсенопалладинита до 5 мкм образуют срastания с гесситом в ассоциации с борнитом, халькопиритом (фиг. 4е). Сопчеит (до 10 мкм) отмечен на контакте борнита и халькопирита (фиг. 4д).

Самородное золото встречено в Zn-теннантите, Vi-теннантите, борните и халькопирите (фиг. 4е–ж). Золото образует комковидно-ветвистые, трещинно-прожилковые формы, реже индивиды с отчетливыми гранями кристаллов куба. Золото по содержанию Ag представлено (мас. %): высокопробным (Au 89.51–92.64, Ag 7.15–9.84), среднепробным (Au 80.94–89.88, Ag 10.06–18.66) и низкопробным (Au 79.05, Ag 20.79) золотом.

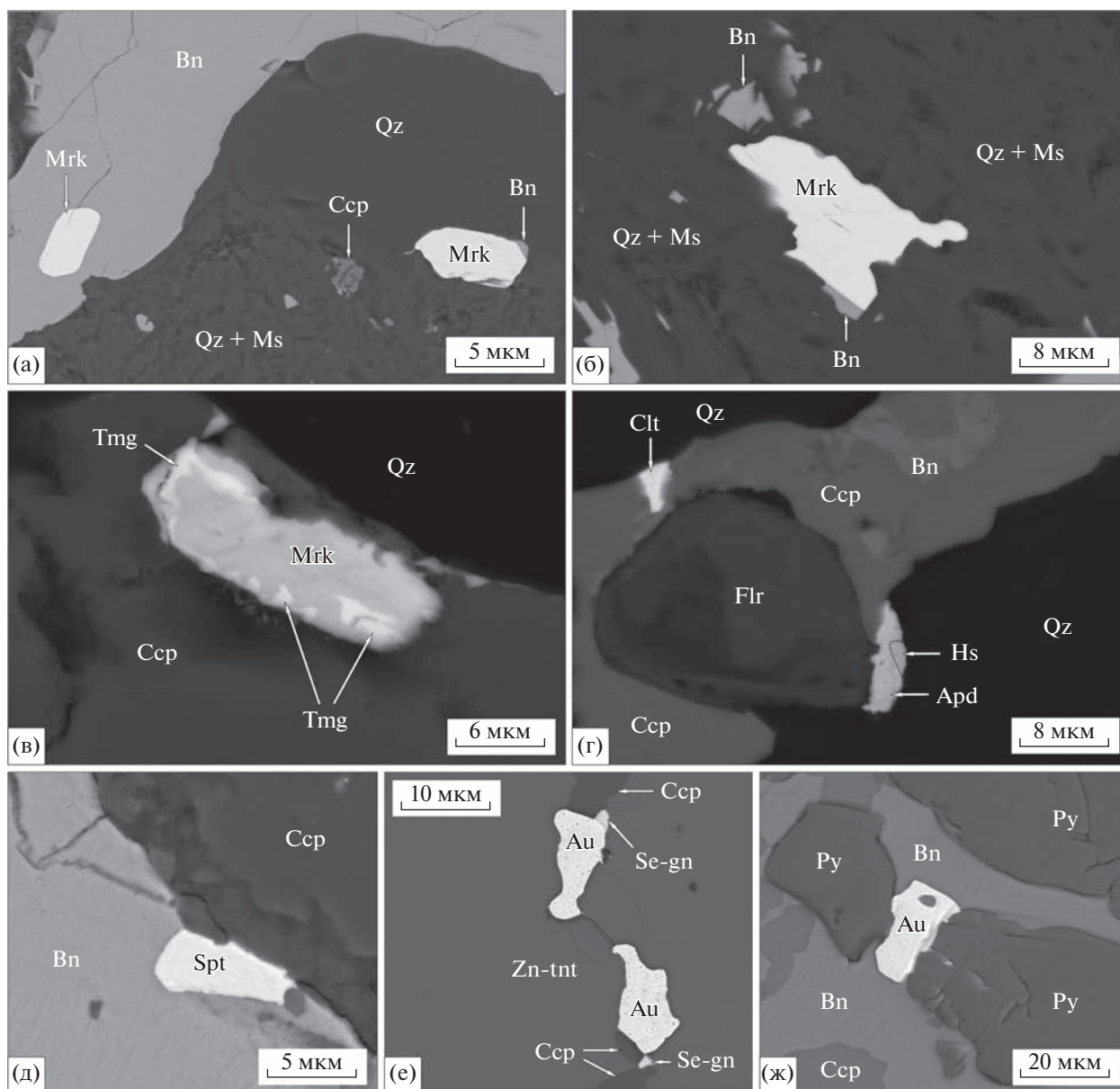
Гессит образует срastания с халькопиритом, клаусталитом, арсенопалладинитом, виттихени-том, S-кавацулитом, Se-тетрадимитом, борнитом и айкинитом (фиг. 5).

Теллуриды Ag, сульфотеллуриды Bi и сульфовисмутиды Cu, Pb (от 5 до 200 мкм) находятся в виде мономинеральных включений в кварце, пирите, халькопирите, Vi-теннантите, а также ассоциируют с золотом и теллуридами Pd (см. фиг. 5). Химические составы их стехиометричны или имеют небольшие отклонения от стехиометрии (табл. 2).

По химическому составу субэпитеральные блеклые руды относятся к Bi-содержащему Zn-теннантиту ( $n = 4, Cu_{9.73-10}(Zn_{1.68-1.81}Fe_{0.11-0.17}Cu_{0.00-0.06})_{1.87-2.01}(As_{2.69-3.50}Bi_{0.43-1.27})_{3.95-3.98}S_{13.05-13.32}$ ) и Zn-теннантиту –  $Cu_{10}(Zn_{0.73}Fe_{0.71}Cu_{0.60})_{2.04}(As_{3.71}Sb_{0.34})_{4.05}S_{12.91}$ . Блеклые руды характеризуются зональностью, обусловленной уменьшением содержания Bi к внешним зонам (фиг. 5г), а в наиболее позднем Zn-теннантите вместо Bi появляется Sb до 2.79 мас. %.

К эпитеральным отнесены поздние золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая ((4), см. фиг. 2), золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая (5) и золото-пирит-халькопирит-





**Фиг. 4.** Меренскиит (Mrk), темагамит (Tmg), арсенопалладинит (Apd), сопчеит (Spt), гессит (Hs) с борнитом (Bn), халькопиритом (Csp), кварцем (Qz), серицитом (Ms), клаусталитом (Clt), Zn-теннантитом (Zn-tnt), Se-галенитом (Se-gn) пиритом (Py) и аксессуарным флоренситом (Flr) тоналит-порфиров. Снимки в режиме BSE.

блекловорудно-кварцевая (б) минеральные ассоциации в кварц-гидрослюдистых метасоматитах и аргиллизитах.

Золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевые прожилки (до 7 см) и жилы (видимой мощностью 50 см и протяженностью до 300 см) развиты в кварц-гидрослюдистых метасоматитах. Содержания сульфидов в кварцевых жилах и прожилках составляют от 20 до 35%. Из рудных минералов преобладают борнит, халькопирит, барит, менее распространены молибденит, пирит, галенит, Se-галенит (Se до 3.67 мас. %), редко отмечаются золото и электрум. В борните отмечаются пластинчатые и решетчатые структуры халькопирита как

результат распада при охлаждении твердых растворов. Золото и электрум образуют сростания с пиритом, халькопиритом, борнитом и баритом, а также мелкую вкрапленность в борните и кварце (фиг. 6–7).

Золото (до 0.3 мм) и электрум (до 0.25 мм) имеют трещинно-прожилковую, комковидно-ветвистую, комковато-ячеистую, интерстициальную формы, реже встречаются изометричные кристаллы с развитием комбинации форм куба и октаэдра и их сростания. Поверхность зерен золота шагреновая и мелкоямчатая, цвет – от золотисто-

**Таблица 1.** Химические составы минералов Pd (мас. %)

№ п/п	Pd	Pt	Ag	Cu	Hg	Te	As	Sb	Сумма	Кристаллохимическая формула
Меренскиит										
1	29.76	1.09	—	—	—	68.69	—	—	99.54	(Pd <sub>1.02</sub> Pt <sub>0.02</sub> ) <sub>1.04</sub> Te <sub>1.96</sub>
2	30.07	—	—	—	—	69.93	—	—	100	Pd <sub>1.02</sub> Te <sub>1.98</sub>
3	29.77	—	—	—	—	69.42	—	—	99.19	Pd <sub>1.02</sub> Te <sub>1.98</sub>
4	29.90	—	—	—	—	69.69	—	—	99.59	Pd <sub>1.02</sub> Te <sub>1.98</sub>
5	29.98	—	—	—	—	70.19	—	—	100.17	Pd <sub>1.02</sub> Te <sub>1.98</sub>
6	29.84	—	—	—	—	69.65	—	—	99.4	Pd <sub>1.02</sub> Te <sub>1.98</sub>
Темагамит										
7	35.16	—	—	—	21.58	42.81	—	—	—	Pd <sub>2.99</sub> Hg <sub>0.97</sub> Te <sub>3.04</sub>
Сопчеит										
8	25.19	—	34.23	—	—	40.52	—	—	99.94	Ag <sub>4.00</sub> Pd <sub>2.99</sub> Te <sub>4.01</sub>
9	25.43	—	33.89	—	—	40.11	—	—	99.43	Ag <sub>3.98</sub> Pd <sub>3.03</sub> Te <sub>3.99</sub>
Арсенопалладинит										
10	79.40	—	—	—	—	—	18.92	1.1	99.36	Pd <sub>8.13</sub> (As <sub>2.75</sub> Sb <sub>0.11</sub> ) <sub>2.87</sub>
11	78.26	—	—	—	—	1.69	18.57	1.06	99.58	Pd <sub>8.05</sub> (As <sub>2.71</sub> Te <sub>0.14</sub> Sb <sub>0.10</sub> ) <sub>2.95</sub>

Примечание. Прочерк – ниже пределов обнаружения. Формула меренскиита рассчитана на 3 ат., темагамита – 7 ат., арсенопалладинита – 4 ат., сопчеита – 11 ат.

желтого до серебристого с желтоватым оттенком (см. фиг. 7).

В золоте содержание Ag от центра зерен к краям закономерно увеличивается на 7–12, реже 17–20 мас. %. Примесь Te достигает 0.76 мас. %, Cu – ниже предела обнаружения. По химическому составу самородное золото образует следующий ряд (мас. %): 1) среднепробное (Au 80.30–86.17, Ag 13.64–18.89; Te 0.00–0.56); 2) низкопробное (Au 69.79–79.22, Ag 19.96–29.71; Te 0.00–0.49) золото; 3) электрум (Au 33.04–69.61, Ag 29.81–66.20, Te 0.00–0.76).

Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация ((5), см. фиг. 2) образует прожилки (до 3 см) и гнезда (до 0.7 см) и наложена на раннюю прожилково-вкрапленную медно-порфировую минерализацию. Основными минералами являются кварц, Mg-анкерит, борнит, халькопирит, энаргит, барит, целестобарит (SrO до 7 мас. %), пирит, галенит, Zn-теннантит-тетраэдрит, редкими являются теллуриды Ag и Au, науманнит и золото. Из теллуридов Au и Ag чаще всего встречается гессит (Ag<sub>2</sub>Te), реже петцит, калаверит, сильванит, мутманнит и штюццит, которые в виде мелких включений (1–40 мкм) отмечаются в халькопирите, кварце и борните (фиг. 8, табл. 3).

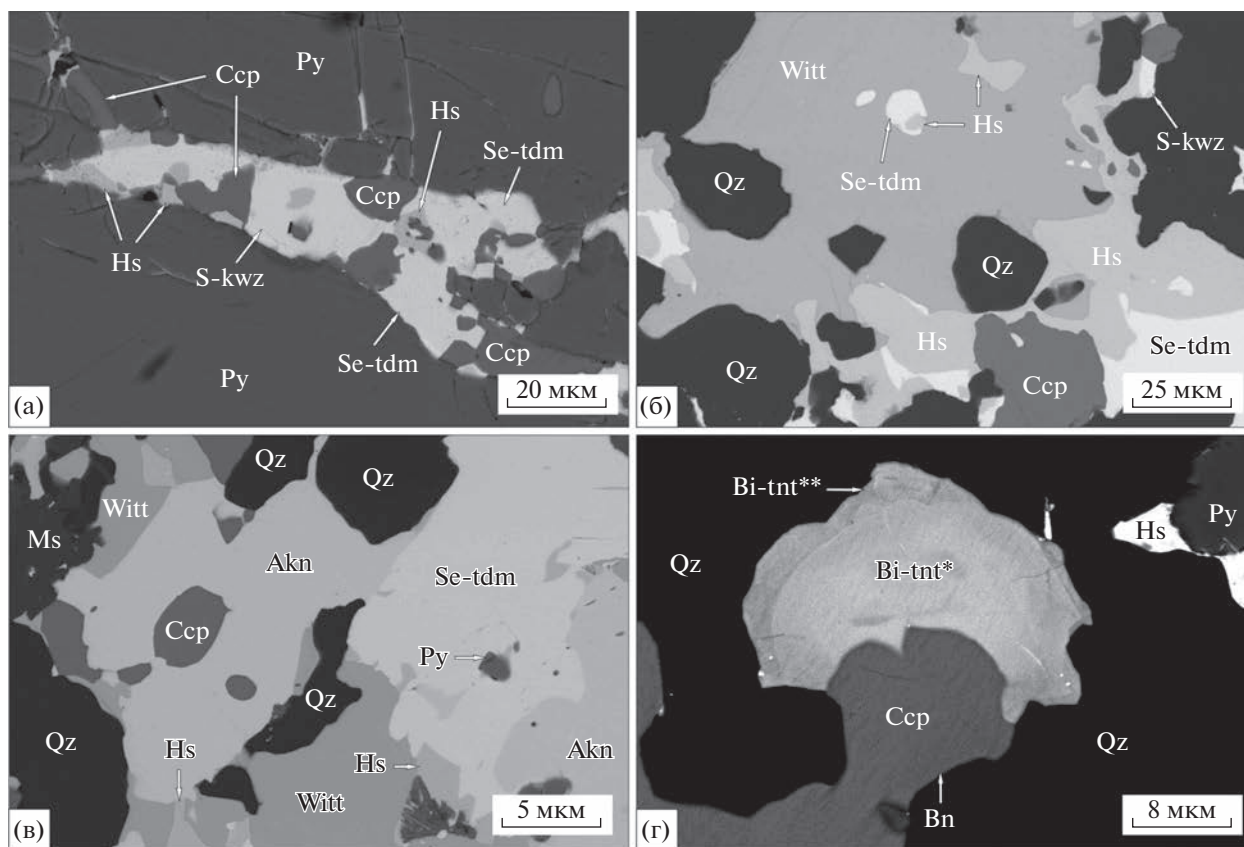
Золото этой ассоциации часто образует сростания с петцитом, гесситом и калаверитом в борните (см. фиг. 8). По составу оно представлено среднепробным (Au 79.92–85.34, Ag 14.56–19.33) и низкопробным (Au 78.11–78.73, Ag 20.72–22.48) золотом.

Науманнит, акантит и штрмейерит находятся в виде мелких включений (от 5 до 50 мкм) и в сростаниях в халькопирите, борните, энаргите и Mg-анкерите. Составы минералов не отклоняются от стехиометрии.

Блеклые руды образуют сростания с халькопиритом, борнитом, энаргитом, гесситом, алтаитом и баритом. По химическому составу блеклые руды представлены Zn-теннантит-тетраэдритом ( $n = 13, Cu_{10}(Zn_{1.10-1.31}Fe_{0.28-0.56}Cu_{0.14-0.55})_{1.81-2.10}(As_{2.53-3}Sb_{1.06-1.45}Bi_{0-0.11}Te_{0-0.02})_{3.98-4.12}S_{12.89-13.12}$ ). Примеси Sb достигают 11.34 мас. %, Bi – 1.47 мас. %, Te – 0.13 мас. %.

Поздние золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевые ((6), см. фиг. 2) прожилки (до 0.9 мм) и жилы (мощностью от 0.5 до 1.2 м и протяженностью 5 м) приурочены к кварц-гидрослюдистым метасоматитам и аргиллизитам в краевых частях месторождения. Эти прожилки с халькопиритом, теннантит-тетраэдритом, кварцем и Mg-сидеритом (Fe<sub>0.73-0.80</sub>Mg<sub>0.20-0.26</sub>Ca<sub>0.00-0.01</sub>)<sub>1.00</sub>CO<sub>3.00</sub> часто цементируют более ранний катаклазированный пирит (фиг. 9).

Содержания сульфидов в кварцевых прожилках и жилах составляют от 10 до 45%. Из рудных минералов преобладают Cu-теннантит, Zn-теннантит, Zn-теннантит-тетраэдрит, халькопирит, пирит, менее распространены галенит, Se-галенит (Se до 6.96 мас. %), борнит, Cu-теннантит-тетраэдрит, касситерит, золото, электрум, энаргит, редки S-клаусталит (S до 5.09 мас. %), нау-



**Фиг. 5.** Взаимоотношения минералов субэпитеpмальной минерализации: а – прожилки с Се-тетрадимитом (Se-tdm), S-кавацулитом (S-kwz), гесситом (Hs), халькопиритом (Ccp) в брекчированном пирите (Py) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевой минерализации медно-порфиrowого этапа; б–в – гессит в виттихените (Witt) и в виде срastаний с Се-тетрадимитом (Se-tdm), S-кавацулитом (S-kwz), халькопиритом (Ccp), айкинитом (Akn) и пиритом (Py) в кварце (Qz) и сериците (Ms); г – гессит (Hs), халькопирит (Ccp), пирит (Py) и зональное зерно Би-теннантита (Bi-tnt\* – центр зерна содержит Bi до 15.7 мас. %, Bi-tnt\*\* – в кайме Bi до 9.8 мас. %) в кварце. Снимки в режиме BSE.

маннит и сфалерит. Золото и электрум (от 3 мкм до 1.5 мм) встречаются в виде тонких вкраплений в Zn-теннантите, Zn-теннантит–тетраэдрите, халькопирите и кварце либо образуют тесные срastания с халькопиритом, Zn-теннантит–тетраэдритом и борнитом.

Золото и электрум в кварце и рудных минералах характеризуются интерстициальными, ксеноморфными, комковато-ветвистыми, дендритовидными формами или искаженными монокристаллами и их удлинненными срastаниями с крючковидными отростками, реже наблюдаются изометричные кристаллы с комбинацией форм куба и октаэдра (фиг. 10).

По химическому составу золото образует следующий ряд (мас. %): 1) весьма высокопробное (Au – 95.86, Ag – 4.08); 2) высокопробное (Au – 91.06–93.01, Ag – 6.75–8.64); 3) среднепробное (Au – 81.52–89.63, Ag – 10.31–17.82); 4) низкопробное (Au – 70.78–79.87, Ag – 20.10–29.22) золото; 5) электрум (Au – 63.37–66.84, Ag – 33.14–35.92).

В ассоциации с золотом и электрумом находятся Се-галенит, S-клаусталит, науманнит и гессит. Состав Се-галенита отвечает формуле (на 2 ат.) –  $Pb_{0.99-1.02}(S_{0.58-0.97}Se_{0.01-0.43})_{0.98-1.01}$ , S-клаусталита –  $Pb_{0.99}(Se_{0.60}S_{0.41})_{1.01}$ , науманнита (на 3 ат.) –  $Ag_{1.99-2.02}Se_{0.98-1.01}$ , гессита –  $Ag_{2.00-2.01}Te_{0.99-1.01}$ .

Блеклые руды зональные и по химическому составу эволюционируют от высокомедистого теннантита до Zn-теннантит–тетраэдрита. Химический состав Cu-теннантита –  $Cu_{10.00}(Zn_{0.29}Fe_{0.81}Cu_{1.06})_{2.16}(As_{3.98}Sb_{0.04})_{4.02}S_{12.82}$ , Zn-теннантита ( $n = 3$ ) –  $Cu_{10}(Zn_{1.06-1.21}Fe_{0.29-0.37}Cu_{0.12-0.52})_{1.70-1.92}(As_{3.71-3.81}Sb_{0.20-0.40})_{4.01-4.11}S_{13.05-13.19}$ , Zn-теннантит–тетраэдрита ( $n = 10$ ) –  $Cu_{10}(Zn_{1.10-1.22}Fe_{0.31-0.74}Cu_{0.19-0.55})_{1.98-2.28}(As_{2.71-2.96}Sb_{1.04-1.19})_{3.88-4.02}S_{12.90-13.00}$ . Содержание Sb достигает 9.52 мас. %, Bi и Te – ниже пределов обнаружения.

Мощность зоны окисления месторождения достигает нескольких метров, в зонах дробления – 30–80 м. В коре выветривания развиты малахит, азурит, ковеллин, халькозин, гетит, гематит, англезит, церуссит, куприт и самородная медь.

**Таблица 2.** Химические составы кавачулита, тетрадимита, теллуридов Ag и Bi, сульфовисмутитов Pb и Cu (мас. %)

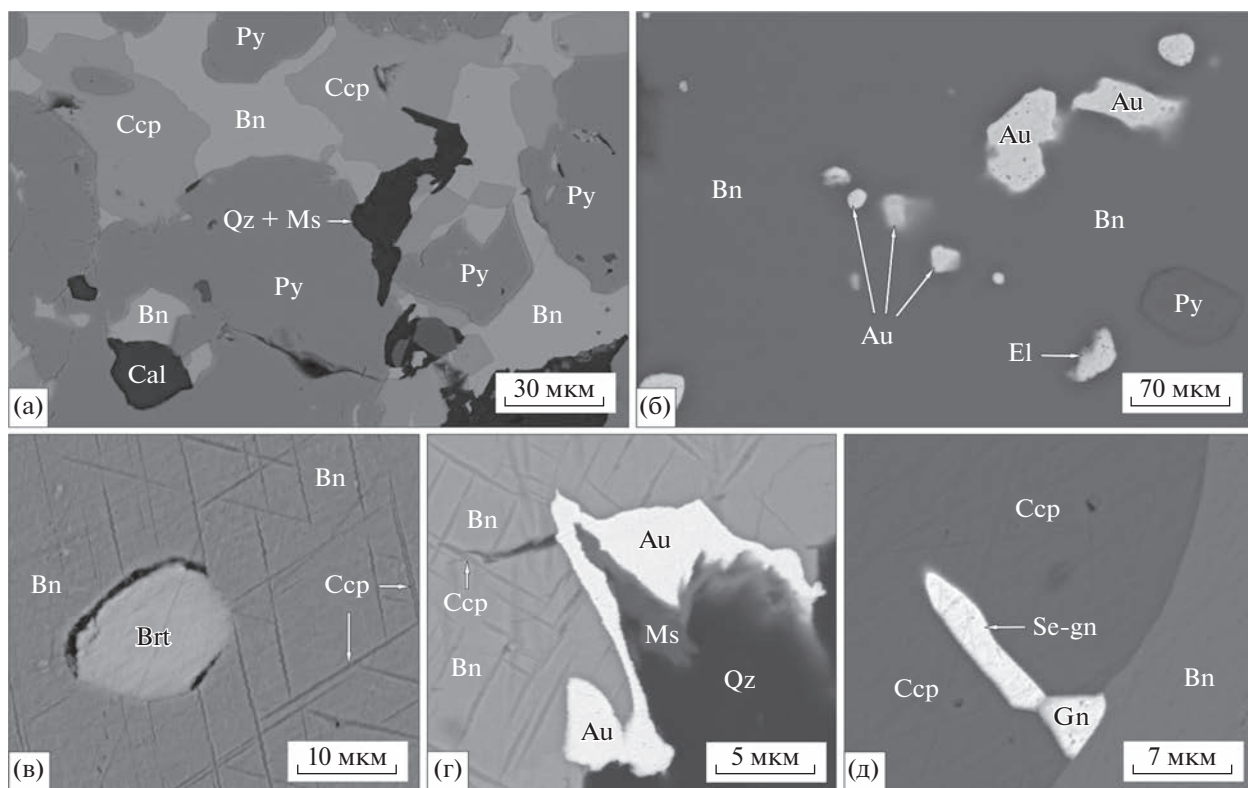
№ п/п	Ag	Cu	Pb	Bi	Te	Se	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
Гессит									
1	61.71	—	—	—	37.3	—	—	99.04	Ag <sub>1.98</sub> Te <sub>1.02</sub>
2	61.84	—	—	—	37.7	—	—	99.5	Ag <sub>1.98</sub> Te <sub>1.02</sub>
3	61.91	—	—	—	37.1	—	—	99.04	Ag <sub>1.99</sub> Te <sub>1.01</sub>
4	62.41	—	—	—	36.8	—	—	99.2	Ag <sub>2.00</sub> Te <sub>1.00</sub>
5	61.74	—	—	—	37.6	—	—	99.34	Ag <sub>1.98</sub> Te <sub>1.02</sub>
6	62.12	—	—	—	37.26	—	—	99.38	Ag <sub>1.99</sub> Te <sub>1.01</sub>
7	62.31	—	—	—	37.67	—	—	99.98	Ag <sub>1.99</sub> Te <sub>1.01</sub>
Теллуровисмутит									
8	—	—	—	51.89	47.56	—	—	99.45	Bi <sub>2.00</sub> Te <sub>3.00</sub>
9	—	—	—	51.02	48.24	—	—	99.26	Bi <sub>1.96</sub> Te <sub>3.04</sub>
Цумоит									
10	—	—	—	60.26	38.99	—	—	99.25	Bi <sub>0.97</sub> Te <sub>1.03</sub>
11	—	—	—	62.4	37.42	—	—	99.82	Bi <sub>1.01</sub> Te <sub>0.99</sub>
Кавачулит									
12	—	—	—	56.9	34.2	7.13	1.40	99.73	Bi <sub>2.02</sub> Te <sub>1.98</sub> (Se <sub>0.67</sub> S <sub>0.33</sub> ) <sub>1.00</sub>
13	—	—	—	57.01	34.32	7.16	1.45	99.94	Bi <sub>2.01</sub> Te <sub>1.99</sub> (Se <sub>0.67</sub> S <sub>0.33</sub> ) <sub>1.00</sub>
14	—	—	—	57.22	34.25	7.78	1.11	100.36	Bi <sub>2.03</sub> Te <sub>1.99</sub> (Se <sub>0.73</sub> S <sub>0.25</sub> ) <sub>0.98</sub>
Тетрадимит									
15	—	—	—	60.5	36.30	2.90	3.70	99.22	Bi <sub>2.03</sub> Te <sub>2.00</sub> (S <sub>0.64</sub> Se <sub>0.33</sub> ) <sub>0.97</sub>
16	—	—	—	58.1	35.12	3.58	2.81	99.61	Bi <sub>2.03</sub> Te <sub>2.01</sub> (S <sub>0.64</sub> Se <sub>0.33</sub> ) <sub>0.97</sub>
17	—	—	—	57.08	35.91	2.83	3.38	99.2	Bi <sub>1.96</sub> Te <sub>2.02</sub> (S <sub>0.76</sub> Se <sub>0.26</sub> ) <sub>1.02</sub>
Виттихенит									
18	—	38.66	—	41.79	—	—	19.55	100	Cu <sub>3.00</sub> Bi <sub>0.99</sub> S <sub>3.01</sub>
19	—	39.21	—	41.17	—	—	19.58	99.96	Cu <sub>3.03</sub> Bi <sub>0.97</sub> S <sub>3.00</sub>
20	—	39.74	—	41.03	—	—	19.12	99.89	Cu <sub>3.09</sub> Bi <sub>0.97</sub> S <sub>2.94</sub>
21	—	37.77	—	41.43	—	1.6	18.64	99.44	Cu <sub>2.98</sub> Bi <sub>1.00</sub> (S <sub>2.92</sub> Se <sub>0.10</sub> ) <sub>3.02</sub>
22	—	38.06	—	42.63	—	—	18.97	99.66	Cu <sub>3.01</sub> Bi <sub>1.02</sub> S <sub>2.97</sub>
23	—	38.57	—	41.6	—	—	19.68	99.85	Cu <sub>2.99</sub> Bi <sub>0.98</sub> S <sub>3.03</sub>
Айкинит									
24	—	11.16	35.13	36.87	—	—	16.01	99.17	Cu <sub>1.03</sub> Pb <sub>1.00</sub> Bi <sub>1.04</sub> S <sub>2.93</sub>
25	—	10.91	35.87	36.68	—	—	16.45	99.91	Cu <sub>1.00</sub> Pb <sub>1.01</sub> Bi <sub>1.02</sub> S <sub>2.98</sub>

Примечание. Прочерк — ниже пределов обнаружения. Формула цумоита рассчитана на 2 ат., гессита — 3 ат., теллуровисмутита, кавачулита и тетрадимита — 5 ат., айкинита — 6 ат., виттихенита — 7 ат.

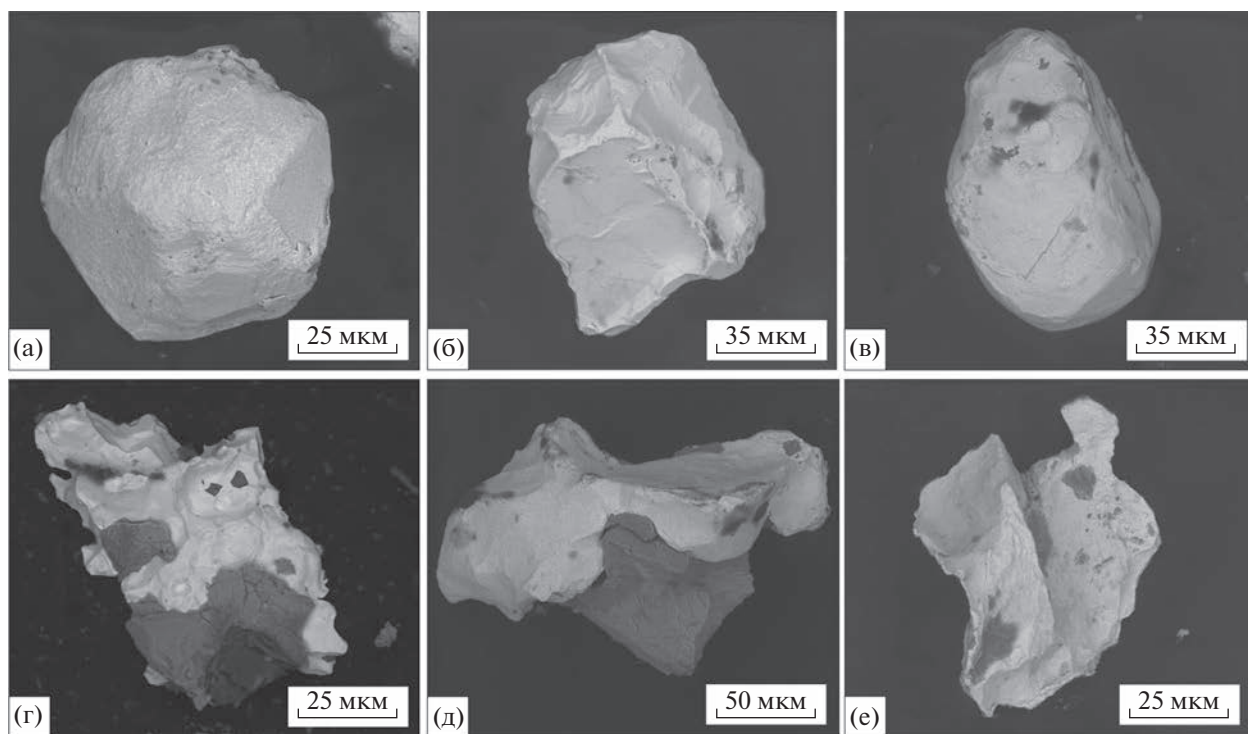
### УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ

Для определения условий образования минеральных ассоциаций месторождения Ак-Суг проанализированы флюидные включения в прозрачно-полированных шлифах жильного кварца с рудной минерализацией. Основываясь на опти-

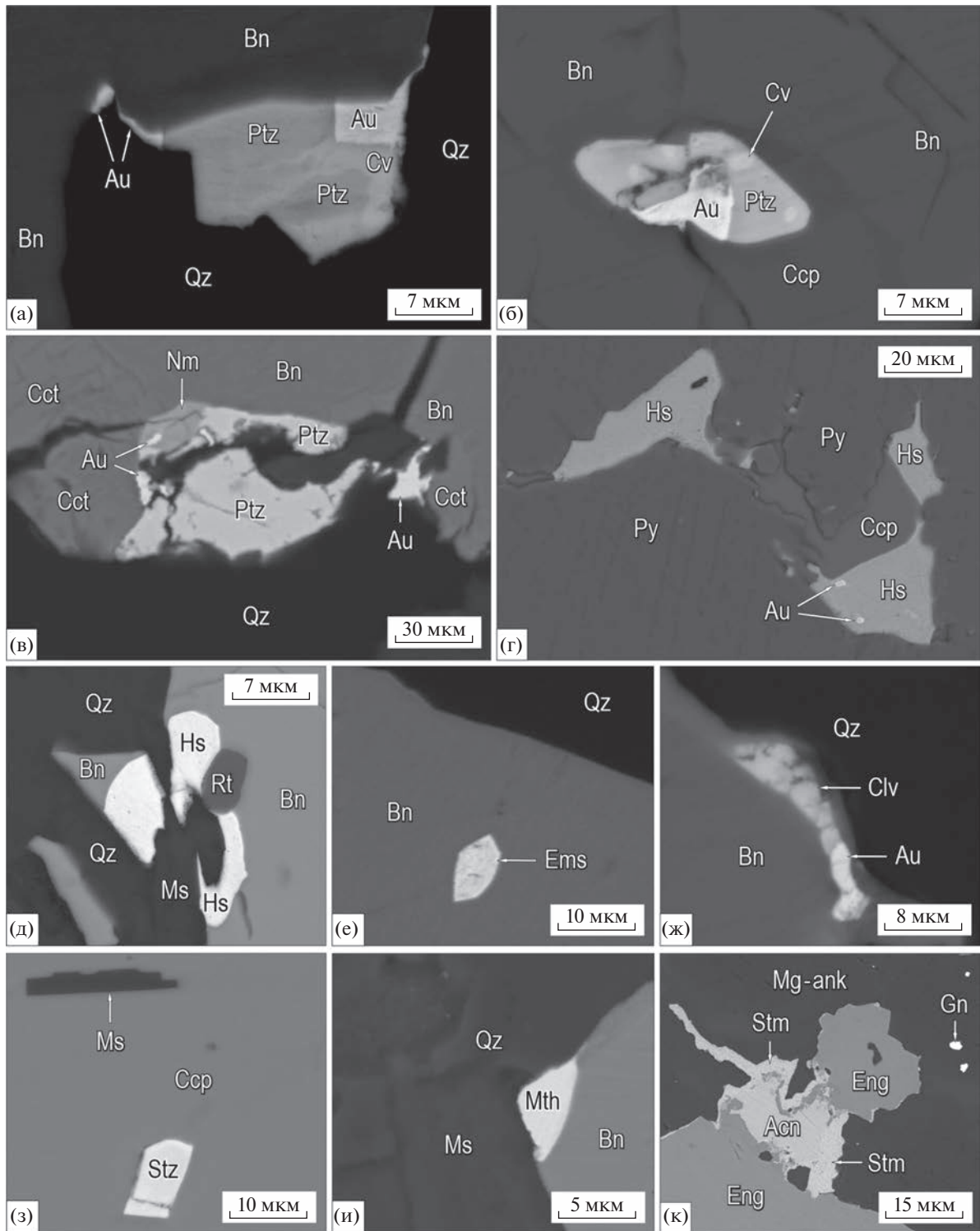
ческих наблюдениях и критериях Э. Реддера (1978), были выделены первичные и первично-вторичные флюидные включения (ФВ) в зернах и кристаллах серого и прозрачного кварца, сингенетичные рудной минерализации, а также вторичные газово-жидкие включения (фиг. 11). Размеры флюидных включений редко превышают 5–



**Фиг. 6.** Борнит (Bn), халькопирит (Ccp), золото (Au), барит (Brt), галенит (Gn) и Se-галенит (Se-gn) в золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевой жиле с кальцитом (Cal), кварцем (Qz), серицитом (Ms) и ранним брекчированным пиритом (Py). Снимки в режиме BSE.



**Фиг. 7.** Самородное Au золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевых жил: а – изометричный кристалл с развитием комбинации форм куба и октаэдра; б – с развитием форм куба; в – плохо ограниченное золото; г–д – интерстициальное золото в виде сростаний с халькопиритом (темно-серое); е – ксеноморфное золото с отпечатками и ровными гранями в межкристаллических промежутках кварца и пирита. Снимки в режиме BSE.



**Фиг. 8.** Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация: а–б – сростания золота (Au), петцита (Ptz) и калаверита (Cv) на контакте борнита (Bn) и кварца (Qz), а также в борните и халькопирите; в – сростания золота (Au), петцита (Ptz) и науманнита (Nm) на контакте борнита (Bn), кварца (Qz) и халькозина (Cct); г–д – зерна гессита (Hs) с пиритом (Py), халькопиритом (Ccp), борнитом (Bn), кварцем (Qz) и более ранним рутилом (Rt) и серицитом (Ms); е – включение эмпресита (Ems) в борните (Bn); ж – сростания золота (Au) и силванита (Clv) на контакте борнита (Bn) и кварца (Qz); з – включение штульцита (Stz) в халькопирите (Ccp); и – выделения эмпресита (Ems) на контакте борнита (Bn), кварца (Qz) и гидросерицита (Ms); к – сростания акантита (Acn), штрмейерита (Stm) и энаргита (Eng) в Mg-анкерите (Mg-ank). Снимки в режиме BSE.

Таблица 3. Химические составы теллуридов Au, Ag и Pb (мас. %)

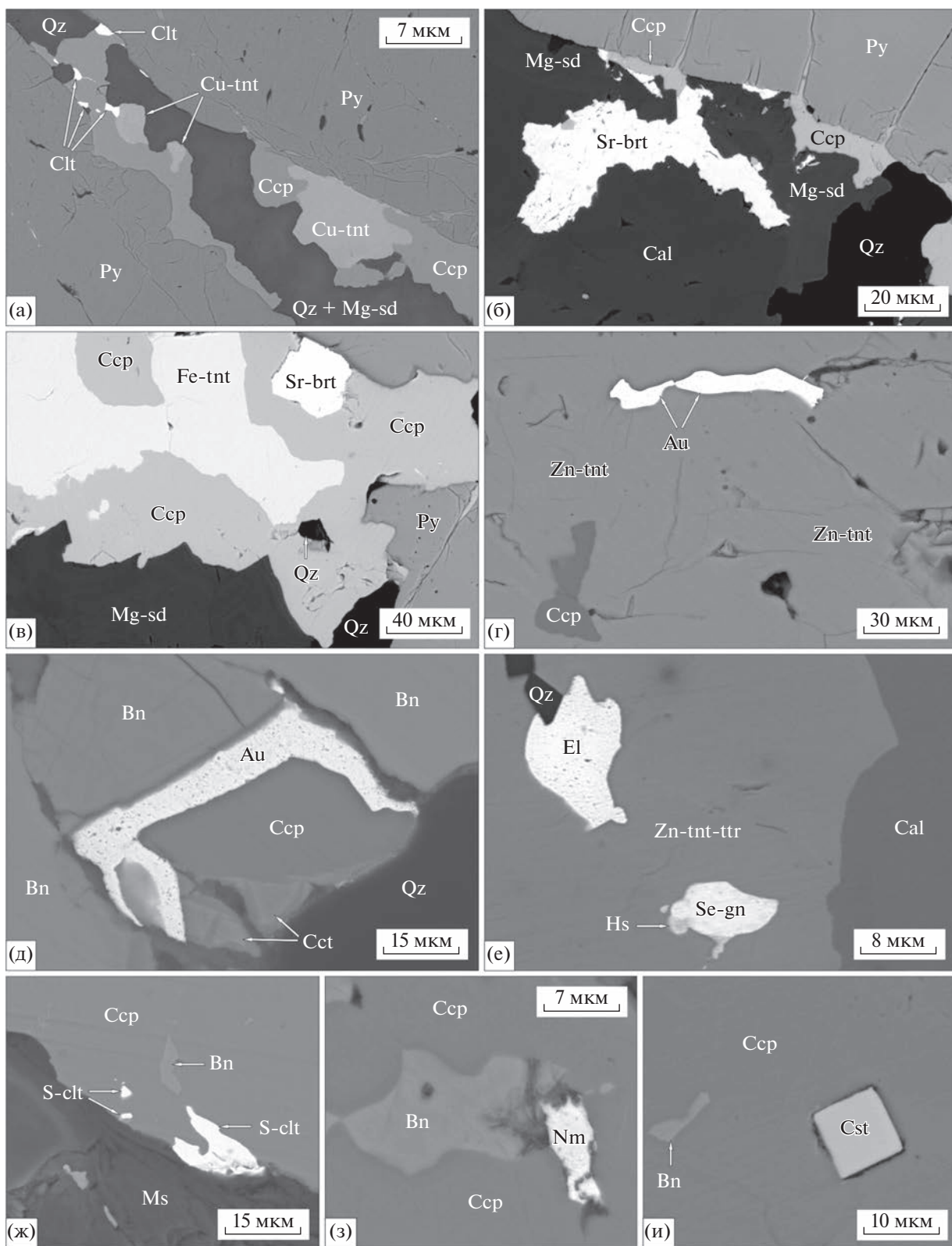
№ п/п	Au	Ag	Pb	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
Калаверит						
1	42.93	—	—	56.92	99.85	$Au_{0.98}Te_{2.02}$
Петцит						
2	24.57	42.25	—	33.7	100.52	$Ag_{3.01}Au_{0.96}Te_{2.03}$
3	24.16	41.75	—	33.41	99.32	$Ag_{3.01}Au_{0.95}Te_{2.03}$
4	24.16	41.21	—	33.7	99.07	$Ag_{2.98}Au_{0.96}Te_{2.06}$
5	24.84	41.38	—	32.85	99.07	$Ag_{3.00}Au_{0.99}Te_{2.01}$
6	25.86	41.18	—	32.84	99.88	$Ag_{2.97}Au_{1.02}Te_{2.01}$
7	26.08	40.74	—	32.7	99.52	$Ag_{2.96}Au_{1.04}Te_{2.01}$
8	24.71	41.71	—	33.3	99.72	$Ag_{3.00}Au_{0.97}Te_{2.03}$
Сильванит						
9	24.2	13.21	—	62.05	99.46	$Ag_{1.00}Au_{1.01}Te_{3.99}$
10	23.38	13.75	—	62.57	99.70	$Ag_{1.03}Au_{0.97}Te_{3.99}$
11	23.38	13.8	—	62.57	99.75	$Ag_{1.04}Au_{0.97}Te_{3.99}$
12	23.73	12.96	—	60.83	97.52	$Ag_{1.01}Au_{1.01}Te_{3.98}$
13	24.2	13.21	—	62.05	99.46	$Ag_{1.01}Au_{1.00}Te_{3.99}$
Мутманнит						
14	35.34	19.6	—	44.96	99.9	$Au_{1.00}Ag_{1.02}Te_{1.98}$
Гессит						
15	—	62.66	—	37.13	99.79	$Ag_{2.00}Te_{1.00}$
16	—	61.9	—	37.16	99.06	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
17	—	62.98	—	37.67	100.65	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
18	—	61.71	—	37.68	99.39	$Ag_{1.98}Te_{1.02}$
19	—	62.05	—	37.28	99.33	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
20	—	61.83	—	37.57	99.4	$Ag_{1.98}Te_{1.02}$
21	—	62.39	—	37.19	99.58	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
Эмперсит						
22	—	45.46	—	54.22	99.68	$Ag_{1.00}Te_{1.00}$
23	—	46.41	—	53.47		$Ag_{1.01}Te_{0.99}$
Штютцит						
24	—	58.37	—	41.06	99.43	$Ag_{5.02}Te_{2.98}$
Алтаит						
25	—	—	61.38	38.14	99.52	$Pb_{1.00}Te_{1.00}$

Примечание. Прочерк — ниже пределов обнаружения. Формулы алтаита и эмперсита рассчитаны на 2 ат., калаверита и гессита — 3 ат., мутманнита — 4 ат., петцита и сильванита — на 6 ат., штютцита — 8 ат.

10 мкм, что затрудняло термобарогеохимические исследования. Состав газовой фазы включений определен методом рамановской спектроскопии.

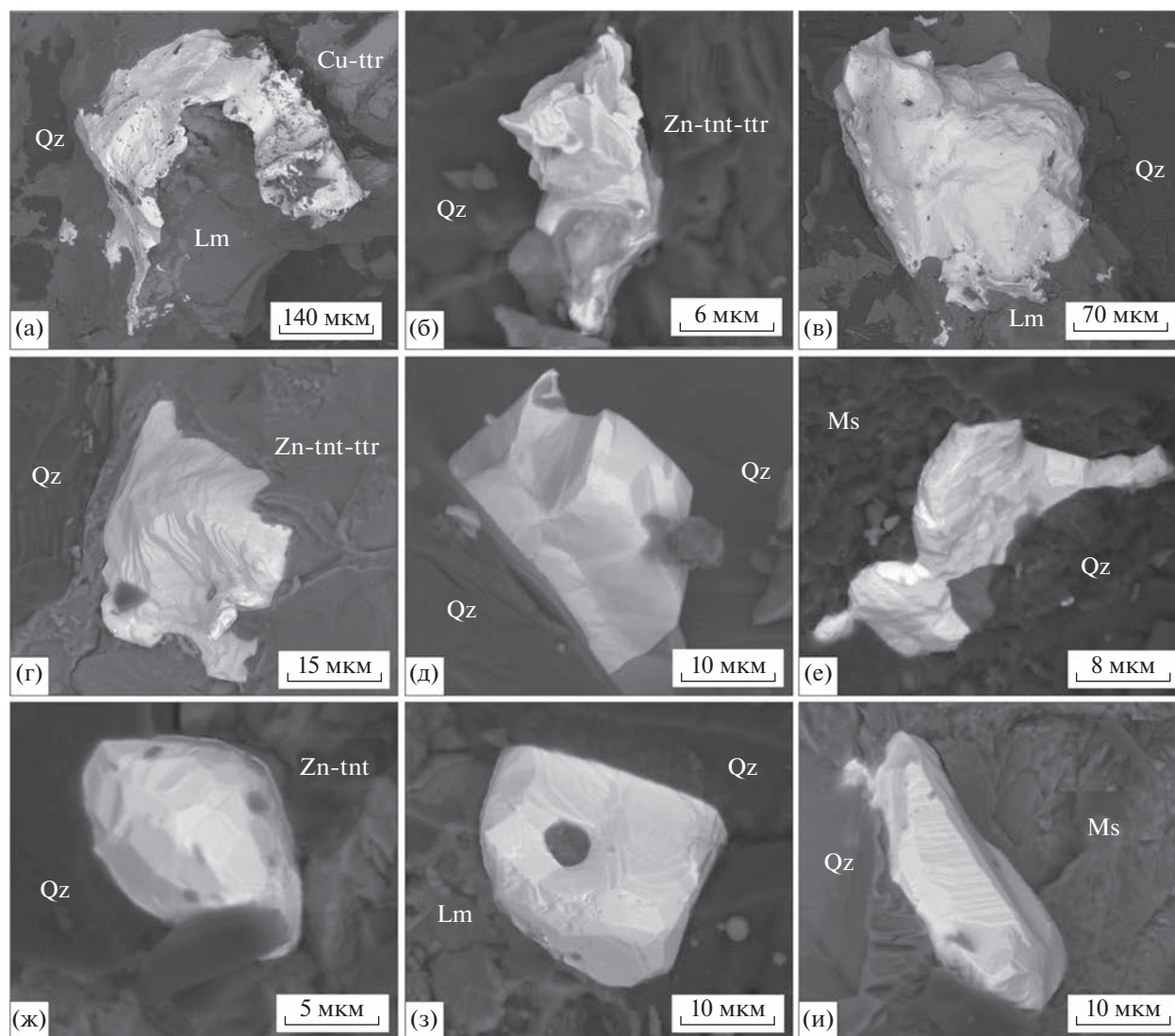
В кварце галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевых прожилков медно-порфинового этапа выделены двухфазные газожидкие ( $VL - Ж_{H_2O} + Г$ ) и трехфазные с  $CO_2$  ( $VLC - Ж_{H_2O} + Ж_{CO_2} + Г_{CO_2}$ ) включения (фиг. 11а).

Первичные VLC флюидные включения имеют округлую, прямоугольную и вытянутую форму, расположены одиночно, редко группами, в центральных частях зерен серого и прозрачного кварца. Включения содержат кубические кристаллические фазы NaCl, газовый пузырек с жидкой углекислотой, а также редкие черные непрозрачные частицы рудного вещества. Псевдотрихичные VL



**Фиг. 9.** Выделения клаусталита (Clt), S-клаусталита (S-clt), Se-галенита (Se-gn), халькопирита (Ccp), борнита (Bn), Cu-теннантита (Cu-tnt), Fe-теннантита (Fe-tnt), Zn-теннантита (Zn-tnt), Zn-теннантит–тетраэдрита (Zn-tnt-ttr), золота (Au), электрума (El), гессита (Hs) кварца (Qz), ангидрита (Anh), кальцита (Cal), Mg-сидерита (Mg-sd), Sr-барита (Sr-brt), касситерита (Cst) и науманнита (Nm) золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевой ассоциации с ранним пиритом (Py) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой ассоциации. Ms – серицит. Снимки в режиме BSE.





**Фиг. 10.** Самородное Au золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевых жил: а–б – интерстициальные зерна золота в кварце (Qz), Cu-теннантите (Cu-ttr), Zn-теннантит–тетраэдрите (Zn-tnt-ttr) и лимоните (Lm); в – комковидное золото в кварце (Qz) и лимоните (Lm); г–е – ксеноморфные зерна золота в кварце (Qz), Zn-теннантит-тетраэдрите (Zn-tnt-ttr) и сериците (Ms); ж–и – изометричные кристаллы с комбинацией форм куба и октаэдра в кварце (Qz), Zn-теннантите (Zn-tnt) сериците (Ms) и лимоните (Lm). Снимки в режиме BSE.

флюидные включения встречаются в трещинах, распространяющихся в пределах кристалла-хозяина и “упирающихся” в рудный минерал. Они характеризуются удлиненной или изометричной формой и размерами 5–10 мкм.

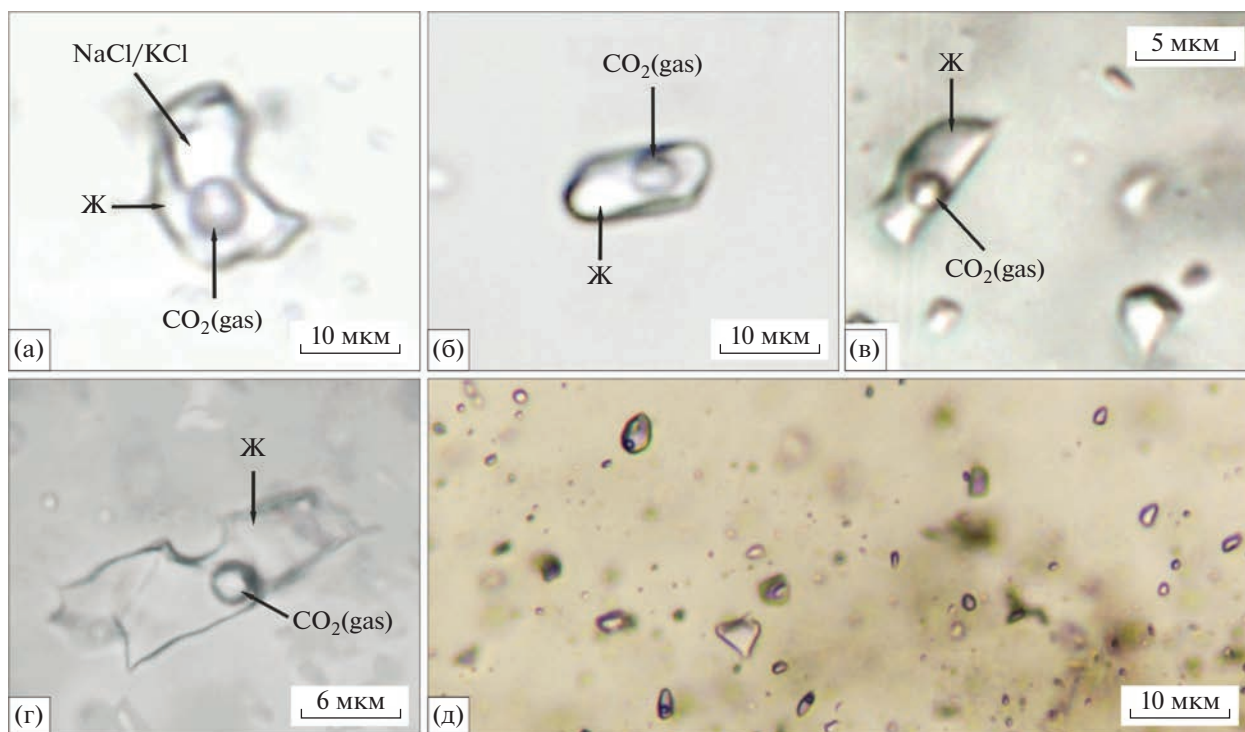
В составе газовой фазы первичных VLC ФВ определена углекислота. Минеральная фаза светлоокрашенная, изотропная, имеет кубический облик и представлена хлоридом Na. Полученные температуры гомогенизации 350–390°C, концентрация солей во флюиде – 31.9–32.9 мас. % NaCl-эquiv.

Псевдвторичные VL ФВ в газовой фазе содержат углекислоту. Температуры гомогенизации варьируют от 320 до 335°C. Солевой состав раствора по температурам эвтектики (–22...–28°C)

хлоридный калиево-натровый. Согласно температурам плавления льда (–15...–15.4°C), концентрации солей составляют 20.1–20.6 мас. % NaCl-эquiv.

По первичным VL флюидным включениям в кварце субэпитермальных золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевых прожилков определен средне-, высокотемпературный ( $T_{\text{гом}}$  260–370°C) хлоридный флюид комплексного состава (Na–K ± Fe ± Ca ± Mg) с CO<sub>2</sub> в газовом пузырьке. Соленость флюида во включениях варьирует от 7.5 до 15 мас. % NaCl-эquiv. (табл. 4).

В кварце эпитеpmальных золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевых, золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевых и золото-пи-



**Фиг. 11.** Флюидные включения в кварце месторождения Ак-Суг: а – первичные VLC включения с твердыми кубическими фазами галита, рудной фазой и CO<sub>2</sub> в кварце медно-порфирового этапа; б – первичные газопожидкие включения в кварце субэпитеpмального этапа; в – псевдотривичные газопожидкие включения в кварце эпитеpмального этапа; г–д – вторичные газопожидкие (г) и существенно жидкие (д) включения в кварце эпитеpмального этапа.

рит-халькопирит-блекловорудно-кварцевых жил VL флюидные включения встречаются в виде обособленных вакуолей и малочисленных групп в центральных частях зерен, а также трассируют заделанные трещины.

В солевом составе жидкой фазы флюидных включений в кварце золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевых жил определены водные хлориды Na и K ± Fe ± Ca ± Mg. Температуры эвтектики образуют интервалы –19...–22 (для первичных включений) и –18...–28°C (для псевдотривичных включений). Гомогенизация в жидкую фазу происходила при 290–335°C у первичных включений и 250–280°C – для псевдотривичных включений. Концентрация солей выше в первичных включениях (до 12.9 мас. %), а в псевдотривичных включениях она варьирует от 2 до 4.6 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 4).

В прозрачных или полупрозрачных зернах кварца золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевых прожилков были зафиксированы двухфазные флюидные включения размером 10–12 мкм. Включения имеют округлую, изометричную форму, расположены обособленно, приурочены к крайним частям зерен кварца. Температуры эвтектики варьируют от –14 до –33°C, что предполагает углекислотно-водно-хлоридный флюид комплексного состава Na–K ± Fe ± Ca ± Mg. Тем-

пературы гомогенизации попадают в интервал 220–290°C. Соленость флюида во включениях составила 1.4–7 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 4).

Двухфазные первичные флюидные включения в кварце золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевых жил имеют температуры эвтектики растворов от –21 до –36°C и содержат флюид с хлоридами Na, K, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ca и Mg с соленостью 3.8–6.7 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации флюидных включений составили 200–240°C. Вторичные VL включения низкотемпературные (150–200°C) с соленостью 3.5–4.9 мас. % NaCl-экв. В составе флюида, заключенного в них, помимо хлоридов Na и K (температуры эвтектики –8...–13°C), определены SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и углекислота (см. табл. 4). Эти низкотемпературные хлоридные растворы наряду с CO<sub>2</sub> содержат примесь азота (1–15 об. %), который определен методом рамановской спектроскопии.

В эпитеpмальных минеральных ассоциациях наблюдается уменьшение концентрации солей в растворе с уменьшением температуры минералообразования (фиг. 12).

Электрум-сфалеритовым геотермометром (Shikazono, 1985):  $T_K = \{28765 + 22600(1 - N_{Ag})^2 - 6400(1 - N_{Ag})^3\} / \{49.008 - 9.152 \log X_{FeS} +$

**Таблица 4.** Результаты изучения флюидных включений в кварце

Обра- зец	Тип	Фазовый состав	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	Соленость (мас. % NaCl-экв.)	Состав флюида
<b>Медно-порфировый этап</b>								
Галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая ассоциация (2)								
AS-18	П	VLC	4	350–390	–	–	31.9–32.8	Хлориды Na и K + CO <sub>2</sub>
AS-8	ПВ	VL	3	320–335	–22...–28	–15...–15.4	20.1–20.6	
<b>Субэпитеpмальный этап</b>								
Золото-висмут-теллуридно-палладиево-кварцевая ассоциация (3)								
AS-6	П	VL	4	330–370	–11...–20	–8.1...–10	11.8–14.7	Хлориды Na и K + CO <sub>2</sub>
As-47	ПВ	VL	4	315–330	–11...–16	–7.7...–11	7.5–9.2	
As-48	П	VL	3	285–290	–14...–19	–7.7...–11	11.4–15	Хлориды Na, K, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Ca, Mg
<b>Эпитеpмальный этап</b>								
Золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация (4)								
AS-K4	П	VL	31	290–335	–19...–22	–1.5...–7	2.5–12.9	Хлориды Na, K, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Ca, Mg
	ПВ		25	250–280	–18...–28	–1.5...–2.8	2.0–4.6	
Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация (5)								
AS-60	П	VL	29	220–290	–14...–33	–1.1...–4.4	1.4–7.0	Хлориды Na, K, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Ca, Mg + CO <sub>2</sub>
Золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая ассоциация (6)								
AS-K7	П	VL	44	200–240	–21...–36	–2.2...–4.2	3.8–6.7	Хлориды Na, K, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Ca, Mg
	В	L	6	150–200	–8...–13	–3...–2.1	3.5–4.9	

Примечание. *n* – количество анализов,  $T_{\text{гом}}$  – температура гомогенизации,  $T_{\text{эвт}}$  – температура эвтектики,  $T_{\text{пл. льда}}$  – температура плавления льда. Типы включений: П – первичные, ПВ – псевдотричные, В – вторичные. VLC – трехфазные газовой-жидкие с углекислотой; VL – двухфазные газовой-жидкие.

+ 18.2961 log  $N_{\text{Ag}}$  + 5.5(1 –  $N_{\text{Ag}}$ )<sup>2</sup> установлено, что минеральная ассоциация субэпитеpмального этапа отлагалась при 357–352°C, минеральные ассоциации эпитеpмального этапа – при 280–212°C (золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая – 280–240°C по парагенезису петцит–гессит–золото, при значениях  $\lg f(\text{Te}_2) = 10^{-16}$ – $10^{-13}$  (Бортников и др., 1988), золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая – 224–212°C по электрум-сфалеритовому геотермометру (Shikazono, 1985).

Расчет давления при образовании поздних минеральных эпитеpмальных ассоциаций произведен по сфалеритовому геобарометру (Toulmin et al., 1991): оно оценено в 0.55 кбар при температуре кристаллизации сфалерита, согласно электрум-сфалеритовому геотермометру равной 220°C.

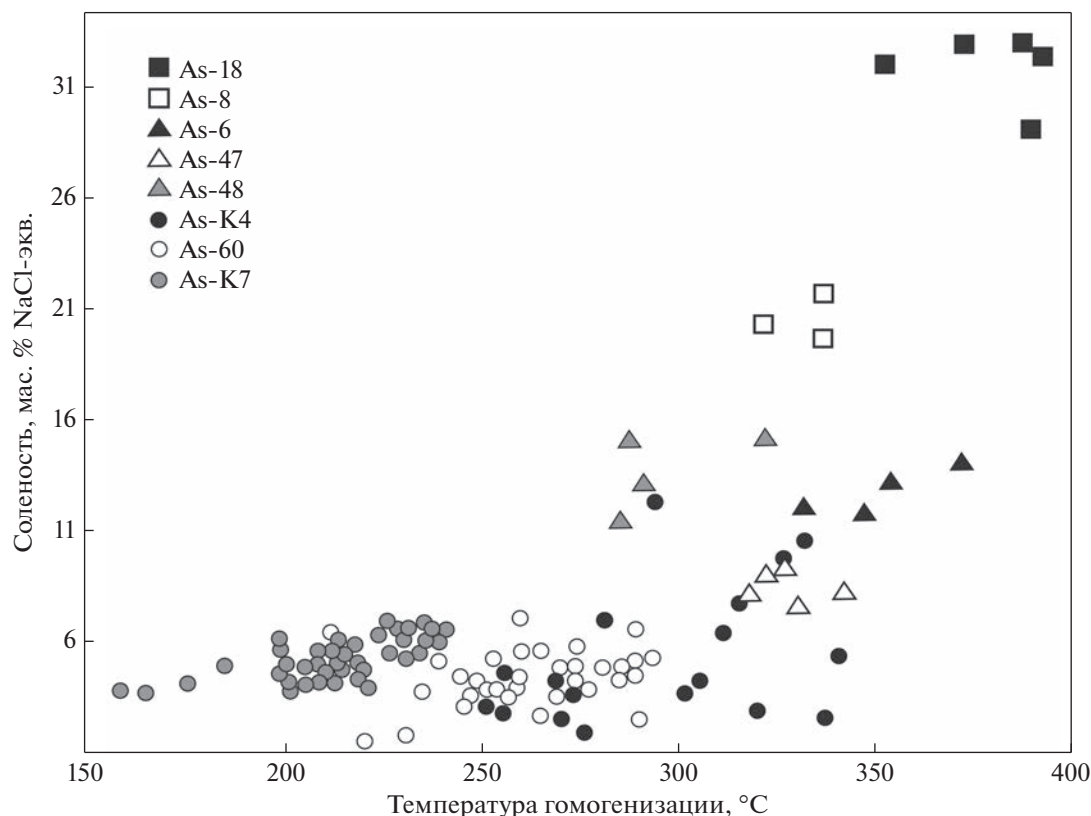
Если принять, что глубины формирования медно-порфировых, субэпитеpмальных и эпитеpмальных минеральных ассоциаций близки, то, с учетом поправки к температурам гомогенизации флюидных включений в кварце на давление 0.55 кбар при минералообразовании (Steele-MacInnis et al., 2012), истинные температуры минералооб-

разования медно-порфировой минерализации составили 435–375°C, субэпитеpмальной – 415–325°C, эпитеpмальные минеральные ассоциации отлагались при следующих температурах: 370–290°C, 330–250°C и 280–190°C. Отметим, что наличие во флюидных включениях медно-порфирового этапа жидкой углекислоты вместе с галитом при комнатной температуре указывает на высокое давление минералообразования.

#### ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ И КИСЛОРОДА ФЛЮИДА

Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S}$ ) в пирите галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевых прожилков медно-порфирового этапа варьирует от –1.0 до +1.2‰, в халькопирите субэпитеpмального этапа – от –1.9 до –2.5‰, халькопирите эпитеpмального этапа – от –0.9 до –2.9‰ (табл. 5).

Значения  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  флюида, в соответствии с уравнением фракционирования (Ohmoto, Rye, 1979; Li, Liu, 2006) и средними истинными температурами минералообразования, полученными



**Фиг. 12.** Температуры гомогенизации и соленость растворов флюидных включений в кварце медно-порфирового (As-8, As-18), субэпитеpмального (As-6, As-47, As-48) и эпитеpмального (As-K4, As-K7, As-60) этапов (см. табл. 4).

по флюидным включениям для медно-порфировой минерализации, варьируют от  $-1.8$  до  $+0.3\text{‰}$  ( $T = 420^\circ\text{C}$ ); субэпитеpмального этапа – от  $-2.7$  до  $-2.0\text{‰}$  ( $T = 400^\circ\text{C}$ ). Значения  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  флюида эпитеpмальных минеральных ассоциаций в соответствии со средними температурами по парагенезису петцит-гессит-самородное золото (Бортников и др., 1988) и электрум-сфалеритовому геотермометру (Shikazono, 1985) варьируют от  $-2.7$  до  $-1.4\text{‰}$  ( $T = 270^\circ\text{C}$ ), от  $-2.5$  до  $-2.1\text{‰}$  ( $T = 210^\circ\text{C}$ ) соответственно.

Величина  $\delta^{18}\text{O}$  кварца медно-порфировых галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевых прожилков составляет  $11.6\text{‰}$ , золото-висмутотеллуридно-палладиево-кварцевых субэпитеpмальных прожилков –  $11.8\text{‰}$ . Значения  $\delta^{18}\text{O}$  кварца золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевых, золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевых и золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевых эпитеpмальных прожилков и жил составляют  $14.6$ ,  $13.6$  и  $12.7\text{‰}$  соответственно (табл. 6).

Изотопный состав кислорода во флюиде, в соответствии с уравнением фракционирования (Zhang et al., 1989; Zheng, 1999), медно-порфировой минерализации составляет  $7.4\text{‰}$  ( $T = 420^\circ\text{C}$ );

субэпитеpмальной –  $7.0\text{‰}$  ( $T = 395^\circ\text{C}$ ); эпитеpмальных прожилков и жил –  $+7.2\text{‰}$  ( $T = 300^\circ\text{C}$ ),  $+4.6\text{‰}$  ( $T = 260^\circ\text{C}$ ) и  $+1.2\text{‰}$  ( $T = 210^\circ\text{C}$ ) соответственно (фиг. 13).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На месторождении Ак-Суг рудная минерализация отлагалась в три этапа. С первым связано формирование медно-порфирового оруденения с минеральными ассоциациями простых сульфидов (пирит, халькопирит, борнит, молибденит, галенит, сфалерит), с редкими выделениями теннантита в серицит-кварцевых (филлизитовых), кварц-калиевых и кварц-серицитовых метасоматитах. Во второй этап формировалась золото-висмутотеллуридно-палладиево-кварцевая субэпитеpмальная минерализация с халькопиритом, энаргитом, борнитом, пиритом, гесситом, золотом, электрумом, клаусталитом, S-кавацулитом, Se-тетрадимитом, Vi-теннантитом (до 15 мас. % Vi), меренскиитом, сопчеитом, темагамитом, арсенопалладинитом, сульфовисмутитами Cu и Pb в кварц-серицитовых метасоматитах. Минералы Pd (меренскиит  $\text{PdTe}_2$ , темагамит  $\text{Pd}_3\text{HgTe}_3$ , арсенопалладинит  $\text{Pd}_8\text{As}_3$ , сопчеит  $\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$ ) субэпитеpмальной минерализации отмечаются и на дру-

**Таблица 5.** Изотопный состав серы в сульфидных минералах месторождения Ак-Суг

№ п/п	№ пробы	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$ , ‰ (CDT)	Средняя температура	$\delta^{34}\text{S}_{(\text{H}_2\text{S})}$ , ‰ (CDT)
Медно-порфировый этап					
Галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая ассоциация (2)					
1	As-6-3	Пирит	-1.0	420	-1.8
2	AS-54	Пирит	+1.2	420	+0.3
Субэпитеpмальный этап					
Золото-висмут-теллуридно-палладиево-кварцевая ассоциация (3)					
4	As-6-1	Халькопирит	-2.5	395	-2.6
5	As-6-2	Халькопирит	-2.6	395	-2.7
6	As-6-8	Халькопирит	-2.4	395	-2.5
6	As-6-9	Халькопирит	-1.9	395	-2.0
Эпитеpмальный этап					
Золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация (4)					
7	As-4	Халькопирит	-0.9	300	-1.0
Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация (5)					
9	As-47	Халькопирит	-2.9	270	-2.7
10	As-49	Халькопирит	-1.6	270	-1.4
Золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая ассоциация (6)					
12	AS-K7	Халькопирит	-1.9	210	-2.1
13	AS-13	Халькопирит	-2.3	210	-2.5

Примечание. Анализы изотопов S выполнены в ИГМ СО РАН, аналитик В.Н. Реутский.

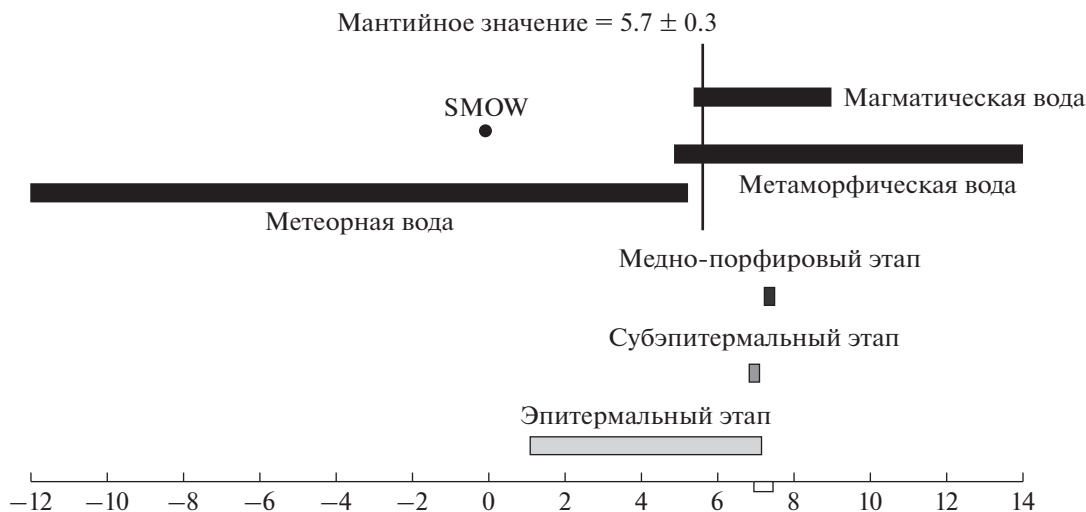
**Таблица 6.** Изотопный состав кислорода кварца и сопутствующего флюида месторождения Ак-Суг

№ п/п	№ пробы	Минерал	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰ (CDT)	Средняя температура	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{H}_2\text{O})}$ , ‰ (CDT)
Медно-порфировый этап					
Галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая ассоциация					
1	As-246	Кварц	+11.6	420	+7.4
Субэпитеpмальный этап					
Золото-висмут-теллуридно-палладиево-кварцевая ассоциация					
2	AS-6	Кварц	+11.8	395	+7.0
Эпитеpмальный этап					
Золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация					
3	AS-4-1	Кварц	+14.6	300	+7.2
Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация					
4	AS-18	Кварц	+13.6	260	+4.6
Золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая ассоциация					
5	AS-7	Кварц	+12.7	210	+1.2

Примечание. Анализы изотопов O выполнены в ГИН СО РАН, аналитик В.Ф. Посохов.

гих медно-порфировых месторождениях, но среди них меренскиит является наиболее распространенным. На золото-медно-порфировом месторождении Маунт Миллиган (Британская Колумбия, Канада) аналогичная субэпитеpмальная (пост-порфировая, доэпитеpмальная) минерализация с

халькопиритом, пиритом, галенитом, электроумом, теннантит-тетраэдритом, теллуридами Вi, меренскиитом, сперрилитом и темагамитом наложена на медно-порфировые минеральные ассоциации (LeFort et al., 2011). На золото-медно-порфировом месторождении Елаците, которое



Фиг. 13. Изотопный состав кислорода флюида месторождения Ак-Суг.

находится в пространственной ассоциации с эпиптермальным месторождением Челопеч (Болгария), минералы Pd и Pt образовались во время переходного (постпорфирового, доэпитермального) этапа (Eliopoulos et al., 2014). С третьим этапом связаны Au–Ag минеральные ассоциации с сульфидами, селенидами, теллуридами, сульфосолями Sb и As в кварц-гидрослюдистых метасоматитах и аргиллизитах.

Минералы Au отлагались на субэпитермальном и эпиптермальном этапах. Золото субэпитермального этапа ассоциирует с меренскиитом, темагмитом, арсенопалладинитом, сопчеитом и гесситом. Эпитермальный этап характеризуется наличием Au не только в самородной, но и в теллуридной форме (AuTe<sub>2</sub>, Ag<sub>3</sub>AuTe<sub>2</sub>, AgAuTe<sub>2</sub>, AgAuTe<sub>2</sub>), которое ассоциирует с гесситом, эмперситом, штюцитом, науманнитом и акантитом. Средняя пробность золота месторождения Ак-Суг для (120 ан.) составляет 672‰ при вариациях от 959 до 331‰. При этом средняя пробность зерен золота субэпитермального этапа составляет 895‰ при вариациях от 927 до 792‰, эпиптермального этапа – 670‰ (959–331‰). В целом в рудах количественно преобладает электрум и низкопробное золото, в меньшей степени присутствует среднее и высокопробное золото. Основными примесями являются Ag и Te. Количества Cu и Hg находятся ниже пределов обнаружения. Содержание Ag в золоте достигает до 29.71 мас. %, Te – 0.59 мас. %; в электруме – Ag – 66.20 мас. %, Te – 0.76 мас. %.

Блеклые руды на месторождения Ак-Суг являются сквозными минералами. Блеклые руды наиболее ранней медно-порфировой минерализации характеризуются слабой зональностью, что свидетельствует об относительно спокойной обстановке минералообразования. Блеклые руды суб-

эпитермальных и эпиптермальных минеральных ассоциаций характеризуются выраженной зональностью, что свидетельствует о колебаниях физико-химических параметров рудообразующего флюида, что типично для Au–Ag эпиптермальных месторождений (Spiridonov et al., 2005).

Галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая минеральная ассоциация медно-порфирового типа образовалась при температурах от 435 до 375°C из Na–K-хлоридного флюида с солёностью от 20.2 до 32.9 мас. % NaCl-экв. В данной ассоциации наличие Cu-теннантита и Zn-теннантита указывает на относительно высокий окислительный потенциал рудоносного флюида, т.к. при высокой f(O<sub>2</sub>) возникают цинкистые и высокомедистые блеклые руды (Spiridonov et al., 2005). Отметим, что формирование медно-порфирового месторождения на ранних стадиях связано с окисленными флюидами магматического происхождения, а на поздних стадиях в рудоотложении могут принимать метеорные воды, иногда играя решающую роль в осаждении металлов вплоть до формирования рудных содержаний (Hedenquist, Lowenstern, 1994; Hedenquist, Richards, 1998; Sillitoe, 2010).

Субэпитермальная золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевая минерализация образовалась при температурах от 415 до 325°C из Na–K ± Fe ± Ca ± Mg хлоридного флюида с концентрациями солей 7.5–15 мас. % NaCl-экв. Установлено, что окислительная природа исходных магм и эволюционирующий минерализованный флюид в медно-порфировых месторождениях считаются основными факторами транспортировки и осаждения ЭПГ (Economou-Eliopoulos et al., 2017). Экспериментальными исследованиями установлено, что значительные количества Pd и Pt (по-

рядка 1 г/т) могут переноситься в виде хлоридных комплексов гидротермальными флюидами в кислых средах ( $\text{pH} < 2-4$ ) при температурах 300–500°C (Gammons et al., 1992; Wood, 2002; Hanley, 2005; Xiong, Wood, 2000).

Эпитермальные минеральные ассоциации отлагались при  $P \sim 0.55$  кбар из  $\text{Na}-\text{K} \pm \text{Fe} \pm \text{Ca} \pm \text{Mg}$  хлоридного флюида со следующими концентрациями солей при температурах: золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая – 370–290°C, 1.4–12.6 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв.; золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая – 330–250°C, 1.4–7 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв.; золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая – 280–190°C, 3.5–6.7 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв. При этом поздние низкотемпературные (220–190°C) и разбавленные (3.5–4.9 мас. %) флюиды характеризуются вариациями хлоридов  $\text{Na}$  и  $\text{K}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ , карбонатов и сульфатов  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$  и  $\text{Mg}$ . Парагенезис борнита, халькопирита, энаргита, теллуридов  $\text{Ag}$  и  $\text{Au}$ , золота и науманнита золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой ассоциации предполагает  $f\text{S}_2$  от  $10^{-14.5}$  до  $10^{-7}$ ,  $f\text{Te}_2$  – от  $10^{-12.7}$  до  $10^{-10.5}$  и  $f\text{Se}_2$  – от  $10^{-19.7}$  до  $10^{-21.9}$  при 250°C (Barton, Skinner, 1979; Afifi et al., 1988).

Значения изотопного состава кислорода флюида медно-порфировой (+7.4‰) и субэпитермальной (+7.0‰) минерализации свидетельствуют об участии магматогенного флюида, а эпитермальной – от +1.2 до +7.2‰ – указывают на смешение магматического флюида с метеорными водами (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009). Участие метеорных вод характерно для эпитермальных  $\text{Au}-\text{Ag}$  месторождений (Berger, Henley, 1989; Hedenquist et al., 1998), а также для поздних стадий золото-медно-порфириновых месторождений (Bodnar, Beane, 1980; Beane, 1983; Reynolds, Beane, 1985; Hedenquist et al., 1998; Cooke et al., 2011; Melfos, Voudouris, 2016).

Значения изотопного состава серы флюида разных минеральных ассоциаций месторождения Ак-Суг характеризуются околонулевыми значениями от –2.7 до +0.3‰, что свидетельствует об участии серы магматического (от –5 до +5‰) либо мантийного (от –3 до +3‰) происхождения (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009) и характерно для большинства медно-порфириновых месторождений Северной и Южной Америки ( $0 \pm 5\%$ ) (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, Goldhaber, 1997).

По генезису сопутствующие эпитермальные месторождения в зарубежной литературе подразделяются на три класса (геолого-генетического типа): из флюидов магматического “high-sulfidation”, смешанного метеорно-магматического “intermediate sulfidation” и метеорного “low-sulfidation” происхождения с широкими вариациями  $\text{pH}$  и  $\text{Eh}$ , состава и концентраций солей (Sillitoe,

1995; White, Hedenquist, 1995, Hedenquist et al., 2000; Sillitoe, Hedenquist, 2003).

Минералого-геохимические особенности месторождения Ак-Суг и отложение эпитермальных минеральных ассоциаций из флюида смешанного метеорно-магматического происхождения, а также их приуроченность к кварц-гидрослюдистым метасоматитам и аргилизитам свидетельствуют о том, что они могут быть отнесены к эпитермальному intermediate sulfidation (IS) типу (Sillitoe, 1995; White, Hedenquist, 1995, Hedenquist et al., 2000). Известно, что индикаторными минералами оруденения IS-типа являются сфалерит, галенит, тетраэдрит–теннантит, халькопирит и марганцовистые карбонаты. Примерами месторождений с хорошо развитым оруденением IS-типа являются Санта-Барбара (Греция) (Voudouris, 2006) и Маунт Миллиган (Канада) (LeFort et al., 2011).

Согласно модели эволюции медно-порфировой системы (Sillitoe, 2010), золоторудная минерализация локализуется непосредственно как в рудном штокверке медно-порфириного оруденения, так и за его пределами. Во втором случае она находится в составе HS- и IS-эпитермальной минерализации, субэпитермальных (переходных от постпорфириновых к эпитермальным) карбонатно-полиметаллических рудах и сопровождается минералами  $\text{Ag}$  (LeFort et al., 2011). В других случаях эпитермальная минерализация образуется на расстоянии несколько километров от медно-порфириновых месторождений: как Лепанто относительно месторождения Фар Саус-Ист, Филиппины (Hedenquist et al., 1998).

На месторождении Ак-Суг процесс рудоотложения происходил при изменении фазового и химического состава рудообразующего флюида. Ранний высокотемпературный флюид медно-порфиривого этапа был гетерогенным и состоял из водяного пара и хлоридного рассола с высокими концентрациями металлов, о чем свидетельствуют дочерние кристаллы рудных минералов. Остывание рудных гидротермальных флюидов и разбавление их метеорной водой является основным процессом для осаждения  $\text{Au}$  и минералов других металлов на эпитермальном этапе. При этом наиболее поздние эпитермальные минеральные ассоциации отлагались из более сложного по составу хлоридно-сульфат-гидросульфидного рудообразующего флюида.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ранне- и среднекембрийское золото-медно-порфириное месторождение Ак-Суг характеризуется закономерностями эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов при переходе от медно-порфиривого к эпитермальному этапу. На

ранних этапах рудообразующего процесса флюид имел магматическое происхождение, а на поздних смешивался с метеорными водами, при этом состав флюида трансформировался от высококонцентрированного (до 32.9 мас. % NaCl-экв.) углекислотно-водно-хлоридного до водно-хлоридного (от 7 до 1.4 мас. % NaCl-экв.) с карбонатами и сульфатами Na, K и Mg. Широкое разнообразие минералов Au–Ag субэпитермальных и эпипермальных минеральных ассоциаций обусловлено вариациями  $fS_2$ ,  $fSe_2$  и  $fTe_2$ .

В рассматриваемом регионе выявление на древнейшем месторождении Ак-Суг субэпитермального и эпипермального типов минерализации является фундаментальным результатом, который может способствовать открытию новых месторождений в данном регионе. Отметим, что при поисках медно-порфирирового оруденения нахождение различных типов сопутствующих руд несет важную информацию: наличие того или иного типа минерализации указывает на степень сохранности ПЭС и уровень их эрозийного среза. Полученные результаты могут иметь практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических поисков месторождений и рудопроявлений Cu, Ag и Au.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-27-00344, <https://rscf.ru/project/23-27-00344/>). Изготовление полированных шлифов (аншлифов) выполнено за счет средств государственного задания ТувИКОПР СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакшеев И.А., Николаев Ю.Н., Прокофьев В.Ю., Нагорная Е.В., Читалин А.Ф., Сидорина Ю.Н., Марущенко Л.И., Калько И.А. Золото-молибден-меднопорфиново-эпипермальная система Баимской рудной зоны, Западная Чукотка // *Металлогения древних и современных океанов-2014: Мат. XX Науч. мол. школы. Миасс: ИМин УРО РАН, 2014. С. 108–112.*
- Берзина А.Н., Сотников В.И., Экономоу-Элиопоулос М., Элиопоулос Д.Г. Первая находка меренскита (Pd, Pt)Te<sub>2</sub> в рудах Cu-Мо-порфирировых месторождений России // *Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 8. С. 848–851.*
- Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений / Ред. Н.П. Лаверов. М.: Недра. 1982. С. 37–46.*
- Бортников Н.С., Крамер Х., Генкин А.Д. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) // *Геология руд. месторождений. 1988. № 2. С. 49–61.*
- Буханова Д.С. Минералого-геохимические особенности Малмыжского золотомедно-порфирирового месторождения, Хабаровский край: Автореф. Дис ... к.г.-м.н. Владивосток, 2019. 26 с.
- Вернадский В.И. Опыт описательной минералогии. Петроград. Изд-во Имп. АН. 1914. 780 с.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э., Соболев И.Д., Абрамова В.Д., Выхристенко Р.И., Трофимов А.П., Хубанов В.Б., Грознова Е.О., Двуреченская С.С., Кряжев С.Г. Золото-порфирировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // *Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.*
- Викентьев И.В., Шатов В.В., Смирнов Д.И., Волчков А.Г. Медно-золотопорфирировое месторождение Юбилейное (Западный Казахстан): геологическая позиция и условия образования // *Геология руд. месторождений. 2023. Т. 65. № 7. С. 596–633.*
- Волков А.В., Егоров В.Н., Колова Е.Е., Прокофьев В.Ю., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Шаповалов В.С. Закономерности размещения и условия формирования Au-содержащих Cu-Мо-порфирировых месторождений северо-востока России // *Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 6. С. 512–539.*
- Грабежьев А.И. Юбилейное Cu–Au порфирировое месторождение (Южный Урал, Россия): SHRIMP-II U-Pb возраст циркона и изотопно-геохимические особенности рудоносных гранитоидов // *Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 3. С. 315–318.*
- Грабежьев А.И., Русинова О.В., Жухлистов А.П., Мурзин В.В. Вертикальная рудно-метасоматическая зональность Томинского медно-порфирирового рудного узла (Южный Урал, Россия) // *Геология руд. месторождений. 1995. № 6. С. 500–510.*
- Грабежьев А.И., Ронкин Ю.Л., Пучков В.Н., Шардакова Г.Ю., Азовскова О.Б., Гердес А. Силурийский U-Pb возраст (LA-ICP-MS) циркона из гранитоидов Зеленодольского медно-порфирирового месторождения, Южный Урал // *Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 3. С. 335–339.*
- Грабежьев А.И., Шардакова Г.Ю., Ронкин Ю.Л., Азовскова О.Б. Систематика U-Pb возрастов цирконов из гранитоидов медно-порфирировых месторождений Урала // *Литосфера. 2017. Т. 17. № 5. С. 113–126.*
- Забелин В.И. Элементы геолого-генетической модели Аксугского медно-молибденового месторождения // *Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. Новосибирск: Наука, 1992. С. 92–103.*
- Знаменский С.Е., Шафигуллина Г.Т., Знаменская Н.М., Косарев А.М. Вознесенское медно-порфирировое месторождение (Южный Урал): структурный контроль оруденения и геохимия интрузивных пород // *Вестник академии наук РБ. 2019. Т. 31. № 2(94). С. 25–35.*
- Кудрявцев Ю.К., Третьякова Е.Н., Сальников А.Е., Рахимитур Г.Р. Геолого-геохимические модели разно-



- ранговых рудных объектов (Au)-Мо-Cu-порфирового семейства. М.: ИМГРЭ, 2012. 141 с.
- Кужугет Р.В., Хертек А.К., Лебедев В.И., Забелин В.И. Особенности состава самородного золота в рудных ассоциациях Ак-Сугского золото-медно-молибденпорфирового месторождения, Восточная Тува // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2015. № 2 (22). С. 63–74.
- Нагорная Е.В. Минералогия и зональность молибден-медно-порфирового рудного поля Находка, Чукотка. Автореф. дис ... к.г.-м.н. 2013. 28 с.
- Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 348 с.
- Плотинская О.Ю. Порфирово-эпитеральные системы Урала: минералы-индикаторы, эволюция и источники вещества // Металлогения древних и современных океанов-2023. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2023. С. 59–61.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1978. Т. 1. 360 с.
- Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов. Тр. Всерос. (с междунар. уч.) науч. конф., посвящ. 80-летию КНЦ РАН. Апатиты, 26–29 сент. 2010 г. К&М, 2010. С. 143–171.
- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulphides and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria // Econ. Geol. 1988. V. 83. P. 377–404.
- Augé T, Petrunov R, Bailly L. On the origin of the PGE mineralization in the Elatsite porphyry Cu-Au deposit, Bulgaria: comparison with the Baula-Nuasahi Complex, India, and other alkaline PGE-rich porphyries // Can. Mineral. 2005. V. 43. P. 1355–1372.
- Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Wiley & Sons: New York, USA. 1979. P. 278–403.
- Beane R.E. The magmatic-meteoritic transition: Geothermal Resources Council. Special Report 13. 1983. P. 245–253.
- Berger B.R., Henley R.W. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits with special reference to the Western United States // Econ. Geol. 1989. V. 84. P. 405–423.
- Berzin N.A., Coleman R.G., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Xiao Xuchang, Chang E.Z. Geodynamic map of the western part of Paleasian Ocean // Russian Geology and Geophysics. 1994. V. 35. P. 5–22.
- Berzin N.A., Kungurtsev L.V. Geodynamic interpretation of Altai–Sayan geological complexes // Russian Geology and Geophysics. 1996. V. 37. P. 56–73.
- Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. Paleozoic-Mesozoic Porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) Deposits within the Southern Margin of the Siberian Craton: Geochemistry, Geochronology, and Petrogenesis (a Review) // Minerals. 2016. V. 6(6). P. 1–25.
- Berzina A.N., Stein H.J., Zimmerman A., Sotnikov V.I. Re-Os ages of molybdenite from porphyry and greisen Mo-W deposits of southern Siberia (Russia) preserve metallogenic record // Mineral Exploration and Sustainable Development / Eds. D. Eliopoulos et al. Millpress, Rotterdam, 2003. V. 1. P. 231–234.
- Bodnar R.J. (1993) Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57. P. 683–684.
- Atkinson A.B.Jr. (2002) A model for the PTX properties of H<sub>2</sub>O-NaCl. Unpublished MSc Thesis, Dept. of Geosciences, Virginia Tech, Blacksburg VA, 133 p.
- Bodnar R.J., Beane, R.E. Temporal and spatial variations in hydrothermal fluid characteristics during vein filling in pre-ore cover overlying deeply buried porphyry copper-type mineralization at Red Mountain, Arizona. Econ. Geol. 1980. V. 75. P. 876–893.
- 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: De Vivo, B., Frezzotti, M.L., Eds. Virginia Tech: Blacksburg, VA, USA. 1994. P. 117–130.
- Bogdanov K., Filipov A., Kehayov R. Au–Ag–Te–Se minerals in the Elatsite porphyry-copper deposit, Bulgaria // Bulgarian Academy of Sciences. Geochemistry // Mineral. Petrol. 2005. V. 43. P. 13–19.
- Chen J., Tang J., Cong Y., Dong Q., Hao J. Geological characteristics and metallogenic model in the Yulong porphyry copper deposit, East Tibet // Acta Geologica Sinica. 2009. V. 83. P. 1887–1900.
- Chen X.H., Wang Z.H., Chen Z.L., Seitmuratova E., Han S.Q., Zhou Q., Ye B.Y. SHRIMP U–Pb, Ar–Ar and fission-track geochronology of W–Mo deposits in the Balkhash metallogenic Belt (Kazakhstan), Central Asia, and the geological implications // J. Asian Earth Sciences. 2015. V. 110. P. 19–32.
- Cheng Z.G., Zhang Z.C., Chai F.M., Hou T., Santosh M., Turesebekov A., Nurtaev B.S. Carboniferous porphyry Cu–Au deposits in the Almalyk ore field, Uzbekistan: the Sarycheku and Kalmakyr examples // International Geology Review, 2017.
- Cooke D.R., Hollings P., Chang Z. Philippine porphyry and epithermal deposits: an introduction // Econ. Geol. 2011. V. 106 (8). P. 1253–1256.
- Coplen T.B. Normalization of oxygen and hydrogen data // Chem. Geology. 1988. V. 72. P. 293–297.
- Crane D., Kavalieris I. Geologic overview of the Oyu Tolgoi porphyry Cu–Cu–Mo deposits, Mongolia // Society of Economic Geologists Special Publication. 2012. V. 16. P. 187–213.
- Economou-Eliopoulos, M. Platinum-group element potential of porphyry deposits. In: Mungall, J.E. (Ed.), Exploration for Platinum-group Element Deposits // Mineral. Association of Canada, Short Course. 2005. V. 35. P. 203–246.
- Economou-Eliopoulos M. Platinum-group elements (PGE) in various geotectonic settings: opportunities and risks // Hell. J. Geosc. 2010. V. 45. P. 65–82.

- Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G., Tsoupas G.* On the diversity of the PGE content in chromitites hosted in ophiolites and in porphyry-Cu systems: Controlling factors // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 88. P. 156–173.
- Eliopoulos D.G., Economou-Eliopoulos M., Zelyaskova-Panayiotova M.* Critical factors controlling Pd and Pt potential in porphyry Cu-Au deposits: Evidence from the Balkan Peninsula // *Geosciences*. 2014. V. 4. P. 31–49.
- Gammons C.H., Bloom M.S., Yu.Y.* Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: I. Solubility of platinum and palladium sulfide minerals in NaCl / H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions at 300°C // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. № 11. P. 3881–3894.
- Golovanov I.M., Seltmann R., Kremenetsky A.A.* The Porphyry Cu–Au–Mo deposits of Central Eurasia: 2. The Almayk (Kalmakyr-Dalnee) and Saukbulak Cu–Au porphyry systems, Uzbekistan // Porter, T.M., ed., *Superporphyry copper and gold deposits – a global perspective*. Adelaide: PGC Publishing. 2005. V. 2. P. 513–523.
- Hanley J.J.* The aqueous geochemistry of the platinum-group elements (PGE) in surficial, low-T hydrothermal and high-T magmatic-hydrothermal environments. Exploration for Platinum-group element deposits. 2005. V. 35. P. 35–56.
- Hedenquist J.W., Arribas A.Jr., Reynolds T.J.* Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines // *Econ. Geol.* 1998<sub>1</sub>. V. 93. P. 373–404.
- Hedenquist J.W., Richards J.* The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits // Richards J.P., Larson P.B. (eds) *Techniques in hydrothermal ore deposits geology*. Rev. *Econ. Geol.* 1998<sub>2</sub>. V. 10. Ch. 10. P. 235–256.
- Hedenquist J. W., Arribas A., Gonzalez-Urien E.* Exploration for epithermal gold deposits, Gold in 2000 // *SEG Rev.* 2000. V. 13. P. 245–277.
- Hoefs J.* *Stable Isotope Geochemistry*. Springer: Berlin / Heidelberg, Germany. 2009. P. 281.
- Hou Z., Zhang H., Pan X., Yang Z.* Porphyry Cu(–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust – examples from the eastern Tethyan metallogenic domain // *Ore Geol. Rev.* 2011. V. 39. P. 21–45.
- Jenchuraeva R.J.* Tectonic settings of porphyry type mineralization and hydrothermal alteration in Paleozoic island arcs and active continental margins, Kyrgyz Range (Tien Shan) Kyrgyzstan // *Mineral. Deposita*. 1997. V. 32(5). P. 434–440.
- Kesler S.E.* Copper, molybdenum, and gold abundances in porphyry copper deposits // *Econ. Geol.* 1973. V. 68. P. 106–112.
- Kudryavtsev Y.K.* The Cu–Mo deposits of Central Kazakhstan // In: *Shatov V., Seltmann R., Kremenetsky A., Lehmann B., Popov V., Ermolov P.* (Eds.) *Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas*. St. Petersburg: Glagol Publishing House. 1996. P. 119–144.
- Kuzhuget R.V., Mongush A.A., Mongush A-D.O.* Evolution of chemical composition of fahlores of the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit (North-East Tuva) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. V. 329. № 2. P. 81–91.
- LeFort D., Hanley J., Guillong M.* Subepithermal Au–Pd mineralization associated with an alkalic porphyry Cu–Au deposit, Mount Milligan, Quesnel Terrane, British Columbia, Canada // *Econ. Geol.* 2011. V. 106. P. 781–808.
- Li Y.; Liu J.* Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 70. P. 1789–1795.
- Lickfold V., Cooke D.R., Crawford A.J., Fanning C.M.* Shoshonitic magmatism and the formation of the Northparkes porphyry Cu–Au deposits, New South Wales // *Australian J. Earth Sciences*. 2007. V. 54. P. 417–444.
- Lindgren W.* *Mineral deposits*. 4<sup>th</sup> Edition: New York: McGraw-Hill. 1933. 930 p.
- Marushchenko L.I., Baksheev I.A., Nagornaya E.V., Nikolaev Y.N., Vlasov E.A., Chitalin A.F., Nikolaev Yu.N., Vlasov E.A.* Compositional evolution of the tetrahedrite solid solution in porphyry-epithermal system: A case study of the Baimka Cu–Mo–Au trend, Chukchi Peninsula, Russia // *Ore Geol. Rev.* 2018. V. 103. P. 21–37.
- Melfos V., Voudouris P.* Fluid evolution in Tertiary magmatic-hydrothermal ore systems at the Rhodope metallogenic province, NE Greece. A review // *Geologia Croatica*. 2016. V. 69(1), P. 157–167, 491–560.
- Nagornaya E.V., Baksheev I.A., Bryzgalov I.A., & Yapa-skurt V.O.* Minerals of the Au–Ag–Pb–Te–Se–S system of porphyry–copper–molybdenum deposits from the Nakhodka ore field, Chukchi Peninsula, Russia // *Moscow University Geology Bulletin*. 2012. V. 67. № 4. P. 233–239.
- Ohmoto H.* Stable isotope geochemistry of ore deposits // In: *Stable isotopes in high temperature geological processes* // *Rev. Mineral. Geochem.* 1986. V. 16. P. 491–560.
- Ohmoto H., Goldhaber M.B.* Sulfur and carbon isotopes // Barnes H.L. (Ed.) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3<sup>rd</sup> Edition. 1997. New York: Wiley. P. 435–486.
- Ohmoto H., Rye R.O.* *Isotopes of sulfur and carbon* // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: Wiley. 1979. P. 509–567.
- Pašava J., Vymazlova A., Košler J.* Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu–Au–Mo deposit, Uzbekistan: bulk geochemical and laser ablation ICPMS data // *Mineral. Deposita*. 2010. V. 45. P. 411–418.
- Plotinskaya O.Yu., Chugaev A.V., Seltmann R.* Lead isotope systematics of porphyry-epithermal spectrum of the Birgilda-Tomino ore cluster in the South Urals, Russia // *Ore Geol. Rev.* 2017<sub>1</sub>. V. 85. P. 204–215.
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Tesselina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S.* Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny // *Ore Geology Reviews*. 2017<sub>2</sub>. V. 85. P. 153–173.
- Plotinskaya O.Yu., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J.* Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting // *Ore Geol. Rev.* 2018. V. 94. P. 239–260.

- Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R.* Paragenesis and Re-Os molybdenite age of the Cambrian Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit, Tuva Republic, Russian Federation // *Econ. Geol.* 2017. V. 112. P. 1021–1028.
- Porter T.M.* The geology, structure and mineralization of the Oyu Tolgoi porphyry copper–gold–molybdenum deposits, Mongolia: A review // *Geoscience Frontiers*. 2016. № 7. P. 375–407.
- Reynolds T.J., Beane R.E.* Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit // *Econ. Geol.* 1985. V. 80. P. 1328–1347.
- Richards J.P.* Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes // *Nature Geoscience*. 2013. V. 6. P. 911–916.
- Richards J.P.* Postsubduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits – products of remelting subduction-modified lithosphere // *Geology*. 2009. V. 37. № 3. P. 247–250.
- Rudnev S.N., Serov P.A., Kiseleva V.Yu.* Vendian – Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva // *Russ. Geol. Geophys.* 2015. V. 56(9). P. 1232–1255.
- Seltmann R., Porter T.M., Pirajno F.* Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: a review // *J. Asian Earth Sciences*. 2014. V. 79. P. 810–841.
- Shatov V.V., Moon C.J., Seltmann R.* Discrimination between volcanic associated massive sulphide and porphyry mineralisation using a combination of quantitative petrographic and rock geochemical data: A case study from the Yubileinoe Cu–Au deposit, western Kazakhstan // *J. Geochem. Explor.* 2014. V. 147. P. 26–36.
- Shen P., Pan H., Wang J., Zhou T.* Petrography, geochemistry and geochronology of the host porphyries and associated alteration at the Tuwu Cu deposit, NW China: a case for increased depositional efficiency by reaction with mafic hostrock? // *Mineral. Deposita*. 2014. V. 49(6). P. 709–731.
- Shikazono N.A.* comparison of temperatures estimated from the electrum–sphalerite–pyrite–argentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au–Ag vein-type deposits in Japan // *Econ. Geol.* 1985. V. 80. No 5. P. 1415–1424.
- Sillitoe R.H.* Exploration of porphyry copper lithocaps / Pacific Rim Congress. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 1995. P. 527–532.
- Sillitoe R.H.* Porphyry copper systems // *Econ. Geol.* 2010. V. 105. P. 3–41.
- Sillitoe R.H., Hedenquist J.W.* Linkages between volcano-tectonic settings, ore–fluid composition, and epithermal precious metal deposits // *Society of Economic Geologists Special Publication*. 2003. № 10. P. 315–343.
- Soloviev, S.G., Kryazhev, S.G., Semenova, D.V., Kalinin, Y.A., Dvurechenskaya, S.S., & Sidorova, N.V.* Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U–Pb geochronology of the Early Paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia, Russia: toward a diversity of Cu–Au–Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system // *Ore Geol. Rev.* 2022. 104706.
- Sotnikov V.I., Berzina A.N., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G.* Platinum and palladium in ores of porphyry Cu–Mo deposits in Siberia and Mongolia // *Doklady Earth Sciences*. 2001. V. 379. P. 546–549.
- Spiridonov E., Maleev M., Kovachev V., Kulikova I., Nazmova G., Filimonov S.* Minerals of fahlore group: indicators of ore genesis // *Bulgarian Geological Society, 80<sup>th</sup> Anniversary. Proc. of the Jubilee International Conference*. Sofia: Bulgarian Geological Society Publ. 2005. P. 79–82.
- Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J.* HokieFlincs\_H<sub>2</sub>O–NaCl: a Microsoft excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O–NaCl // *Computers & Geosciences*. 2012. V. 49. P. 334–337.
- Tarkian M., Hunken U., Tokmachieva M., Bogdanov K.* Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria // *Mineral. Deposita*. 2003. V. 38. P. 261–281.
- Tarkian M., Koopmann G.* Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines // *Mineral. Deposita*. 1995. V. 30. P. 39–47.
- Tessalina S., Plotinskaya O.* Silurian to Carboniferous Re-Os molybdenite ages of the Kalinovskoe, Mikheevskoe and Talitsa Cu–Mo porphyry deposits in the Urals: implications for geodynamic setting // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 85. P. 174–180.
- Titley S.R.* Copper, molybdenum, and gold content of some porphyry copper systems of the southwestern and western Pacific. *Econ. Geol.* 1978. V. 73 (5). P. 977–981.
- Toulmin P., Barton P.B., Wiggins L.B.* Commentary on the sphalerite geobarometer // *American Mineralogist*. 1991. V. 76. P. 1038–1051.
- Voudouris P.* A comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeastern Greece // *Mineral. Petrol.* 2006. V. 87. P. 241–275.
- Voudouris P.A.* Comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeastern Greece // *Mineral. Petrol.* 2006. V. 87. P. 241–275.
- Voudouris P.C., Melfos V, Spry P.G., Baker T.* Cenozoic porphyry-epithermal and other intrusion-related deposits in northeastern Greece: geological, mineralogical and geochemical constraints // *Eocene to Miocene Hydrothermal Deposits of Northern Greece and Bulgaria: Relationships Between Tectonic-Magmatic Activity, Alteration, and Gold Mineralization*. 2017. V. 54. P. 43–83.
- Wang Y.F., Chen H.Y., Xiao B., Han J.S., Fang J., Yang J.T., Jourdan F.* Overprinting mineralization in the Paleozoic Yandong porphyry copper deposit, Eastern Tianshan, NW China – evidence from geology, fluid inclusions and geochronology // *Ore Geol. Rev.* 2017. P. 148–167.
- Wang Y.H., Xue C.J., Liu J.J., Wang J.P., Yang J.T., Zhang F.F., Zhao Z.N., Zhao Y.J.* Geochemistry, geochronology, Hf isotope, and geological significance of the Tuwu porphyry copper deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang // *Acta Petrologica Sinica*. 2014. V. 30. P. 3383–3399.

- White N.C., Hedenquist J.W.* Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration // Society of Economic Geologists Newsletter. 1995. V. 23. P. 9–13.
- Wilson A.J., Cooke D.R., Stein H.J., Fanning C.M., Holliday J.R., Tedder I.J.* U-Pb and Re-Os geochronologic evidence for two alkalic porphyry ore-forming events in the Cadia District, New South Wales, Australia // Econ. Geol. 2007. V. 102. P. 3–26.
- Wood S.A.* The aqueous geochemistry of the platinum-group elements with applications to ore deposits // The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements. 2002. V. 54. P. 211–249.
- Xiong Y., Wood S.A.* Experimental quantification of hydrothermal solubility of platinum-group elements with special reference to porphyry copper environments // Miner. Petrol. 2000. V. 68. № 1–3. P. 1–28.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I.* Deep Geodynamics and Mantle Plumes: their role in the formation of the Central Asian fold belt // Petrology. 2003. V. 11(6). P. 504–531.
- Zeng Q.D., Liu J.M., Chu S.X., Wang Y.B., Sun Y., Duan X.X., Zhou L.L., Qu W.J.* Re-Os and U-Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu–Mo–(Au) deposit, Northeast China, and its geological significance // J. Asian Earth Sciences. 2014. V. 79. P. 895–909.
- Zhang L.-G., Liu J.-X., Zhou H.B., Chen Z.-S.* Oxygen isotope fractionation in the quartz–water–salt system // Econ. Geol. 1989. V. 89. P. 1643–1650.
- Zhao X.-B., Xue C.-J., Chi G.-X., Mo X.-X., Nurtaev B., Zhang G.-Z.* Zircon and molybdenite geochronology and geochemistry of the Kalmakyr porphyry Cu Au deposit, Almalyk district, Uzbekistan: Implications for mineralization processes // Ore Geol. Rev. 2017. V. 86. P. 807–824.
- Zheng Y.F.* Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // Geochem. J. 1999. V. 33. P. 109–126.