



## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА САМОРОДНОГО ЗОЛОТА В РУДНЫХ АССОЦИАЦИЯХ АК-СУГСКОГО ЗОЛОТОМЕДНО-МОЛИБДЕН-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ВОСТОЧНАЯ ТУВА

Р. В. Кужугет, А. К. Хертек, В. И. Лебедев, В. И. Забелин

Рассмотрены последовательность формирования рудных минеральных ассоциаций, минералогическо-геохимические особенности самородного золота и минеральная зональность Ак-Сугского золотомедно-молибден-порфирикового месторождения. Отложение минералов Au и Ag происходило в течение трех стадий минералообразования: блеклорудно-пирит-халькопиритовой, пирит-борнит-халькопиритовой и борнит-халькопирит-теллуридной. Установлено, что состав самородного золота месторождения в значительной мере обусловлен температурами образования рудных ассоциаций и вариациями фугитивности серы ( $fS_2$ ), селена ( $fSe_2$ ) и теллура ( $fTe_2$ ). Минералогическими методами установлено, что пробность всего золота Ак-Сугского месторождения составляет 311–959 ‰, в среднем 672 ‰. Его состав эволюционирует от весьма высокопробного золота до электрума. Основными примесями самородного золота и электрума являются Ag и Te. Содержание Cu и Hg 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. %.

**Ключевые слова:** типоморфные особенности, самородное золото, Au-Cu-Mo-порфириковое оруденение, Тува.

## COMPOSITION OF NATIVE GOLD IN ORE ASSOCIATIONS OF THE AK-SUGSKOYE GOLD-COPPER-MOLYBDENUM PORPHYRY DEPOSIT, EASTERN TUVA

R. V. Kuzhuget, A. K. Khertek, V. I. Lebedev, V. I. Zabelin

The paper considers evolution of ore associations, mineral and geochemical features of native gold, and mineral zonation of the Ak-Sugskoye gold-copper-molybdenum porphyry deposit. Deposition of Au and Ag occurred at three stages of mineral formation: fahlore-pyrite-chalcopyrite, pyrite-bornite-chalcopyrite, and bornite-chalcopyrite-telluride ones. It was stated that the native gold composition within the deposit is substantially controlled by the formation temperature of ore associations and fugacity of sulphur ( $fS_2$ ), selenium ( $fSe_2$ ) and tellurium ( $fTe_2$ ). Mineralogical and geochemical methods revealed an average gold fineness of 672 ‰ within the deposit, whereas the fineness itself varies between 311 and 959 ‰, and the gold composition evolves from high-fineness gold to electrum. The major additives to native gold are Ag and Te. The Cu and Hg contents are below detection limits. The content of Ag in gold reaches 29.71 wt.%, Te is up to 0.59 wt.%. The Ag content in electrum is 66.20 wt.%, that of Te is 0.76 wt.%.

**Keywords:** *typomorphic features, native gold, Au-Cu-Mo porphyry mineralization, Tuva.*

Ведущий промышленный тип медного и медно-молибденового оруденения – медно-порфириковые месторождения. Из них добывается большое количество Cu, Mo и Re (Актогай, Казахстан; Каджаран, Армения; Эль-Тениенте, Чили и др.). Невысокие средние содержания Cu (десятые доли %) и Mo (сотые – тысячные доли %) в разрабатываемых месторождениях этого типа компенсируются большими объемами прожилково-вкрапленных руд. Ценность медно-порфириковых месторождений во многом зависит и от содержания благородных металлов. Концентрация Au в них обычно низкая – от сотых до первых десятых г/т, редко до 0,5–1 г/т и более, но благодаря огромным запасам ресурсы золота значительны. Наиболее золотоносны бедные молибденовые медно-порфириковые месторождения энсиматических островных дуг. Отношения Ag/Au в них колеблются от 10 до 500 и более, чаще 60–100 [1]. По запасам Au среди них отмечаются крупные месторождения – Грасберг в Индонезии

(2900 т), Пиббл в США (3050 т), Ою Толгой в Монголии (3000 т) и др. [11, 20 и др.].

Существенно медные руды верхних зон некоторых медно-порфириковых месторождений Армении (Кадражан), Филиппин (Санто-Томас II), Казахстана (Бощекуль), США (Аллард), Болгарии (Медет, Элаците), Малайзии (Мамут), Папуа – Новой Гвинеи (Ок-Теди), Узбекистана (Кальмакыр) содержат десятки г/т Au, а также повышенные концентрации Pd и Pt (Au:Pd:Pt ≈ 100:10:1). В подобных рудах в ассоциации с электрумом, алтаитом (PbTe), гесситом (Ag<sub>2</sub>Te), петцитом (Ag<sub>3</sub>AuTe<sub>2</sub>), креннеритом ((Au,Ag)Te<sub>2</sub>), сильванитом ((Au,Ag)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>) развиты висмутотеллуриды Pd–Pt: меренскийит (PdTe<sub>2</sub>), майченерит (PdBiTe или Pd(Bi,Te)<sub>2</sub>), мончеит (PtTe<sub>2</sub>), реже арсениды, арсеноантимониды палладия – сперрилит (PtAs<sub>2</sub>), арсенопалладит (Pd<sub>8</sub>As<sub>3</sub>) [6, 11, 12, 15, 20, 21, 26, 27]. В рудах перечисленных медно-порфириковых месторождений содержание Pt варьирует от 2 до 380 мг/т, Pd – 23–980 мг/т, в сульфидных



концентрациях – 0,4–3,9 и 0,2–8,5 г/т соответственно [7, 26 и др.]. В рудах медно-молибден-порфировых месторождений Сибири (Сорское, Жирекен) определены содержания Pt до 10 мг/т, Pd – 29 мг/т, в сульфидных концентратах – до 61 и 230 мг/т соответственно [3, 17].

В России медно-порфировые месторождения расположены в складчатых областях Урала, Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна, Сихотэ-Алиня, Чукотки и Камчатки. Однако только два из них (Ак-Сугское в Алтае-Саянской складчатой области (Тува) и Песчанка на Чукотке) могут быть отнесены к крупным объектам [11].

На территории Республики Тува известно несколько сотен проявлений Cu и Mo различного генезиса. Медное и молибденовое оруденение встречается как совместно, так и раздельно. В промышленных масштабах в Туве оно представлено объектами золотомедно-молибден-порфирового типа. Наиболее крупные Ак-Сугское и Кызык-Чадырское месторождения Восточной Тувы, для которых характерны повышенные содержания Au и Ag, а также их значительные запасы и ресурсы [4].

### Методы исследований

Оптические исследования выполнены на микроскопе ПОЛАМ Р312. Состав минералов определялся на растровом электронном микроскопе (с пределами обнаружения содержаний элементов-примесей 0,01 мас. %) MIRA LM в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). Снимки минералов в отраженных электронах сделаны на том же, а также на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-1000 в Тувинском институте комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл). Для группировки золота по пробности использована следующая классификация: весьма высокопробное золото (950–1000 ‰); высокопробное (900–950 ‰); средней пробности (800–900 ‰); низкопробное (700–800 ‰); электрум (300–700 ‰); кюстелит (100–300 ‰); серебро (Au-содержащее серебро) (<100 ‰) [16, 20].

### Краткая геологическая характеристика

Ак-Сугское золотомедно-молибден-порфировое месторождение находится в северо-восточной части Республики Тува в междуречье Ак-Суг и Даштыг-Ой. Оно приурочено к тектонически мобильной зоне в области сопряжения разновозрастных геологических структур: протерозойского Восточно-Саянского антиклинория, палеозойского Казыр-Кизирского синклинория и нижнепалеозойской складчатой структуры Восточной Тувы [5]. Район характеризуется проявлением разнообразных типов рудной минерализации, но наибольший интерес он представляет в отношении медно-молибден-порфирового оруденения. Прожилковое, прожилково-вкрапленное золотомедно-молибденовое оруденение Ак-Сугского месторождения

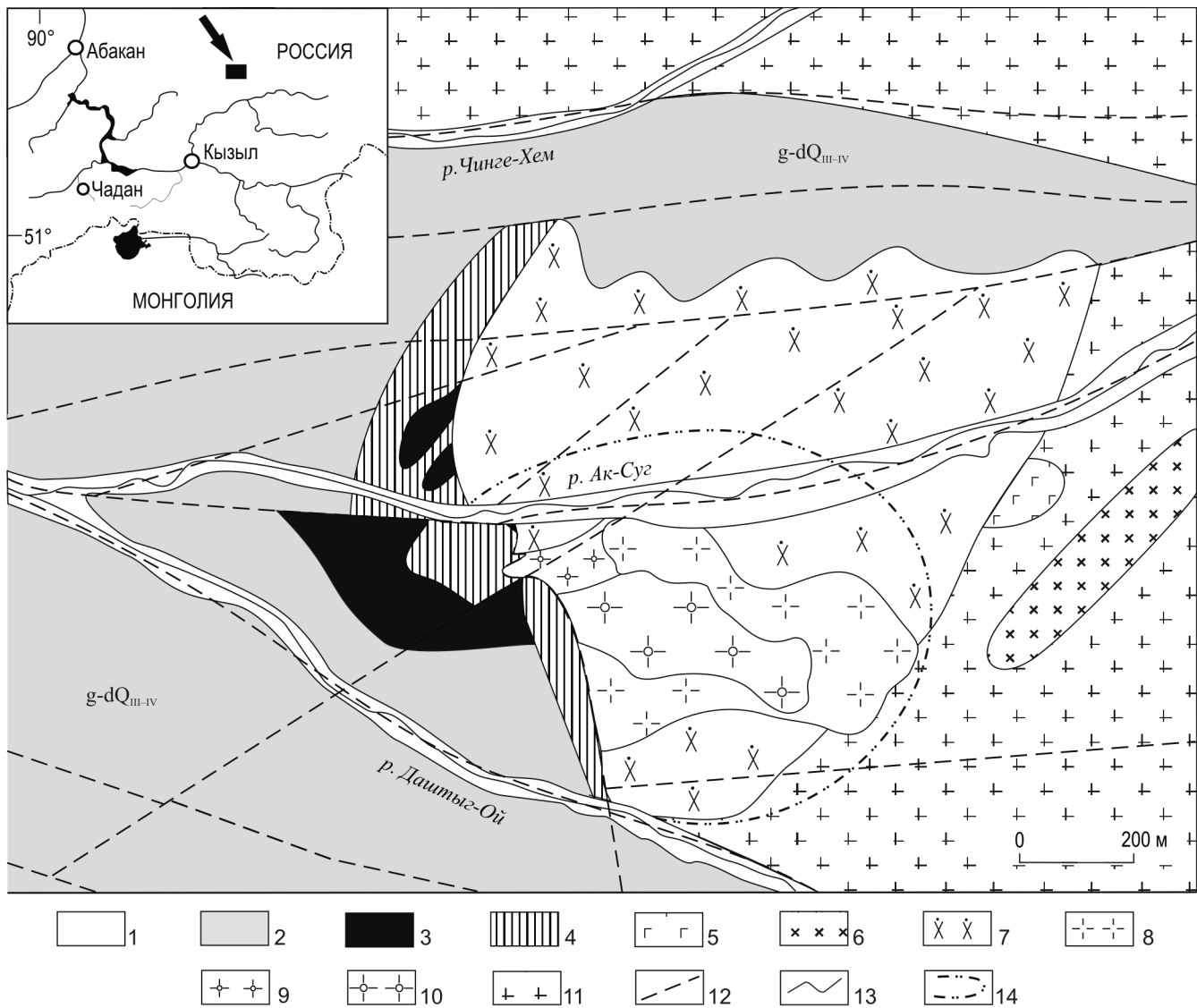
приурочено к многофазному штокообразному телу порфировых пород Ак-Сугского массива (батолита). Эти породы образуют гомодромный ряд от габброидов и диоритов по периферии до плагиогранит-порфиров толеитового ряда в центральной части. Большая часть массива сложена натриевыми, известково-щелочными породами тоналит-гранодиоритовой ассоциации [1, 2 и др.]. Породы прорываются штоками порфировидных тоналитов, кварц-плагиоклазовых порфиров, с которыми связано проявление штокверкового золотомедно-молибден-порфирового оруденения (рис. 1). Возраст рудоносных тоналитов, кварц-плагиоклазовых порфиров, определенный Ar-Ar методом по плагиоклазу, определен в 404–401 млн лет, что соответствует раннему девону [1].

В Ак-Сугском месторождении наблюдается типовая медно-порфировая зональность метасоматической колонны, имеющая следующий вид (от центра к периферии): «кварцевое ядро» → кварцевые и калиевые метасоматиты → кварц-серицитовые и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты → аргиллизиты → пропилиты. Калиевые метасоматиты развиты очень слабо. Вероятно, отсутствие широкого проявления калиевого метасоматоза может быть объяснено натровым уклоном магматизма при становлении Ак-Сугской интрузии [5, 22, 23 и др.]. Около 80 % запасов руд месторождения сосредоточено в кварц-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах и аргиллизированных породах.

Основную промышленную ценность на Ак-Сугском месторождении представляют Cu и Mo. Кроме них на большей части месторождения установлено повышенное содержание Au, Ag, Re, Pd и Pt. Содержание (г/т) Au 0,1–29, Ag 0,51–161,6, Re 0,05–0,58, Pd 0,009–0,92, Pt 0,017–0,096. Запасы руды по категории C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> до глубины 400–600 м от поверхности – 1 млрд т на массу штокверка со средними содержаниями Cu 0,44 % (запасы 4,45 млн т), Mo 0,012 % (121,9 тыс. т), Au 0,13 г/т (133,5 т), Re 0,17 г/т (свыше 105 т), Ag 0,86 % (866,1 т), условной Cu 0,7 % [4, 8, 9, 15].

### Минеральные ассоциации и минералогическо-геохимические особенности самородного золота

В целом процесс формирования медно-молибденового оруденения и сопровождающих его метасоматитов развивался длительное время, на многих месторождениях – по единой схеме, подчиняясь общей эволюции рудно-магматической системы. Последовательность формирования рудных минеральных ассоциаций на медно-молибден-порфировых месторождениях выглядит так: пирит, халькопирит, молибденит, магнетит, гематит, шеелит, вольфрамит → галенит, сфалерит, тетрадимит, борнит, халькозин, энаргит → киноварь, флюорит, барит, минералы висмута, теллура. Этот минеральный ряд отражает как последовательность выделения руд-



**Рис. 1.** Схема геологического строения Ак-Сугского месторождения (по данным [2, 7] с дополнениями)

1 – аллювиальные отложения ( $Q_{IV}$ ); 2 – моренные и делювиальные отложения ( $g-dQ_{III-IV}$ ); 3–4 – девонские вулканогенные осадочные образования толтаковской свиты ( $D_1tl$ ): 3 – риолит-дацитовые, риолитовые порфиры, 4 – туфопесчаники, конгломераты; 5–10 – ак-сугский комплекс ( $D_1ak$ ): 5 – габбро, 6 – диориты, 7 – кварцевые диориты, 8 – порфириновые гранодиориты, тоналиты и плагиограниты, 9 – тоналит-порфиры, 10 – плагиогранит-порфиры; 11 – диориты таннуольского комплекса ( $O_{2-3}t$ ); 12 – разрывные нарушения; 13 – геологические границы; 14 – контур рудного штока

ных минералов, так и вертикальную и латеральную зональность месторождений [6, 8, 13, 18 и др.].

Латеральная и вертикальная зональность медно-порфировых месторождений, а также смена эпитермального (золотосеребряного, полиметаллического) оруденения на медно-порфировое с увеличением глубины или развития эпитермального на флангах медно-порфирового оруденения в достаточной мере аргументирована во многих вулканоплутонических поясах и районах и согласуется с общей моделью порфировых систем [24].

По составу рудных минералов руды Ак-Сугского месторождения подразделяются на следующие типы: халькопирит-пирит-молибденитовые, пирит-борнит-халькопиритовые и блеклорудно-пирит-халькопиритовые. Наиболее распространены

халькопирит-пирит-молибденитовые и пирит-борнит-халькопиритовые [5, 10].

По данным предшественников [10, 15] и собственным наблюдениям авторов, на Ак-Сугском месторождении установлено, что рудная минерализация представлена в виде четырех последовательных стадий (минеральных ассоциаций): 1) пирит-халькопирит-молибденитовая; 2) блеклорудно-пирит-халькопиритовая; 3) пирит-борнит-халькопиритовая; 4) борнит-халькопирит-теллуридная (табл. 1).

Последняя борнит-халькопирит-теллуридная минеральная ассоциация в пределах рудного штока развита менее всего, остальные ассоциации – широко. Мощность зоны окисления месторождения до нескольких метров, в зонах дробле-



Таблица 1

Минералогический состав рудных ассоциаций Ак-Сугского месторождения

Наиболее распространенные рудные минералы	Второстепенные рудные минералы	Особенности состава самородного золота
Пирит-халькопирит-молибденитовая ассоциация		
Пирит Халькопирит Молибденит	Пирротин Гематит Магнетит Марказит Вольфрамит	Не выявлено
Блеклорудно-пирит-халькопиритовая ассоциация		
Халькопирит Теннантит Zn-теннантит Zn-теннантит-тетраэдрит Cu-теннантит-тетраэдрит Fe-теннантит-тетраэдрит Пирит Галенит	Сфалерит Золото Se-галенит (Se до 0,5 мас. %) Энаргит (Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub> )	Весьма высокопробное (959 ‰), высокопробное (932–927 ‰), среднепробное (863–851 ‰) и низкопробное золото (729‰), а также электрум (669–638‰). Средняя пробность золотин 845 ‰ (638–959 ‰). Для золота характерна примесь Ag до 27 мас. %, для электрума – до 36 мас. %
Пирит-борнит-халькопиритовая ассоциация		
Пирит Борнит Халькопирит Халькозин Галенит	Se-галенит (Se до 3,67 мас. %) Золото Электрум	Среднепробное (810 ‰) и низкопробное золото (799–700 ‰), а также электрум (697–331 ‰). Средняя пробность золотин 632 ‰ (331–810 ‰). Для золота характерна примесь Ag до 30 мас. %, Te до 0,56 мас. %, для электрума – Ag до 66 мас. %, Te до 0,76 мас. %
Борнит-халькопирит-теллуридная ассоциация		
Борнит Халькопирит Zn-теннантит Тетраэдрит Se-тетраэдрит Барит Целестобарит Галенит Se-галенит Клаусталит S-клаусталит Виттихенит (Cu <sub>3</sub> BiS <sub>3</sub> ) Кавацулит (Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> Se) Гессит Золото	Петцит Калаверит Арсенопалладинит Меренскиит S-кавацулит Кобальтин S-науманнит (Ag <sub>2</sub> (Se,S))	Высокопробное (903–901 ‰), среднепробное (875–826 ‰) и низкопробное золото (784 ‰). Средняя пробность золотин 858 ‰ (784–903 ‰). Для золота характерна примесь Ag до 22 мас. %

ния – 30–80 м. В коре выветривания развиты малахит, азурит, ковеллин, халькозин, гетит, гематит, англезит, церуссит, куприт и самородная медь.

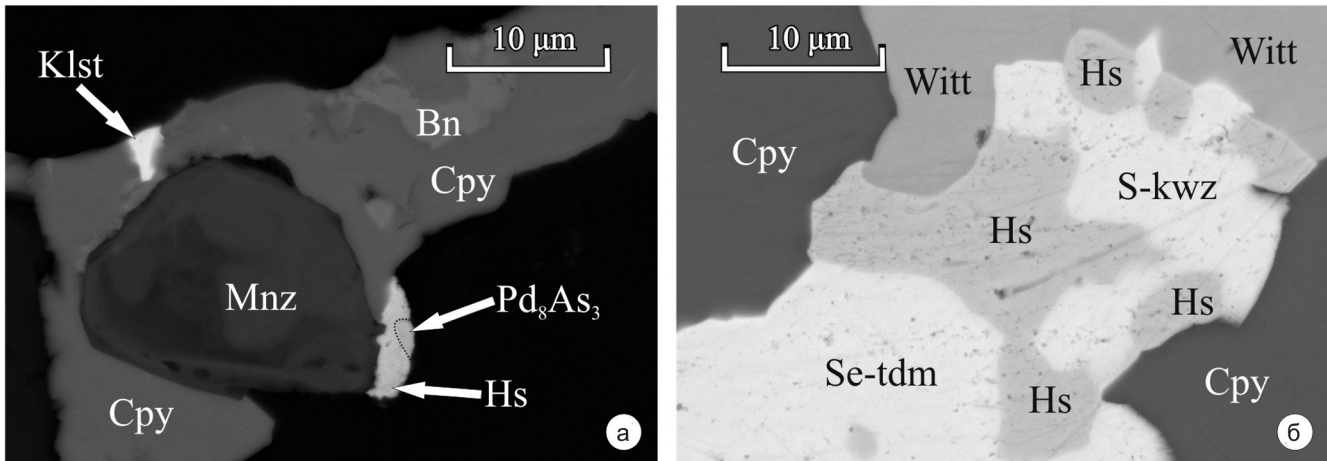
Ак-Сугскому месторождению свойственна латеральная минеральная зональность: ранняя пирит-халькопирит-молибденитовая ассоциация слагает внутреннюю (медно-молибденовую) зону, а поздние ассоциации – внешнюю (полиметаллическую).

Теллуриды Au и Ag и минералы Pd характерны для поздней борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации. Из теллуридов Au и Ag прежде всего встречается гессит (Ag<sub>2</sub>Te), реже петцит (Ag<sub>3</sub>AuTe<sub>2</sub>) и калаверит (AuTe<sub>2</sub>), в основном в виде мелких включений (1–40 мкм) разной формы в халькопирите, Se-тетрадимите и S-кавацулите. Гессит образует сростки с клаустолитом, арсенопалладитом, виттихенитом, S-кавацулитом, Se-тетрадимитом, борнитом и халькопиритом (рис. 2). Состав теллу-

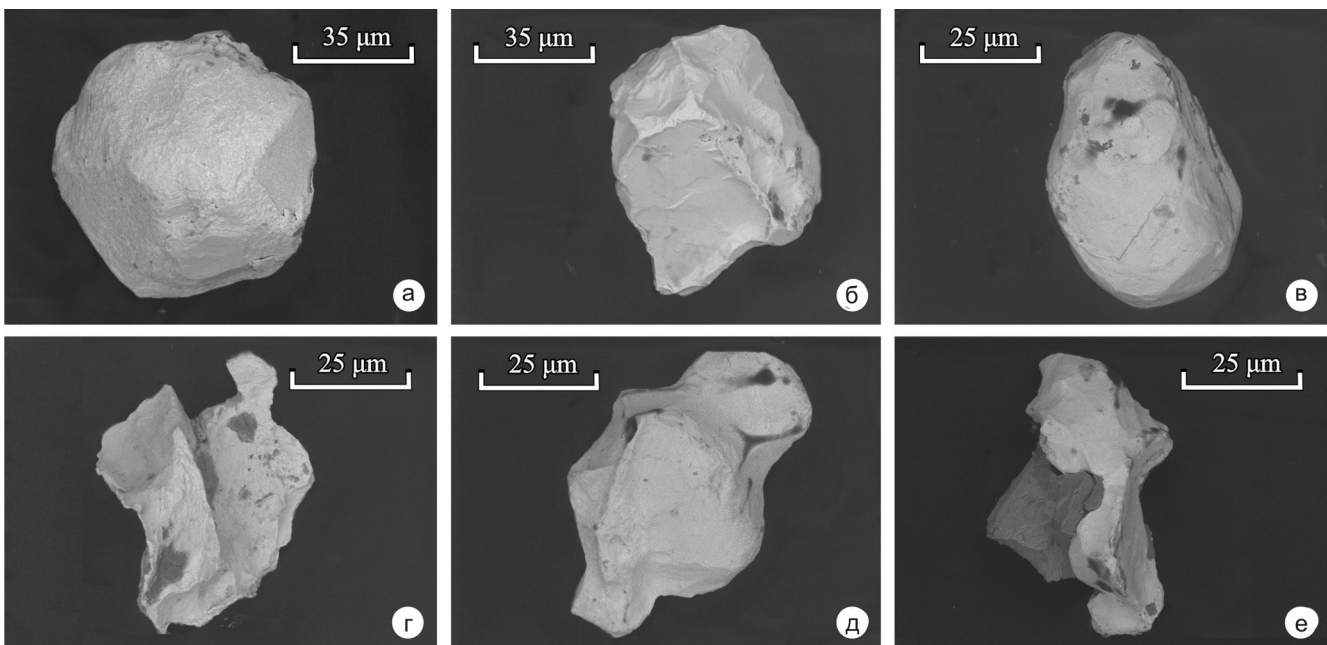
ридов Ag и Au (Ag<sub>2</sub>Te, Ag<sub>3</sub>AuTe<sub>2</sub>, AuTe<sub>2</sub>), а также науманнита (Ag<sub>2</sub>Se) не отклоняется от стехиометрии.

Авторами впервые обнаружен и описан арсенид палладия (арсенопалладинит) со следующим составом (мас. %): Pd 78,26; As 18,57; Te 1,69; Sb 1,06, формула (при расчете 11 атомов) – Pd<sub>8,05</sub>(As<sub>2,71</sub>Te<sub>0,14</sub>Sb<sub>0,10</sub>)<sub>2,95</sub> (см. рис. 2, а). Из-за малого размера зерен рентгеновское изучение минерала не производилось. Выделения арсенида палладия (арсенопалладинита) до 5 мкм образуют сростания с гесситом в ассоциации с борнитом, халькопиритом. Мельчайшие включения (до 5 мкм) меренскиита в халькопирите охарактеризованы нашими предшественниками [15]. Минерал содержит (мас. %): Pd 25,20; Pt 1,21; Cu 0,46; Fe 0,38; Te 72,31, формула (при расчете на три атома) – (Pd<sub>0,86</sub>Pt<sub>0,02</sub>Cu<sub>0,03</sub>Fe<sub>0,03</sub>)<sub>0,94</sub>Te<sub>2,06</sub>.

Самородное золото встречается в трех последних рудных ассоциациях Ак-Сугского месторождения. Морфология золота весьма разнообразна.



**Рис. 2.** Формы выделения клаустолита (Klst), гессита (Hs), арсенопалладита ( $Pd_8As_3$ ), виттихенита (Witt), S-кавацулита (S-kwz), Se-тетрадимита (Se-tdm), борнита (Bn), халькопирита (Cpy) и монацита (Mnz)



**Рис. 3.** Формы выделения самородного золота Ак-Сугского месторождения: а – изометричный кристалл с развитием комбинации форм куба и октаэдра; б – золото с развитием форм куба; в – каплевидное золото; г–д – ксеноморфные, интерстициальные формы золотин с отпечатками и ровными гранями вследствие отложения в межкристаллических пространствах кварца, пирита и халькопирита; е – ксеноморфное золото в виде сростков с халькопиритом (темно-серое)

Преобладают трещинно-прожилковые, комковидно-ветвистые, комковато-ячеистые, дендритоидные, интерстициальные формы, реже встречаются кристаллы и их сростки (рис. 3). Поверхность золотин шагреновая и мелкоямчатая, цвет от золотисто-желтого до серебристого с желтоватым оттенком.

Золоторудная минерализация блеклорудно-пирит-халькопиритовой ассоциации представлена весьма высокопробным, высокопробным, среднепробным, низкопробным золотом и электрумом. Выделения золота и электрума (от 20 до 3 мкм) образуют тесные сростания с халькопиритом, пиритом, борнитом и блеклыми рудами (Zn-теннантитом, Zn-теннантит-тетраэдритом и Fe-теннантит-тетраэдритом). Довольно часто отмечаются выделения самородного золота в блеклых рудах в виде тонких вкраплений (рис. 4, а–в). В самородном золоте блеклорудно-пирит-халькопирит-

товой ассоциации содержание Ag от центра зерна к краю закономерно увеличивается на 2–3 мас. % (табл. 2, анализы 1–11). Примеси Cu, Hg и Te ниже пределов обнаружения. По химическому составу самородное золото данной ассоциации образуют следующий ряд (мас. %):

- 1) весьма высокопробное (Au – 95,86, Ag – 4,08);
- 2) высокопробное (Au – 92,31–93,01, Ag – 6,75–7,24);
- 3) среднепробное (Au – 85,10–86,27, Ag – 13,68–14,89);
- 4) низкопробное (Au – 72,23, Ag – 26,88);
- 5) электрум (Au – 63,37–66,84, Ag – 33,14–35,92).

Золоторудная минерализация пирит-борнит-халькопиритовой ассоциации представлена средне-, и низкопробным золотом и электрумом.



Таблица 2

Химический состав золота и электрума (мас. %) блеклорудно-пирит-халькопиритовой (анализы 1–11) и борнит-халькопирит-теллуридной (анализы 12–16) ассоциаций Ак-Сугского месторождения

№ анализа	Образец	Зона зерна	Au	Ag	Te	Σ	Кристаллохимическая формула	Пробность
1	AS-41	Центр	95,86	4,08	–	99,94	$(Au_{0,93}Ag_{0,07})_{1,00}$	959
2	AS-42	«	93,01	6,83	–	99,84	$(Au_{0,88}Ag_{0,12})_{1,00}$	932
3		«	92,75	6,75	–	99,50	$(Au_{0,88}Ag_{0,12})_{1,00}$	932
4		«	92,31	6,99	–	99,30	$(Au_{0,88}Ag_{0,12})_{1,00}$	930
5		«	92,62	7,24	–	99,86	$(Au_{0,88}Ag_{0,12})_{1,00}$	927
6		AS-345	«	86,27	13,68	–	99,95	$(Au_{0,78}Ag_{0,22})_{1,00}$
7	«		85,52	14,07	–	99,59	$(Au_{0,77}Ag_{0,23})_{1,00}$	859
8	«		85,10	14,89	–	99,99	$(Au_{0,76}Ag_{0,24})_{1,00}$	851
9	AS-42	«	72,23	26,88	–	99,11	$(Au_{0,60}Ag_{0,40})_{1,00}$	729
10		Центр	66,84	33,14	–	99,98	$(Au_{0,52}Ag_{0,48})_{1,00}$	669
11		Край	63,37	35,92	–	99,28	$(Ag_{0,51}Au_{0,49})_{1,00}$	638
12	AS-15	То же	89,51	9,57	–	99,08	$(Au_{0,84}Ag_{0,16})_{1,00}$	903
13			89,92	9,84	–	99,76	$(Au_{0,83}Ag_{0,17})_{1,00}$	901
14		То же	87,46	12,51	–	99,97	$(Au_{0,79}Ag_{0,21})_{1,00}$	875
15			82,16	17,29	–	99,45	$(Au_{0,72}Ag_{0,28})_{1,00}$	826
16			Центр	78,40	21,54	–	99,94	$(Au_{0,67}Ag_{0,33})_{1,00}$

Примечание. Здесь и в табл. 3 состав минералов определялся на электронном микроскопе MIRA LM, кристаллохимическая формула минералов Au и Ag рассчитана при сумме металлов, равной 1; прочерк – содержания ниже пределов обнаружения.

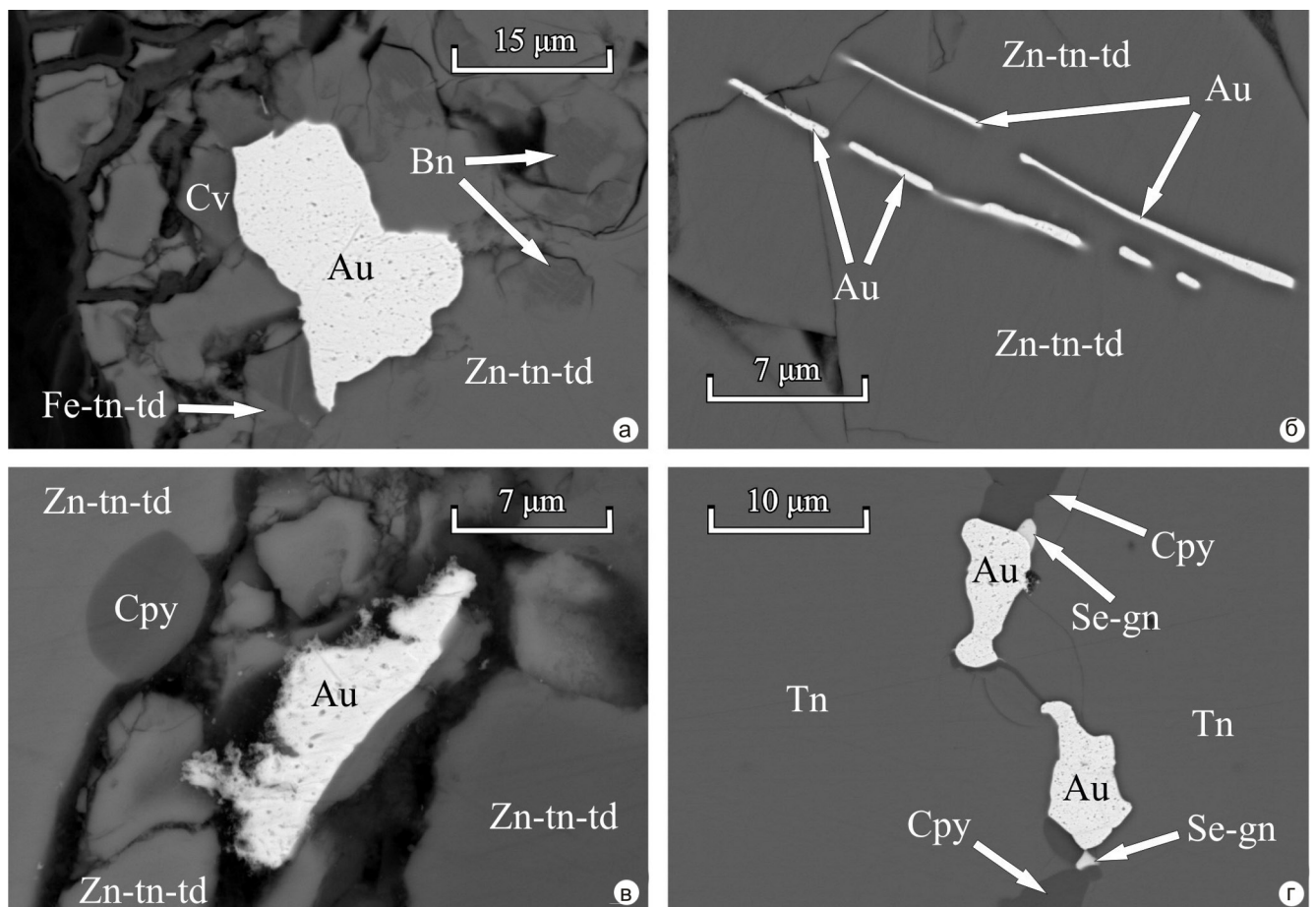


Рис. 4. Формы выделения золота (Au) и его взаимоотношение с ковеллином (Cv), борнитом (Bn), халькопиритом (Cpy), Se-галенитом (Se-gn), теннантитом (Tn), Fe-теннантит-тетраэдритом (Fe-tn-td) и Zn-теннантит-тетраэдритом (Zn-tn-td) в рудах Ак-Сугского месторождения

Золото и электрум этой ассоциации неправильной формы размером до 0,29 мм; образуют сростания с пиритом, халькопиритом, борнитом, встречаются

ся в виде вкрапленности в борните, халькозине по борниту. В самородном золоте данной ассоциации содержание Ag от центра зерна к краю законо-



Таблица 3

Химический состав золота и электрума (мас. %) пирит-борнит-халькопиритовой ассоциации Ак-Сугского месторождения

№ анализа	Образец	Зона зерна	Au	Ag	Te	Σ	Кристаллохимическая формула	Пробность
1	AS-3a	Центр	80,49	18,29	0,56	99,34	(Au <sub>0,70</sub> Ag <sub>0,29</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	810
2		«	80,55	18,89	–	99,44	(Au <sub>0,70</sub> Ag <sub>0,30</sub> ) <sub>1,00</sub>	810
3		«	80,30	18,83	–	99,13	(Au <sub>0,70</sub> Ag <sub>0,30</sub> ) <sub>1,00</sub>	810
4		Край	76,48	22,42	0,38	99,28	(Au <sub>0,65</sub> Ag <sub>0,34</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	770
5		Центр	79,22	19,96	–	99,18	(Au <sub>0,68</sub> Ag <sub>0,32</sub> ) <sub>1,00</sub>	799
6		«	78,64	20,57	0,46	99,67	(Au <sub>0,67</sub> Ag <sub>0,32</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	789
7		Край	75,65	24,05	–	99,70	(Au <sub>0,63</sub> Ag <sub>0,37</sub> ) <sub>1,00</sub>	759
8	AS-3б	Центр	75,39	24,28	–	99,67	(Au <sub>0,63</sub> Ag <sub>0,37</sub> ) <sub>1,00</sub>	756
9		«	75,05	24,61	–	99,66	(Au <sub>0,63</sub> Ag <sub>0,37</sub> ) <sub>1,00</sub>	753
10		Край	74,33	25,09	–	99,42	(Au <sub>0,62</sub> Ag <sub>0,38</sub> ) <sub>1,00</sub>	748
11		Центр	72,79	26,43	–	99,22	(Au <sub>0,60</sub> Ag <sub>0,40</sub> ) <sub>1,00</sub>	734
12		Край	72,37	26,86	–	99,23	(Au <sub>0,60</sub> Ag <sub>0,40</sub> ) <sub>1,00</sub>	729
13		Центр	72,31	27,60	–	99,91	(Au <sub>0,59</sub> Ag <sub>0,41</sub> ) <sub>1,00</sub>	724
14	AS-3a	Центр	71,92	27,97	–	99,89	(Au <sub>0,58</sub> Ag <sub>0,42</sub> ) <sub>1,00</sub>	720
15		Край	59,39	39,83	0,51	99,73	(Ag <sub>0,52</sub> Au <sub>0,47</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	596
16		Центр	70,30	28,63	0,35	99,28	(Au <sub>0,57</sub> Ag <sub>0,42</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	708
17		«	69,00	29,81	0,42	99,23	(Au <sub>0,56</sub> Ag <sub>0,43</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	695
18		«	64,10	34,75	0,63	99,48	(Au <sub>0,50</sub> Ag <sub>0,49</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	644
19		«	61,61	38,32	–	99,93	(Ag <sub>0,53</sub> Au <sub>0,47</sub> ) <sub>1,00</sub>	617
20		«	59,64	40,21	–	99,85	(Ag <sub>0,55</sub> Au <sub>0,45</sub> ) <sub>1,00</sub>	597
21		«	57,40	41,68	–	99,08	(Ag <sub>0,57</sub> Au <sub>0,45</sub> ) <sub>1,00</sub>	579
22		Край	34,03	65,51	0,44	99,98	(Ag <sub>0,77</sub> Au <sub>0,22</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	340
23		Центр	70,47	28,96	0,49	99,92	(Au <sub>0,57</sub> Ag <sub>0,42</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	705
24		«	69,79	29,20	–	99,63	(Au <sub>0,56</sub> Ag <sub>0,43</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	700
25		«	62,83	36,85	–	99,68	(Ag <sub>0,52</sub> Au <sub>0,48</sub> ) <sub>1,00</sub>	630
26		«	62,19	36,57	0,76	99,52	(Ag <sub>0,51</sub> Au <sub>0,48</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	625
27		«	60,44	38,90	0,50	99,84	(Ag <sub>0,54</sub> Au <sub>0,45</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	605
28	Край	42,68	56,22	0,39	99,29	(Ag <sub>0,70</sub> Au <sub>0,29</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	430	
29	AS-3б	Центр	69,95	29,34	–	99,29	(Au <sub>0,57</sub> Ag <sub>0,43</sub> ) <sub>1,00</sub>	705
30		«	67,20	32,03	0,40	99,63	(Au <sub>0,53</sub> Ag <sub>0,46</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	674
31		«	34,75	64,66	0,51	99,92	(Ag <sub>0,77</sub> Au <sub>0,22</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	348
32		«	33,98	65,43	0,35	99,76	(Ag <sub>0,78</sub> Au <sub>0,22</sub> ) <sub>1,00</sub>	341
33		Край	33,04	66,20	0,53	99,77	(Ag <sub>0,78</sub> Au <sub>0,21</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	331
34	AS-3a	Центр	70,18	29,71	–	99,89	(Au <sub>0,56</sub> Ag <sub>0,44</sub> ) <sub>1,00</sub>	703
35		«	69,61	30,21	–	99,82	(Au <sub>0,56</sub> Ag <sub>0,44</sub> ) <sub>1,00</sub>	697
36		«	67,33	32,18	0,35	99,86	(Au <sub>0,53</sub> Ag <sub>0,46</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	674
37		Край	60,83	38,69	–	99,52	(Ag <sub>0,54</sub> Au <sub>0,46</sub> ) <sub>1,00</sub>	611
38		Центр	69,25	30,23	0,44	99,92	(Au <sub>0,55</sub> Ag <sub>0,44</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	693
39		«	67,72	31,55	0,37	99,64	(Au <sub>0,53</sub> Ag <sub>0,46</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	680
40		Край	57,79	41,36	–	99,15	(Ag <sub>0,57</sub> Au <sub>0,43</sub> ) <sub>1,00</sub>	583
41		Центр	67,34	32,56	–	99,90	(Au <sub>0,53</sub> Ag <sub>0,47</sub> ) <sub>1,00</sub>	674
42		«	65,77	33,56	0,44	99,77	(Au <sub>0,51</sub> Ag <sub>0,48</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	659
43		«	62,49	36,47	0,42	99,38	(Ag <sub>0,51</sub> Au <sub>0,48</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	629
44		Край	58,29	40,81	0,48	99,58	(Ag <sub>0,56</sub> Au <sub>0,43</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	585
45		Центр	66,56	33,02	–	99,58	(Au <sub>0,52</sub> Ag <sub>0,48</sub> ) <sub>1,00</sub>	668
46		«	60,48	38,53	–	99,01	(Ag <sub>0,54</sub> Au <sub>0,46</sub> ) <sub>1,00</sub>	611
47		Край	55,89	43,55	0,41	99,85	(Ag <sub>0,58</sub> Au <sub>0,41</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	560
48		Центр	64,70	34,77	–	99,47	(Ag <sub>0,50</sub> Au <sub>0,50</sub> ) <sub>1,00</sub>	650
49		«	62,20	37,03	0,38	99,61	(Ag <sub>0,52</sub> Au <sub>0,47</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	624
50		«	60,84	38,49	–	99,33	(Ag <sub>0,54</sub> Au <sub>0,46</sub> ) <sub>1,00</sub>	613
51	Край	56,83	42,04	0,36	99,23	(Ag <sub>0,57</sub> Au <sub>0,42</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	573	
52	Центр	63,36	36,56	–	99,92	(Ag <sub>0,51</sub> Au <sub>0,49</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	634	
53	«	61,93	36,79	0,57	99,29	(Ag <sub>0,52</sub> Au <sub>0,47</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	624	
54	Край	55,19	43,93	0,48	99,60	(Ag <sub>0,59</sub> Au <sub>0,40</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	554	
55	AS-3a	Центр	63,06	36,85	0,37	99,58	(Ag <sub>0,51</sub> Au <sub>0,48</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	633
56		«	62,52	36,69	–	99,21	(Ag <sub>0,52</sub> Au <sub>0,48</sub> ) <sub>1,00</sub>	630
57		Край	53,12	45,75	0,66	99,53	(Ag <sub>0,61</sub> Au <sub>0,38</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	534
58	AS-3б	Центр	62,82	36,58	0,50	99,90	(Ag <sub>0,51</sub> Au <sub>0,48</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	629
59		«	57,30	42,18	–	99,48	(Ag <sub>0,57</sub> Au <sub>0,43</sub> ) <sub>1,00</sub>	576
60		Край	54,40	44,98	0,51	99,89	(Ag <sub>0,60</sub> Au <sub>0,39</sub> Te <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>	545

№ 2(22) ♦ 2015



№ анализа	Образец	Зона зерна	Au	Ag	Te	Σ	Кристаллохимическая формула	Пробность
61	AS-3a	Центр	62,69	37,06	–	99,75	$(Ag_{0,52}Au_{0,48})_{1,00}$	628
62		«	62,42	36,83	0,36	99,61	$(Ag_{0,51}Au_{0,48}Te_{0,01})_{1,00}$	627
63		«	58,52	40,98	–	99,50	$(Ag_{0,56}Au_{0,44})_{1,00}$	588
64		Край	40,04	58,53	0,44	99,01	$(Ag_{0,72}Au_{0,27}Te_{0,01})_{1,00}$	404
65	AS-3б	Центр	60,66	38,26	0,39	99,31	$(Ag_{0,53}Au_{0,46}Te_{0,01})_{1,00}$	611
66		Край	53,73	45,62	0,48	99,83	$(Ag_{0,60}Au_{0,39}Te_{0,01})_{1,00}$	538
67		Центр	59,38	39,97	0,42	99,77	$(Ag_{0,55}Au_{0,44}Te_{0,01})_{1,00}$	595
68		Край	58,17	40,97	0,38	99,52	$(Ag_{0,56}Au_{0,43}Te_{0,01})_{1,00}$	585

Примечание. Прочерк – содержания ниже пределов обнаружения.

мерно увеличивается на 7–12, реже 20–36 мас. % (табл. 3, анализы 1–68). Примесь Cu и Hg ниже пределов обнаружения. По химическому составу самородное золото данной ассоциации образуют следующий ряд (мас. %):

1) среднепробное (Au 80,30–80,55, Ag 18,29–18,89, Te 0,00–0,56);

2) низкопробное (Au 69,79–79,22, Ag 19,96–29,71, Te 0,00–0,49);

3) электрум (Au 33,04–69,61, Ag 29,81–66,20, Te 0,00–0,76).

Высокопробное, среднепробное и низкопробное золото борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации образует мелкие включения в борните, халькопирите в ассоциации с баритом, целестобаритом, клаустолитом, виттихенитом, S-кавацулитом, Zn-теннантит-тетраэдритом, халькопиритом, ковеллином, Se-галенитом, гесситом, арсенопалладитом и Se-тетрадимитом (см. рис. 3, г). В золоте данной ассоциации содержание Ag от центра зерна к краю закономерно увеличивается на 2–5 мас. % (см. табл. 2, анализы 12–16). Примесь Cu, Hg и Te ниже пределов обнаружения. По химическому составу самородное золото данной стадии можно разделить на три группы (мас. %):

1) высокопробное (Au – 89,51–89,92, Ag – 9,57–9,84);

2) среднепробное (Au – 82,16–87,46, Ag – 12,51–17,29);

3) низкопробное (Au – 78,42, Ag – 21,54).

Исследование на сканирующем электронном микроскопе показало, что самородное золото Ак-Сугского золотомедно-молибден-порфирикового месторождения образует прямую зональность: содержание Au от центра к периферии закономерно уменьшается, Ag – увеличивается. Основные примеси – Ag и Te; Cu и Hg ниже пределов обнаружения. Концентрация Ag в золоте достигает 29,71 мас. %, Te 0,59 мас. %, в электруме – Ag 66,20 мас. %, Te 0,76 мас. % (см. табл. 2, 3).

Средняя пробность самородного золота Ак-Сугского месторождения для 31 золотин (84 анализа) составляет 674 ‰ (311–959 ‰), при этом для блеклорудно-пирит-халькопиритовой ассоциации – 845 ‰ (638–959 ‰), пирит-борнит-халькопиритовой ассоциации – 632 ‰ (331–810 ‰), поздней борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации – 858 ‰ (784–903 ‰). В целом в рудах количественно преобладают

электрум и низкопробное золото, реже отмечается среднепробное и высокопробное золото (рис. 5, 6).

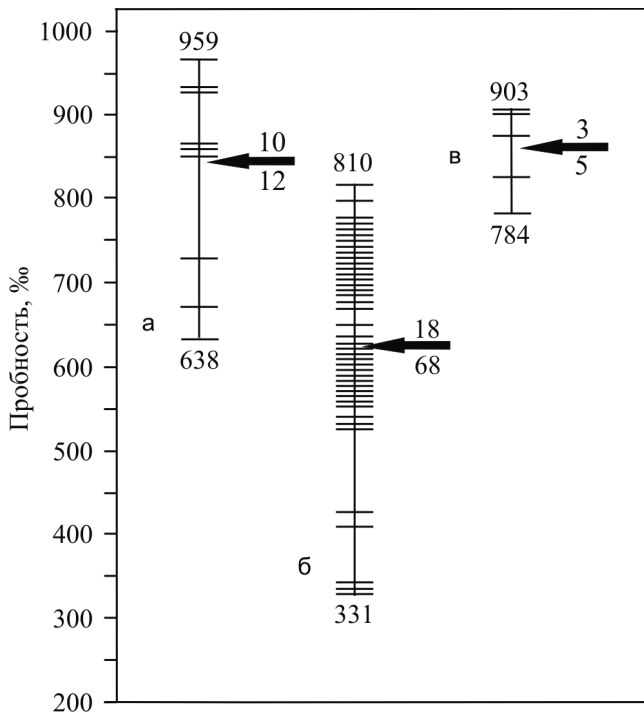
Тренд состава самородного золота блеклорудно-пирит-халькопиритовой стадии следующий: весьма высокопробное Au (959 ‰) → высокопробное Au (932–927 ‰) → среднепробное Au (863–851 ‰) → низкопробное Au (729 ‰) → электрум (669–638 ‰); пирит-борнит-халькопиритовой: среднепробное Au (810 ‰) → низкопробное Au (799–700 ‰) → электрум (697–331 ‰); борнит-халькопирит-теллуридной: высокопробное Au (903–901 ‰) → среднепробное Au (875–826 ‰) → низкопробное Au (784 ‰) + гессит + Ag-содержащие минералы ряда галенит – клаусталит (Ag до 3 мас. %) ± петцит ± калаверит ± S-содержащий науманнит ± арсенопалладит ± меренскиит.

Наименьший разброс пробности самородного золота поздней борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации по сравнению с другими и отсутствие в ней электрума, видимо, связано с наличием теллуридной и селенидной минерализаций, т.е. при повышенной активности Te и Se в рудах формировалось прежде всего высоко- и среднепробное золото, поскольку Ag связывалось в теллуриды и/или селениды (см. рис. 5), так как степень химической активности Bi и Ag с Te выше, чем у Au.

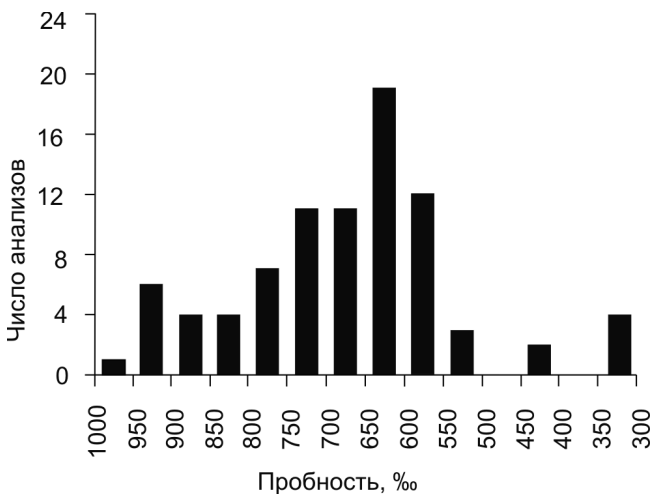
В минеральных ассоциациях с самородным золотом в рудах Ак-Сугского месторождения наблюдается галенит и его Se-содержащая разновидность с содержанием Se до 4 мас. %. В поздней борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации отмечаются неограниченные твердые растворы минералов ряда галенит – клаусталит. По данным следующих работ [23, 25], наличие уже существующих сульфидных комплексов (например, галенита) предотвращает концентрацию селена в гидротермальном растворе за счет буферизации Se по реакции:  $2PbS + Se_2 = 2PbSe + S_2$ . Соответственно, отношение Se/S в гидротермальном растворе контролируется галенит-клаусталитовым буфером, что сдерживает рост концентрации Se. В этих условиях из гидротермального раствора при низком отношении  $Se_2/S_2$ , могут осаждаться только селениды Ag. Вероятно, этим объясняется отсутствие селенидов Au, Au-Ag в рудах Ак-Сугского месторождения.

Теллур, как менее совместимый элемент в структуре сульфидных минералов, чем селен, из-за большого атомного радиуса ( $r_{Te^{2-}} = 2,11 \text{ \AA}$  от-





**Рис. 5.** Вариации пробностей самородного золота Ак-Сугского месторождения: а – блеклорудно-пирит-халькопиритовой ассоциации; б – пирит-борнит-халькопиритовой ассоциации; в – борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации



**Рис. 6.** Частота встречаемости пробности самородного золота Ак-Сугского месторождения

носителем  $Se^{-2} = 1,88-1,90 \text{ \AA}$  и  $S^{-2} \text{ \AA} = 1,56-1,78 \text{ \AA}$ ) сформировал собственные минералы в сульфидных рудах на более поздних этапах минерализации, когда концентрация Те в гидротермальном растворе увеличилась путем кристаллизации из раствора более ранних сульфидных минералов.

Наличие весьма высокопробного и высокопробного золота в более ранней блеклорудно-пирит-халькопиритовой стадии, видимо, связано с повышенными температурами формирования минералов данной ассоциации, которые на разных месторождениях медно-молибден-порфирирового типа, по данным различных авторов, в целом близки: 350–470 °С (более ранняя ассоциация

с молибденитом); 250–350 °С (промежуточная с халькопиритом) и 160–250 °С (поздняя полиметаллическая) [18, 19]. Возможно, температурный интервал формирования 250–350 °С соответствует промежуточным ассоциациям (блеклорудно-пирит-халькопиритовая и пирит-борнит-халькопиритовая) Ак-Сугского месторождения. Температурный интервал формирования золототеллуридной минерализации борнит-халькопирит-теллуридной ассоциации, судя по диаграмме стабильности Au–Ag–Te минералов ассоциации петцит – гессит – золото, соответствует 180–280 °С, при значениях  $\log f(Te_2) = 10^{-16} - 10^{-10}$  [14]. Соответственно, наиболее высокотемпературные рудные ассоциации развиты в центральной части рудного штокверка, низкотемпературные – в периферийных частях.

Таким образом, формирование золотомедно-молибден-порфирирового Ак-Сугского месторождения, связано со становлением рудоносного порфирирового массива, сложенного ак-сугским комплексом девона. Для месторождения характерна типовая медно-порфирировая зональность метасоматической колонны, а также латеральная минеральная зональность от центра к периферии рудного штокверка где наблюдается смена медно-молибденовой минерализации, Au-содержащей медной (с золотом и электрумом) и полиметаллической (с золотом, теллуридами Au и Ag). Рассматриваемый объект золотомедно-молибден-порфирирового типа имеет ярко выраженный медный профиль; ему свойственны повышенные содержания благородных металлов (Au, Ag и Pd), которые в рудах образуют собственные минералы. В рудах Ак-Сугского месторождения наблюдаются три генерации самородного золота, его состав изменяется от весьма высокопробного золота до электрума. Состав самородного золота месторождения в значительной мере обусловлен температурами образования рудных ассоциаций и вариациями  $fS_2$ ,  $fSe_2$  и  $fTe_2$ . При повышенной  $fSe_2$  и  $fTe_2$  в растворах формировалось высокопробное золото, поскольку серебро связывалось в теллуриды. По химическому составу самородное золото рудных ассоциаций месторождения близко и образует следующий ряд (мас. %): 1) весьма высокопробное золото (Au 95,86, Ag 4,08); 2) высокопробное золото (Au 89,51–93,01, Ag 6,75–9,84); 3) среднепробное золото (Au 80,30–87,46, Ag 12,51–17,29, Te 0,00–0,56); 4) низкопробное золото (Au 69,79–79,22, Ag 19,96–29,71; Te 0,00–0,49); 5) электрум (Au 33,04–69,61, Ag 29,81–66,20, Te 0,00–0,76). В целом в рудах количественно преобладают низкопробное золото и электрум, реже встречается среднепробное золото.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-45-04195-р\_сибирь\_а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксугское Cu-Mo-порфирировое месторождение в Северо-Восточной Туве: Ar/Ar геохроно-



логия, источники вещества [Текст] / В. И. Сотников, В. А. Пономарчук, Д. О. Шевченко, А. Н. Берзина // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 11. – С. 1119–1132.

2. **Берзина, А. П.** Медно-молибден-порфировые рудно-магматические системы Центральной Азии и геодинамические условия их формирования [Текст] / А. П. Берзина, А. Н. Берзина, В. О. Гимон // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит : матер. Всерос. конф. с междунар. участием, Владивосток, 20–23 сентября 2011 г. – Владивосток : Дальнаука, 2011. – С. 331–333.

3. **Берзина, А. Н.** Pt и Pd в рудах медно-молибден-порфировых месторождений Сибири и Монголии [Текст] / А. Н. Берзина, В. И. Сотников // Докл. РАН. – 2001. – Т. 378, № 5. – С. 665–667.

4. **Волков, А. В.** Золото Тывы от скифов до наших дней [Текст] / А. В. Волков // Золото и технологии. – 2011. – № 1 (11).

5. **Забелин, В. И.** Элементы геолого-генетической модели Аксугского медно-молибденового месторождения [Текст] / В. И. Забелин // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 92–103.

6. **Золотосодержащие** минеральные ассоциации месторождений меднорудного профиля Алтае-Саянской складчатой области [Текст] / И. В. Гасков, В. А. Акимцев, К. Р. Ковалев [и др.] // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 9. – С. 986–994.

7. **Коробейников, А. Ф.** Золото и платиновые металлы в медно-молибден-порфировых месторождениях [Текст] / А. Ф. Коробейников, А. И. Грабежов // Изв. ТПУ. – 2003. – Т. 306, № 5. – С. 24–32.

8. **Лебедев, Н. И.** Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых [Электронный ресурс] / Н. И. Лебедев ; отв. ред. д.г.-м.н. В. И. Лебедев. – Кызыл : Тувикопр СО РАН, 2012. – 284 с. – Точка доступа: <http://ipc-publisher.ru/admin/files/LebedevNI-mngr-resursyPI-2012.pdf>.

9. **Медно-молибденовая** рудная формация (на примере Сибири и сопредельных регионов) [Текст] / В. И. Сотников, А. П. Берзина, Е. И. Никитина [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1977. – 423 с.

10. **Монгуш, А. Д.** Ак-Сугское медно-молибден-порфировое месторождение: вещественный состав пород и руд [Текст] / А. Д. Монгуш, В. И. Лебедев // Изв. СО РАЕН. Отд. секции наук о Земле. – 2013. – № 1(42). – С. 22–29.

11. **Нагорная, Е. В.** Минералогия и зональность молибден-медно-порфирового рудного поля Находка, Чукотка : Автореф. дис. ... к.г.-м.н. [Текст] / Е. В. Нагорная. – М., 2013. – 26 с.

12. **Николаева, Е. И.** Типоморфизм самородного золота в рудах медно-порфировых месторождений Алмалыкского рудного района [Текст] / Е. И. Николаева // Минералогия и геохимия эндогенных месторождений Средней Азии. Вып. 3. – Ташкент : САИГИМС, 1980. – С. 79–98.

13. **Павлова, И. Г.** Геолого-генетические модели молибденово-медных порфировых месторождений [Текст] / И. Г. Павлова // Генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск : Наука, 1983. – С. 127–134.

14. **Парагенезисы** теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) [Текст] / Н. С. Бортников, Х. Крамер, А. Д. Генкин [и др.] // Геология рудных месторождений. – 1988. – № 2. – С. 49–61.

15. **Первая** находка меренскита (Pd, Pt)Te<sub>2</sub> в рудах Cu-Mo-порфировых месторождений России [Текст] / А. Н. Берзина, В. И. Сотников, М. Экономоу-Элиопоулос, Д. Г. Элиопоулос // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 8. – С. 848–851.

16. **Петровская, Н. В.** Самородное золото [Текст] / Н. В. Петровская. – М. : Наука, 1973. – 348 с.

17. **Платина** и палладий в рудах медно-молибден-порфировых месторождений Сибири и Монголии [Текст] / А. Н. Берзина, В. И. Сотников, М. Экономоу-Элиопоулос, Д. Г. Элиопоулос // Докл. РАН. – 2001. – Т. 378, № 5. – С. 663–667.

18. **Попов, В. С.** Геология и генезис медно-молибден-порфировых месторождений [Текст] / В. С. Попов. – М. : Наука, 1977. – 203 с.

19. **Сотников, В. И.** Основные тенденции развития теории рудообразования [Текст] / В. И. Сотников // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – Т. 2, № 12. – С. 56–62.

20. **Спиридонов, Э. М.** Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации [Текст] / Э. М. Спиридонов // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов : тр. Всерос. (с междунар. участием) науч. конф., посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН (26–29 сентября 2010 г.). – Апатиты : Изд-во К&М, 2010. – С. 143–171.

21. **Филимонова, Л. Е.** Минералы теллура в рудах медно-молибденового месторождения Бошекуль [Текст] / Л. Е. Филимонова, А. П. Слюсарев // Минералогия и геохимия Центрального Казахстана и Алтая. – Алма-Ата : Наука, 1971. – С. 42–51.

22. **Lowell, J. D.** Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper ore deposits [Text] / J. D. Lowell, J. M. Guilbert // Economic Geology. – 1970. – Vol. 65. – P. 373–408.

23. **Meyer, C.** Wall rock alteration [Text] / C. Meyer, J. J. Hemley ; ed. H. L. Barnes // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. – New York : Holt, Rinehart, and Winston, 1967. – P. 166–232.

24. **Sillitoe, R. H.** Porphyry Copper Systems, Society of Economic Geologists, Inc. [Text] / R. H. Sillitoe // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – P. 3–41.

25. **Simone, G.** Phase Relations among Selenides, Sulfides, Tellurides, And Oxides: II. Application to Selenide-Bearing Ore Deposits [Text] / G. Simone, S. E. Kesler, E. J. Essene // Economic Geology. – 1997. – Vol. 92. – P. 468–484.

26. **Tarkian, M.** Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit,



Luzon Island, Philippines [Text] / M. Tarkian, G. Koopmann // Mineral. Deposita. – 1995. – Vol. 30. – P. 39–47.

27. Tarkian, M. Mineralogy of precious metals in the Skouries porphyry copper deposit, Northern Greece [Text] / M. Tarkian, D. G. Eliopoulos, M. Economou-Eliopoulos // Neues Jahrb. Mineral. Monat. – 1991. – Vol. 12. – P. 529–537.

## REFERENCES

1. Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Shevchenko D.O., Berzina A.N. [Aksugskoe Cu-Mo-porphyry deposit in the North-Eastern Tuva: Ar/Ar geochronology, matter sources]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 11, pp. 1119–1132. (In Russ.).

2. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O. [Copper-molybdenum-porphyry ore-magmatic systems of the Central Asia and geodynamic conditions of their formation]. *Geologicheskie protsessy v obstanovkakh subdukcii, kollizii i skol'zheniya litosfernykh plit: Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Vladivostok, 20–23 sentyabrya 2011 g.* [Geological processes in subduction, collision, and shifting of tectonic plates: Proc. of the All-Russian and International Conference, Vladivostok, 20–23 September 2011]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2011, pp. 331–333. (In Russ.).

3. Berzina A.N., Sotnikov V.I. [Pt and Pd in ores of copper-molybdenum-porphyry deposits of Siberian and Mongolia]. *Report of RAS*, 2001, vol. 378, no. 5, pp. 665–667. (In Russ.).

4. Volkov A.V. [Gold of Tuva from Scythians till the present day]. *Zoloto i tekhnologii – Gold and technologies*, 2011, no. 1 (11). (In Russ.).

5. Zabelin V.I. [Elementi geologo-geneticheskoi modeli Aksugskogo medno-molibdenovogo mestorojdeniya]. *Magmatizm i metallogeniya rudnih raionov Tuvi* [Magmatism and metallogeny of ore districts of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, pp. 92–103. (In Russ.).

6. Gaskov I.V., Akimtsev V.A., Kovalev K.R., et al. [Gold-bearing mineral associations in copper-ore deposits, Altai-Sayan folded region]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 9, pp. 986–994. (In Russ.).

7. Korobeynikov A.F., Grabezhev A.I. [Gold and platinum metals in copper-molybdenum-porphyry deposits]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Tomsk Polytechnic University Proceedings*, 2003, no. 5, vol. 306, pp. 24–32. (In Russ.).

8. Lebedev N.I. *Mineral'nye resursy Tuvy: obzor i analiz poleznykh iskopaemykh* [Mineral resources of Tuva: Review and analysis of mineral resources]. Kyzyl, YuvIKOPR SB RAS, 2012, 284 p. Available at: <http://ipc-publisher.ru/admin/files/LebedevNI-mngr-resursyPI-2012.pdf> (accessed in December 2012). (In Russ.).

9. Sotnikov V.I., Berzina A.P., Nikitina E.I., et al. *Medno-molibdenovaya rudnaya formatsiya (na primere Sibiri i sopredel'nykh regionov)* [Copper-molybde-

num ore formation (Case study from Siberia and adjacent regions)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 423 p. (In Russ.).

10. Mongush A.D., Lebedev V.I. [The Ak-Suskoe copper-molybdenum-porphyry deposit: Material composition of rocks and ores]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle RAEN – Proceedings of the Siberian Branch of the Geosciences Section RANS*, 2013, no. 1 (42), pp. 22–29. (In Russ.).

11. Nagornaya E.V. *Mineralogiya i zonal'nost' molibden-medno-porfirovogo rudnogo polya Nakhodka, Chukotka* [Mineralogy and zonation of the copper-molybdenum-porphyry Nakhodka ore field, Chukotka]. PhD Thesis: 25.00.05, Moscow, 2013. 26 p. (In Russ.).

12. Nikolaeva E.I. [Typomorphism of native gold in copper-porphyry deposits of the Almalyksky ore region]. *Mineralogiya i geokhimiya endogennykh mestorozhdeniy Sredney Azii* [Mineralogy and geochemistry of endogenous deposits of the Central Asia]. Tashkent, SAIGIMS Publ., 1980, vol. 3, pp. 79–98. (In Russ.).

13. Pavlova I.G. [Geological-genetic models of molybdenum-copper-porphyry deposits]. *Geneticheskii modeli endogennykh rudnykh formatsiy* [Genetic models of endogenous ore formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, pp. 127–134. (In Russ.).

14. Bortnikov N.S., Kramer Kh., Genkin A.D., et al. [Coexisting gold and silver tellurides in the Florencia gold-ore deposit (Republic of Cuba)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of ore deposits*, 1988, no. 2, pp. 49–61. (In Russ.).

15. Berzina A.N., Sotnikov V.I., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D. G. First finding of merenskyite (Pd,Pt)Te<sub>2</sub> in porphyry Cu-Mo ores in Russia. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 8, pp. 656–658.

16. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* [Native gold]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 348 p. (In Russ.).

17. Sotnikov V.I., Berzina A.N., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D. [Platinum and palladium in ores of copper-molybdenum-porphyry deposits of Siberia and Mongolia]. *Doklady RAN – RAS Proceedings*, 2001, vol. 378, no. 5, pp. 663–667. (In Russ.).

18. Popov V.S. *Geologiya i genezis medno-molibden-porfirovykh mestorozhdeniy* [Geology and genesis of copper-molybdenum-porphyry deposit]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 203 p. (In Russ.).

19. Sotnikov V.I. [Major trends of the ore formation theory evolution]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal – Soros Educational Journal*, 1996, vol. 2, no. 12, pp. 56–62. (In Russ.).

20. Spiridonov E.M. [Review of gold mineralogy in the main types of gold mineralization]. *Zoloto Kol'skogo poluostrova i sopredel'nykh regionov. Trudy Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu Kol'skogo NTs RAN. Apatity (26–29 sent. 2010 g)* [Gold of the Kola Peninsula and adjacent regions. Proceedings of the All-Russia and International Scientific Conference dedicated to the 80<sup>th</sup> anniversary of the Kola



RC RAS. Apatity (26–29 September 2010)]. Apatity, K & M Publ., 2010, pp. 143–171. (In Russ.).

21. Filimonova L.E., Slyusarev A.P. [Tellurium minerals in ores of the copper-molybdenum Boshchekul' deposit]. *Mineralogiya i geokhimiya Tsentral'nogo Kazakhstana i Altaya* [Mineralogy and Geochemistry of the Central Kazakhstan and Altai]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1971, pp. 42–51. (In Russ.).

22. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper ore deposits. *Economic Geology*, 1970, vol. 65, pp. 373–408.

23. Meyer C., Hemley J.J., Barnes H.L. ed. Wall rock alteration. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 1967, New York, Holt, Rinehart, and Winston, pp. 166–232.

24. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–41.

25. Simone G., Kesler S.E., Essene E.J. Phase Relations among Selenides, Sulfides, Tellurides, and Oxides: II. Application to Selenide-Bearing Ore Deposits. *Economic Geology*, 1997, vol. 92, pp. 468–484.

26. Tarkian M., Koopmann G. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines. *Mineral Deposita*, 1995, vol. 30, pp. 39–47.

27. Tarkian M., Eliopoulos D.G., Economou-Eliopoulos M. Mineralogy of precious metals in the Skouries porphyry copper deposit, Northern Greece. *Neues Jahrb. Mineral. Monat.*, 1991, vol. 12, pp. 529–537.

© П. В. Кужугет, А. К. Хертек, В. И. Лебедев,  
В. И. Забелин, 2015

**КУЖУГЕТ Ренат Васильевич**, ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов» СО РАН (ТувИКОПР СО РАН), Кызыл, ст. науч. сотр. *E-mail: rkuzhuget@mail.ru*

**ХЕРТЕК Айлан Кымзай-ооловна**, ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов» СО РАН (ТувИКОПР СО РАН), Кызыл, инженер-исследователь. *E-mail: ajlan@mail.ru*

**ЛЕБЕДЕВ Владимир Ильич**, ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов» СО РАН (ТувИКОПР СО РАН), Кызыл, директор, д. г.-м. н. *E-mail: vil@tikopr.fromtuva.ru*

**ЗАБЕЛИН Владимир Иванович**, ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов» СО РАН (ТувИКОПР СО РАН), Кызыл, гл. науч. сотр., к. г.-м. н., д. биол. н. *E-mail: zabelunvi@mail.ru*

**KUZHUGET Renat**, Tuva Institute of Integrated development of Natural Resources SB RAS (TuvIKOPR), Kyzyl, Russia. *E-mail: rkuzhuget@mail.ru*

**KHERTEK Aylan**, Tuva Institute of Integrated development of Natural Resources SB RAS (TuvIKOPR), Kyzyl, Russia. *E-mail: ajlan@mail.ru*

**LEBEDEV Vladimir**, DSc, Tuva Institute of Integrated development of Natural Resources SB RAS (TuvIKOPR), Kyzyl, Russia. *E-mail: vil@tikopr.fromtuva.ru*

**ZABELIN Vladimir**, PhD (Geology and Mineralogy), DSc (Biology), Tuva Institute of Integrated development of Natural Resources SB RAS (TuvIKOPR), Kyzyl, Russia. *E-mail: zabelunvi@mail.ru*