

УДК 553.43: 553.41: 549.355 (571.52)

ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЛЁКЛЫХ РУД АК-СУГСКОГО ЗОЛОТО-МОЛИБДЕН-МЕДНО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

Кужугет Ренат Васильевич¹,
rkuzhuget@mail.ru

Монгуш Андрей Александрович¹,
amongush@inbox.ru

Монгуш Ай-Демир Олегович¹,
aidemirm@rambler.ru

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
Россия, 667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117 а.

Изучение блёклых руд является одним из эффективных направлений минералогических исследований, позволяющих расширять условия образования рудных месторождений, что, в свою очередь, является научной основой для их поисков, разведки и рациональной отработки.

Цель работы: выяснение минералого-геохимических особенностей и эволюции состава блёклых руд, а также особенностей рудообразующих гидротермальных флюидов, формировавших Ак-Сугское золото-молибден-медно-порфировое месторождение.

Методы исследования: полевые исследования, детальные минералогические исследования с изучением рудной минерализации в полированных шлифах (аншлифах) с помощью поляризационного микроскопа Olympus и растрового сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd).

Результаты исследования. Установлены вариации состава минералов группы блёклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирового месторождения, которые представлены минералами ряда теннантит–тетраэдрит. Последние развиты в составе трёх минеральных ассоциаций, соответствующих трём генерациям. Для блёклых руд характерна скрытая плавная зональность, обусловленная увеличением содержания Sb к внешним зонам. Эволюция составов блёклых руд I генерации: Cu-теннантит→Fe-теннантит→Zn-теннантит, II генерации: Cu-теннантит→Zn-теннантит→Zn-теннантит-тетраэдрит. Блёклая руда III генерации представлена Zn-теннантит-тетраэдритом. Наличие высокомедистого теннантита, Zn-теннантита, Zn-теннантит-тетраэдрита и минералогические особенности руд Ак-Сугского месторождения свидетельствуют об относительно повышенном окислительном потенциале рудообразующих гидротермальных флюидов. Главными факторами рудоотложения являются изменение окислительно-восстановительного характера, вариации fS_2 , fSe_2 , fTe_2 и снижение температуры рудоносного флюида.

Ключевые слова:

Блёклые руды, теннантит, теннантит-тетраэдрит, Au-Мо-Cu-порфировое месторождение, Тува.

Введение

Блёклые руды относятся к классу сульфосолей с общей формулой $Me_1 + 10Me_2 + 2X_1Y_{13}$, где $Me^{1+} = Cu, Ag, Tl, Au$; $Me^{2+} = Zn, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Hg, Cd, Pb, Mn, Ni, Co, X = As, Sb, Bi, Te, Ge, In, Y = S, Se$. Благодаря широко проявленному изоморфизму, минералы группы блёклых руд являются индикаторами рудогенеза. Особенности их состава, в совокупности с данными о минеральных ассоциациях и последовательности их кристаллизации, имеют большое значение для установления закономерностей эволюции химического состава рудогенерирующих растворов [1–3].

Минералы группы блёклых руд широко развиты в различных типах гидротермальных месторождений, в том числе медно-порфирового типа. Месторождения медно-порфирового семейства с повышенными содержаниями Au и Ag относятся к золото-молибден-медно-порфировому типу. В России к данному типу относятся медно-порфировые месторождения в складчатых областях Урала, Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна, Сихотэ-Алиня, Чукотки и Камчатки [4]. Однако только три из них – Малмыж (Хабаровский край), Пе-

счанка (Чукотский автономный округ) и Ак-Суг (Республика Тыва) – характеризуются значительными запасами Cu и Au [5, 6].

Краткая характеристика Ак-Сугского месторождения

Ак-Сугское золото-молибден-медно-порфировое месторождение находится в северо-восточной части Республики Тыва в междуречье рек Ак-Суг и Даштыг-Ой. Оно приурочено к тектонически мобильной зоне в области сопряжения докембрийских и раннекаледонских структур, непосредственно расположено в зоне Кандатского разлома, разделяющего Хамсаринскую (Тува) и Кизирскую (Восточный Саян) структурно-фациальные зоны ранних каледонид. Оруденение приурочено к многофазному штокообразному телу порфировых пород Ак-Сугского массива (батолита). В данном массиве представлен гомодромный ряд от габброидов и диоритов по периферии до плагиогранит-порфиров толеитового ряда в центральной части (рис. 1). Эти породы прорываются штоками порфировидных тоналитов, кварц-плагиоклазовых порфиров, с которыми и связано проявление штокверкового золото-молибден-медно-порфирового оруденения.

Достоверных данных о возрасте порфировых пород Ак-Сугского массива нет. Вулканогенные и осадочные породы толтаковской свиты на западном фланге месторождения отнесены к среднему девону, однако возраст свиты остается дискуссионным, т. к. отсутствует палеонтологическое обоснование возраста свиты. Контакты пород толтаковской свиты с тоналитами и порфирированными плагиогранитами Ак-Сугского массива имеют либо тектонический характер, либо достоверно не установлены, либо наблюдается контактное воздействие плагиогранит-порфиров на осадочные породы в виде аргиллизации и наложенной прожилково-вкрапленной минерализации самородной меди и халькозина [7].

Возраст наиболее ранних диоритов Ак-Сугского массива, по данным Ar–Ar метода по амфиболу, составляет $488 \pm 4,8$ млн лет, пироксенсодержащих кварцевых диоритов – $490 \pm 4,8...488,6 \pm 1,8$ млн лет (E_3), амфиболовых кварцевых диоритов – 462 млн лет (O_2) [8]. Ar–Ar датирование метасоматитов, образованных прежде всего за счет порфирированных пород Ак-Сугского массива, выявило три импульса эндогенных событий: $404 \pm 7...401 \pm 2$ (D_1); $364 \pm 4...354 \pm 3$ (D_3-C_1) и $331 \pm 4...324,7 \pm 2,2$ (C_1) млн лет, отвечающих, очевидно, разным периодам проявления рудно-метасоматических процессов [8]. Re-Os датирование молибденита ранних стадий Ак-Сугского месторождения дает возраст $517,3 \pm 3$ и $517,4 \pm 3$ млн лет, т. е. указывает на

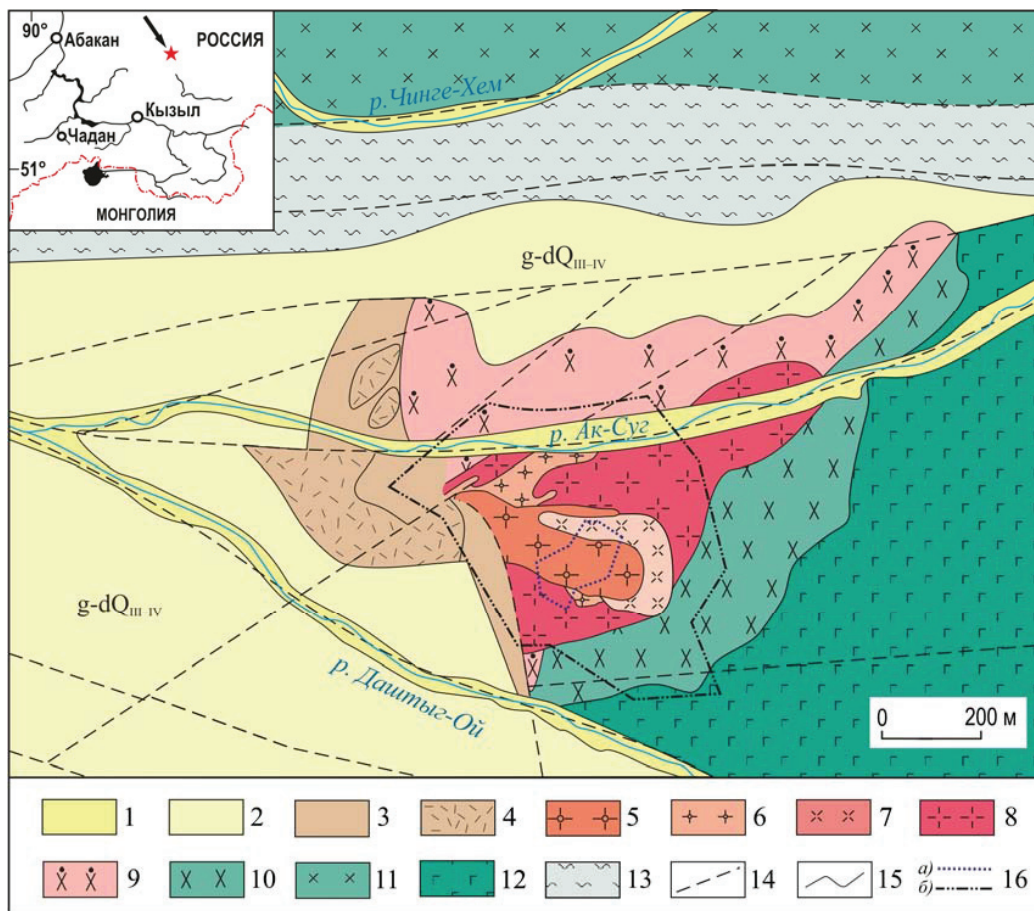


Рис. 1. Схема геологического строения Ак-Сугского месторождения по данным [7] с добавлениями: 1 – аллювиальные отложения (Q_N); 2 – моренные и делювиальные отложения ($g-dQ_{III-IV}$); 3–4 – вулканогенные осадочные образования толтаковской свиты (D_{tl} (?)): 3 – риолит-дацитовые, риолитовые порфиры; 4 – туфопесчаники, конгломераты; 5–10 – Ак-Сугский массив (Ак-Сугский комплекс (E_3-D_{3ak} (?))): 5 – плагиогранит-порфиры; 6 – тоналит-порфиры; 7 – тоналиты порфирированные; 8 – тоналиты, плагиограниты порфирированные; 9 – тоналиты; 10 – габбро, диориты, кварцевые диориты, тоналиты; 11–12 – таннуольский комплекс (E_3tn): 11 – диориты; 12 – габбро; 13 – кислые и основные эффузивы, сланцы хамсаринской свиты (E_3hm); 14 – разрывные нарушения; 15 – границы геологические; 16 – а) контур кварцевого ядра; б) контур месторождения

Fig. 1. Schematic geological structure of the Ak-Sug deposit (after [7], with additions): 1 are the alluvial deposits (Q_N); 2 are the moraine and deluvial deposits ($g-dQ_{III-IV}$); 3–4 are the volcanogenic sedimentary formations of the Toltakov series (D_{tl} (?)): 3 are the rhyolite-dacite, rhyolite porphyry; 4 are the tuff sandstones, conglomerates; 5–10 is the Ak-Sug massif (Ak-Sug complex (E_3-D_{3ak} (?))): 5 are the plagiogranite-porphyry; 6 are the tonalite-porphyry; 7 are the tonalite porphyry; 8 are the tonalite, plagiogranite porphyry; 9 is the tonalite; 10 are the gabbros, diorites, quartz diorites, tonalites, 11–12 is the Tannu-Ola complex (E_3tn): 11 are the diorites; 12 are the gabbros; 13 are the acidic and basic effusives, schists of the Hamsarin series (E_3hm); 14 are the faults; 15 are the geologic boundaries; 16 a) the contour of the quartz core; b) the contour of the Ak-Sug deposit

раннекембрийский возраст оруденения [9]. Видимо, формирование медно-порфирового оруденения Ак-Сугского месторождения происходило длительное время и имеет многоимпульсный характер эндогенных процессов (магматизма и оруденения).

В целом метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется с типовой медно-порфировой зональностью метасоматической колонны, имеющей вид (от центра к периферии): «кварцевое ядро» → кварцевые, серицит-кварцевые (филлитовые) метасоматиты ± калиевые метасоматиты → кварц-серицитовые и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты → аргиллизиты → пропилиты. Калиевые метасоматиты развиты очень слабо. Картина зональности на отдельных участках иногда усложняется наложенной аргиллизацией, а также соседством пропилитов с породами «кварцевого ядра». Аргиллизиты не образуют какой-то определённо очерченной зоны, они встречаются в виде отдельных участков в зонах кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов. Около 80 % запасов руд месторождения сосредоточено в кварц-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах, аргиллизитах и аргиллизирован-

ных породах, образованных, прежде всего, за счёт порфировых пород. Оруденение Ак-Сугского месторождения представлено прожилковыми и прожилково-вкрапленными рудами [7, 10].

На Ак-Сугском месторождении выделено семь стадий гидротермального минералообразования: 1) пирит-кварцевая, 2) молибденит-кварцевая, 3) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая, 4) золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая, 5) золото-пирит-халькопирит-блёкловорудно-кварцевая, 6) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая (развита менее всего) и 7) кварц-кальцитовая. От центра к периферии рудного штокверка наблюдается следующая латеральная минералогическая зональность: пирит-молибденитовая минерализация в кварцевых и кварцево-сланцевых метасоматитах → молибденит-теннантит-халькопиритовая и Au-содержащая медная минерализация с золотом и электроумом в кварц-серицитовых метасоматитах → золото-теллуридно-борнит-халькопиритовая минерализация в кварц-серицитовых, серицит-гидрослюдистых метасоматитах и аргиллизитах → пиритовая в пропилитизированных породах. В центре ме-

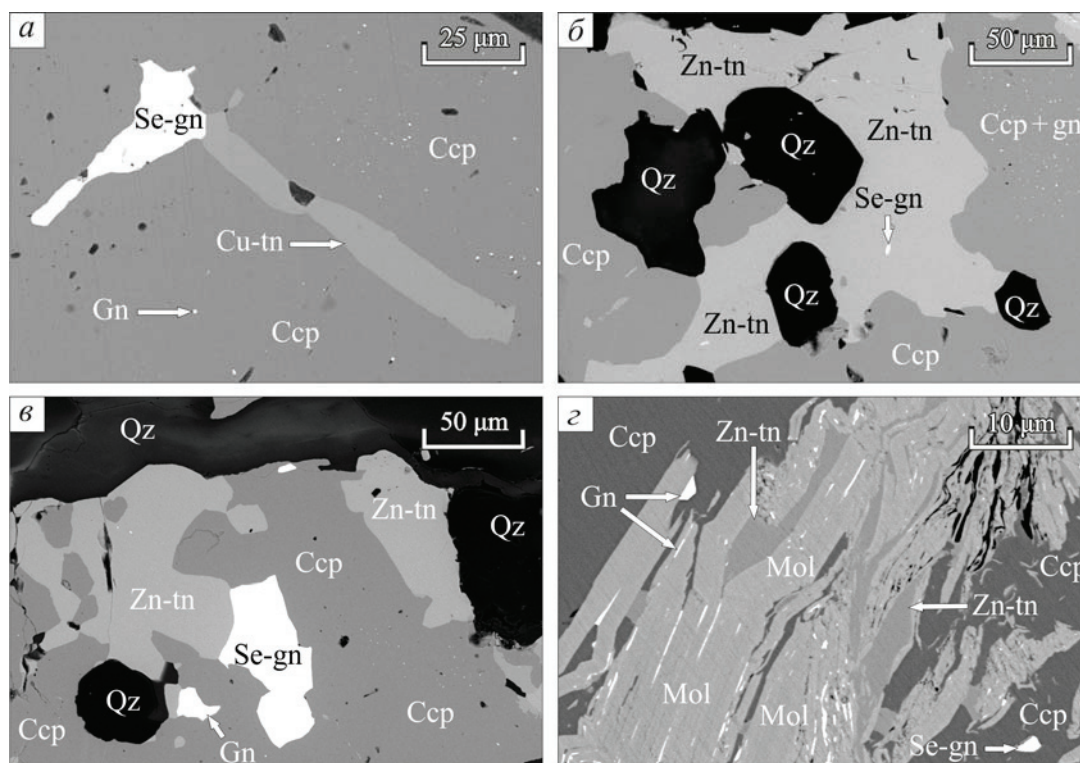


Рис. 2. Взаимоотношения блёклых руд I генерации с другими сульфидными минералами: а) ксеноморфные зёрна галенита (Gn), Se-галенита (Se-gn) и Cu-теннантита (Cu-tn) в халькопирите (Ccp); б) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) с халькопиритом (Ccp) в ассоциации с галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) и кварцем (Qz); в) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) с халькопиритом (Ccp), галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) в ассоциации с кварцем (Qz); г) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) с молибденитом (Mol), галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) в халькопирите (Ccp). Здесь и на рис. 3 – фотографии в отражённых электронах

Fig. 2. Relationship of the I generation fahlores with other sulfide minerals: а) xenomorphic grains of galena (Gn), Se-galena (Se-gn) and Cu-tennantite (Cu-tn) in chalcopyrite (Ccp); б) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) with chalcopyrite (Ccp) in association with galena (Gn), Se-galena (Se-gn) and quartz (Qz); в) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) with chalcopyrite (Ccp), galena (Gn), Se-galena (Se-gn) in association with quartz (Qz); г) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) with molybdenite (Mol), galena (Gn), Se-galena (Se-gn) in chalcopyrite (Ccp). Here and in Fig. 3 – the photos are in reflected electrons

сторождения располагается ясно выраженное кварцевое «ядро» с бедной пирит-молибденитовой минерализацией.

Методы исследования

При детальном минералогическом исследовании руд в качестве критериев для установления последовательности формирования руд авторами использованы различные онтогенетические признаки, включая состав, строение, зональность минералов, индукционные поверхности, минеральные парагенезисы, пресечение жил и прожилков минеральных агрегатов, цементация обломков ранних минералов поздними и т. д. Состав минералов определялся на растровом сканирующем электронном

микроскопе MIRA 3 LMU. Для сравнительного анализа блёклых руд использовано три известных модуля, рассчитываемые по формульным коэффициентам: железистость – $Fe^* = 100Fe / (Fe + Zn)$, сурьмянистость – $Sb^* = 100Sb / (Sb + As + Te + Bi)$ и формальная медистость – $Cu^* = 100(Cu - 10) / (Fe + Zn)$ [1].

Генерации и химический состав блёклых руд

Блёклые руды на месторождении выделялись в галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевую (3 стадия, I генерация), золото-пирит-халькопирит-блёкловорудно-кварцевую (5 стадия, II генерация) и золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевую (6 стадия, III генерация) стадии.

Таблица 1. Химический состав блёклых руд Ак-Сугского месторождения (мас. %)

Table 1. Chemical composition of fahlores of the Ak-Sug deposit (wt. %)

| Образец/Sample | Анализ/Analysis | Cu | Zn | Fe | As | Sb | Te | Bi | S | Сумма/Total | Fe* | Sb* | Cu* |
|-------------------------------|-----------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------------|------|------|--------|
| I генерация /I generation | | | | | | | | | | | | | |
| К-4Г | 1 | 48,52 | 2,13 | 0,61 | 20,40 | 0,20 | | | 28,05 | 99,91 | 0,25 | 0,01 | 204,87 |
| 6-2/2 | 2 | 45,96 | 1,58 | 2,66 | 20,19 | 0,49 | | | 28,16 | 99,04 | 0,66 | 0,01 | 72,35 |
| 8-5/2 | 3 | 47,10 | 2,55 | 1,72 | 19,70 | 0,70 | | | 28,14 | 99,91 | 0,44 | 0,02 | 94,92 |
| 6-2/4 | 4 | 47,50 | 0,80 | 3,90 | 20,30 | 0,50 | | | 27,70 | 100,7 | 0,85 | 0,01 | 83,70 |
| 5Г-6 | 5 | 45,50 | 2,50 | 2,80 | 19,30 | 2,10 | | | 27,60 | 99,80 | 0,57 | 0,06 | 53,23 |
| As-86 | 6 | 44,94 | 3,19 | 2,64 | 18,58 | 2,79 | | | 27,62 | 99,76 | 0,49 | 0,08 | 41,39 |
| 8-5 | 7 | 43,14 | 3,74 | 2,96 | 16,45 | 6,01 | | | 27,68 | 99,98 | 0,48 | 0,18 | 14,85 |
| II генерация /II generation | | | | | | | | | | | | | |
| 6-2 | 8 | 47,44 | 1,30 | 3,04 | 20,12 | 0,29 | | | 27,72 | 99,91 | 0,73 | 0,01 | 96,82 |
| As-к7б | 9 | 45,01 | 4,67 | 1,23 | 19,21 | 1,65 | | | 28,22 | 99,99 | 0,24 | 0,05 | 37,72 |
| As-к7б | 10 | 44,62 | 5,08 | 1,10 | 18,82 | 2,30 | | | 28,06 | 99,98 | 0,20 | 0,07 | 32,39 |
| As-к7а | 11 | 43,09 | 5,29 | 1,37 | 18,65 | 3,24 | | | 28,37 | 100,01 | 0,23 | 0,10 | 7,39 |
| As-42 | 12 | 43,51 | 4,9 | 1,69 | 14,49 | 8,25 | | | 27,12 | 99,96 | 0,29 | 0,25 | 29,08 |
| As-42 | 13 | 43,69 | 4,97 | 1,15 | 14,49 | 8,41 | | | 27,28 | 99,99 | 0,21 | 0,26 | 34,41 |
| As-42 | 14 | 43,11 | 5,20 | 2,10 | 13,78 | 8,45 | | | 27,01 | 99,65 | 0,32 | 0,27 | 22,40 |
| As-42 | 15 | 43,41 | 4,95 | 2,16 | 13,71 | 8,63 | | | 26,68 | 99,54 | 0,34 | 0,28 | 29,41 |
| As-42 | 16 | 43,60 | 4,84 | 1,54 | 14,14 | 8,70 | | | 27,16 | 99,98 | 0,27 | 0,27 | 32,16 |
| As-42 | 17 | 43,54 | 5,05 | 1,38 | 13,96 | 8,75 | | | 26,88 | 99,56 | 0,24 | 0,27 | 34,95 |
| As-42 | 18 | 42,04 | 5,13 | 2,72 | 13,29 | 9,22 | | | 26,98 | 99,38 | 0,38 | 0,30 | 9,56 |
| As-40 | 19 | 43,45 | 4,69 | 2,11 | 13,25 | 9,41 | | | 27,08 | 99,99 | 0,34 | 0,30 | 28,62 |
| As-40 | 20 | 43,60 | 4,85 | 1,39 | 13,80 | 9,52 | | | 27,24 | 100,40 | 0,25 | 0,30 | 32,23 |
| As-40 | 21 | 43,20 | 4,74 | 1,71 | 14,06 | 9,18 | | | 27,09 | 99,98 | 0,30 | 0,29 | 26,95 |
| III генерация /III generation | | | | | | | | | | | | | |
| As-41 | 22 | 42,50 | 4,75 | 2,07 | 14,81 | 8,52 | - | - | 27,74 | 100,39 | 0,34 | 0,26 | 8,86 |
| As-41 | 23 | 42,71 | 4,98 | 1,51 | 13,70 | 8,79 | - | 1,42 | 26,85 | 99,96 | 0,26 | 0,28 | 24,91 |
| As-41 | 24 | 43,49 | 4,98 | 1,12 | 13,84 | 9,28 | - | - | 26,96 | 99,67 | 0,21 | 0,29 | 36,67 |
| As-41 | 25 | 42,47 | 5,15 | 1,26 | 13,48 | 9,49 | - | 1,21 | 26,91 | 99,97 | 0,22 | 0,30 | 22,31 |
| As-41 | 26 | 43,55 | 5,15 | 1,15 | 13,62 | 9,66 | - | - | 26,85 | 99,98 | 0,21 | 0,30 | 36,17 |
| As-41 | 27 | 42,60 | 5,25 | 1,32 | 12,92 | 9,87 | - | 1,05 | 26,95 | 99,96 | 0,23 | 0,31 | 23,46 |
| As-41 | 28 | 42,71 | 5,01 | 1,94 | 13,39 | 9,88 | - | - | 26,73 | 99,66 | 0,31 | 0,31 | 22,33 |
| As-41 | 29 | 42,47 | 5,08 | 1,31 | 13,08 | 9,91 | 0,13 | 1,32 | 26,69 | 99,99 | 0,23 | 0,31 | 24,87 |
| As-41 | 30 | 42,95 | 5,07 | 1,05 | 12,83 | 9,95 | - | 1,47 | 26,65 | 99,97 | 0,20 | 0,31 | 34,60 |
| As-41 | 31 | 41,92 | 5,17 | 1,45 | 13,29 | 10,10 | - | 1,09 | 26,96 | 99,98 | 0,24 | 0,31 | 13,77 |
| As-41 | 32 | 43,23 | 5,08 | 1,14 | 13,11 | 10,23 | - | - | 27,22 | 100,01 | 0,21 | 0,32 | 30,40 |
| As-41 | 33 | 42,90 | 5,41 | 1,02 | 12,75 | 11,22 | - | - | 27,18 | 100,48 | 0,18 | 0,35 | 24,46 |
| As-41 | 34 | 42,17 | 5,50 | 1,66 | 12,18 | 11,34 | - | - | 26,61 | 99,46 | 0,26 | 0,36 | 18,59 |

Примечание. Состав блёклых руд определен на растровом электронном микроскопе MIRA 3 LMU (г. Новосибирск). $Fe^* = Fe / (Fe + Zn)$, $Sb^* = Sb / (As + Bi + Te + Sb)$, $Cu^* = 100 (Cu - 10) / (Fe + Zn)$. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Composition of the fahlores was determined on MIRA 3 LMU scanning electron microscope (Novosibirsk). $Fe^* = Fe / (Fe + Zn)$, $Sb^* = Sb / (As + Bi + Te + Sb)$, $Cu^* = 100 (Cu - 10) / (Fe + Zn)$. Dash – below detection limit.

Выделения до 200 мкм блёклых руд I генерации образуют включения и прожилки в кварце и халькопирите в ассоциации с молибденитом, халькопиритом, галенитом, Se-галенитом (Se до 1 мас. %), пиритом, сфалеритом (Fe до 0,24 мас. %). Иногда наблюдаются прожилковидные выделения молибденита, галенита, Se-галенита с Zn-теннантитом в халькопирите (рис. 2).

По химическому составу блёклые руды I генерации относятся к Cu-теннантиту, Fe-теннантиту и Zn-теннантиту. Cu-теннантит характеризуется высокими значениями медистости (Cu^* от 72,35 до 204,87), железистости (Fe^* от 0,25 до 0,66) и низкими значе-

ниями сурьмянистости (Sb^* от 0,01 до 0,02). В Fe-теннантите значения Cu^* варьирует от 53,23 до 83,70, Fe^* – 0,57–0,85, Sb^* – 0,01–0,06. В Zn-теннантите значения Cu^* варьирует от 14,85 до 41,39, Sb^* – 0,08–0,18, в то время как значение Fe^* не меняется (0,48–0,49) (табл. 1, 2). Блёклые руды данной генерации характеризуются слабой зональностью, обусловленной увеличением содержания Sb к внешним зонам. По химическому составу прослеживается их эволюция от высокомедистого теннантита до Zn-теннантита через Fe-теннантит. Величина Sb^* в блёклых рудах I генерации варьирует от 0,01 до 0,18, Cu^* – 14,85–204,87, Fe^* – 0,25–0,85.

Таблица 2. Кристаллохимические формулы блёклых руд Ак-Сугского месторождения

Table 2. Crystallochemical formulas of fahlores of the Ak-Sug deposit

| Образец/Sample | Анализ/Analysis | Формула/Formula | Минерал/Mineral |
|--------------------------------------|-----------------|--|---|
| <i>I генерация /I generation</i> | | | |
| К-4Г | 1 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,48}Fe_{0,16}Cu_{1,32})_{1,96}(As_{4,04}Sb_{0,03})_{4,07}S_{12,97}$ | Cu-теннантит Cu-tennantite |
| 6-2/2 | 2 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,36}Fe_{0,71}Cu_{0,78})_{1,85}(As_{4,01}Sb_{0,06})_{4,07}S_{13,08}$ | |
| 8-5/2 | 3 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,58}Fe_{0,45}Cu_{0,98})_{2,01}(As_{3,90}Sb_{0,09})_{3,99}S_{13,00}$ | |
| 6-2/4 | 4 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,18}Fe_{1,03}Cu_{1,01})_{2,22}(As_{3,99}Sb_{0,06})_{4,05}S_{12,73}$ | Fe-теннантит Fe-tennantite |
| 5Г-6 | 5 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,57}Fe_{0,75}Cu_{0,70})_{2,16}(As_{3,85}Sb_{0,26})_{4,11}S_{12,88}$ | Zn-теннантит Zn-tennantite |
| As-86 | 6 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,73}Fe_{0,71}Cu_{0,60})_{2,04}(As_{3,71}Sb_{0,34})_{4,05}S_{12,91}$ | |
| 8-5 | 7 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,86}Fe_{0,80}Cu_{0,25})_{1,91}(As_{3,31}Sb_{0,76})_{4,07}S_{13,03}$ | |
| <i>II генерация /II generation</i> | | | |
| 6-2 | 8 | $Cu_{10,00}(Zn_{0,29}Fe_{0,81}Cu_{1,06})_{2,16}(As_{3,98}Sb_{0,04})_{4,02}S_{12,82}$ | Cu-теннантит Cu-tennantite |
| As-к76 | 9 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,06}Fe_{0,33}Cu_{0,52})_{1,91}(As_{3,81}Sb_{0,20})_{4,01}S_{13,08}$ | Zn-теннантит Zn-tennantite |
| As-к76 | 10 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,16}Fe_{0,29}Cu_{0,47})_{1,92}(As_{3,75}Sb_{0,28})_{4,03}S_{13,05}$ | |
| As-к7а | 11 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,37}Cu_{0,12})_{1,70}(As_{3,71}Sb_{0,40})_{4,11}S_{13,19}$ | Zn-теннантит-тетраэдрит Zn-tennantite-tetrahedrite |
| As-42 | 12 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,14}Fe_{0,46}Cu_{0,47})_{2,07}(As_{2,96}Sb_{1,04})_{4,00}S_{12,93}$ | |
| As-42 | 13 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,16}Fe_{0,31}Cu_{0,51})_{1,98}(As_{2,96}Sb_{1,06})_{4,02}S_{13,00}$ | |
| As-42 | 14 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,22}Fe_{0,58}Cu_{0,40})_{2,20}(As_{2,82}Sb_{1,06})_{3,88}S_{12,92}$ | |
| As-42 | 15 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,17}Fe_{0,60}Cu_{0,51})_{2,28}(As_{2,82}Sb_{1,09})_{3,91}S_{12,81}$ | |
| As-42 | 16 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,14}Fe_{0,42}Cu_{0,50})_{2,06}(As_{2,89}Sb_{1,10})_{3,95}S_{12,96}$ | |
| As-42 | 17 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,18}Fe_{0,38}Cu_{0,55})_{2,11}(As_{2,87}Sb_{1,11})_{3,98}S_{12,90}$ | |
| As-42 | 18 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,74}Cu_{0,19})_{2,14}(As_{2,73}Sb_{1,17})_{3,90}S_{12,96}$ | |
| As-40 | 19 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,10}Fe_{0,58}Cu_{0,48})_{2,16}(As_{2,71}Sb_{1,18})_{3,89}S_{12,95}$ | |
| As-40 | 20 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,13}Fe_{0,38}Cu_{0,49})_{2,00}(As_{2,82}Sb_{1,19})_{4,01}S_{12,99}$ | |
| As-40 | 21 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,13}Fe_{0,38}Cu_{0,49})_{2,00}(As_{2,82}Sb_{1,19})_{4,01}S_{12,99}$ | |
| <i>III генерация /III generation</i> | | | |
| As-41 | 22 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,10}Fe_{0,56}Cu_{0,15})_{1,81}(As_{3,00}Sb_{1,06})_{4,06}S_{13,12}$ | Zn-теннантит-тетраэдрит Zn-tennantite-tetrahedrite |
| As-41 | 23 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,18}Fe_{0,42}Cu_{0,40})_{2,00}(As_{2,83}Sb_{1,12}Bi_{0,11})_{4,05}S_{12,95}$ | |
| As-41 | 24 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,17}Fe_{0,31}Cu_{0,54})_{2,02}(As_{2,85}Sb_{1,18})_{4,03}S_{12,95}$ | |
| As-41 | 25 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,22}Fe_{0,35}Cu_{0,35})_{1,92}(As_{2,78}Sb_{1,21}Bi_{0,09})_{4,08}S_{13,00}$ | |
| As-41 | 26 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,32}Cu_{0,55})_{2,08}(As_{2,80}Sb_{1,22})_{4,02}S_{12,90}$ | |
| As-41 | 27 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,24}Fe_{0,37}Cu_{0,38})_{1,99}(As_{2,67}Sb_{1,25}Bi_{0,08})_{4,00}S_{13,01}$ | |
| As-41 | 28 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,18}Fe_{0,54}Cu_{0,38})_{2,10}(As_{2,76}Sb_{1,25})_{4,01}S_{12,89}$ | |
| As-41 | 29 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,36}Cu_{0,39})_{1,96}(As_{2,71}Sb_{1,27}Bi_{0,10}Te_{0,02})_{4,10}S_{12,94}$ | |
| As-41 | 30 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,29}Cu_{0,52})_{2,02}(As_{2,66}Sb_{1,27}Bi_{0,11})_{4,04}S_{12,94}$ | |
| As-41 | 31 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,23}Fe_{0,40}Cu_{0,22})_{1,85}(As_{2,75}Sb_{1,29}Bi_{0,08})_{4,12}S_{13,03}$ | |
| As-41 | 32 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,20}Fe_{0,31}Cu_{0,46})_{1,97}(As_{2,69}Sb_{1,29})_{3,98}S_{13,05}$ | |
| As-41 | 33 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,27}Fe_{0,28}Cu_{0,38})_{1,93}(As_{2,62}Sb_{1,42})_{4,04}S_{13,03}$ | |
| As-41 | 34 | $Cu_{10,00}(Zn_{1,31}Fe_{0,46}Cu_{0,33})_{2,10}(As_{2,53}Sb_{1,45})_{3,98}S_{12,92}$ | |

Примечание. Формулы блёклых руд рассчитаны на 29 формульных коэффициента, с использованием данных из табл. 1.

Note. Formulas of fahlores are designed for 29 formula coefficients, using the data from Table 1.

Блёклые руды II генерации пользуются наибольшим распространением. Они слагают выделения разнообразной формы, их минеральные выделения с халькопиритом и пиритом в кварцевых жилах образуют скопления до 2 см. Довольно часто в блёклых рудах данной генерации отмечаются включения касситерита, борнита, галенита, Se-галенита (Se до 6,96 мас. %), S-клаусталита (S до 5,09 мас. %), золота (Au – 70,78–95,86, Ag – 4,08–29,22) и электрума (Au – 63,37–66,84, Ag – 33,14–35,92), реже отмечаются включения науманнита и сфалерита (рис. 3 а, б).

По химическому составу блёклые руды II генерации относятся к Cu-теннантиту, Zn-теннантиту и Zn-теннантит-тетраэдриту. Более ранний Cu-теннантит тоже характеризуется высокими значениями Cu* (96,82), Fe* (0,73) и низкими значениями Sb* (0,01). В Zn-теннантите значения Cu* варьирует от 7,39 до 37,72, Fe* – 0,20–0,24, Sb* – 0,05–0,10. Zn-теннантит-тетраэдрит характеризуется высокими значениями Sb* – от 0,25 до 0,30, Fe* – 0,21–0,38, Cu* – 9,56–34,95. Соответственно, блёклые руды II генерации характеризуются вариациями Sb* от 0,01 до 0,30, Cu* – 7,39–96,82, Fe* – 0,20–0,73, и по химическому составу эволюционируют от высокомедистого теннантита до Zn-теннантит-тетраэдрита.

Редкие выделения (20–50 мкм) блёклых руд III генерации развиты в составе золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой стадии в ассоциации с халькопиритом, борнитом, энаргитом, Se-галенитом (Se от 0,86 до 13,61 мас. %, Ag до 1,74 мас. %), клаусталитом, S-клаусталитом (S от 0,20 до 5,73 мас. %, Ag до 0,72 мас. %), гесситом, алтаитом, баритом, целестобаритом (SrO до 7 мас. %), S-кавацулитом, тетрадимитом, Se-тетрадимитом (Se до 2,82 мас. %) и виттихенитом (рис. 3 в, г).

В составе золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой стадии, кроме выше перечисленных минералов, отмечаются следующие минералы: золото (Au 78,11–92,64, Ag 7,15–22,48), меренскийит PdTe₂, арсенопалладинит Pd₃As₃, сопчеит Ag₄Pd₃Te₄, петцит, калаверит, креннерит, сильванит, эмпресит, науманнит и S-науманнит (S до 2,17 мас. %).

По химическому составу блёклые руды III генерации представлены Zn-теннантит-тетраэдритом с примесью Bi до 1,47 мас. %, Te – 0,13 мас. % при Cu* 8,86–36,67, Sb* – 0,26–0,36, Fe* – 0,18–0,34 (табл. 1, 2).

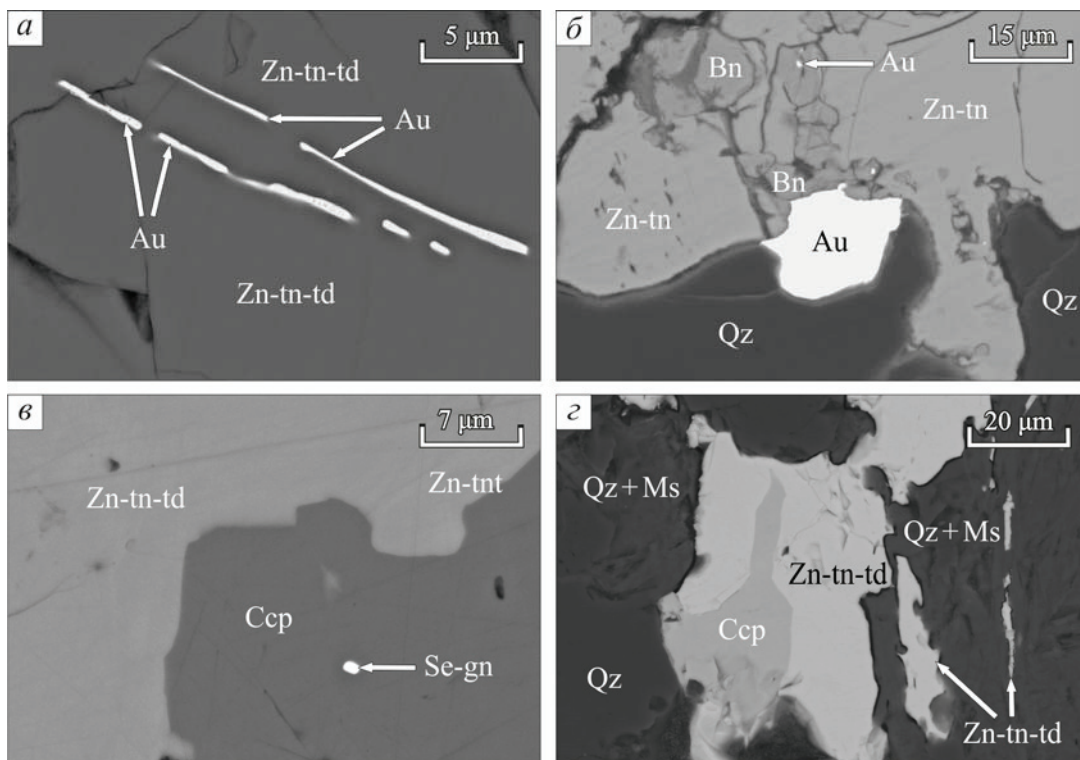


Рис. 3. Взаимоотношения блёклых руд I и II генерации с другими сульфидными минералами: а) Zn-теннантит-тетраэдрит (Zn-tn-td) II генерации с включениями золота (Au); б) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) II генерации с борнитом (Bn), золотом (Au) и кварцем (Qz); в) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) III генерации с халькопиритом (Ccp) в ассоциации с Se-галенитом (Se-gn); г) срастание Zn-теннантит-тетраэдрита (Zn-tn-nd) III генерации с халькопиритом (Ccp), кварцем (Qz) и серицитом (Ms)

Fig. 3. Relationship between fahlores of the I and II generation with other sulfide minerals: а) Zn-tennantite-tetrahedrite (Zn-tn-td) II generation with inclusions of gold (Au); б) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) II generation with bornite (Bn), gold (Au) and quartz (Qz); в) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) III generation with chalcopyrite (Ccp) in association with Se-galena (Se-gn); г) fusion of Zn-tennantite-tetrahedrite (Zn-tn-nd) III generation with chalcopyrite (Ccp), quartz (Qz) and muscovite (Ms)

Обсуждение результатов

Для всех генераций блёклых руд Ак-Сугского месторождения характерна либо скрытая плавная зональность, либо отсутствие зональности, что указывает на плутоногенный тип оруденения. По данным [1, 3, 11], в плутоногенных месторождениях кристаллы блёклых руд ряда теннантит–тетраэдрит не обладают резко выраженной зональностью, поскольку формируются в упорядоченных условиях при постепенном снижении температуры. В то же время для кристаллов блёклых руд вулканогенных и вулканогенно-плутоногенных месторождений характерна резко выраженная зональность, часто осцилляционная. Зональность блёклых руд вулканогенно-плутоногенных месторождений обусловлена вариациями содержаний As–Sb и Zn–Fe, вулканогенных месторождений – As–Sb–Te–Bi, S–Se, Cu–Ag, Zn–Fe–Cu–Hg–Cd.

В блёклых рудах Ак-Сугского месторождения наблюдается эволюция от теннантита к теннантит–тетраэдриту (рис. 4), что отвечает стандартному тренду снижения температуры кристаллизации минералов группы блёклых руд [3].

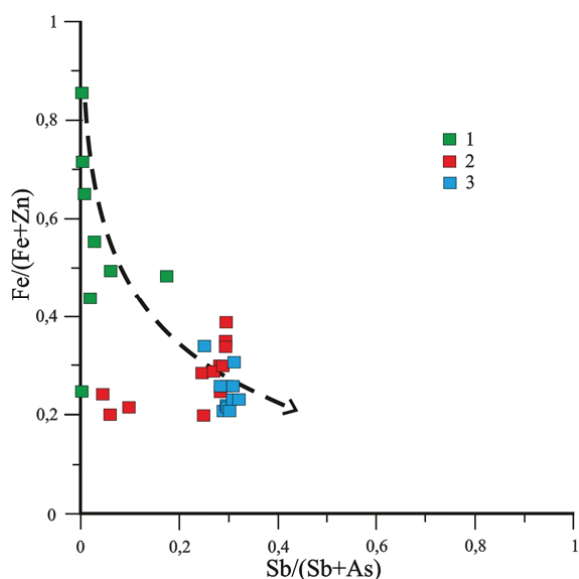


Рис. 4. Соотношение $Sb/(Sb+As)$ и $Fe/(Fe+Zn)$ в блёклых рудах Ак-Сугского месторождения. 1–3 – точки составов блёклых руд: 1 – I генерации; 2 – II генерации; 3 – III генерации. Стрелкой показана эволюция состава блёклых руд

Fig. 4. Ratio of $Sb/(Sb+As)$ and $Fe/(Fe+Zn)$ in the fahlores of the Ak-Sug deposit. 1–3 – points of compositions of faded ores: 1 – I generation; 2 – II generation; 3 – III generation. The arrow shows the evolution of the composition of fahlores

Экспериментально установлено, что с понижением температуры возрастает сурьмянистость блёклых руд, ассоциирующих с энаргитом [12]. Эти данные согласуются с данными [13] об эволюции состава блёклых руд медно-порфировых месторождений от высокоцинкистого теннантита до высокоцинкистого тетраэдрита.

Отсутствие крайнего члена минералов ряда теннантит–тетраэдрит, т. е. тетраэдрита, обусловлено, видимо, эрозионным срезом месторождения (эрозией вскрыта средняя часть рудно-магматической системы), т. к. по данным Е.В. Нагорной [14] на сильно эродированных медно-порфировых объектах развит высокожелезистый теннантит, на среднеэродированных – как высокожелезистые, так и высокоцинкистые члены ряда теннантит–тетраэдрит.

Отсутствие примеси Ag и серебристых блёклых руд на Ак-Сугском месторождении, видимо, тоже обусловлено эрозионным срезом, т. к. по данным [15] более высокие содержания серебра и сурьмы в блёклых рудах наблюдаются на периферии порфирово-эпитермальной системы (на глубинах менее 1,5 км формируется Au–Ag эпитермальная минерализация, а на глубинах 2 и более км – Mo–Cu-порфировая), где разные уровни порфирово-эпитермальной системы обусловлены тектоническими подвижками и разным уровнем эрозии [16].

Наличие магнетита и вольфрамита в первой рудной пирит-кварцевой стадии свидетельствует о том, что минералообразование данной стадии происходило в условиях окисленности флюидов, при высокой фугитивности (f) кислорода. Минералогические особенности стадии предполагают $lgf(O_2)=10^{-7}-10^{-6}$ (при $T=330^\circ C$), и $lgf(S_2)=10^{-32}-10^{-29}$ (при $T=200^\circ C$) [17–19]. Замещение магнетита гематитом (мартитизация) и образование магнетита по пластинчатым выделениям гематита (мушкетовитизация) свидетельствуют об изменениях $f(O_2)$ при формировании руд.

Минералогические особенности второй и третьей стадий предполагают $lgf(S_2)=10^{-7}-10^{-12}$ (при $300^\circ C$). Наличие позднего Se-галенита (Se до 1 мас. %) в третьей стадии предполагает повышенные $f(Se_2)$ в конце данной стадии [17, 18]. Эволюция блёклых руд третьей стадии (I генерации) от высокомедистого теннантита до Zn-теннантита через Fe-теннантит с высокими значениями Cu^* от 53,23 до 83,70 указывает на относительно высокий окислительный потенциал рудоносного флюида и на изменение окислительно-восстановительных условий, т. к. при высокой $f(O_2)$ возникают цинкистые и высокомедистые блёклые руды [11]. По данным [20], увеличение содержаний железа в блёклой руде в некоторых случаях может быть обусловлено не столько повышенным содержанием этого элемента в гидротермальном растворе, сколько снижением температуры и активности серы рудообразующего флюида.

Решётчатая структура распада халькопирита в борните четвёртой стадии, согласно экспериментальным данным, формируется при охлаждении твёрдого раствора ниже $250^\circ C$ [22]. Минеральные ассоциации пятой стадии отлагались при $logf(S_2)=10^{-7}-10^{-12}$ (при $300^\circ C$).

По электрум-сфалеритовому геотермометру [21] температуры формирования минеральных ассоциаций пятой стадии составили: $367-194^\circ C$. Ми-

нералогические особенности данной стадии предполагают $lgf(S_2)=10^{-25}-10^{-10}$, $lgf(Se_2)=10^{-20}-10^{-9}$ (при $T=300\text{ }^\circ\text{C}$) и высокую fO_2 [17, 18], т. к. из блёклых руд отмечаются Cu-теннантит, Zn-теннантит и Zn-теннантит-тетраэдрит.

Температурный интервал формирования золото-теллуридной минерализации шестой стадии, судя по диаграмме стабильности Au–Ag–Te минералов ассоциации петцит-гессит-золото, соответствует $253-181\text{ }^\circ\text{C}$ при значении $lgf(Te_2)=10^{-16}-10^{-13}$ [23]. Минералогические особенности стадии предполагают $lgf(S_2)=10^{-19}-10^{-8}$, $lgf(Se_2)=10^{-17}-10^{-15}$ и $lgf(Te_2)=10^{-18}-10^{-8}$ (при $T=250\text{ }^\circ\text{C}$) [17, 18]. Постепенное увеличение цинкистости блёклых руд III генерации свидетельствуют о повышении fO_2 , а наличие поздних селенидов (клаусталита, науманнита) подтверждает это предположение, т. к. последние отлагаются из растворов с высоким потенциалом $f(O_2)$ [24].

Наличие обильных выделений ангидрита, барита и целестобарита на поздней кварц-кальцитовой стадии свидетельствует о том, что минеральные ассоциации данной стадии образовывались в относительно окисленных условиях.

Таким образом, данные минералогических исследований показывают, что для Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирового месторождения характерен окисленный состав рудообразующих флюидов, а главными факторами рудоотложения являются изменение окислительно-восстановительного характера и снижение температуры рудоносного флюида, т. е. понижение окислительного потенциала способствовало отложению сульфидов, а падение температуры более концентрированных ранних растворов приводило к уменьшению растворимости Au и его осаждению в самородной форме.

Отметим, что для большинства Mo-Cu-порфировых систем характерен окисленный состав раннего рудообразующего флюида. По данным [25–27], золото-молибден-медно-порфировые месторождения существенно отличаются по значениям окислительно-восстановительного потенциа-

ла, отвечающего сульфат-сульфидному равновесию, об этом свидетельствует присутствие сульфата (гипса) и сульфидов (халькопирит), а также гематита в качестве твёрдых фаз в кристаллофлюидных включениях.

Заключение

По химическому составу блёклые руды Ак-Сугского месторождения относятся к промежуточным членам ряда теннантит–тетраэдрит, которые представлены тремя генерациями. Для блёклых руд Ак-Сугского месторождения характерна скрытая плавная зональность, обусловленная незначительным увеличением содержания Sb к внешним зонам, и их эволюция от теннантита к теннантит-тетраэдриту, что типично для плутоногенных месторождений. Наблюдаются следующие тренды блёклых руд, в т. ч. I генерации: Cu-теннантит → Fe-теннантит → Zn-теннантит; II генерации: Cu-теннантит → Zn-теннантит → Zn-теннантит-тетраэдрит; III генерация блёклых руд представлена Zn-теннантит-тетраэдритом. Соответственно, в блёклых рудах отмечается постепенное накопление сурьмы от ранних генераций к поздним. Эволюция состава блёклых руд предполагает, что на Ак-Сугском месторождении современным эрозионным срезом вскрыта средняя часть рудно-магматической системы. Расположенное в центре ясно выраженное кварцевое «ядро» с бедной пирит-молибденитовой минерализацией тоже подтверждает данное утверждение.

Наличие высокомедистого теннантита, Zn-теннантита и Zn-теннантит-тетраэдрита и другие минералогические особенности руд Ак-Сугского месторождения свидетельствуют об относительно повышенном окислительном потенциале рудообразующих гидротермальных флюидов и о том, что главными факторами рудоотложения являются изменение окислительно-восстановительного характера, вариации fS_2 , fSe_2 , fTe_2 и снижение температуры рудоносного флюида.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-45-04195-р_сибирь_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Э.М. Типоморфные особенности блёклых руд некоторых плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота // Геология рудных месторождений. – 1987. – Т. 29. – № 6. – С. 83–91.
2. Кемкина Р.А. Блёклые руды Прасоловского вулканогенного Au-Ag месторождения (о. Кунашир, Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – № 2. – С. 30–44.
3. Филимонов С.В. Минералы группы блёклых руд – индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2009. – 45 с.
4. Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвящённой 80-летию Кольского НЦ РАН. – Апатиты, 26–29 сентября 2010. – Апатиты: Изд-во K&M, 2010. – С. 143–171.
5. Лебедев Н.И. Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых / отв. ред. д-р геол.-минерал. наук В.И. Лебедев. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2012. – 284 с.
6. Рязанова Е.И. Новейшее открытие Дальнего Востока России – золото-меднопорфировое месторождение Малмыж // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по Материалам VIII науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых учёных с международным участием): в 2 т. / отв. ред. П.А. Белкин. – Пермь, 2015. – Т. 1. – С. 52–55.
7. Забелин В.И. Элементы геолого-генетической модели Аксугского медно-молибденового месторождения // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 92–103.
8. Аксугское Cu-Mo-порфировое месторождение в Северо-Восточной Туве: Ag/Ag геохронология, источники вещества / В.И. Сотников, В.А. Пономарчук, Д.О. Шевченко, А.Н. Берзина // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 11. – С. 1119–1132.

9. 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 // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112. – P. 1021–1028.
10. Особенности состава самородного золота в рудных ассоциациях Ак-Сугского золото-медно-молибден-порфирирового месторождения, Восточная Тува / Р.В. Кужугет, А.К. Хертек, В.И. Лебедев, В.И. Забелин // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2015. – № 2 (22). – С. 45–52.
11. Minerals of Fahlore group: Indicators of Ore Genesis / E. Spiridonov, M. Maleev, V. Kovachev, I. Kulikova, G. Nazmova, S. Filimonov // *Bulgarian Geological Society, 80-th Anniversary: Proc. of the Jubilee International Conference*. Bulgarian Geological Society. – Sofia, 2005. – P. 79–82.
12. Feiss P.G. Reconnaissance of the tetrahedrite-tennantite enargite-famatinite phase relations as a possible geothermometer // *Economic Geology*. – 1974. – V. 69. – № 3. – P. 383–390.
13. Araya R.A., Bowles J.F., Simpson P.R. Relationships between composition and reflectance in the tennantite-tetrahedrite series of El Teniente ore deposit, Chile // *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*. – 1977. – № 10. – P. 467–482.
14. Нагорная Е.В. Эволюция химического состава блеклых руд медно-молибден-порфирировых месторождений Находкинского рудного поля // *Разведка и охрана недр*. – 2011. – № 8. – С. 11–16.
15. Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. Состав блеклых руд как элемент зональности порфирово-эпitherмальной системы (на примере рудопроявления Биксизак, Ю. Урал) // *Геология рудных месторождений*. – 2015. – Т. 57. – № 1. – С. 48–70.
16. Березняковское золоторудное месторождение (Южный Урал, Россия) / А.И. Грабежев, В.Н. Сазонов, В.В. Мурзин, В.П. Молошаг, В.И. Сотников, Н.С. Кузнецов, Б.А. Пужаков, Б.Г. Покровский // *Геология рудных месторождений*. – 2000. – Т. 42. – № 1. – С. 38–52.
17. Barton P.V., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits / Ed. by H.L. Barnes*. – New York: John Wiley and Sons, 1979. – P. 278–403.
18. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*. – 1988. – V. 83. – P. 377–394; P. 395–404.
19. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments / M.T. Einaudi, J.W. Hedenquist, E.E. Inan // *Society of Economic Geologists Special Publication* 10. – 2003. – P. 285–313.
20. Бортников Н.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. Минералогический показатель условий гидротермального рудообразования // *Эндогенные рудные районы и месторождения*. – М.: Наука, 1987. – С. 40–59.
21. Shikazono N.A. Comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyriteargentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au–Ag vein type deposits in Japan // *Economic Geology*. – 1985. – V. 80. – № 5. – P. 1415–1424.
22. Durazzo A., Taylor L.A. Exsolution in the Mss-pentlandite system: textural and genetic implications for Ni-sulfide ores // *Mineralium Deposita*. – 1982. – V. 17. – P. 313–332.
23. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) / Н.С. Бортников, Х. Крамер, А.Д. Генкин и др. // *Геология рудных месторождений*. – 1988. – № 2. – С. 49–61.
24. 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. – V. 92. – P. 468–484.
25. Состав и металлоносность магматогенных флюидов базитовых и гранитоидных мантийно-коровых рудно-магматических систем, продуцирующих Co-Ni-Pt, Cu-Mo-порфирировые, Sn-W и Mo-W оруденение / А.А. Борисенко, А.А. Боровиков, Л.М. Житова, Г.А. Павлова, И.В. Гасков // *Модельный анализ развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – С. 154–174.
26. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran / A. Zarasvandi, M. Rezaei, J. Raith, D. Lentz, A.M. Azimzadeh, H. Pourkaseb // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – V. 111. – P. 175–191.
27. Nature and evolution of the ore-forming fluids in the giant Dexing porphyry Cu–Mo–Au deposit, Southeastern China / X. Liu, H.R. Fan, F.F. Hu, K.F. Yang, B.J. Wen // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – V. 171. – P. 83–95.

Поступила 22.10.2017 г.

Информация об авторах

Кужугет Р.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Монгуш А.А., кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научным вопросам Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Монгуш А.-Д.О., соискатель ученой степени кандидата наук лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

UDC 553.43: 553.41: 549.355 (571.52)

EVOLUTION OF CHEMICAL COMPOSITION OF FAHLORES OF THE AK-SUG GOLD-MOLYBDENUM-COPPER-PORPHYRY DEPOSIT (NORTH-EAST TUVA)

Renat V. Kuzhuget¹,
rkuzhuget@mail.ru

Andrey A. Mongush¹,
amongush@inbox.ru

Ai-Demir O. Mongush¹,
aidemirm@rambler.ru

¹ Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS,
117 a, Internatsionalnaya street, Kyzyl, 667007, Russia.

The study of fahlores is one of the most effective areas of mineralogical research that allows deciphering the conditions for formation of ore deposits, which in its turn is the scientific basis for their search, exploration and rational mining.

The main aim of the study was to reveal mineralogical-geochemical features and evolution of the composition of fahlores, as well as features of the ore-forming hydrothermal fluids that formed the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit.

Research methods: field studies, detailed mineralogical studies with ore mineralization in polished sections (polished sections) with Olympus polishing microscope and electron microscope MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) combined with Xray microanalysis systems INCA Energy 450+Xmax-80 and INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd).

Results. We revealed variations in composition of the fahlores group minerals of the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit, which are represented by the minerals of the tennantite-tetrahedrite series. The latter are developed as part of three mineral associations corresponding to three generations. For the fahlores, a latent smooth zoning is characteristic, due to an increase in the Sb content to the outer zones. Evolution of compositions of the I generation fahlores: Cu-tennantite → Fe-tennantite → Zn-tennantite, II generation: Cu-tennantite → Zn-tennantite → Zn-tennantite-tetrahedrite. Fahlores of the III generation is represented by Zn-tennantite-tetrahedrite. The presence of high-copper tennantite, Zn-tennantite, Zn-tennantite-tetrahedrite, and mineralogical features of the Ak-Sug ore deposits indicate a relatively increased oxidation potential of ore-forming hydrothermal fluids. The main factors of ore deposition were a change in the oxidation-reduction character, variations of fS_2 , fSe_2 , fTe_2 and temperature decrease of ore-bearing fluid.

Key words:

Fahlores, tennantite, tennantite-tetrahedrite, Au-Mo-Cu-porphyry deposit, Tuva.

This work was supported by the grant no. 15-45-04195-p_cубурь_a from the Russian Foundation for Basic Research.

REFERENCES

- Spiridonov E.M. Typomorphic peculiarities of fahlores of some plutogenic, volcanogenic, and telethermal deposits of gold. *Geology of Ore Deposits*, 1987, no. 6, pp. 83–91. In Rus.
- Kemkina R.A. Fahlores of the Prasolovka volcanogenic Au-Ag deposit (Kunashir Island, Russian Far East). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2007, vol. 26, no. 2, pp. 30–44. In Rus.
- Filimonov S. V. *Mineraly gruppy blyoklykh rud – indikatory rudogeneza (na primere gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota)*. Avtoreferat Kand. nauk [Minerals of Fahlore group as Indicators of Ore Genesis (by the Example of Hydrothermal Gold Deposits). Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2009. 45 p.
- Spiridonov E.M. Obzor mineralogii zolota v vedushchikh tipakh Au mineralizatsii [Review of gold mineralogy in major types of Au mineralization]. *Zoloto Kolskogo poluostrova i sopredelnykh regionov. Trudy Vserossiiskoy (s mezhnatsionnym uchastiem) nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu Kolskogo NC RAN* [Gold of the Kola Peninsula and Adjacent Regions. Proceedings of the Russian (with Non-Russian Participants) Conference Dedicated to the 80th Anniversary of the Kola Scientific Center (Russian Academy of Sciences)]. Apatity, K&M Publ. pp. 143–171.
- Lebedev N.I. Mineralnye resursy Tuvy: obzor i analiz poleznykh iskopaemykh [Mineral resources of Tuva: overview and analysis of mineral resources]. Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN Publ., 2012. 284 p.
- Ryazanova E.I. Noveyshee otkrytie Dalnego Vostoka Rossii – zoloto-mednoporfirovoe mestorozhdenie Malmyzh [Newest discovery of far East Russia – Malmyzh porphyry copper-gold deposit]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire: sb. nauch. tr. (po Materialam VIII nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhnatsionnym uchastiem)* [Geology in the Developing World: Collection of the Scientifics Proc. (on the materials of the VIII scientific-practical conference of students, aspirants and young scientists with international participation)]. Perm, PGU Publ., 2015. Vol. 1, pp. 52–55.
- Zabelin V.I. Elementy geologo-geneticheskoy modeli Aksugskogo medno-molibdenovogo mestorozhdeniya [Elements of the geological-genetic model of the Aksug copper-molybdenum deposit]. *Magmatizm i metallogeniya rudnykh rayonov Tuvy* [Magmatism and metallogeny of the ore regions of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. pp. 92–103.
- Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Shevchenko D.O., Berzina A.N. The Aksug porphyry Cu-Mo deposit in Northeastern Tuva: 40Ar/39Ar geochronology and resources of matter. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 11, pp. 1119–1132. In Rus.
- Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. Paragenesis and Re-Os Molybdenite Age of the Cambrian Ak-Sug Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Tyva Republic, Russian Federation. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, pp. 1021–1028.
- Kuzhuget R.V., Khertek A.K., Lebedev V.I., Zabelin V.I. Composition of native gold in ore associations of the Ak-Sug gold-cop-

- per-molybdenum porphyry deposit, Eastern Tuva. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2015, no. 2 (22), pp. 45–52. In Rus.
11. Spiridonov E., Maleev M., Kovachev V., Kulikova I., Nazmova G., Filimonov S. Minerals of Fahlore group: Indicators of Ore Genesis. Bulgarian Geological Society, 80-th Anniversary. *Proc. of the Jubilee International Conference*. Sofia, Bulgarian Geological Society Publ., 2005. pp. 79–82.
 12. Feiss P.G. Reconnaissance of the tetrahedrite-tennantite enargite-famatinite phase relations as a possible geothermometer. *Economic Geology*, 1974, vol. 69, no. 3, pp. 383–390.
 13. Araya R.A., Bowles J.F., Simpson P.R. Relationships between composition and reflectance in the tennantite-tetrahedrite series of El Teniente ore deposit. Chile. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1977, no. 10, pp. 467–482.
 14. Nagornaya E.V. Evolution of the chemical composition of the tennantite-tetrahedrite group minerals from porphyry copper-molybdenum deposits, Nakhodka ore field. *Prospect and protection of mineral resources*, 2011, no. 8, pp. 11–16. In Rus.
 15. Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Zeltmann R. Fahlores Compositional Zoning in a Porphyry–Epithermal System: Bikisizak Occurrence, South Urals, Russia as an example. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 1, pp. 48–70. In Rus.
 16. Grabezhev A.I., Sazonov V.N., Murzin V.V., Molo?ag V.P., Sotnikov V.I., Kuznetsov N.S., Puzhak B.A., Pokrosovsky B.G. The Bereznjakovsk Gold Deposit (South Urals, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 2000, vol. 42, no. 1, pp. 38–52. In Rus.
 17. Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Ed. by H.L. Barnes. New York, John Wiley and Sons, 1979. pp. 278–403.
 18. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, pp. 377–394; 395–404.
 19. Einaudi M.T., Hedenquist J.W., Inan E.E. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologists Special Publication 10*, 2003. pp. 285–313.
 20. Bortnikov N.S., Genkin A.D., Kovalenker V.A. Mineralogico-geokhimicheskie pokazateli uslovii gidrotermalnogo rudoobrazovaniya [Mineralogical-geochemical indices of hydrothermal ore formation conditions]. *Endogennyye rudnye rayony i mestorozhdeniya* [Endogenous ore regions and deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1987. pp. 40–59.
 21. Shikazono N.A. Comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyriteargentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au–Ag vein type deposits in Japan. *Economic Geology*, 1985, vol. 80, no. 5, pp. 1415–1424.
 22. Durazzo A., Taylor L.A. Exsolution in the Mss–pentlandite system: textural and genetic implications for Ni-sulfide ores. *Mineralium Deposita*, 1982, vol. 17, pp. 313–332.
 23. Bortnikov N.S., Kramer Kh., Genkin A.D., Krapiva L.Ya., Santa Cruz M. Paragenesis of Gold and Silver Tellurides in the Florencia Gold Deposit, the Republic of Cuba. *Geology of Ore Deposits*, 1988, no. 2, pp. 49–61. In Rus.
 24. 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.
 25. Borisenko A.A., Borovikov A.A., Zhitova L.M., Pavlova G.A., Gaskov I.V. Sostav i metallonost magmatogennykh flyuidov bazitovykh i granitoidnykh mantiino-korovykh rudno-magmaticheskikh sistem, produktsiruyushchikh Co-Ni-Pt, Cu-Mo-porfirovye, Sn-W i Mo-W orudnenie [Composition and metal content of magmatogenous fluids of basite and granitoid mantle-crustal ore-magmatic systems producing Co-Ni-Pt, Cu-Mo-porphyry, Sn-W and Mo-W mineralization]. *Modelny analiz razvitiya kontinentalnykh mantiino-korovykh rudoobrazuyushchikh sistem* [Model Analysis of the Continental Mantle–Crust Ore-Forming Systems]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2009. pp. 154–174.
 26. Zarasvandi A., Rezaei M., Raith J., Lentz D., Azimzadeh A.M., Pourkaseb H. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, vol. 111, pp. 175–191.
 27. Liu X., Fan H.R., Hu F.F., Yang K.F., Wen B.J. Nature and evolution of the ore-forming fluids in the giant Dexing porphyry Cu–Mo–Au deposit, Southeastern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, vol. 171, pp. 83–95.

Received: 22 October 2017.

Information about the authors

Renat V. Kuzhuget, Cand. Sc., senior researcher, Tuvini Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

Andrey A. Mongush, Cand. Sc., deputy science director, Tuvini Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

Ai-Demir O. Mongush, research scholar, Tuvini Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.