

**ИСТОЧНИКИ СЕРЫ
СУЛЬФИДОВ МЕДНО-ЗОЛОТО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
АК-СУГ (ВОСТОЧНАЯ ТУВА)**

Р.В. Кужугет¹, А.О. Монгуш², Н.Н. Анкушева³

¹Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
ул. Интернациональная, 117а, г. Кызыл, 667007 Россия; rkuzhuget@mail.ru

²Тувинский государственный университет, ул. Ленина, 36, г. Кызыл, 667000 Россия

³Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия

**SULFUR SOURCES OF SULFIDES
OF THE AK-SUG CU-AU PORPHYRY DEPOSIT, EASTERN TUVA**

R.V. Kuzhuget¹, A.O. Mongush², N.N. Ankusheva³

¹Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS,
ul. Internatsionalnaya, 117a, Kyzyl, 667007 Russia; rkuzhuget@mail.ru

²Tuvan State University, ul. Lenina, 36, Kyzyl, 667000 Russia

³South-Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy,
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia

Изучен изотопный состав серы сульфидов медно-золото-порфинового месторождения Ак-Суг, локализованного в раннепротерозойских магматических породах. Изотопный состав серы сульфидов варьирует от +1.0 до +3.2 ‰: от +2.5 до +3.2 ‰ – для молибденита-I, от +1.0 до +3.1 ‰ – для пирита-III, от –2.3 до –0.9 ‰ – для халькопирита-III–V и от –2.9 до –2.4 ‰ – халькопирита-VI и –1.0 ‰ – для пирита-V. Околонулевые значения изотопного состава серы сульфидов месторождения Ак-Суг свидетельствуют об участии серы магматического (от –5 до +5 ‰) либо мантийного (от –3 до +3 ‰) происхождения, т.е. источником рудного вещества служил магматический флюид, характерный для большинства медно-порфировых месторождений Тихоокеанского кольца.

Илл. 5. Табл. 1. Библи. 23.

Ключевые слова: сульфиды, изотопы серы, медно-порфировые месторождения, Тува.

The paper presents the S isotopic composition of sulfides from the Ak-Sug Au-Cu-porphyry deposit hosted by Early Proterozoic magmatic rocks. The S isotopic composition of sulfides varies from +1.0 to +3.2 ‰: +2.5 to +3.2 ‰ for molybdenite-I, +1.0 to +3.1 ‰ for pyrite-III, –2.3 to –0.9 ‰ for chalcopyrite-III–V, –2.9 to –2.4 ‰, for chalcopyrite-VI and –1.0 ‰ for pyrite-V. The close-to-zero S isotopic ratios of sulfides from the Ak-Sug deposit indicate magmatic (from –5 to +5 ‰) or mantle (from –3 to +3 ‰) S source typical of most Cu-porphyry deposits of the Pacific Fire Ring.

Figures 5. Table 1. References 23.

Key words: sulfides, sulfur isotopes, copper porphyry deposits, Tuva.

Введение

Медно-порфировые месторождения образуются как в субдукционно-компрессионных текто-

нических условиях во время активной субдукции океанической или континентальной коры (Sillitoe, 2010), так и в постсубдукционных обстановках (Richards, 2009, 2013; Hou et al., 2011) и получа-

ют рудообразующие «материалы» (флюиды, S, Cl и металлы) преимущественно из магм, формирующих порфириновые интрузии, связанные с рудой. Считается, что формирование медно-порфирирового оруденения на ранних стадиях связано с окисленными флюидами магматического происхождения, а на поздних стадиях в рудоотложении могут принимать метеорные воды, иногда играя решающую роль в осаждении металлов вплоть до формирования рудных содержаний (Hedenquist, Lowenstern, 1994; Hedenquist, Richards, 1998; Sillitoe, 2010).

На некоторых медно-порфирировых месторождениях (Бьютт, США; Поргера, Папуа-Новая Гвинея и т.д.) изотопный состав серы и свинца минералов свидетельствует о том, что вмещающие породы также могут быть поставщиками части рудообразующих «материалов» для медно-порфирировых систем (Richards et al., 1991; Field et al., 2005; Cooke et al., 2014). Это явление отражает локальное взаимодействие флюид-порода между магматическими флюидами и вмещающими породами с разным изотопным составом во время гидротермальной циркуляции в верхней части земной коры (Richards et al., 1991; Cooke et al., 2014). Таким образом, изотопные исследования серы сульфидов позволяют лучше понять связанные с рудой магмато-гидротермальные процессы на медно-порфирировых месторождениях и дают новую информацию об источниках рудного вещества и связи оруденения с магматизмом (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009). Целью данной работы стало установление «источников серы руд» Ак-Сугского медно-золото-порфирирового месторождения, которое является одним из крупнейших объектов медно-порфирирового типа в России.

Геологическое строение месторождения

Месторождение Ак-Суг открыто геологами Ферганской экспедиции ВИМСа Г.В. Махиным и Н.Е. Костиным в 1952 г. В течение 1966–1981 гг. на территории месторождения активно велись поисково-оценочные работы. В 1982–1985 гг. В.И. Забелиным и другими геологами Тувинской геологоразведочной экспедиции проводилась предварительная разведка объекта. В соответствии с разработанными НИИ «Сибцветмет» кондициями подсчитаны запасы категории $C_1 + C_2$. В ГКЗ запасы апробацию не проходили. В ходе завершающего этапа предварительной разведки месторождение оценено как крайне перспективное, однако даль-

нейшие исследования по объекту были приостановлены из-за сложных транспортных условий для дальнейшего освоения.

Новый этап освоения месторождения начался в 2008 г. силами ООО «Голевская горнорудная компания». В 2008–2013 гг. на объекте проведены разведочные работы с утверждением постоянных разведочных кондиций и запасов месторождения для условий отработки открытым способом. Балансовые запасы полезных ископаемых месторождения Ак-Суг, утвержденные ГКЗ Российской Федерации в 2014 г., составляют (по категориям): Cu – 6.24 млн т ($B + C_1$) и 512.1 тыс. т (C_2), Mo – 141.4 ($B + C_1$) и 7.2 (C_2) тыс. т, Au – 83 т (C_2), Ag – 288.5 т (C_2) и Re – 83.3 т (C_2). Общие ресурсы меди Ак-Сугского рудного узла по категории $B + C_1 + C_2 + P_1 + P_2 + P_3$ составляют >10.6 млн т, т.е. месторождение является объектом мирового класса.

Ак-Сугское месторождение расположено на южном склоне Восточного Саяна в тектонически мобильной зоне области сопряжения докембрийских и раннекаледонских структур – зоне Кандатского разлома, разделяющего Хамсаринскую (Тува) и Кизирскую (Восточный Саян) структурно-фациальные зоны ранних каледонид. Оруденение приурочено к многофазному Ак-Сугскому плутону, который локализован на пересечении Даштыгойского грабена северо-западного направления с зоной интенсивной трещиноватости субширотного Ак-Сугского разлома.

Ак-Сугский плутон находится в Хамсаринской зоне – краевой северо-восточной части вендраннекембрийской Таннуольско-Хамсаринской островодужной зоны, сформировавшейся в Алтае-Саянской области при субдукции Палеоазиатского океана (Берзин, Кунгурцев, 1996). Плутон сложен полнокристаллическими преимущественно среднезернистыми породами (габброиды, диориты, тоналиты), вмещающими штоко- и дайкообразные тела (малые интрузии, рудоносный комплекс) порфирировых пород, с которыми пространственно и во времени ассоциирует Cu-Mo оруденение (рис. 1).

Малые рудоносные интрузии сложены мелко- и среднезернистыми тоналитами и тоналит-порфирами. Интрузивные породы на месторождении пропилитизированы, но чаще подвергнуты кварц-серицитовым и аргиллизитовым изменениям и вмещают основной объем промышленного оруденения. Магматизм на месторождении завершился проявлением поздних даек лейкогранитов и аплитов, которые рассекают штокверковое Cu-Mo

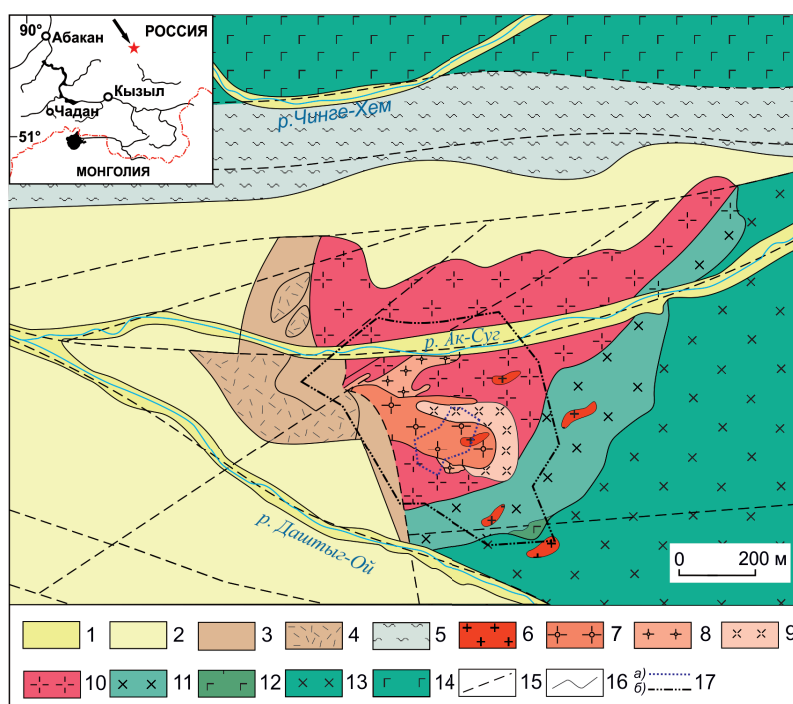


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Ак-Суг по данным (Забелин, 1992) с изменениями авторов:

1 – аллювиальные отложения, Q_{IV} ; 2 – моренные и делювиальные отложения, Q_{III-IV} ; 3, 4 – вулканогенно-осадочные породы толтаковской свиты, D_1tl (?); 3 – риолит-дациты и риолиты; 4 – туфопесчаники, конгломераты; 5 – кислые и основные эффузивы, сланцы хамсаринской свиты, E_1hm ; 6–13 – Ак-Сугский плутон (рудоносный комплекс), $E_{1-2}ak$: 6 – лейкограниты и аплиты; 7 – тоналит-порфиры II; 8 – тоналит-порфиры I; 9 – порфировидные тоналиты; 10 – массивные тоналиты; 11 – роговообманковые кварцевые диориты; 12 – габбро; 13, 14 – майнский комплекс, E_1mn : 13 – диориты; 14 – габбро; 15 – разрывные нарушения; 16 – геологические границы; 17 – контур кварцевого ядра (а) и месторождения (б).

Fig. 1. Geological scheme of the Ak-Sug deposit (modified after Zabelin, 1992):

1 – alluvial sediments, Q_{IV} ; 2 – moraine and deluvial sediments, Q_{III-IV} ; 3, 4 – volcanosedimentary rocks of Toltaково Formation, D_1tl (?); 3 – dacitic rhyolites and rhyolites; 4 – tuff sandstones and conglomerates; 5 – felsic and mafic effusive rocks, schists of Khamsara Formation, E_1hm ; 6–13 – Ak-Sug pluton (ore-bearing complex), $E_{1-2}ak$: 6 – leucogranites and aplites; 7 – porphyry tonalites II; 8 – porphyry tonalites I; 9 – porphyry tonalites; 10 – massive tonalites; 11 – hornblende quartz diorites; 12 – gabbro; 13, 14 – Mainsky complex, E_1mn : 13 – diorites; 14 – gabbro; 15 – faults; 16 – geological boundaries; 17 – contours of quartz core (a) and deposit (b).

порфировое оруденение и содержат бедную прожилковую и гнездовую пирит-халькопирит-кварцевую минерализацию (с золотом, науманнитом, минералами W и Te), которая сопряжена с процессами аргиллизации вмещающих пород (Сотников и др., 2004). Магматические породы плутона и малых рудоносных интрузий относятся к известково-щелочной серии пониженной щелочности с доминированием Na над K . Поздняя магматическая ассоциация представлена лейкогранитами и аплитами высококалийной известково-щелочной серии (Berzina et al., 2016).

Рудная минерализация на месторождении Ак-Суг отлагалась в два этапа: с первым этапом связано формирование Cu -порфирового оруденения, со

вторым – минерализация в аргиллизитах (Кудрявцев и др., 2012).

Зональность месторождения и минеральный состав руд

Метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется с типовой зональностью метасоматической колонны медно-порфирового месторождения и имеет вид (от центра к периферии): «кварцевое ядро» → кварцевые, серицит-кварцевые (филлитовые) метасоматиты ± кварц-калиевые метасоматиты → кварц-серицитовые и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты ± ар-

гиллизиты → пропилиты (Забелин, 1992). Кварц-калиевые метасоматиты развиты очень слабо. Картина зональности на отдельных участках усложняется наложенной аргиллизацией, а также контактом пропилитов с породами «кварцевого ядра». Аргиллизиты не образуют какой-то определенной зоны, а встречаются в виде отдельных участков в зонах кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов. Около 80 % запасов руд месторождения сосредоточено в кварц-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах и аргиллизитах, образованных, прежде всего, за счет тоналит-порфиров.

Для месторождения характерна латеральная зональность распределения минеральных разновидностей руд от центра к периферии рудного штокверка: молибден-медная в кварцевых и кварцево-сланцевых метасоматитах с неравномерной калишпатизацией → халькопиритовая и Au-содержащая борнит-халькопиритовая в кварц-серицитовых метасоматитах → золото-теллурид-

но-медная в кварц-серицитовых и серицит-гидро-сланцевых метасоматитах → золото-висмут-теллуридно-полисульфидная в серицит-гидросланцевых метасоматитах, аргиллизитах, аргиллизитизированных тоналит-порфирах, лейкогранитах и аплитах → внешняя пиритовая в пропилитизированных породах.

По данным предшественников (Забелин, 1992; Берзина и др., 2007; Pollard et al., 2017) и собственным наблюдениям авторов (Монгуш, Лебедев, 2013; Кужугет и др., 2015, 2018), рудная минерализация Ак-Сугского месторождения представлена восемью минеральными ассоциациями (рис. 2–4):

- 1) пирит-кварцевая (кварц-I, пирит-I, магнетит, гематит, ферберит);
- 2) сульфидно-карбонат-кварцевая (кварц-II, кальцит-I, калиевый полево шпат, пирит-II, халькопирит-I, борнит-I, теннантит-I);
- 3) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая (кварц-III, халькопирит-II, тен-

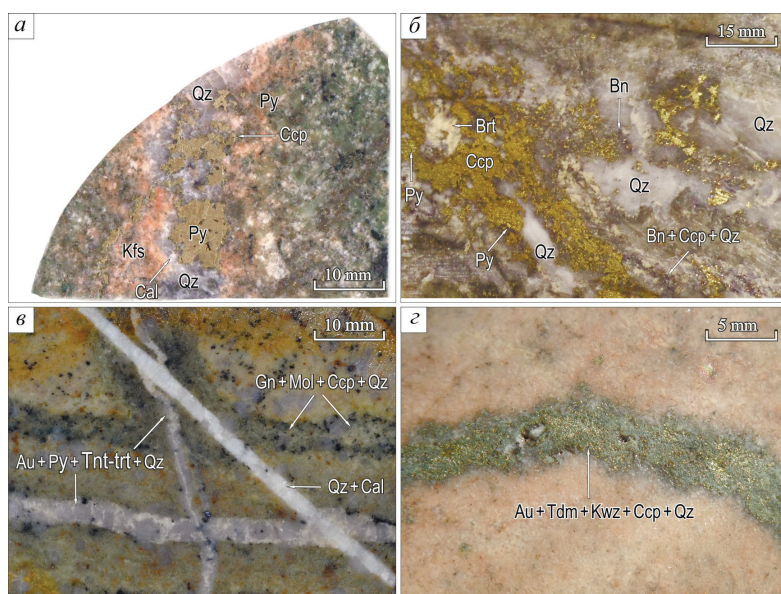


Рис. 2. Интрузивные породы и жильная минерализация месторождения Ак-Суг:

а – сульфидно-карбонат-кварцевый прожилок и кварц-полевошпатовые вторичные изменения в диорите; б – пирит-борнит-халькопирит-кварцевый прожилок в тоналит-порфире; в – агрегаты галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевой ассоциации в тоналит-порфире, рассеченные поздними золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевыми и кальцит-кварцевыми прожилками; г – золото-висмута-теллуридно-сульфидно-кварцевый прожилок в дайке аплитов.

Qz – кварц, Cal – кальцит, Kfs – калиевый полево шпат, Brt – барит, Ccp – халькопирит, Py – пирит, Au – золото, Bn – борнит, Mol – молибденит, Gn – галенит, Tnt-trt – теннантит-тетраэдрит, Tdm – тетрадимит, Kwz – кавазулит.

Fig. 2. Intrusive rocks and vein mineralization of the Ak-Sug deposit.

a – sulfide-carbonate-quartz vein and related quartz-feldspar alterations in diorite; b – pyrite-bornite-chalcopyrite-quartz vein in porphyry tonalite; b – aggregates of galena-molybdenite-tennantite-chalcopyrite-quartz assemblage in porphyry tonalite with late gold-pyrite-chalcopyrite-black ore-quartz and calcite-quartz veins; z – gold-bismuth-telluride-sulfide-quartz vein in aplite dike.

Qz – quartz, Cal – calcite, Kfs – K-feldspar, Brt – barite, Ccp – chalcopyrite, Py – pyrite, Au – gold, Bn – bornite, Mol – molybdenite, Gn – galena, Tnt-trt – tennantite-tetrahedrite, Tdm – tetradymite, Kwz – kawazulite.

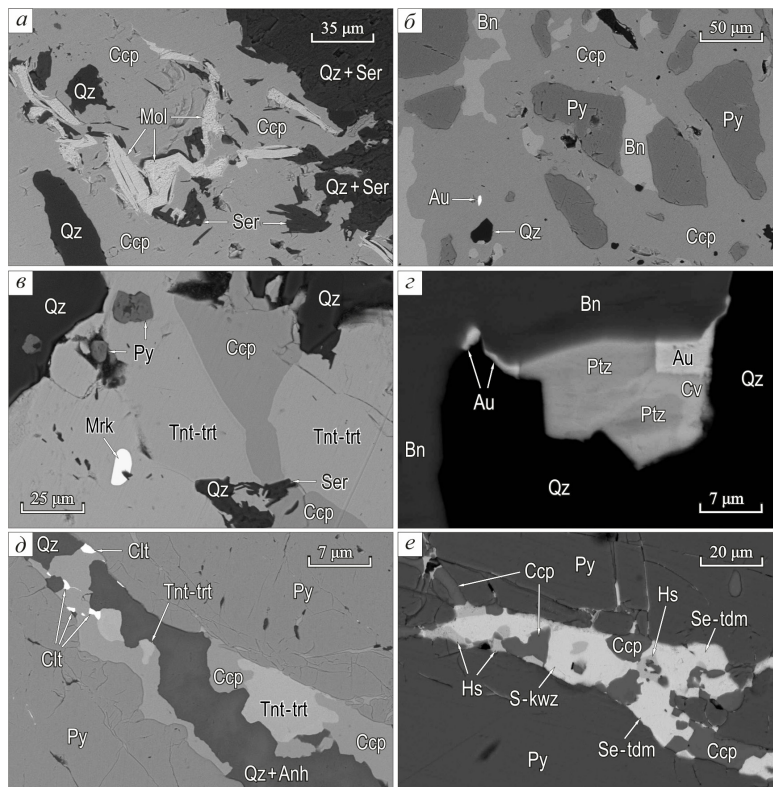


Рис. 3. Минеральные агрегаты рудных ассоциаций месторождения Ак-Суг:

а – халькопирит (Ccp) и молибденит (Mol) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевой ассоциации в кварц-серичитовых (Qz + Ms) метасоматитах; б – ранний катаклазированный пирит, сцементированный халькопиритом (Ccp), борнитом (Bn), золотом (Au) и кварцем (Qz) золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевой ассоциации (Py); в, г – теннантит-тетраэдрит (Tnt-trt), халькопирит (Ccp), пирит (Py), борнит (Bn), меренскийит (Mrk), золото (Au), петцит (Ptz), калаверит (Cv) и кварц (Qz) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой ассоциации; д – прожилки золото-пирит-халькопирит-блёкловорудно-кварцевой ассоциации с халькопиритом (Ccp), теннантит-тетраэдритом (Tnt-trt), кварцем (Qz), ангидритом (Anh) в катаклазированном пирите (Py); е – прожилки золото-висмут-теллуридно-сульфидно-кварцевой ассоциации с Se-тетрадимитом (Se-tdm), S-кавацулитом (S-kwz), гесситом (Hs) и халькопиритом (Ccp) в раннем пирите (Py). BSE-фото, СЭМ MIRA LM (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Fig. 3. Ore mineral assemblages of the Ak-Sug deposit:

а – chalcopyrite (Ccp) and molybdenite (Mol) of galena-molybdenite-tennantite-chalcopyrite-quartz assemblage in quartz-sericite (Qz + Ms) metasomatites; б – early cataclastic pyrite (Py) cemented by chalcopyrite (Ccp), bornite (Bn), native gold (Au) and quartz (Qz) of gold-pyrite-bornite-chalcopyrite-quartz assemblage; в, г – tennantite-tetrahedrite (Tnt-trt), chalcopyrite (Ccp), pyrite (Py), bornite (Bn), merenskyite (Mrk), native gold (Au), petzite (Ptz), calaverite (Cv) and quartz (Qz) of gold-telluride-bornite-chalcopyrite-quartz assemblage; д – gold-pyrite-chalcopyrite-fahlore-quartz veinlets with chalcopyrite (Ccp), tennantite-tetrahedrite (Tnt-trt), quartz (Qz), anhydrite (Anh) in cataclastic pyrite (Py); е – gold-bismuth-telluride-sulfide-quartz veinlets with Se-tetradymite (Se-tdm), S-kawazulite (S-kwz), hessite (Hs), and chalcopyrite (Ccp) in early pyrite (Py). BSE-images. SEM MIRA LM (IGM SB RAS, Novosibirsk).

нантит-II, молибденит-I, пирит-III, галенит-I (Se до 1 мас. %), сфалерит-I (Fe до 0.24 мас. %));

4) золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая (кварц-IV, борнит-II, халькопирит-III, пирит-IV, галенит-II (Se до 3.67 мас. %), барит-I, золото-I (Au 80.30–69.79, Ag 13.64–29.71; Te 0.00–0.56) и электрум-I (Au 33.04–69.61, Ag 29.81–66.20, Te 0.00–0.76));

5) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая (кварц-V, халькопирит-IV, борнит-III,

пирит-V, теннантит-тетраэдрит, минералы ряда галенит-клаусталит, алтаит, гессит-I, петцит-I, золото-II (Au 95.00–75.07, Ag 4.07–24.83), калаверит, креннерит, сильванит, эмпресит, штюцит, мутманнит, меренскийит, арсенопаладинит Pd_8As_3 , сопчеит $Ag_4Pd_3Te_4$, темагамит $Pd_3HgTe_3(?)$, самородный теллур, барит-II, молибденит-II, кобальтин, энаргит-II);

6) золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая (кварц-VI, теннантит-тетраэдрит,

Минерал	Гидротермальные минеральные ассоциации							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Кварц	— ^I	— ^{II}	— ^{III}	— ^{IV}	— ^V	— ^{VI}	— ^{VII}	— ^{VII}
Кальцит	—	— ^I						— ^{II}
Пирит	— ^I	— ^{II}	— ^{III}	— ^{IV}	— ^V	— ^{VI}	— ^{VII}	
Магнетит	—							
Молибденит			— ^I		— ^{II}			
Ферберит	—							
Борнит		— ^I		— ^{II}	— ^{III}	— ^{IV}	— ^V	
Халькопирит		— ^I	— ^{II}	— ^{III}	— ^{IV}	— ^V	— ^{VI}	
Галенит			— ^I	— ^{II}	— ^{III}	— ^{IV}		
Сфалерит			— ^I			— ^{II}		
Блеклые руды		— ^I	— ^{II}		— ^{III}	— ^{IV}	— ^V	
Золото				— ^I	— ^{II}	— ^{III}	— ^{VI}	
Электрум				— ^I		— ^{III}		
Клаусталит					— ^I	— ^{II}		
Гессит					— ^I		— ^{II}	
Алтаит					—			
Петцит					— ^I		— ^{II}	
Калаверит					—			
Сильванит					—			
Креннерит					—			
Барит				— ^I	— ^{II}	— ^{III}	— ^{VI}	— ^V
Эмпрессит					—			
Штютцит					—			
Мутманит					—			
Меренскиит					—			
Арсенопаладинит					—			
Сопчеит					—			
Темагамит (?)					—			
Самородный теллур					—			
Энаргит					— ^I	— ^{II}		
Кобальтин					—			
Касситерит					—			
Науманнит					—			
Ангидрит					—	— ^I	— ^{II}	
Цумоит							—	
Кавацулит							—	
Тетрадимит							—	
Виттихенит							—	
Айкинит							—	
Анкерит								—

Рис. 4. Схема последовательности минералообразования месторождения Ак-Суг.

Толщина линий указывает на относительную степень распространенности минерала. Римские цифры – генерации минералов.

Fig. 4. Schematic sequence of mineral formation of the Ak-Sug deposit.

The line thickness indicates the relative abundance of minerals. Roman numerals indicate the mineral assemblages.

халькопирит-V, пирит-VI, минералы ряда галенит-клаусталит, борнит-IV, касситерит, энаргит-II, науманнит, барит-III, ангидрит-I, сфалерит-II, золото-III (Au 95.86–70.78, Ag 4.08–29.22) и электрум-III (Au 63.37–66.84, Ag 33.14–35.92));

7) золото-висмута-теллуридно-сульфидно-кварцевая (кварц-VII, халькопирит-VI, пирит-VII, борнит-V, Вi-содержащий теннантит, золото-VI (Au 80.51–78.11, Ag 22.48–19.33), гессит-II, петцит-II, цумоит, S-содержащий кавацулит, тетрадимит, Se-содержащий тетрадимит, виттихенит и айкинит, барит-IV);

8) кварц-карбонатная (кварц-VIII, кальцит-II, анкерит, барит-V и ангидрит-II).

Изотопный состав серы сульфидов

Изотопный состав серы сульфидов месторождения Ак-Суг определен для монофракций пирита и халькопирита размером 0.1–0.5 мм, отобранных вручную под бинокляром. Изотопный состав серы сульфидов проанализирован в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН с ис-

пользованием газового масс-спектрометра Finnigan MAT Delta в режиме двойного напуска (г. Новосибирск). Контроль всех измерений проводился анализом образцов стандартного изотопного состава в диапазоне $\delta^{34}\text{S}$ от -15.1 до $+21.8$ ‰ относительно троилита из Canyon Diablo (CDT), в том числе международных: NBS-123 ($\delta^{34}\text{S} = +17.44$ ‰) и NBS-127 ($\delta^{34}\text{S} = +21.8$ ‰). Воспроизводимость значений $\delta^{34}\text{S}$, включая подготовку образца, не более 0.1 ‰ (2 σ). Значения $\delta^{34}\text{S}$ (‰) приведены относительно стандарта CDT.

Изотопный состав серы халькопирита и пирита месторождения характеризуется незначительным разбросом: от -2.9 до -0.9 ‰ для халькопирита, от -1.0 до $+1.2$ ‰ – для пирита (табл., рис. 5). Значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите-III галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевой ассоциации составляют $+1.2$ ‰, в халькопирите-III золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевой ассоциации – -0.9 ‰. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах более поздних минеральных ассоциаций (золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой, золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевой и золото-висмут-теллуридно-сульфидно-кварцевой) характеризуются более легкими значениями: от -2.9 до -1.9 ‰ (-1.6 ‰ для халькопирита-IV, -1.0 ‰ для пирита-IV, от -2.3 до -1.9 ‰ для халькопирита-V и от -2.9 до -2.4 ‰ для халькопирита-VI).

Обсуждение результатов и выводы

По нашим данным и результатам предшественников (Сотников и др., 2004) изотопный состав серы пирита, халькопирита и молибденита месторождения Ак-Суг характеризуется незначительным разбросом (табл.), что указывает на ее гомогенный магматический источник. Полученные результаты позволили выявить тренд увеличения доли легкого изотопа серы от ранних генераций сульфидов к поздним (рис. 5). Обогащение легким изотопом серы поздних генераций сульфидов может быть связано с частичным окислением сульфидной серы при увеличении окислительного потенциала ($f\text{O}_2$), сопровождающимся разделением изотопов между окислительными и восстановленными формами серы, при этом сульфиды обогащаются изотопом S^{32} (Ohmoto, Rye, 1979). В таких случаях рудный процесс обычно заканчивается отложением на поздних стадиях гипогенных сульфатов, в данном случае, барита \pm ангидрита, ассоциирующих с халькопиритом и пиритом. Значения $\delta^{34}\text{S}$ ангидрита месторождения Ак-Суг, который встречается в золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевой и пострудной кварц-карбонатной ассоциациях, варьируют от $+9.4$ до $+12$ ‰ (Сотников и др., 2004).

Таким образом, изотопный состав серы сульфидов из разных минеральных ассоциаций место-

Изотопный состав серы сульфидов месторождения Ак-Суг

Sulfur isotopic composition of sulfides of the Ak-Sug deposit

Таблица

Table

Минеральные ассоциации	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ (CDT)
Галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая	Молибденит-I*	+3.2
		+3.0
		+2.5
	Пирит-III*	+3.1
		+2.1
		+1.7
Пирит-III	+1.2	
Золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая	Халькопирит-III	-0.9
Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая	Халькопирит-IV	-1.6
Золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая	Халькопирит-V	-1.9
		-2.3
Золото-висмут-теллуридно-сульфидно-кварцевая	Пирит-V	-1.0
		-2.4
	Халькопирит-VI	-2.5
		-2.6
		-2.9

Примечание. * – данные (Сотников и др., 2004).

Note. * – data of (Sotnikov et al., 2004).

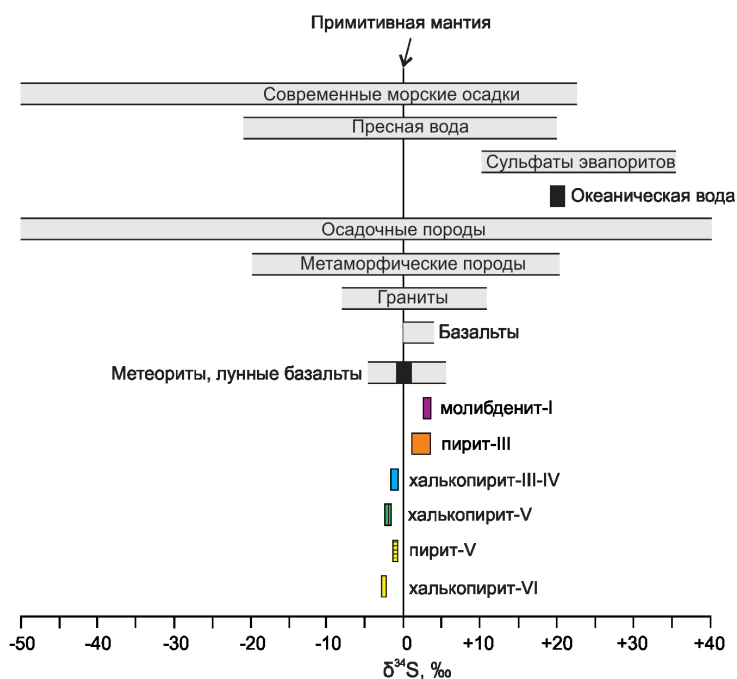


Рис. 5. Изотопный состав серы сульфидов месторождения Ак-Суг в сравнении с изотопным составом серы различных резервуаров (Hoefs, 2009).

Fig. 5. Sulfur isotopic composition of sulfides from the Ak-Sug deposit in comparison with S isotopic composition of various reservoirs (Hoefs, 2009).

рождения Ак-Суг характеризуется околонулевыми значениями, изменяясь от -0.9 до $+3.2$ ‰. Это свидетельствует об участии серы магматического (от -5 до $+5$ ‰) либо мантийного (от -3 до $+3$ ‰) происхождения (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009), что соответствует магматическому флюиду, характерному для большинства медно-порфировых месторождений Северной и Южной Америки (0 ± 5 ‰) (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, Goldhaber, 1997).

Авторы признательны аналитикам ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН В.Н. Реутскому, М.Н. Колбасовой и О.П. Изох за проведение изотопных анализов состава серы в сульфидах, а также рецензенту и редакторам журнала за высказанные замечания и редакторскую правку, позволившие улучшить первоначальный вариант статьи.

Литература

- Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В.** (1996) Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, **37**(1), 63–81.
- Берзина А.Н., Сотников В.И., Экономоу-Элиопоулос М., Элиопоулос Д.Г.** (2007) Первая находка меренскита (Pd, Pt)Te₂ в рудах Cu-Мо-порфировых месторождений России. *Геология и геофизика*, **48**(8), 848–851.
- Забелин В.И.** (1992) Элементы геолого-генетической модели Аксугского медно-молибденового месторождения. *Магматизм и металлогения рудных районов Тувы*. Новосибирск, Наука, 92–103.
- Кудрявцев Ю.К., Третьякова Е.Н., Сальников А.Е., Рахимипур Г.** (2012) Геолого-геохимические модели разноранговых рудных объектов (Au)-Мо-Cu-порфирового семейства. М., ИМГРЭ, 142 с.
- Кужугет Р.В., Монгуш А.А., Монгуш А.Д.О.** (2018) Эволюция химического состава блеклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирового месторождения (Северо-Восточная Тува). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, **329**(2), 81–91.
- Кужугет Р.В., Хертек А.К., Лебедев В.И., Забелин В.И.** (2015) Особенности состава самородного золота в рудных ассоциациях Ак-Сугского золото-медно-молибден-порфирового месторождения, Восточная Тува. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **2**(22), 45–52.

Монгуш А.Д., Лебедев В.И. (2013) Ак-Сугское медно-молибден-порфи́ровое месторождение: вещественный состав пород и руд. *Известия СО РАН. Отделение секции наук о Земле*, **1**(42), 22–29.

Сотников В.И., Пономарчук В.А., Перцева А.П., Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О. (2004) Эволюция изотопов серы в Cu-Mo порфи́ровых рудно-магматических системах Сибири и Монголии. *Геология и геофизика*, **45**, 963–974.

Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. (2016) Paleozoic-Mesozoic porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) deposits within the southern margin of the Siberian Craton: geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a review). *Minerals*, **6**(6), 125.

Cooke D.R., Hollings P., Wilkinson J.J., Tosdal R.M. (2014) Geochemistry of porphyry deposits. *Treatise on Geochemistry*, Second edition, **13**, 357–381.

Field, C.W., Zhang, L., Dilles, J.H., Rye, R.O., Reed, M.H. (2005) Sulfur and oxygen isotopic record in sulfate and sulfide minerals of early, deep, pre-main stage porphyry Cu-Mo and late main stage base-metal mineral deposits, butte district, Montana. *Chemical Geology*, **215** (1), 61–93.

Hedenquist J.W., Lowenstern J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, **370**, 519–527.

Hedenquist J.W., Richards J.P. (1998) The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 235–256.

Hoefs J. (2009) Stable isotope geochemistry. Berlin, Springer, 281 p.

Hou Z., Zhang H., Pan X., Yang Z. (2011) Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust – examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, **39**, 21–45.

Ohmoto H. (1986) Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Review in Mineralogy*, **16**, 491–560.

Ohmoto H., Goldhaber M.B. (1997) Sulfur and carbon isotopes. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.-Y., Wiley, 517–611.

Ohmoto H., Rye R.O. (1979) Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.-Y., John Wiley and Sons, 509–567.

Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. (2017) Paragenesis and Re-Os molybdenite age of the Cambrian Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit, Tuva Republic, Russian Federation. *Economic Geology*, **112**, 1021–1028.

Richards J.P. (2009). Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting subduction-modified lithosphere. *Geology*, **37**(3), 247–250.

Richards J.P. (2013) Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience*, **6**, 911–916.

Richards J.P., Mcculloch M.T., Chappell B.W., Kerrich R. (1991) Sources of metals in the Porgera gold

deposit, Papua New Guinea: evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**(2), 565–580.

Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Economic Geology*, **105**, 3–41.

References

Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. (2016) Paleozoic-Mesozoic porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) deposits within the southern margin of the Siberian Craton: geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a Review). *Minerals*, **6**(6), 125.

Berzin N.A., Kungurtzev L.V. (1996) [Geodynamic interpretation of geological complexes of Altay-Sayany region]. *Geologiya i geofizika, [Geology and Geophysics]* **37**(1), 63–81. (in Russian)

Berzina A.N., Sotnikov V.I., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G. (2007) [First finding of merenskyite (Pd,Pt)Te₂ in porphyry Cu-Mo ores in Russia]. *Geologiya i geofizika, [Geology and Geophysics]*, **48**(8), 656–658. (in Russian)

Cooke D.R., Hollings P., Wilkinson J.J., Tosdal R.M. (2014) Geochemistry of porphyry deposits. *Treatise on Geochemistry*, Second edition, **13**, 357–381.

Field, C.W., Zhang, L., Dilles, J.H., Rye, R.O., Reed, M.H. (2005) Sulfur and oxygen isotopic record in sulfate and sulfide minerals of early, deep, pre-main stage porphyry Cu-Mo and late main stage base-metal mineral deposits, butte district, Montana. *Chemical Geology*, **215** (1), 61–93.

Hedenquist J.W., Lowenstern J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, **370**, 519–527.

Hedenquist J.W., Richards J.P. (1998) The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 235–256.

Hoefs J. (2009) Stable isotope geochemistry. Berlin, Springer, 281 p.

Hou Z., Zhang H., Pan X., Yang Z. (2011) Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust – examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, **39**, 21–45.

Kudryavtsev Yu.K., Tretyakova E.N., Salnikov A.E., Rakhimipur G. (2012) [Geological and geochemical models of multy-rank (Au)-Mo-Cu porphyry ore deposits]. Moscow, IMGRE, 142 p. (in Russian)

Kuzhuget R.V., Hertek A.K., Lebedev V.I., Zabelin V.I. (2015) [Compositional features of native gold in ore assemblages of the Ak-Sug (Au)-Mo-Cu porphyry deposit, NE Tuva]. *Geologiya i mineral'nye resursy Sibiri [Geology and mineral resources of Siberia]*, **2**(22), 45–52. (in Russian)

- Kuzhuget R.V., Mongush A.A., Mongush A.-D.O.** (2018) [Evolution of chemical composition of fahlores from the Ak-Sug (Аи)-Mo-Cu porphyry deposit, NE Tuva]. *Izvestiya Tomskogo polytekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources]*, **329**(2), 81–91.
- Mongush A.D., Lebedev V.I.** (2013) [The Ak-Sug Cu-Mo porphyry deposit: composition of ores and rocks]. *Izvestiya SO RAEN. Otdelenie seksii nauk o Zemle [Bulletin of SB RANS. Earth's Science Department]*, **1**(42), 22–29. (in Russian)
- Ohmoto H.** (1986) Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Review in Mineralogy*, **16**, 491–560.
- Ohmoto H., Goldhaber M.B.** (1997) Sulfur and carbon isotopes. In: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.-Y., Wiley, 517–611.
- Ohmoto H., Rye R.O.** (1979) Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.-Y., John Wiley and Sons, 509–567.
- Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R.** (2017) Paragenesis and Re-Os molybdenite age of the Cambrian Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit, Tyva Republic, Russian Federation. *Economic Geology*, **112**, 1021–1028.
- Richards J.P.** (2009). Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting subduction-modified lithosphere. *Geology*, **37**(3), 247–250.
- Richards J.P.** (2013) Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience*, **6**, 911–916.
- Richards J.P., Mcculloch M.T., Chappell B.W., Kerrich R.** (1991) Sources of metals in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55** (2), 565–580.
- Sillitoe R.H.** (2010) Porphyry copper systems. *Economic Geology*, **105**, 3–41.
- Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Pertceva A.P., Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O.** (2004) [Evolution of S isotopes in Cu-Mo porphyry ore-magmatic systems of Siberia and Mongolia]. *Geologiya i geofizika, [Geology and Geophysics]*, **45**, 963–974. (in Russian)
- Zabelin V.I.** (1992) [The geological-genetic model of the Ak-Sug Cu-Mo deposit]. In: *Magmatizm i metallogeniya rudnykh rayonov Tuvy [Magmatism and metallogeny of Tuva ore regions]*. Novosibirsk, Nauka, 92–103. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 25 октября 2019 г.