

Evans K.A., Reddy S.M., Tomkins A.G. et al. Effects of geodynamic setting on the redox state of fluids released by subducted mantle lithosphere // *Lithos*. 2017. Vol. 278–281. P. 26–42.

Evans B.W., Hattori K., Baronnet A. Serpentinite: what, why, where // *Elements*. 2013. Vol. 9. № 2. P. 99–106.

Foustoukos D.I., Bizimis M., Frisby C., Shirey S.B. Redox controls on Ni–Fe–PGE mineralization and Re/Os fractionation during serpentinization of abyssal peridotite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. Vol. 150. P. 11–25.

Früh-Green G.L., Connolly J.A.D., Plas A. et al. Serpentinization of oceanic peridotites: implications for geochemical cycles and biological activity // *The Subseafloor Biosphere at Mid-Ocean Ridges*. Geophysical Monograph Series. 2004. P. 119–136.

Klein F., Bach W. Fe-Ni-Co-O-S phase relations in peridotite-seawater interactions // *Journal of Petrology*. 2009. Vol. 50. № 1. P. 37–59.

Kutyrev A., Kamenetsky V., Kontonikas-Charos A. et al. Behavior of Platinum-group elements during hydrous metamorphism: constraints from awaruite (Ni₃Fe) mineralization // *Lithosphere*. 2023. Article ID lithosphere_2023_126.

Kutyrev A.V., Sidorov E.G., Kamenetsky V.D. et al. Platinum mineralization and geochemistry of the Matysken zoned Ural-Alaskan type complex and related placer (Far East Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 130. Article 103947.

Mungall J.E., Naldrett A.J. Ore deposits of the Platinum-group elements // *Elements*. 2008. Vol. 4. P. 253–258.

Naldrett A.J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits // *Magmatic Ni–Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis*. Society of Economic Geologists, Denver, Colorado, 2011. P. 1–50.

Pushkarev E.V., Anikina E.V., Kamenetsky V. Non-magmatic origin of PGM-rich chromitites in the Ural-Alaskan-type intrusions: mineralogical and structural // *12th International Platinum Symposium*. Yekaterinburg, 2014. P. 275–276.

Р.В. Кужугет¹, Н.Н. Анкушева²

¹ – Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов СО РАН, г. Кызыл, Россия
rkuzhuget@mail.ru

² – Южно-Уральский федеральный научный центр
минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия

Благороднометалльная минерализация и РТ-параметры формирования золото-молибден-медно-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточный Саян)

R.V. Kuzhuget¹, N.N. Ankusheva²

¹ – Tuvinian Institute for Exploration of
Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

² – South Urals Federal Research Center of Mineralogy and
Geoecology UB RAS, Miass, Russia

Noble metal mineralization and PT-parameters of formation of the Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit (Eastern Sayan)

Abstract. Ore mineralization of the Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit formed during three stages: 1) porphyry-copper mineralization with simple sulfides in quartz-sericite and quartz-sericite-chlorite metasomatites, 2) subepithermal Au-Bi-Te-Pd-quartz mineralization in quartz-sericite metasomatites, and 3) intermediate-sulfidation Au-Ag mineral assemblages with selenides, tellurides, and Sb and As sulfosalts in

argillites. The Ak-Sug deposit exhibits the features of the evolution of mineral assemblages, temperatures, composition, and fluid salinity during the transition from porphyry copper to the epithermal stage. At the early stages of the ore-forming process, the fluid was magmatic, whereas the later stages involved meteoric waters and the composition of the fluid transformed from high-saline (up to 32.9 wt % NaCl eq) CO₂-aqueous-chloride to aqueous-chloride (from 7 to 1.4 wt % NaCl eq) with Na, K, and Mg carbonates and sulfates. A wide diversity of Au-Ag minerals of subepithermal and epithermal mineral assemblages is caused by variations in fS_2 , fSe_2 , and fTe_2 .

Медно-порфировые месторождения служат источником большого количества Cu, Mo и Re, а также они содержат значимые количества Au, Ag и ЭПГ. Они образуются в различных геодинамических обстановках: субдукционных, постсубдукционных, коллизионных и постколлизионных [Sillitoe, 2010; Hou et al., 2011; Richards, 2013]. Медно-порфировые месторождения могут совмещать Au-Ag эпитермальные, полиметаллические (Zn-Cu-Pb-Ag±Au) и другие типы оруденения, которые могут быть производными единой порфирово-эпитермальной рудно-магматической системы [Sillitoe, 2010].

Ак-Сугский рудный узел локализован в Саяно-Тувинском сегменте северной части Центрально-Азиатского орогенного пояса и представляет собой аккреционно-коллизионную структуру, возникшую при геодинамической эволюции и закрытии Палеоазиатского океана [Берзин, Кунгурцев., 1996]. В рудном узле, кроме одноименного месторождения, выявлено несколько медно-порфировых рудопроявлений в интрузивных породах одноименного комплекса (Є₁ak) – Кадырой, Гребешковый, Даштыг и др., эпитермального Au-Ag типа в гидротермально-измененных нижнекембрийских эффузивно-осадочных породах – жильное рудопроявление Биче-Кадыр-Оос [Kuzhuget et al., 2023].

Возраст рудоносных порфиров Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Ак-Суг (U-Pb-датировка циркона интрузий от 515 ± 4 до 499 ± 6 млн лет [Berzina et al., 2016], Re-Os-датировка молибдена 518, 517, 516 и 511 млн лет [Pollard et al., 2017]) позволил предположить, что оруденение сформировалось в период геодинамического перехода от островодужного (570–518 млн лет) к аккреционно-коллизионному (510–450 млн лет).

Месторождение Ак-Суг расположено на южном склоне Восточного Саяна в зоне сопряжения докембрийских и раннекаледонских структур Кандатского разлома. Оруденение приурочено к Ак-Сугскому плутону, который локализован на пересечении Даштыгойского грабена СЗ направления с зоной трещиноватости субширотного Ак-Сугского разлома. Плутон сложен среднезернистыми породами (габброиды, диориты, тоналиты), вмещающими штоко- и дайкообразные тела (малые интрузии, рудоносный комплекс) порфировых пород, с которыми ассоциирует Cu-Mo оруденение.

Золото-молибден-медно-порфировое оруденение месторождения Ак-Суг сопровождается ореолами гидротермально измененных пород, развитых по рудоносным порфирам и вмещающим гранитоидам. Метасоматическая зональность согласуется с типовой зональностью метасоматической колонки медно-порфирового месторождения. Установлено, что рудная минерализация на месторождении отлагалась в три этапа. В первый этап сформировалось медно-порфировое оруденение с ассоциациями простых сульфидов (пирит, халькопирит, борнит, молибденит, галенит, сфалерит) в кварц-серицитовых и кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах. Во второй этап сформировалась субэпитермальная золото-висмута-теллуридно-палладиево-кварцевая минерализация с халькопиритом, энаргитом, борнитом, пиритом, гесситом, золотом, электрумом, клаусталитом, S-кавацулитом, Se-тетрадимитом, Bi-теннантитом (до 15 мас. % Bi), меренскиитом PdTe₂, сопчеитом Ag₄Pd₃Te₄, темагамитом Pd₃HgTe₃, арсенопалладинитом Pd₈As₃, сульфовисмутидами Cu и Pb в кварц-серицитовых метасоматитах. С третьим этапом связаны Au-Ag минеральные ассоциации с калаверитом, петцитом, сильванитом, гесситом, эмпреситом, науманнитом и сульфосолями Sb и As [Кужугет и др., 2023].

Изучение флюидных включений, рамановская спектроскопия и минеральная термометрия (парагенезис теллуридов Au и Ag) показали, что медно-порфировое оруденение отлагалось из углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe) флюида с концентрациями солей 20.1–32.8 мас. % NaCl-экв. при 470–395 °С, субэпитемальная минерализация – при P ~0.96–1.0 кбар из углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe±Ca±Mg) флюида с концентрациями солей 7.5–15 мас. % NaCl-экв. при 445–365 °С. Эпитеральные минеральные ассоциации отлагались при P ~0.55 кбар из углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe±Ca±Mg) флюида с концентрациями солей 1.4–12.6 мас. % NaCl-экв. при 370–200 °С.

Изотопный состав S флюида разных минеральных ассоциаций месторождения варьирует от –2.7 до +0.4 ‰, указывая на то, что они являются производными единой порфировой системы.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ флюида медно-порфирового (5.8–6.4 ‰) и субэпитемального (5.7–6.2 ‰) этапов указывают на его магматогенный генезис; а эпитемального (0.6–5.2 ‰) – на смешение магматического флюида с метеорными водами (0.4–5.7 ‰) [Кужугет и др., 2023].

Полученные изотопные данные в сочетании с минералого-геохимическими особенностями и условиями образования руд позволили проследить закономерности эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов месторождения Ак-Суг при переходе от медно-порфирового к эпитемальному этапу.

Эпитемальным этапом месторождения Ак-Суг обладает сходными минералого-геохимическими особенностями и условиями образования руд с оруденением эпитемального Au-Ag рудопроявления Биче-Кадыр-Оос, находящегося в 12 км к СВ. Это рудопроявление представлено золото-сульфидно-кварцевыми и золото-полисульфидно-карбонатно-кварцевыми жилами с аргиллитовыми зонами в вулканогенно-осадочных породах нижнего кембрия. Здесь установлены две стадии рудообразования: золото-сульфидно-кварцевая стадия с пиритом, марказитом, пирротином, арсенопиритом, халькопиритом, реже сфалеритом, гесситом, золотом и электрумом и поздняя золото-полисульфидно-карбонатно-кварцевая стадия с золотом, электрумом, Hg-электрумом, Se-акантитом, Se-галенитом, борнитом, теннантитом, тетраэдритом, гесситом, теллуробисмутитом, висмутинитом, матильдитом, джемсонитом, урайитом, самородным Вi и баритом. По данным изучения флюидных включений, рамановской спектроскопии и термометрии минералов (парагенезис электрума и сфалерита) установлено, что рудные жилы образовались при P ~0.5 кбар из водного CO₂-Na-K-хлоридного флюида (4.9–9.6 мас. % экв. NaCl) и температурах от 330 до 200 °С (330–270 °С – ранние золотосульфидно-кварцевые жилы и 290–200 °С – поздние золото-полисульфидно-карбонат-кварцевые жилы) и вариациях $f\text{O}_2$, $f\text{S}_2$, $f\text{Se}_2$ и $f\text{Te}_2$.

Изотопный состав S в сульфидах и значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида +1.3 и +4.7 ‰ (T 300–275 °С) указывают на участие магматической серы в рудообразовании.

Изотопные данные кислорода свидетельствуют о том, что при формировании жил магматический флюид смешивался с метеорной водой ($\delta^{18}\text{O}_{\text{флюида}}$ составляет 3.4–6.4 ‰) [Кужугет и др., 2023].

Таким образом, ранне- и среднекембрийское золото-медно-порфировое месторождение Ак-Суг характеризуется закономерностями эволюции минеральных парагенезисов, температур, состава и концентрации флюидов при переходе от медно-порфирового к эпитемальному этапу. Наличие в Ак-Сугском золото-молибден-медно-порфировом рудном узле эпитемального Au-Ag оруденения Биче-Кадыр-Оос свидетельствует о существовании единой порфирово-эпитемальной рудно-магматической системы. Отметим, что наиболее древние представители медно-порфирового типа из-за длительного развития эрозионных процессов обычно не сохраняются и/или значительно эродированы.

Литература

- Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В.* Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 1. С. 63–81.
- Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Хертек А.К. и др.* Золото-молибден-медно-порфирировое месторождение Ак-Суг (Восточный Саян): благороднометалльная минерализация, РТ-параметры и состав рудоносного флюида // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 7. С. 634–661.
- Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O.* Paleozoic-Mesozoic porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) deposits within the southern margin of the Siberian Craton: geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a review) // Minerals. 2016. Vol. 6. Article 125.
- Hou Z., Zhang H., Pan X., Yang Z.* Porphyry Cu(-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust – examples from the eastern Tethyan metallogenic domain // Ore Geology Reviews. 2011. Vol. 39. P. 21–45.
- Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Hertek A.K. et al.* Precious-metal mineralization and formation conditions of the Biche-Kadyr-Oos epithermal Au-Ag ore occurrence (Eastern Sayan, Russia) // Minerals. 2023. Vol. 13. Article 1529.
- 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. P. 1021–1028.
- Richards J.P.* Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes // Nature Geoscience. 2013. Vol. 6. P. 911–916.
- Sillitoe R.H.* Porphyry copper systems // Economic Geology. 2010. Vol. 105. P. 3–41.

С.Ю. Степанов, Р.С. Паламарчук, А.В. Корнеев, М.А. Рассомахин
Южно-Уральский федеральный научный центр
минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия
Stepanov-1@yandex.ru

Самородное золото в различных типах руд Ауэрбаховского рудного узла (Северный Урал)

S.Yu. Stepanov, R.S. Palamarchuk, A.V. Korneev, M.A. Rassomakhin
South Urals Federal Research Center of Mineralogy and
Geoecology UB RAS, Miass, Russia

Native gold in various ore types of the Auerbakhovsky ore district (North Urals)

Abstract. The work considers the main features of gold mineralization in skarn, medium-temperature berezites and listvenites, and low-temperature ore breccias. In all hydrothermal-metasomatic complexes of the Auerbakhovsky ore district, native gold is spatially and genetically associated with sulfides. In most ore assemblages, native gold locally forms large aggregates in vein and ore minerals. The varying chemical composition of native gold indicates a consistent trend of increasing gold potential with a decreasing temperature of the mineral-forming medium. The assemblage of features of gold mineralization indicates a high ore potential of the Auerbakhovsky ore district related to both the identification of new objects and the reassessment of previously known numerous copper and ferrous deposits.