

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553. 411'43:549.281(571.52)

Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва

**Arsenical native copper from Au-Cu porphyry Ak-Sug deposit,
Eastern Tyva**

**Шведов Г. И., Самородский П. Н.,
Макаров В. А., Муромцев Е. А.,
Шадчин М. В., Лобастов Б. М., Глушков Ю. В.**

**Shvedov G. I., Samorodsky P. N., Makarov V. A.,
Muromtsev E. A., Shadchin M. V.,
Lobastov B. M., Glushkov Yu. V.**

Рассмотрено геологическое строение Au-Cu-порфирового месторождения Ак-Суг (Тыва). Изучено распространение в рудах месторождения самородной меди. Установлено, что самородная медь имеет как гипергенное, так и гипогенное происхождение. Охарактеризована гипогенная самородная медь с повышенным содержанием мышьяка (до 4,4 %) в ассоциации с арсенидами меди, самородным серебром, цирконом, браннеритом, ксенотимом-(Y), флоренситом-(Ce), а также халькозином и берцелианитом. Отмечается приуроченность гипогенной самородной меди к зонам рассланцевания руд.

Ключевые слова: Ак-Суг, золото-медно-порфировые месторождения, самородная медь, арсениды меди.

The geology of the Ak-Sug Au-Cu-porphyry deposit in the eastern Tyva is considered. The distribution of native copper in ores of the deposits was studied. It has been established that the native copper is of both hypogene and supergene origin. The hypogene native copper is characterized by an elevated arsenic content (up to 4.4 %) and occurs in association with copper arsenides, native silver, zircon, brannerite, xenotime-(Y), florensite-(Ce), chalcocite, and berzelianite. Hypogene native copper is confined to ore schistosity zones.

Keywords: Ak-Sug, porphyry gold-copper deposits, native copper, copper arsenides.

Для цитирования: Шведов Г. И., Самородский П. Н., Макаров В. А., Муромцев Е. А., Шадчин М. В., Лобастов Б. М., Глушков Ю. В. Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 77–92. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10005.

For citation: Shvedov G. I., Samorodsky P. N., Makarov V. A., Muromtsev E. A., Shadchin M. V., Lobastov B. M., Glushkov Yu. V. Arsenical native copper from Au-Cu porphyry Ak-Sug deposit, Eastern Tyva. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 77–92. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10005.

Введение. Самородная медь как самостоятельный рудный минерал является наиболее распространённым самородным металлом. Исследователи, как правило, уделяют большое внимание проявлениям самородной меди в базальтах и ассоциирующих с ними осадочных породах. Это объясняется, очевидно, тем, что в мире известен и хорошо изучен один район уникальных месторождений самородной меди – Калюмет-Хекла, на южном берегу оз. Верхнее (штат Мичиган, США), где залежи меди сосредоточены на полуострове Кивино. Рудовмещающие породы – миндалекаменные базальты, перемежающиеся с пластами конгломератов, сформированных в среднепротерозойском внутриконтинентальном рифте [13, 17].

Обзор публикаций показывает, что самородная медь встречается в достаточно разнообразных геологических обстановках. В одном из первых подробных обзоров [19] проявления самородной меди описаны не только в базальтах и связанных с ними осадочных породах, но и в основных (Нью-Джерси) и ультраосновных (Италия) интрузивах, осадочных породах (Мичиган, Боливия), в зоне окисления сульфидных месторождений (Нью-Мехико), также известны находки в современных болотах (Монтана). По данным М. И. Новгородовой, самородная медь встречается в метеоритах, лунном реголите, в магматических породах основного, среднего, кислого и щелочного составов, а также в осадочных толщах [12]. В гидротермальных рудах гипогенная медь встречалась, например, в составе ранней рудной ассоциации месторождения Золотая Гора [14]. На этом объекте медь наблюдается в жильчатых телах диопсид-гранатовых пород, залегающих среди серпентинитов, и находится в ассоциации с медистым золотом, халькозином, кальцитом, диопсидом, апатитом, сфеном, магнетитом [8]. В большинстве случаев самородная медь здесь беспримесная, высокой чистоты. Аналогичная чистая медь встречается в слабо минерализованных миндалекаменных диабазах, тогда как в промышленно значимых проявлениях этого же типа она часто содержит примесь мышьяка. Медь с примесью

мышьяка до нескольких процентов распространена и в скарновых месторождениях [12].

В то же время необходимо отметить недостаточную освещённость вопросов, касающихся условий образования самородной меди в месторождениях медно-порфировой рудной формации. К месторождениям порфирового типа в последние годы проявляют интерес ведущие горнодобывающие компании мира. Такие месторождения – комплексные, большого объёма – обеспечивают более 60 % мировой добычи меди, около 15 % золота и основной объём производства молибдена. Изучение особенностей нахождения и формирования самородной меди на данных объектах не только решает вопросы условий формирования медной минерализации, но и является важным направлением с точки зрения отработки эффективных схем извлечения меди из руд, а также решения вопросов снижения содержания мышьяка в медном концентрате.

Материал статьи подготовлен в рамках выполнения работ по гранту РФФИ по теме «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения, как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции». Здесь, при изучении минералого-геохимической зональности месторождения, авторами была выявлена и охарактеризована мышьяксодержащая самородная медь, локализованная преимущественно в западной и северо-западной частях рудной зоны.

Геологическое строение. Ак-Сугское месторождение располагается в пределах южного склона Восточного Саяна и входит в состав Ак-Сугского рудного узла, который локализован на сопряжении двух крупных тектонических структур Алтае-Саянской складчатой области: Восточно-Тувинской и Кизир-Казырской складчатых систем, естественной границей между которыми является крупный региональный Кандатский разлом.

Месторождение приурочено к многофазному Ак-Сугскому массиву кембрийского возраста [1], определяющему основные черты его геологического строения (рис. 1). Породы Ак-Сугского массива и одноимённого интрузивного комплекса развиты на значительной части

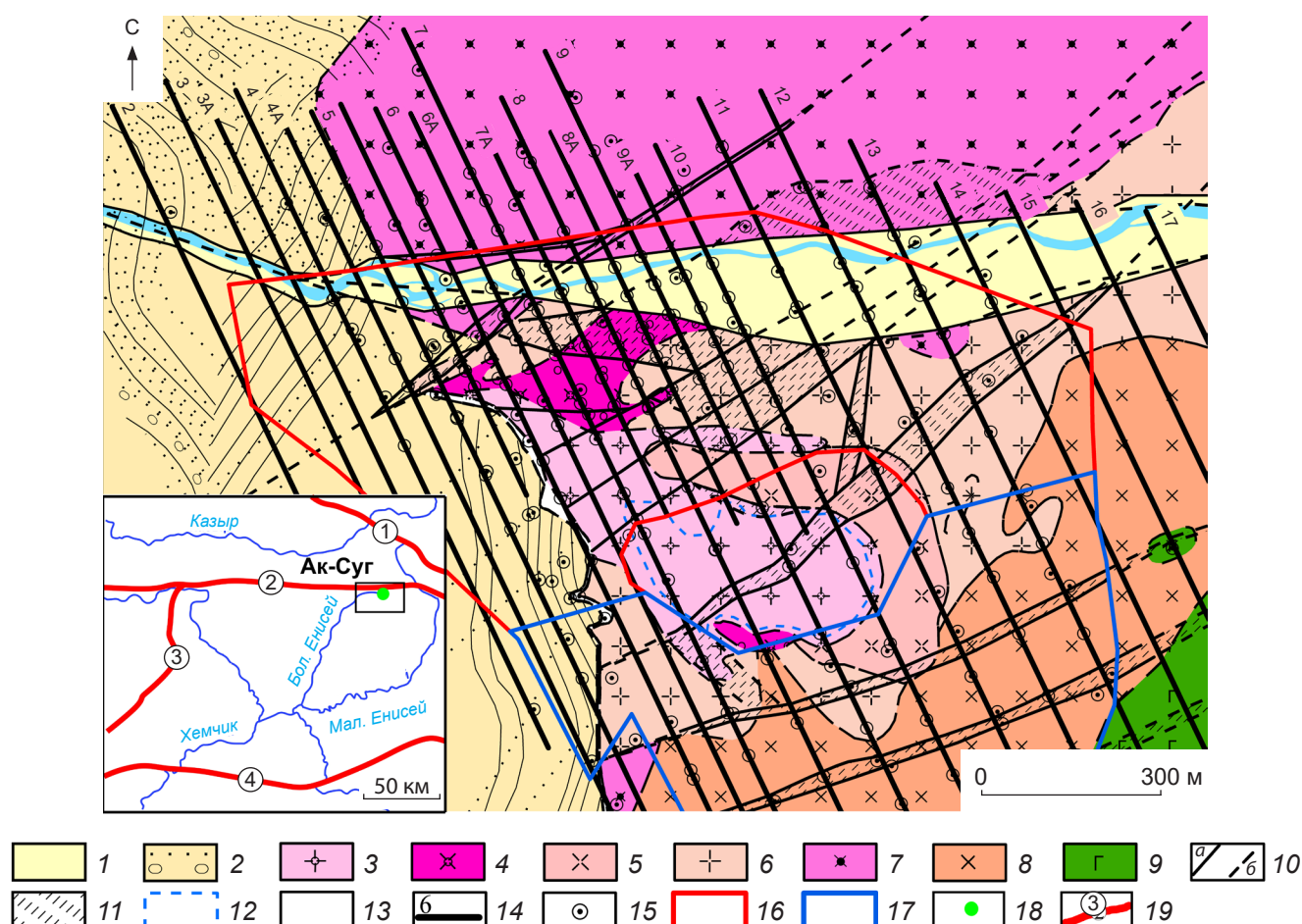


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Ак-Суг, по материалам разведочных работ (Ю. В. Глушков, 2014):

1 – современные аллювиальные отложения; 2 – толтаковская свита среднего девона (красноцветные туфопесчаники, туфоконгломераты); гранитоиды Ак-Сугского массива: 3 – плагิโอгранит-порфиры, 4 – тоналит-порфиры, 5 – тоналиты порфировидные, 6 – тоналиты, плагิโอграниты слабопорфировидные, 7 – безрудные, метасоматически изменённые тоналиты, 8 – кварцевые диориты, тоналиты, 9 – диориты, габбродиориты; 10 – тектонические нарушения достоверные (а), предполагаемые (б); 11 – зоны смятия, дробления, расщепления; 12 – «кварцевое ядро»; 13 – милониты; 14 – разведочные линии, их номера; 15 – скважины; 16 – контур Северной рудной залежи; 17 – контур Южной рудной залежи; на врезке: 18 – месторождение Ак-Суг; 19 – региональные разломы, их номера: 1 – Восточно-Саянский, 2 – Кандатский, 3 – Куртушибинский, 4 – Хемчикско-Азасский

Fig. 1. Geological map of Ak-Sug deposit, based on exploration data (Yu. V. Glushkov, 2014):

1 – recent alluvial deposits; 2 – Middle Devonian Toltakovskaya suite (redbed tuff sandstones, tuff conglomerates); Ak-Sug massif granitoids: 3 – plagiogranite porphyries, 4 – tonalite porphyries, 5 – porphyry-like tonalites, 6 – tonalites, poorly porphyritic plagiogranites, 7 – metasomatically altered barren tonalites, 8 – quartz diorites, tonalites, 9 – diorites, gabbrodiorites; 10 – tectonic deformations: actual (a), inferred (b); 11 – crumple, crush, schistosity zones; 12 – “quartz core”; 13 – milonites; 14 – prospecting lines, their numbers; 15 – drillholes; 16 – contour of Severnaya orebody; 17 – contour of Yuzhnaya orebody; inset: 18 – Ak-Sug deposit; 19 – regional faults, their numbers: 1 – Vostochno-Sayansky, 2 – Kandatsky, 3 – Kurtushibinsky, 4 – Khemchiksky-Azassky

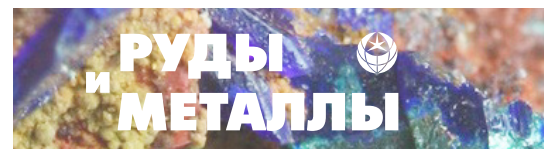
площади рудного поля. Предполагается, что они сформировались последовательно, в несколько фаз, образовав при этом обычный гомодромный ряд от диоритов и габбро по южной периферии массива до плагиогранитов и кварц-плагиоклазовых порфиров в его центральной части. Ак-Сугский массив имеет клиновидную форму, вытянут в северо-западном направлении. С севера он ограничен зоной Кандатского глубинного разлома, на востоке и юго-востоке также по зоне дробления контактирует с эффузивами хамсаринской свиты и гранодиоритами таннуольского комплекса. Южная и западная границы – тектонические с красноцветными девонскими отложениями (вулканогенно-осадочные породы толтаковской свиты) [6, 7, 10].

Структура месторождения определяется позицией и морфологией Ак-Сугского интрузивного массива, контролирующего пространственное размещение околорудных и рудовмещающих метасоматитов, а также рудной минерализации. Интрузивный массив располагается вблизи стыка двух региональных разломов – Ак-Сугского и Челдезрикского. Ак-Сугский разлом ограничивает рудоносную интрузию с севера, имеет близширотное простирание и является ветвью Кандатского глубинного разлома. Челдезрикский разлом ориентирован северо-западно, следует вдоль северного борта Даштыгойского грабена, в значительной мере определяя морфологию последнего. Даштыгойский грабен прослеживается в меридиональном и северо-западном направлении более чем на 35 км при ширине 2,5–5 км и выполнен осадочно-вулканогенными девонскими породами (песчаники – 20 %, гравелиты, конгломераты – 30 %, вулканиты кислого состава – 30 %, алевролиты и аргиллиты – 20 %). Месторождение Ак-Суг соприкасается с грабеном по тектоническому нарушению. Зона Ак-Сугского разлома выражена мощной полосой дробления, интенсивной трещиноватости и расщепления пород (до нескольких сотен метров). В пределах месторождения она проявлена отрицательными формами рельефа – долиной р. Ак-Суг, а на глубине подсечена многими скважинами. В

скважинах зона разлома прослеживается интервалами развальцевания пород (до тектонической глинки) с частыми кавернами, заполненными сыпучим мелкозернистым материалом, преимущественно кварц-полевошпатового состава. Мощность тектонически нарушенных интервалов – от первых метров до десятков метров.

Зоны развальцевания и дробления имеют западно-юго-западное простирание и преимущественно крутое (70–85°) падение на север, являясь таким образом многочисленными мелкими ответвлениями основной структуры широтного простирания. Зона дробления и смятия пород сопровождается широкой полосой трещиноватости, охватывающей практически всё рудное поле месторождения. При этом среди систем трещиноватости самой различной ориентировки преобладает юго-западная при крутом падении на северо-запад или юго-восток. Наблюдаются и пологопадающие трещины, но они распространены в меньшей степени. Наибольшая густота трещин отмечается в пределах Северной рудной залежи и в центральной части месторождения («кварцевое ядро»). Количество трещин при этом составляет от 7–10 до 50–70 на один погонный метр. К югу от «кварцевого ядра» интенсивность трещиноватости уменьшается в два-три раза. Преобладающее юго-западное направление простирания трещиноватости характерно не только для всех пород интрузии, но для красноцветных отложений к западу от месторождения.

В целом метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется с типовой зональностью метасоматической колонны медно-порфировых объектов, имеющей вид (от центра к периферии): «кварцевое ядро» → кварцевые, серицит-кварцевые 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 непосредственным 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 аргиллизированных породах, образованных, прежде всего, за счёт порфировых интрузий. Оруденение Ак-Сугского месторождения представлено прожилковыми и прожилково-вкрапленными рудами [6].

Особенностью Ак-Сугского месторождения является отсутствие калиевых метасоматитов с ортоклазом и биотитом, обычно приуроченных к внутренней зоне. Вместе с тем в рудном поле в качестве внешнего ореола развиты ранние кварц-калшпатовые прожилки с халькопиритом и пиритом в диоритах, кварцевых диоритах и гранодиоритах, то есть в породах первой фазы. Вероятно, отсутствие широкого проявления калиевого метасоматоза может быть объяснено натровым уклоном магматизма при становлении Ак-Сугской интрузии.

Установлено, что в процессе становления Ак-Сугского интрузивного массива отделение восходящих флюидов было неоднократным, что и привело вначале к формированию связанной с ранней фазой обширной зоны пропитализации, а затем – зон кварц-серицитового, кварцевого метасоматоза и аргиллизации, обусловленных внедрением более кислых по составу поздних фаз. Большая часть промышленного молибденово-медного оруденения образовалась вслед за внедрением порфиров ранней генерации. С поздней фазой порфиров, по-видимому, связано переотложение ранее образовавшихся руд и формирование богатых скоплений в виде крутопадающей пластинообразной залежи, ориентированной в широтном направлении в трещинной зоне Ак-Сугского разлома (Северная рудная залежь).

Поздняя фаза была рудоносной в меньшей степени, чем первая, и сопровождалась интенсивным окварцеванием, что привело к образованию в центральной части месторождения «кварцевого ядра». К северу от него развита кварц-серицитовая зона с богатыми молиб-

деново-медными рудами, затем следует пропитовая с преимущественно прожилковой минерализацией пирита. Гипогенные минеральные ассоциации отложились на месторождении минимум в восемь стадий, разделённых катаклазом [7]: 1) пирит-кварцевая (кварц, пирит, магнетит, гематит, ферберит); 2) сульфидно-карбонат-кварцевая (кварц, кальцит, калиевый полевоый шпат, пирит, халькопирит, борнит, теннантит); 3) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая (кварц, халькопирит, теннантит, молибденит, пирит, галенит, сфалерит); 4) золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая (кварц, борнит, халькопирит, пирит, галенит, барит, золото); 5) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая (кварц, халькопирит, борнит, пирит, теннантит-тетраэдрит, галенит-клаусталит, алтаит, гессит, петцит, золото, калаверит, креннерит, сильванит, эмпрессит, штюцит, мутманнит, меренскиит, арсенопалладинит, сопчеит, темагамит, самородный теллур, барит, молибденит, кобальтин, энаргит); 6) золото-пирит-халькопирит-блэкклорудно-кварцевая (кварц, теннантит-тетраэдрит, халькопирит, пирит, галенит-клаусталит, борнит, касситерит, энаргит, науманнит, барит, ангидрит, сфалерит, золото и электрум); 7) золото-висмут-теллуридно-сульфидно-кварцевая (кварц, халькопирит, пирит, борнит, висмутсодержащий теннантит, золото, гессит, петцит, цумоит, кавацулит, тетрадимит, виттихенит, айкинит и барит); 8) кварц-карбонатная (кварц, кальцит, анкерит, барит, ангидрит).

Рудный процесс завершился формированием ангидрит-гипсовых прожилков.

В целом представляется, что образование многофазной гранитоидной интрузии и связанного с ней оруденения на месторождении Ак-Суг происходило длительное время, поскольку породы ранних фаз интрузии обнаруживаются в гальке отложений ниже-среднедевонского возраста, а процесс аргиллизации наложен на последние.

В формировании минералого-геохимической зональности месторождения принимают участие многочисленные метасоматические процессы, взаимоотношение которых создаёт

сложную рудно-метасоматическую структуру, определяющую сложное строение месторождения Ак-Суг.

Методика исследований. Изучалась коллекция прозрачных и полированных шлифов руд и вмещающих пород, переданная геологической службой ООО «Тывамедь». Для повышения качества наблюдений полированные шлифы были подвергнуты переполровке.

Методы исследования руд Ак-Сугского месторождения включали петрографическое изучение прозрачных шлифов (микроскоп Axioskop 40APOL) и минераграфическое – полированных шлифов (микроскоп Olympus BX 51) с последующим определением химического состава минералов. Для этого применялся сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega3 SBH с ЭДС анализатором OxfordX-Act (R&D Центр НН СФУ, г. Красноярск, аналитики С. А. Сильянов и Б. М. Лобастов). При работе на сканирующем микроскопе выполнялись следующие условия: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда 2,3 нА (на чаше Фарадея); время съёмки – 120 с. Накопление спектров производилось из точки до шкалы в 300 тыс. импульсов. При анализе использованы образцы химически чистых элементов и соединений стандартов MAC (Micro-Analysis Consultants Ltd, Великобритания, рег. № 11192): Ti, Fe, V, Zr, Y, GaP (P), SrF₂ (Sr), LaB₆ (La), CeO₂ (Ce), NaCl (Cl), CaF₂ (F), SiO₂ (Si), Al₂O₃ (Al), MgO (Mg), CaF₂ и волластонит (Ca).

Для элементов S (Ka), Fe (Ka), Co (Ka), Ni (Ka), Cu (Ka), Zn (Ka), As (La), Sb (La) и Pb (Ma) в качестве стандартов использовались чистые металлы (Co, Ni) и следующие соединения: FeS, FeS₂, FeAsS, ZnS, CuFeS₂, Sb₂S₃, PbTe.

Измерение тока зонда производилось на стандарте металлического кобальта MAC (рег. № 9941) через каждые 60 минут исследования. Обработка результатов проводилась с помощью ПО Oxford Instruments.

Самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг. По данным документации керн скважин, самородная медь была обнаружена в скважинах 3г-1, 4а-1, 4а-2, 4-3, 4-4, 5а-2-1, 5а-3, 5а-4, 5г-1, 5-4, 11-2 на глубинах от 32,0 до 386,0 м (запад и северо-за-

пад месторождения) (рис. 2). В ходе изучения представленной коллекции прозрачных и полированных шлифов авторами статьи самородная медь подтверждена в скважинах 3г-1, 5г-1 и 5-4.

В изученных образцах самородная медь тяготеет к карбонатно-кварцевым прожилкам, образуя прожилковидные, амёбовидные выделения и рассеянную вкрапленность. При этом крупные частицы амёбовидной (до первых мм) и прожилковой (до нескольких см по удлинению при мощности до первых мм) форм, как правило, окружены пылевидными и мелкими ((0,001–0,002)–(0,05–0,1) мм) частицами меди округлой и неправильной форм.

Интересная особенность, отмеченная в ходе изучения руд месторождения, – значительное сокращение количества сульфидных минералов при появлении самородной меди. Как правило, выделения самородной меди не сопровождаются сульфидной минерализацией. Исключение – образец, отобранный из скважины 5-4 с глубины 263,1 м, содержащий небольшое (менее одного процента от объёма) количество борнита. Вторичные минералы меди (куприт, азурит, малахит) встречаются до глубины 160 м, как правило, в небольшом количестве (менее 1 %), кроме образца из скважины 5г-1 (глубина отбора 122,3 м), в котором самородная медь подверглась существенному (местами полному) замещению купритом, развивающимся в виде кайм, и малахитом. В то же время из регулярно встречающихся минералов-спутников, диагностируемых в отражённом свете, отмечены гематит и рутил.

Вмещающие кварц-карбонатные прожилки с самородной медью (образцы 3г-1-132,0; 5-4-154,0; 5-4-172,5; 5-4-263,1; 5-4-356,0) породы – метасоматически изменённые плагиогранит-порфиры, тоналиты и плагиограниты. По результатам изучения прозрачных шлифов на данных интервалах самородная медь встречается, как правило, в интенсивно расслаиваемых породах. При этом отдельные порфироокласты кварца и фрагменты кварцевых прожилков «плавают» в массе серицита. Часто отмечается наложенная карбонатизация. В скважине 5-4 (интервал 356,0 м) медь от-

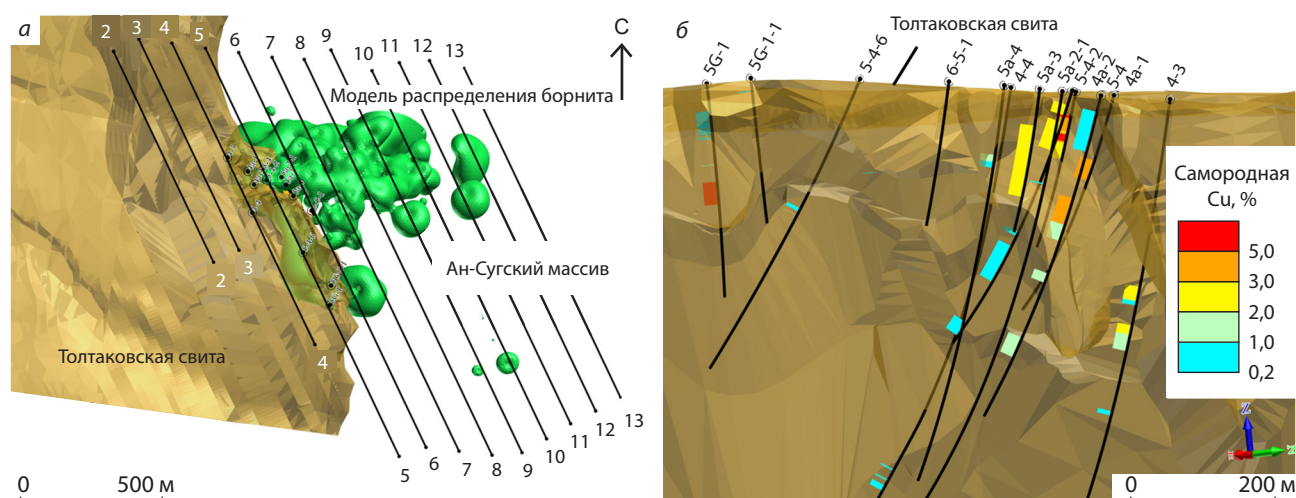


Рис. 2. Характер распределения борнита и самородной меди на месторождении Ак-Суг:

a – объёмная модель распределения борнита в границах содержания минерала более 0,3 % (проекция на план); *б* – интервалы с самородной медью в скважинах на границе Ак-Сугского массива и толтаковской свиты девона, по материалам разведочных работ (Ю. В. Глушков, 2014) (проекция скважин на вертикальную плоскость по разведочной линии 5-5)

Fig. 2. Distribution pattern of bornite and native copper at Ak-Sug deposit:

a – 3D bornite distribution model within mineral content limits of over 0.3 % (plan projection); *b* – native copper intervals in drillholes at the boundary between Ak-Sug massif and Devonian Toltakovskaya suite, based on exploration data (Yu. V. Glushkov, 2014) (hole projection on a vertical plane along prospecting line 5-5)

мечена в частично раздробленном и карбонатизированном прожилке. Минерал в виде рассеянной неравномерно вкрапленности отмечается вдоль всего прожилка (зёрна размером 0,005–1,5 мм, зёрна менее 0,05 мм имеют преимущественно изометрическую или слабо удлиненную форму, более крупные – амёбовидную). Судя по морфологии и взаимоотношениям минералов, формирование меди происходило близкоодновременно с процессом карбонатизации.

Учитывая незначительную мощность зоны окисления Ак-Сугского месторождения, наличие самородной меди как в приповерхностной части, так и на глубоких его горизонтах может свидетельствовать о различных механизмах её формирования.

Самородная медь в скважине 5г-1 в интервалах 62,2, 122,3 и 159,1 м представляет собой, вероятно, гипергенную медь. Самородная медь

здесь образует мелкие, неправильной формы выделения, тонкие, переплетающиеся прожилки, а также замещается и обрастает купритом, малахитом и ассоциирует с гидроокислами железа. По химическому составу эта медь является чистой и не содержит примесей.

По результатам электронно-микроскопического изучения медь, обнаруженная в составе скважины 5-4 (интервал 154,0 м), имеет беспримесный состав и тесно срастается с рутилом, цирконом и фторапатитом (рис. 3; табл. 1).

Самородная медь в этой же скважине, на интервале 263,1 м, содержит примесь мышьяка в количестве от 2,35 до 4,5 мас. % и активно замещается арсенидами меди – альгодонитом и домейкитом. Отметим, что в этом образце медь также наблюдается в составе тонкого (2–4 мм) кварц-карбонатного (кварц, кальцит, доломит) прожилка и находится в весьма тесном

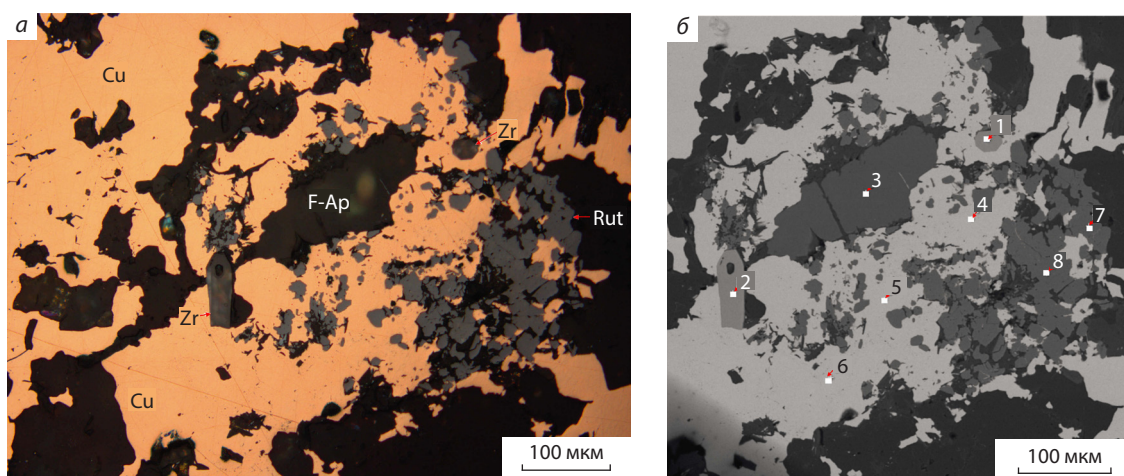


Рис. 3. Самородная медь в сростании с цирконом, F-апатитом и рутилом. Образец 5-4-154,0 в отражённом свете (а), в обратнорассеянных электронах (б):

Cu – самородная медь; Zr – циркон; F-Ap – фторапатит; Rut – рутил; номера точек анализов см. табл. 1

Fig. 3. Native copper intergrown with zircon, F-apatite and rutile. Sample 5-4-154,0 in reflected light (a), in backscattered electrons (b):

Cu – native copper, Zr – zircon, F-Ap – F-apatite; Rut – rutile; see Table 1 for analysis point numbers

1. Химический состав самородной меди и срощивающихся с ней минералов (образец 5-4-154,0)

1. Chemical composition of native copper and intergrown minerals (sample 5-4-154,0)

№ анализа	Содержания элементов, мас. %									Сумма	Минерал
	O	F	Si	P	Cl	Ca	Ti	Cu	Zr		
1	36,11	-	14,49	-	-	-	-	-	51,14	101,74	Циркон
2	35,96	-	14,47	-	-	-	-	-	51,49	101,92	Циркон
3	26,66	3,05	-	19,48	0,39	37,85	-	-	-	97,43	F-апатит
4	-	-	-	-	-	-	-	99,69	-	99,69	Медь
5	-	-	-	-	-	-	-	98,10	-	98,10	Медь
6	-	-	-	-	-	-	-	99,52	-	99,52	Медь
7	41,47	-	-	-	-	-	59,10	-	-	100,56	Рутил
8	41,37	-	-	-	-	-	58,71	-	-	100,08	Рутил

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 3, б.

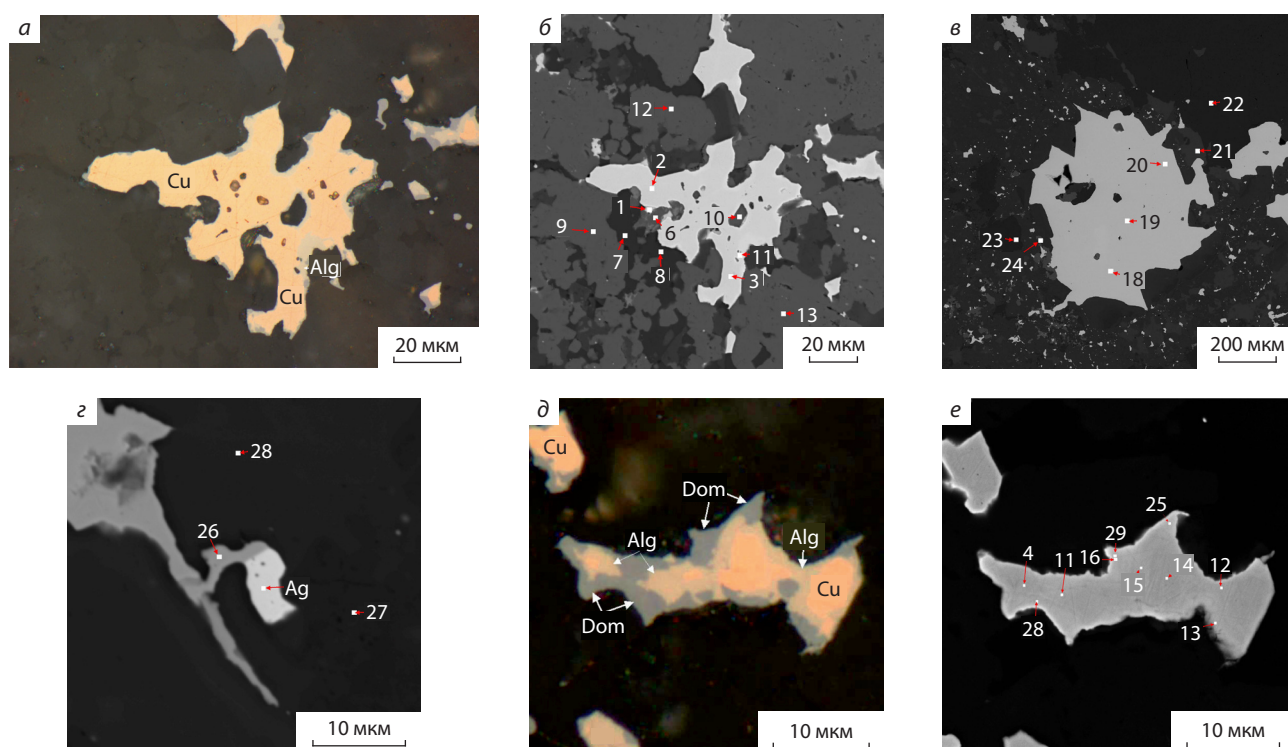


Рис. 4. Зёрна и агрегаты мышьяксо­дер­жающей самородной меди. Образец 5-4-263,1 в отражённом свете (а), в обратнорассеянных электронах (б–е):

Cu – самородная медь; Alg – альгодонит; Ag – серебро; Dom – домейкит; номера точек анализов см. табл. 2, 3

Fig. 4. Grains and aggregates of arsenical native copper. Sample 5-4-263,1 in reflected light (a), in backscattered electrons (b-d):

Cu – native copper; Alg – alga­donite; Ag – silver; Dom – domey­kite; see Tables 2, 3 for analysis point numbers

2. Химический состав мышьяк­со­дер­жающей самородной меди (образец 5-4-263,1)

2. Chemical composition of arsenical native copper (sample 5-4-263,1)

№ анализа	№ при­сунка	Содержания элементов, мас. %			Сумма
		Fe	Cu	As	
2	4, б	-	97,51	2,55	100,07
3	4, б	-	97,63	2,35	99,98
14	4, е	-	96,56	2,48	99,04
18	4, в	-	97,04	4,31	101,35
19	4, в	-	98,00	2,87	100,87
20	4, в	-	97,63	3,87	101,50
26	4, г	0,88	94,02	4,40	99,29

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 4, б–е.

срастании с многочисленными зёрнами и кристаллами фторапатита и зёрнами барита (рис. 4; табл. 2, 3).

Интересно, что кроме указанных минералов в срастании и в ассоциации с мышьяк­со­дер­жающей самородной медью обнаружены мелкие зёрна самородного серебра, циркона, браннерита $U(Ti,Fe)_2O_6$, ксенотима-(Y) $(Y,Dy,Gd,Er,U,Tb)PO_4$ и флоренсита-(Ce) $(Sr,Ce,La,Nd)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$. В этих же прожилках обнаружены селен­со­дер­жащий халькозин и берцелианит (Cu_2Se) . Последний характерен для низко-

температурных гидротермальных месторождений урана [15].

Альгодонит Cu_6As и домейкит Cu_3As относятся к редким минералам месторождения Ак-Суг. Выделены и диагностированы в составе скважины 5-4 на интервале 263,1 м как фазы, обрастающие по краям и замещающие агрегаты мышьяксодержащей самородной меди (см. рис. 4 д, е; табл. 4).

В целом оба минерала являются редкими, малораспространёнными фазами. Ещё более редкий минерал – коутекит Cu_5As_2 , также обнаруженный в составе аншлифа 5-4-263,1 и представленный самостоятельными зёрнами размером до $0,016 \times 0,020$ мм (рис. 5; табл. 5).

Обсуждение результатов. Известно, что гипогенная медь гидротермального происхождения ассоциирует с халькозином, арсенидами меди, карбонатами. Медь гипергенного происхождения находится в ассоциации с купритом, гидрооксидами железа и гидрокарбонатами меди.

На золото-медно-порфировых месторождениях самородная медь отмечалась в основном только в зонах окисления как гипергенный минерал [5, 9, 10, 16]. На Ак-Сугском месторождении самородная медь в виде ксеноморфных вкрапленников размером до нескольких сантиметров и прожилками мощностью до нескольких миллиметров была обнаружена в туфопесчаниках толтаковской свиты D1(?)tl [10]. Источник меди и её генезис не обсуждался. Априори считалось, что вся самородная медь месторождения является гипергенной.

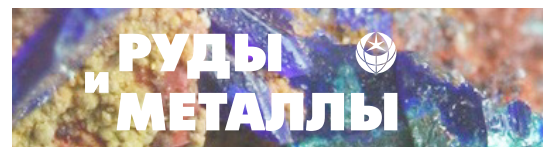
Обнаружение авторами данной статьи мышьяковистой меди, замещающейся редкими арсенидами меди (альгодонит, домейкит, коутекит) на значительных глубинах и в составе кварц-карбонатных прожилков, позволяет по-новому взглянуть на происхождение части самородной меди месторождения Ак-Суг. Содержание мышьяка в меди изученных образцов варьирует от 0,0 до 34,5 мас. % (рис. 6).

По экспериментальным данным, растворимость мышьяка в меди составляет 6,83 ат. % при эвтектической температуре 685°C , примерно 6,5 ат. % при температуре перитектоидного превращения и около 5,1 ат. % при 25°C

[4]. Обнаруженная авторами фаза-1 (см. рис. 6) с подобными содержаниями мышьяка может быть отнесена к самородной меди с незначительной примесью мышьяка или к минералу витнеиту, имеющему состав (Cu,As) , однако этот вопрос может быть решён однозначно только на основе рентгеноструктурных исследований. Вторая фаза (фаза-2), содержащая в своём составе 15–16 мас. % мышьяка, является, по всей видимости, альгодонитом с теоретической формулой Cu_6As или Cu_8As (см. табл. 4) [15]. По данным справочной литературы, синтетическая фаза (фаза β , см. рис. 6), аналогичная по составу этому минералу, устойчива ниже 325°C . Третий состав (фаза-3) с содержанием мышьяка 19–20 ат. % согласно диаграмме состояния является гетерогенным и также может существовать ниже 325°C . Четвёртая обнаруженная фаза (фаза-4) (см. рис. 6) с содержаниями мышьяка 27–31 мас. % (см. табл. 4) удовлетворительно пересчитывается на кубический минерал α -домейкит состава Cu_3As . Синтетическая кубическая фаза, соответствующая α -домейкиту, устойчива ниже 225°C и 100 МПа [15]. Согласно Скиннеру и Льюису, α -домейкит устойчив вообще ниже 90°C [24]. Наконец, пятая обнаруженная фаза (фаза-5) (см. рис. 6) с содержаниями мышьяка 31,5–34,5 мас. % (см. табл. 5) вполне соответствует минералу коутекиту. Гексагональный коутекит, в свою очередь, отвечает синтетической фазе Cu_2As , устойчивой ниже 300°C , которая образуется при эвтектоидном распаде высокотемпературной тетрагональной γ -фазы Cu_5As_2 [15].

При этом известно, что формирование домейкита и альгодонита связано с гидротермальными процессами [20, 21]. Таким образом, изученные фазы состава медь–мышьяк Ак-Сугского месторождения могли формироваться в низкотемпературном интервале от 225 до 300°C .

Образование самородной меди в зоне гипергенеза связано с увеличением окислительного потенциала и связыванием железа и серы соответственно в оксидной и сульфатной формах. При этом также возникают сульфиды меди с пониженным содержанием Fe и



3. Химические составы минералов, ассоциирующих с мышьяксодержащей самородной медью (образец 5-4-263,1)

3. Chemical compositions of minerals associated with arsenical native copper (sample 5-4-263,1)

№ анализа	№ рисунка	Содержания элементов, мас. %												
		O	F	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ca	Mn	Fe	Sr	Ba
1	4, б	29,6	-	-	-	-	-	15,1	-	-	-	-	6,76	50,17
6	4, б	40,68	4,69	-	0,75	-	18,96	0,27	-	37,31	-	-	-	-
7	4, б	50,59	-	-	-	46,48	-	-	-	1,07	-	-	-	-
8	4, б	49,54	-	-	-	46,65	-	-	-	-	-	-	-	-
9	4, б	36,23	4,87	-	-	-	19,98	-	-	38,51	-	-	-	-
10	4, б	39,26	5,11	-	-	-	19,42	-	-	38,73	-	-	-	-
12	4, б	38,43	3,92	-	-	-	20,48	-	-	40,04	-	-	-	-
13	4, б	36,55	5,49	-	-	-	20,16	-	-	40,23	-	-	-	-
21	4, в	52,22	-	-	-	-	-	-	-	47,79	-	-	-	-
22	4, в	49,78	-	-	-	47,69	-	-	-	-	-	-	-	-
23	4, в	51,11	-	-	-	49,29	-	-	-	-	-	-	-	-
24	4, в	36,56	6,68	-	-	-	17,94	-	0,12	40,15	-	-	-	-
27	4, г	54,33	-	14,33	-	-	-	-	-	27,27	0,77	3,27	-	-
28	4, г	53,49	-	12,33	-	-	-	-	-	26,24	1,19	6,72	-	-

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 4, б–г. Номерам анализов соответствуют следующие минералы: 1 – барит; 6, 9, 10, 12, 13, 24 – F-апатит; 7, 8, 22, 23 – кварц; 21 – кальцит; 27, 28 – доломит.

4. Химический состав арсенидов меди, обрастающих и замещающих самородную медь (образец 5-4-263,1)

4. Chemical composition of copper arsenides overgrowing and replacing native copper (sample 5-4-263,1)

№ анализа	Содержания элементов, мас. %			Сумма	Минерал	Кристаллохимическая формула
	Fe	Cu	As			
4	-	84,37	15,63	100,00	Альгодонит	$\text{Cu}_{6,05}\text{As}_{0,95}$
11	0,49	85,18	15,94	101,61	Альгодонит	$(\text{Cu}_{6,01}\text{Fe}_{0,04})_{6,05}\text{As}_{0,95}$
12	-	84,10	15,74	99,84	Альгодонит	$\text{Cu}_{6,04}\text{As}_{0,96}$
13	-	83,34	16,11	99,45	Альгодонит	$\text{Cu}_{6,01}\text{As}_{0,99}$
15	0,49	81,20	19,08	100,78	Альгодонит	$(\text{Cu}_{5,80}\text{Fe}_{0,04})_{5,84}\text{As}_{1,16}$
16	0,54	69,63	31,12	101,30	Домейкит	$(\text{Cu}_{2,88}\text{Fe}_{0,03})_{2,91}\text{As}_{1,09}$
25	-	68,66	29,0	97,67	Домейкит	$\text{Cu}_{2,94}\text{As}_{1,06}$
28	-	70,4	26,9	97,30	Домейкит	$\text{Cu}_{3,02}\text{As}_{0,98}$
29	-	67,73	28,65	96,37	Домейкит	$\text{Cu}_{2,94}\text{As}_{1,06}$

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 4, е.

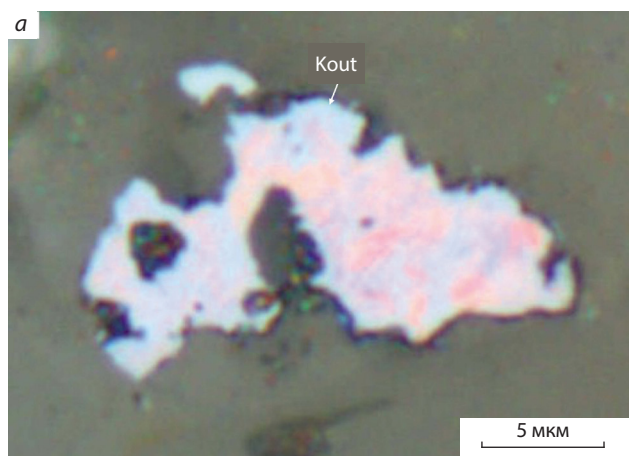
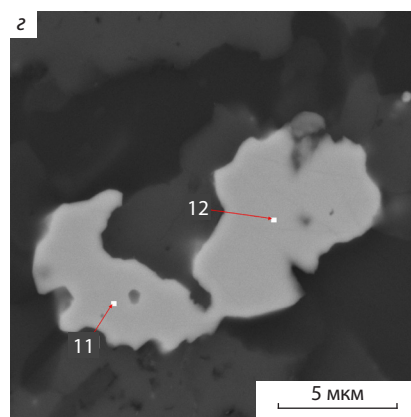
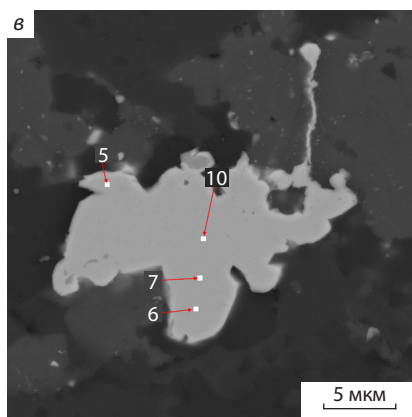
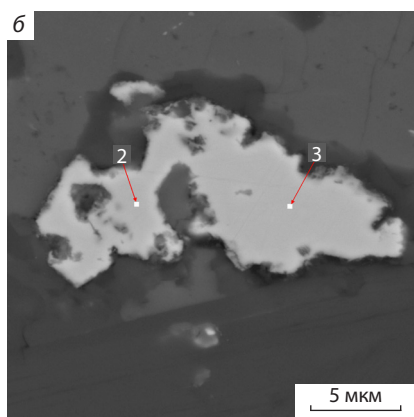


Рис. 5. Зёрна коутекита. Образец 5-4-263,1 в отражённом свете (а), в обратнорассеянных электронах (б–д):

Kout – коутекит; номера точек анализов см. табл. 5

Fig. 5. Koutekite grains. Sample 5-4-263,1 in reflected light (a), in backscattered electrons (b–d)

Kout – koutekite; see Table 5 for analysis point numbers



5. Химический состав коутекита месторождения Ак-Суг (образец 5-4-263,1)

5. Chemical composition of Ak-Sug deposit koutekite (sample 5-4-263,1)

№ анализа	№ рисунка	Содержания элементов, мас. %			Сумма	Кристаллохимическая формула
		Cu	As	Fe		
2	5, б	65,96	34,38	0,52	100,86	$(\text{Cu}_{4,83}\text{Fe}_{0,04})_{4,87}\text{As}_{2,13}$
3	5, б	66,05	34,53	0,32	100,90	$(\text{Cu}_{4,83}\text{Fe}_{0,03})_{4,86}\text{As}_{2,14}$
5	5, в	68,99	30,76	-	98,94	$\text{Cu}_{5,08}\text{As}_{1,92}$
6	5, в	68,85	30,72	0,43	100,00	$(\text{Cu}_{5,05}\text{Fe}_{0,04})_{5,09}\text{As}_{1,91}$
7	5, в	70,3	31,56	0,28	102,14	$(\text{Cu}_{5,05}\text{Fe}_{0,02})_{5,07}\text{As}_{1,93}$
10	5, в	69,72	31,37	-	101,09	$\text{Cu}_{5,07}\text{As}_{1,93}$
11	5, д	67,09	32,14	-	99,23	$\text{Cu}_{4,98}\text{As}_{2,02}$
12	5, д	67,92	32,08	-	100,00	$\text{Cu}_{5,00}\text{As}_{2,00}$

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 5, б–д.

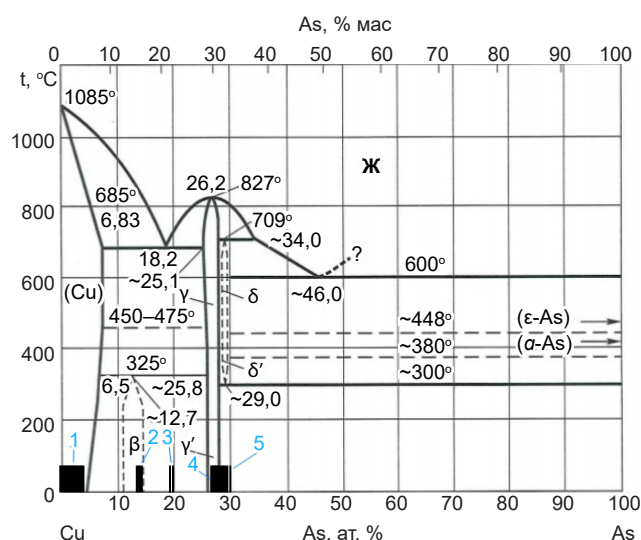


Рис. 6. Диаграмма состояния системы Cu-As по [4] с участками составов арсенидов меди Ак-Сугского месторождения (фазы 1–5 – чёрные прямоугольники)

Fig. 6. Diagram of Cu-As system state after [4] with areas of copper arsenide composition, Ak-Sug deposit (black rectangles)

безжелезистые: борнит, халькозин, ковеллин [22].

Известно также, что в образовании гипогенной медной минерализации на медно-порфировых объектах участвуют сложные высококонцентрированные растворы, имеющие хлоридно-сульфатный состав и высокие концентрации солевых компонентов [3]. В этих условиях медь подвижна, поэтому для образования самородной необходимо её выпадение из хлоридного комплекса в условиях восстановительной среды и при отсутствии сульфидной серы [18]. Осаждению меди из раствора будут способствовать повышенные содержания фтора, а также слабощелочная среда [18]. Именно эти условия создались в исследованных кварц-карбонатных прожилках, где кроме самородной меди и арсенидов меди в большом количестве проявились фторапатит, браннерит и редкоземельные минералы (ксенотим-(Y), флоренсит-(Ce) и др.). Находки домейкита

и коутекита в низкотемпературных песчаниках с урановой минерализацией Индии и Казахстана были описаны в литературе давно [2, 23].

Возможно также, что гипогенная самородная медь Ак-Сугского месторождения возникла в ходе послерудного метаморфизма при дефиците серы и высокой активности мышьяка за счёт преобразования мышьяксодержащих медных сульфидов (теннантита, энаргита и других). Обнаружение в ассоциации с мышьяксодержащей самородной медью браннерита, ксенотима-(Y) и флоренсита-(Ce) не исключает также наложение на ранние руды более поздних магматических пород массива щелочных гранитов арысканского комплекса, проявленного на Арысканском месторождении редких земель, расположенном в 12 км к северо-востоку от Ак-Суга, где оруденение представлено редкоземельной и уран-мышьяковой минерализацией [11]. Выявление источника редкоземельных элементов на Ак-Сугском месторождении и анализ их связи с редкоземельной минерализацией Арысканского месторождения требует отдельного самостоятельного исследования.

Выводы:

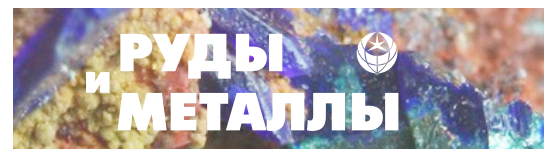
1. На месторождении Ак-Суг присутствует два типа самородной меди: гипергенная, ассоциирующая с гидроокислами железа, с оксидами и гидрокарбонатами меди (купритом, малахитом и т. д.), и гипогенная медь. Гипогенная медь находится в составе кварц-карбонатных прожилков, содержит значительные количества мышьяка, замещается редкими арсенидами меди и ассоциирует с баритом, фторапатитом, цирконом, браннеритом, ксенотимом-(Y), флоренситом-(Ce), берцелианитом.

2. Формирование гипогенной самородной меди может быть связано с восходящими низкотемпературными метаморфогенными флюидами. Миграция флюидов осуществлялась по зоне рассланцевания Ак-Сугского разлома.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и Акционерного общества «Корпорация развития Енисейской Сибири» в рамках научного проекта № 20-45-242903.

Список литературы

1. Берзина А. Н., Берзина А. П., Гимон В. О. Cu-Мо-порфириновое месторождение Аксуг (Северо-Восточная Тува): хронология процессов магматизма и рудообразования (U-Pb, Re-Os изотопные данные), металлогенические следствия // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60 (9). – С. 1330–1349.
2. Абулгазина С. Д., Котельников П. Е., Сальков С. А., Тасов Б. М., Яренская М. А., Ясницкая Г. П. Новые данные о коутеките // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1991. – Ч. 120, вып. 2. – С. 49–51.
3. Борисенко А. С., Боровиков А. А., Житова Л. М., Павлова Г. Г. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металлоносности // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 12. – С. 1308–1325.
4. Копылов Н. И., Каминский Ю. Д. Мышьяк / под ред. Г. А. Толстикова. – Новосибирск : Сибирское университетское издательство, 2004. – 367 с.
5. Кривцов А. И., Мигачёв И. Ф., Попов В. С. Медно-порфириновые месторождения мира. – М. : Недра, 1986. – 236 с.
6. Кужугет Р. В., Монгуш А. А., Монгуш А. О. Эволюция химического состава блёклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирирового месторождения (Северо-Восточная Тува) // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329, № 2 – С. 81–91.
7. Кужугет Р. В., Монгуш А. О., Анкушева Н. Н. Источники серы сульфидов медно-золото-порфирирового месторождения Ак-Суг (Восточная Тува) // Минералогия. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 73–82.
8. Минералы. Справочник в 7 томах. Т. 1. Самородные элементы, интерметаллические соединения, карбиды, нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды, висмутиды, сульфиды, селениды, теллуриды. – М. : Академия наук СССР, 1960. – 617 с.
9. Мовсесян С. А., Исаенко М. П. Комплексные медно-молибденовые месторождения. – М. : Недра, 1974. – 344 с.
10. Монгуш А. Д., Лебедев В. И. Ак-Сугское медно-молибден-порфириновое месторождение: вещественный состав пород и руд // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2013. – Т. 1, № 42. – С. 22–29.
11. Никифоров А. В., Хертек А. К., Козловский А. М. Арысканское редкоземельное месторождение: первые результаты Sm-Nd изотопных исследований, Восточная Тува // Материалы III Всероссийской школы-конференции с международным участием. – Кызыл : Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 2017. – С. 99–102.
12. Новгородова М. И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. – М. : Наука, 1983. – 281 с.
13. Савчук Ю. С., Волков А. В., Аристов В. В. Медистые базальты Северного Урала // Литосфера. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 133–144.
14. Спиридонов Э. М., Плетнев П. А. Месторождение медистого золота Золотая Гора (о «золотородингитовой» формации). – М. : Научный мир, 2002. – 220 с.
15. Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете / Т. Н. Чвилева, М. С. Безсмертная, Э. М. Спиридонов [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 504 с.
16. Тумли С. Р., Бин Р. Э. Медно-порфириновые месторождения // Генезис рудных месторождений. Т. 1. – М. : Мир, 1984. – С. 245–333.
17. Уайт У. С. Месторождения самородной меди в северной части штата Мичиган // Рудные месторождения США. Т. 1. – М. : Мир, 1972. – С. 457–481.
18. Усенко У. В. Условия образования месторождений самородной меди Волюно-Подольской плиты // Известия Национальной Академии наук Украины. – 2010. – № 4. – С. 128–133.
19. Cornwall H. R. A summary of ideas on the origin of native copper deposits // Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists. – 1956. – V. 51, № 7. – P. 1–8.
20. Handbook of mineralogy. Elements, Sulfides and Sulfosalts. – 2003. – V. 1. – 588 p.
21. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. – 2010. – 1250 p.
22. Pracejus B. The ore minerals under the microscope: an optical guide, second edition. – Amsterdam : Elsevier, 2015. – V. 3. – 1118 p.
23. Singh Y., Singh K. D. P., Chhabra J., Srinivasan S., Sharma Y. C., Gupta R. K. First report of domeykite and koutekite (copper arsenides) in Siwalik sandstones of Romehra, Hamirpur district, Himachal Pradesh // Journal of the Geological Society of India. – 2002. – V. 60. – P. 695–699.
24. Skinner B. J., Luce F. D. Stabilities and composition of α-domeykite and algodonite // Economic Geology. – 1971. – V. 66. – P. 133–139.



References

1. Berzina A. N., Berzina A. P., Gimon V. O. Cu-Mo-porfirovoye mestorozhdenie Aksug (Severo-Vostochnaya Tuva): khronologiya protsessov magmatizma i rudobrazovaniya (U-Pb, Re-Os izotopnye dannye), metallogenicheskie sledstviya [Cu-Mo-porphyry Aksug deposit (North-East Tuva): chronology of magmatism and ore formation processes (U-Pb, Re-Os isotope data), metallogenetic consequences], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2019, V. 60 (9), pp. 1330–1349. (In Russ.).
2. Abulgazina S. D., Kotelnikov P. E., Sal'kov S. A., Tassov B. M., Yarenskaya M. A., Yasnitskaya G. P. Novyye dannye o koutekite [New data on koutekite], *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]*, 1991, V. 120, I. 2, pp. 49–51. (In Russ.).
3. Borisenko A. S., Borovikov A. A., Zhitova L. M., Pavlova G. G. Sostav magmatogennykh flyuidov, faktory ikh geokhimicheskoy spetsializatsii i metallo-nosnosti [Composition of magmatogenic fluids, factors of their geochemical specialization and metal content], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2006, V. 47, No 12, pp. 1308–1325. (In Russ.).
4. Kopylov N. I., Kaminskii Yu. D. Mysh'yak [Arsenic], Novosibirsk, Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo Publ., 2004, 367 p.
5. Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S. Medno-porfirovoye mestorozhdeniya mira [World porphyry copper deposits], Moscow, Nedra Publ., 1986. – 236 p.
6. Kuzhuget R. V., Mongush A. A., Mongush A. O. Evolyutsiya khimicheskogo sostava bleklykh rud Ak-Sugskogo zoloto-molibden-medno-porfirovogo mestorozhdeniya (Severo-Vostochnaya Tuva) [Evolution of the chemical composition of the fahlores of the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit (North-East Tuva)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, Tomsk, 2018, V. 329, No 2, pp. 81–91. (In Russ.).
7. Kuzhuget R. V., Mongush A. O., Ankusheva N. N. Istochniki sery sul'fidov medno-zoloto-porfirovogo mestorozhdeniya Ak-Sug (Vostochnaya Tuva) [Sources of sulfur sulfides of the copper-gold-porphyry deposit Ak-Sug (Eastern Tuva)], *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2019, V. 5, No 4, pp. 73–82. (In Russ.).
8. Mineraly. Spravochnik v 7 tomakh. T. 1. Samorodnye elementy, intermetallicheskie soedineniya, karbidy, nitridy, fosfidy, arsenidy, antimonidy, vismutidy, sul'fidy, selenidy, telluridy [Minerals. Reference book in 7 volumes. V. 1. Native elements, intermetallic compounds, carbides, nitrides, phosphides, arsenides, antimonides, bismuthides, sulfides, selenides, tellurides], Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1960, 617 p.
9. Movsesyan S. A., Isaenko M. P. Kompleksnyye medno-molibdenovye mestorozhdeniya [Complex copper-molybdenum deposits], Moscow, Nedra Publ., 1974, 344 p.
10. Mongush A. D., Lebedev V. I. Ak-Sugskoe medno-molibden-porfirovoye mestorozhdenie: veshchestvennyi sostav porod i rud [Ak-Sug copper-molybdenum-porphyry deposit: material composition of rocks and ores], *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits]*, 2013, V. 1, No 42, pp. 22–29. (In Russ.).
11. Nikiforov A. V., Khertek A. K., Kozlovskii A. M. Aryskanskoe redkozemel'noye mestorozhdenie: pervyye rezul'taty Sm-Nd izotopnykh issledovaniy, Vostochnaya Tuva [Aryskan rare earth deposit: first results of Sm-Nd isotope studies, Eastern Tuva], *Materialy III Vserossiiskoi shkoly-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the III All-Russian school-conference with international participation]*, Kyzyl, Tuvinskii institut kompleksnogo osvoeniya prirodnnykh resursov SO RAN Publ., 2017, pp. 99–102. (In Russ.).
12. Novgorodova M. I. Samorodnye metally v gidrotermal'nykh rudakh [Native metals in hydrothermal ores], Moscow, Nauka Publ., 1983, 281 p.
13. Savchuk Yu. S., Volkov A. V., Aristov V. V. Medistye bazal'ty Severnogo Urala [Cuprous basalts of the Northern Urals], *Litosfera [Lithosphere]*, 2017, V. 17, No 3, pp. 133–144. (In Russ.).
14. Spiridonov E. M., Pletnev P. A. Mestorozhdenie medistogo zolota Zolotaya Gora (o "zoloto-rodingitovoi" formatsii) [Field of the Copper gold Zolotaya Gora (about the "gold-rodingite" formation)], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2002, 220 p.
15. Spravochnik-opredelitel' rudnykh mineralov v otrazhennom svete [Reference book-identifier of ore minerals in reflected light], Ed. T. N. Chvileva, M. S. Bezsmertnaya, E. M. Spiridonov [et al.], Moscow, Nedra Publ., 1988, 504 p.
16. Titli S. R., Bin R. E. Medno-porfirovoye mestorozhdeniya [Porphyry copper deposits], *Genezis*

- rudnykh mestorozhdenii. T. 1* [Genesis of ore deposits. V. 1], Moscow, Mir Publ., 1984, pp. 245–333. (In Russ.).
17. White U. S. Mestorozhdeniya samorodnoi medi v severnoi chasti shtata Michigan [Deposits of native copper in the northern part of Michigan], *Rudnye mestorozhdeniya SShA. T. 1* [Ore Deposits of the USA. T. 1], Moscow, Mir Publ., 1972, pp. 457–481. (In Russ.).
 18. Usenko U. V. Usloviya obrazovaniya mestorozhdenii samorodnoi medi Volyno-Podol'skoi plity [Conditions of the formation of a native copper mineralisation of the Volyn-Podolsk plate], *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Ukrainy* [News of the National Academy of Sciences of Ukraine], 2010, No 4, pp. 128–133. (In Russ.).
 19. Cornwall H. R. A summary of ideas on the origin of native copper deposits, *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 1956, V. 51, No 7, pp. 1–8.
 20. Handbook of mineralogy. Elements, Sulfides and Sulfosalts, 2003, V. 1, 588 p.
 21. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems, 2010, 1250 p.
 22. Pracejus B. The ore minerals under the microscope: an optical guide, second edition, Amsterdam, Elsevier, 2015, V. 3, 1118 p.
 23. Singh Y., Singh K. D. P., Chhabra J., Srinivasan S., Sharma Y. C., Gupta R. K. First report of domeykite and koutekite (copper arsenides) in Siwalik sandstones of Romehra, Hamirpur district, Himachal Pradesh, *Journal of the Geological Society of India*, 2002, V. 60, pp. 695–699.
 24. Skinner B. J., Luce F. D. Stabilities and composition of α-domykite and algodonite, *Economic Geology*, 1971, V. 66, pp. 133–139.

Авторы

Шведов Геннадий Иванович

доцент¹, инженер², g.shvedov@mail.ru

Самородский Павел Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук
доцент кафедры геологии месторождений
и методики разведки¹, psamorodskiy@sfu-kras.ru

Макаров Владимир Александрович

доктор геолого-минералогических наук
заведующий кафедрой геологии месторождений
и методики разведки, директор¹, vmakarov58s@mail.ru

Муромцев Егор Алексеевич

аспирант¹, EgorMuromtsevSib@gmail.com

Шадчин Максим Викторович

аспирант¹, shamamr@gmail.com

Лобастов Борис Михайлович

инженер², ассистент кафедры геологии,
минералогии и петрографии¹, lbm02@ya.ru

Глушков Юрий Владимирович

главный геолог³, glushkovyv@mmcintergeo.ru

¹ Институт горного дела, геологии и геотехнологий
ФГАОУ ВО СФУ, г. Красноярск

² R&D центр НН Института горного дела,
геологии и геотехнологий ФГАОУ ВО СФУ, г. Красноярск

³ ООО «Тывамедь», г. Кызыл

Authors

Shvedov Gennadiy Ivanovich

Associate professor¹, engineer², g.shvedov@mail.ru

Samorodsky Pavel Nikolaevich

PhD, Associate professor of deposit geology
and exploration methods department¹
psamorodskiy@sfu-kras.ru

Makarov Vladimir Aleksandrovich

PhD, Head of deposit geology
and exploration methods department, Director¹
vmakarov58s@mail.ru

Muromtsev Egor Aleksandrovich

postgraduate¹, EgorMuromtsevSib@gmail.com

Shadchin Maksim Victorovich

postgraduate¹, shamamr@gmail.com

Lobastov Boris Mikhailovich

engineer², assistant of Geology, mineralogy
and petrography department¹, lbm02@ya.ru

Glushkov Yuri Vladimirovich

Chief geologist³, glushkovyv@mmcintergeo.ru

¹ Institute of Mining, Geology and Geotechnologies,
Krasnoyarsk, Russia

² R&D Center of Mining, Geology
and Geotechnologies Institute, Krasnoyarsk, Russia

³ LLC Tyvamed, Kyzyl, Russia