



УДК 553.430

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-3

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МИНЕРАЛОГИИ РУД Au-Mo-Cu ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-СУГ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

М.В. Шадчин, Г.И. Шведов, В.А. Макаров, Б.М. Лобастов, С.А. Сильянов, С.С. Сердюк

Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов, пр. им. газеты «Красноярский рабочий» 95, г. Красноярск, 660025 Россия; shatamr@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11.03.2024 г., после доработки 13.05.2024 г., принята к печати 25.08.2024 г.

Аннотация. В результате изучения вещественного состава руд Au-Mo-Cu порфирового месторождения Ак-Суг (Северо-Восточная Тува) методами оптической и сканирующей электронной микроскопии получены новые данные о его минералогии. В рудах обнаружены ранее не диагностированные минералы Se – богдановичит и берцелианит, Co – карролит и Co-содержащий пирит, Bi – самородный висмут, виттихенит, волинскит и михарит, W – шеелит, U – браннерит, Cu и Ag – маккинстриит и штрмейерит. Анализ новых минеральных парагенезисов позволил существенно расширить список минералов, обнаруженных на данном месторождении. Охарактеризованные минералы отлагались в широком диапазоне температур в ходе нескольких последовательных стадий рудообразования: порфировой (Co-содержащий пирит, карролит), эпиптермальной и субэпиптермальной (михарит, волинскит, виттихенит, самородный висмут, Se-содержащий галенит). В позднюю низкотемпературную стадию отлагались браннерит, берцелианит, богдановичит, штрмейерит, маккинстриит, а также шеелит.

Ключевые слова: месторождение Ак-Суг, Северо-Восточная Тува, Au-Mo-Cu порфировые месторождения, минералогия руд.

Финансирование. Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и Акционерного общества «Корпорация развития Енисейской Сибири» в рамках научного проекта № 20-45-242903 «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции» и проекта № 20-45-243001\20.

Благодарности. Авторы благодарны рецензенту и редакторам журнала за многочисленные комментарии, позволившие значительно улучшить текст статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. М.В. Шадчин – интерпретация полученных данных, написание рукописи, визуализация; Г.И. Шведов – разработка концепции, минераграфические исследования, написание черновика, редактирование финального варианта рукописи; В.А. Макаров – написание черновика, редактирование финального варианта рукописи; Б.М. Лобастов – аналитические работы; С.А. Сильянов – аналитические работы, написание черновика рукописи; С.С. Сердюк – редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Шадчин М.В., Шведов Г.И., Макаров В.А., Лобастов Б.М., Сильянов С.А., Сердюк С.С. Новые данные по минералогии руд Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Ак-Суг (Северо-Восточная Тува). Минералогия, 10(3), 32–51. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-3.

NEW DATA ON ORE MINERALOGY OF THE AK-SUG PORPHYRY Au-Mo-Cu DEPOSIT (NORTHEASTERN TUVA)

M.V. Shadchin, G.I. Shvedov, V.A. Makarov, B.M. Lobastov, S.A. Silyanov, S.S. Serdyuk

Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals, pr. im. gazety Krasnoyarskiy rabochiy 95, Krasnoyarsk, 660025 Russia; shamamr@gmail.com

Received 11.03.2024, revised 13.05.2024, accepted 25.08.2024

Abstract. New data on ore mineralogy of the Ak-Sug porphyry Au-Mo-Cu deposit (Northeastern Tuva) are presented as a result of study of ore composition using optical and scanning electron microscopy. Previously unknown minerals of Se (bohdanowiczite and berzelianite), Co (carrollite and Co-bearing pyrite), Bi (native bismuth, wittichenite, volynskite, and miharaite), Cu and Ag (mckinstryite and stromeyerite), W (scheelite), and U (brannerite) are found in ores of the deposit. The analysis of new mineral assemblages allowed us to significantly expand the list of minerals found at this deposit. The characterized minerals formed in a wide range of temperatures during several successive stages of ore formation: porphyry (carrollite and Co-bearing pyrite), epithermal and subepithermal (miharaite, volynskite, wittichenite, native bismuth, Se-bearing galena). Brannerite, berzelianite, bohdanowiczite, stromeyerite, mckinstryite, and scheelite formed at the late low-temperature stage.

Keywords: Ak-Sug deposit, Northeastern Tuva, porphyry Au-Mo-Cu deposits, ore mineralogy.

Funding. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the Government of the Krasnoyarsk krai, the Regional Science Foundation and Joint Stock Company «Yenisei Siberia Development Corporation» project no. 20-45-242903 «Geological-genetic model of the Ak-Sug deposit as a reference porphyry copper object of the East Sayany metallogenic province» and project no. 20-45-243001\20.

Acknowledgments. We are grateful to the reviewer and editors of the journal for their numerous comments, which allowed us to improve the manuscript.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. M.V. Shadchin – data interpretation, writing – original draft, visualization; G.I. Shvedov – conceptualization, investigation, writing – original draft, visualization, writing – review & editing; V.A. Makarov – writing – original draft, visualization, writing – review & editing; B.M. Lobastov – analytical work; S.A. Silyanov – analytical work, writing – original draft; S.S. Serdyuk – writing – review & editing. All authors approved the final version of the article before publication.

For citation: Shadchin M.V., Shvedov G.I., Makarov V.A., Lobastov B.M., Silyanov S.A., Serdyuk S.S. New data on ore mineralogy of the Ak-Sug porphyry Au-Mo-Co deposit (Northeastern Tuva). Mineralogy, 10(3), 32–51. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-3

ВВЕДЕНИЕ

Минералогия руд Ак-Сугского месторождения изучалась многими производственными и научно-исследовательскими организациями в течение нескольких десятков лет, начиная с момента его открытия экспедицией ВИМСа в 1952 г. Перечень обнаруженных рудных минералов в настоящее время включает в себя более 60 минеральных видов (табл. 1). Главные рудообразующие минералы включают первичные и вторичные (минералы окисленных руд). К первичным относятся самородные металлы (золото, серебро, медь, теллур, висмут), сульфиды (пирит, халькопирит, борнит, молибденит, галенит, сфалерит), сульфосоли (энаргит), к вторичным – самородная медь, оксиды (делафоссит, куприт, тенорит), карбонаты (малахит, азурит), ферримолибдит (Шведов и др., 2021). К второстепенным рудообразующим минералам отнесены акантит, кобальтин и марказит (сульфиды), гематит, ильменит, касситерит и магнетит (оксиды). Сульфосоли представлены

айкинитом, тетрадимитом и блеклыми рудами (теннантитом, тетраэдритом), среди теллуридов описаны гессит и калаверит, среди селенидов и вольфрамов – клаусталит и ферберит, соответственно. Из редких минералов охарактеризованы многочисленные сульфиды, оксиды, вольфраматы, фосфаты, сульфосоли, селениды и арсениды (Кривцов и др., 1985; Берзина и др., 2007; Сотников, 2001; Монгуш и др., 2013; Кужугет и др., 2015, 2019; Шведов и др., 2021). Породообразующие и акцессорные минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, карбонатами (кальцитом, доломитом, анкеритом), слюдами (биотитом, мусковитом-серицитом, хлоритом), сульфатами (баритом, целестином, ангидритом), эпидотом, амфиболами, цирконом, монацитом, апатитом и рутилом (табл. 1).

Цель настоящей работы – характеристика редких рудных минералов, впервые найденных на месторождении (самородный висмут, богдановичит, берцелианит, виттихенит, волинскит, карролит, Co-содержащий пирит, маккинстриит, михараит,

Таблица 1

Перечень минералов, выявленных на месторождении Ак-Суг

Table 1

List of minerals identified at the Ak-Sug deposit

Рудообразующие минералы			Редкие минералы	Породообразующие минералы
Главные		Второстепенные		
Первичные	Окисленные			
<u>Самородные металлы:</u> Висмут* Золото Медь Серебро* Теллур	<u>Самородные металлы:</u> Медь	<u>Оксиды:</u> Гематит Ильменит Касситерит Магнетит	<u>Оксиды:</u> Браннерит*	<u>Сульфаты:</u> Ангидрит Барит Целестин
<u>Интерметаллиды:</u> Электрум	<u>Оксиды:</u> Делафоссит Куприт Тенорит	<u>Вольфраматы:</u> Ферберит	<u>Вольфраматы:</u> Шеелит*	<u>Карбонаты:</u> Анкерит Доломит Кальцит Сидерит
<u>Простые сульфиды:</u> Галенит Молибденит Пирит Пирротин Сфалерит	<u>Карбонаты:</u> Азурит Малахит	<u>Простые сульфиды:</u> Акантит Кобальтин Марказит	<u>Фосфаты:</u> У-ксенотим* Се-флоренсит*	<u>Оксиды:</u> Рutil
<u>Сложные сульфиды:</u> Борнит Халькопирит	<u>Молибдаты:</u> Ферримолибдит	<u>Сульфосоли:</u> Айкинит Блеклые руды Теннантит Тетрадимит Тетраэдрит	<u>Сульфосоли:</u> Виттихенит* Волинскит* Михараит*	<u>Фосфаты:</u> Апатит Монацит Фторапатит
<u>Сульфосоли:</u> Энаргит	<u>Простые сульфиды:</u> Халькозин	<u>Теллуриды:</u> Гессит Калаверит	<u>Сложные сульфиды:</u> Карролит* Маккинстриит* Штроемейерит*	<u>Силикаты:</u> Амфиболы Биотит Мусковит Полевые шпаты Серицит Хлорит Циркон Эпидот
	<u>Сложные сульфиды:</u> Ковеллин	<u>Селениды:</u> Клаусталит	<u>Теллуриды:</u> Алтаит Богдановичит* Креннерит Меренскиит Мутманнит Петцит Сильванит Сопчеит Теллуровисмутит Темагамит? Цумоит Штютцит Эмпрессит	
			<u>Селениды:</u> Берцелианит* Кавацулит Науманнит	
			<u>Арсениды:</u> Альгодонит* Арсенопалладинит Домейкит* Ковтекит*	

Примечание. * – Минералы, выявленные на месторождении впервые.

Note. * – Minerals identified at the deposit for the first time.

штромейерит, шеелит) и оценка условий их образования.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-СУГ

Ак-Сугское Au-Mo-Cu порфировое месторождение расположено в Центрально-Азиатской части России на территории Республики Тува (в 240 км к северо-востоку от г. Кызыл). Территория месторождения и одноименный рудный узел относятся к Таннуольско-Хамсаринской островодужной системе и локализованы южнее зоны стыка Восточно-Тувинской и Кизир-Казырской складчатых систем (рис. 1), разделенных межрегиональным Кандатским разломом. В геотектонической истории района выделены венд-раннекембрийский островодужный и среднекембрийско-ордовик-силурийский аккреционной-коллизийный этапы (Руднев, 2010). Ранний этап характеризовался формированием вулканоплутонических поясов островодужного типа, в том числе, Тувинского (Таннуольского), к которому относится территория месторождения Ак-Суг. На следующем этапе произошло сочленение фрагментов островных дуг, задуговых бассейнов и микроконтинентов (Тувино-Монгольского), сопровождавшееся проявлением широкомасштабного синколлизийного магматизма и регионального метаморфизма (Добрецов, Буслов, 2007).

Строение Ак-Сугского месторождения (Добрянский и др., 1992; Забелин, 1992) определяется структурой одноименной полифазной интрузии (рис. 2), характеризующейся следующими разновидностями пород, сменяющимися от периферии массива к его центру: диориты, габбродиориты, кварцевые диориты (периферия), тоналиты и плагиограниты, в том числе, слабо порфировидные (центральная часть). Ядро интрузивного штока представлено тоналит-порфирами (порфиры-I) и плагиогранит-порфирами (порфиры-II), с которыми пространственно и парагенетически связано промышленное Au-Mo-Cu оруденение. Интрузия имеет зональную куполовидную форму с углами падения контактов до 80°. Дайки представлены маломощными дорудными и синрудными телами гранодиоритов, гранитов и аплитов среди пород основного и среднего составов. Как правило, дайковые тела в различной степени гидротермально изменены и несут рассеянную вкрапленную и прожилковую минерализацию. Также в строении Ак-

Сугского массива отмечаются пострудные дайки диоритовых, диабазовых и андезитовых порфиров. Гидротермальные изменения в них отсутствуют либо проявлены значительно слабее, а рудные минералы не обнаруживаются визуальными методами или в протолочках (Добрянский и др., 1992; Забелин, 1992).

Возраст интрузивного магматизма, связанного с формированием Ак-Сугского массива, остается предметом многочисленных дискуссий. Некоторые исследователи указывают на девонский возраст его формирования (Добрянский и др., 1992; Забелин, 1992; Сотников и др., 2003; Государственная..., 2013), ряд других исследователей (Pollard et al., 2017; Берзина и др., 2019) придерживаются точки зрения о кембрийском возрасте магматизма и рудообразования.

Рудные тела месторождения представлены штокверками с вкрапленной и прожилково-вкрапленной минерализацией в интрузивных породах центральной и ядерной части Ак-Сугского массива. Богатые руды месторождения сконцентрированы в его Северной залежи (наиболее богатая зона имеет размеры примерно 300 × 400 м вблизи поверхности с постепенным расширением рудной зоны к глубоким горизонтам) со средними содержаниями Cu около 0.8 % и Mo 0.02 %. К настоящему времени подтвержденный вертикальный размах оруденения составляет порядка 800 м, и потенциал месторождения на глубоких горизонтах далеко не исчерпан.

Процесс формирования крупномасштабного оруденения непосредственно связан с гидротермальными растворами, отделявшимися в результате внедрения двух генераций порфировых магм (Лобанов и др., 2023). С внедрением более ранних тоналит-порфиров (порфиры-I) и последующей деятельностью рудоносных флюидов связано образование преимущественно золото-медной минерализации (халькопирит, борнит и др.). Формирование молибденовой минерализации связано с внедрением плагиогранит-порфиров (порфиры-II). Это подтверждается пространственной разобщенностью медной и молибденовой минерализации и указывает на разный возраст их формирования (Лобанов и др., 2023). Гидротермально-метасоматические преобразования вмещающих пород проявлены в последовательной смене типов гидротермальных ассоциаций от центра интрузивного массива к его периферии (Лобанов и др., 2023). Центральная часть массива интенсивно окварцована и содержит безрудное «кварцевое ядро». По направлению

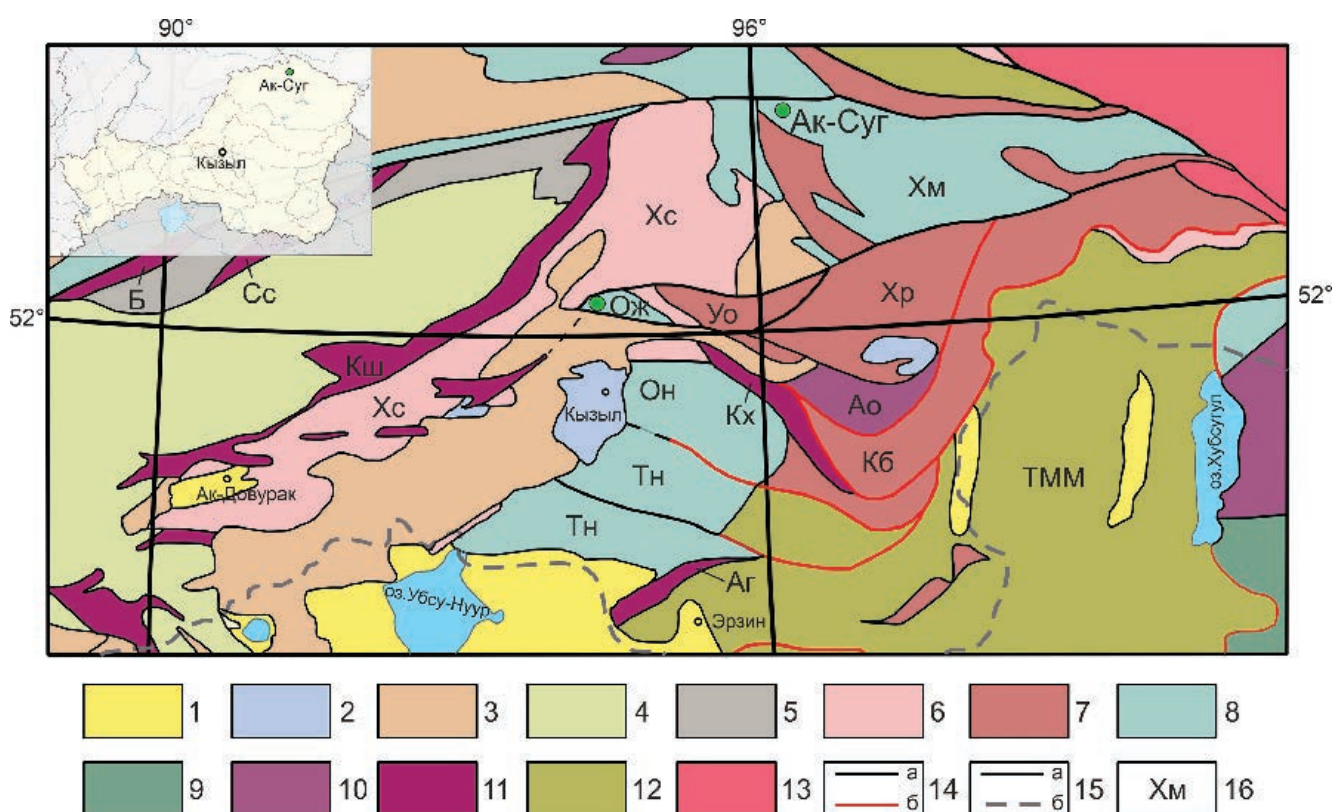


Рис. 1. Геодинамическая схема Тувы и сопредельных территорий (Монгуш и др., 2013).

1 – Рыхлые отложения кайнозойских впадин; 2 – терригенные отложения юрских мульд; 3 – магматические и осадочные ассоциации девонских рифтогенных прогибов; 4 – кембрий-силурийские турбидиты континентальной окраины; 5 – преимущественно турбидитовые аккреционные призмы; 6–10 – структурно-вещественные комплексы вендианнекембрийской островодужной системы: 6 – преддуговые терригенные, 7 – задуговые вулканогенные и терригенно-вулканогенные, 8 – островодужные осадочно-вулканогенные и вулканоплутонические, 9 – нерасчлененные островодужные, 10 – пред- и задуговые офиолитовые аллохтоны; 11 – метаморфические комплексы; 12 – докембрийские микроконтиненты; 13 – Сибирский кратон; 14 – главные постаккреционные разломы (а) и надвиги (б); 15 – границы: а – структурных зон, б – государственная; 16 – названия структурно-формационных подразделений Таннуольско-Хамсаринской островодужной системы: преддуговая Саяно-Тувинская группа структурно-формационных зон: Кш – Куртушибинская, Б – Борусская, Сс – Северо-Саянская и Хс – Хемчикско-Сыстыгхемская; островодужная Таннуольско-Хамсаринская группа зон: Тн – Таннуольская подзона, Он – Ондумская подзона; Ож – Ожинская зона; Хм – Хамсаринская зона; задуговая Восточно-Тувинская группа зон: Аг – Агардагская, Кх – Каахемская, Уо – Улугойская, Хр – Харальская, Кб – Карабельдырская, Ао – Агойский метаморфический террейн; ТММ – Тувино-Монгольский микроконтинент.

Fig. 1. Geodynamic scheme of Tuva and adjacent territories (Mongush et al., 2013).

1 – Loose sediments of Cenozoic basins; 2 – terrigenous deposits of the Jurassic troughs; 3 – igneous and sedimentary associations of the Devonian rift troughs; 4 – Cambrian-Silurian turbidites of the continental margin; 5 – mostly turbidite accretionary prisms; 6–10 – structural-compositional complexes of the Vendian-Early Cambrian island arc system: 6 – fore-arc terrigenous; 7 – back-arc volcanic and terrigenous-volcanic; 8 – island-arc sedimentary-volcanic and volcano-plutonic; 9 – undifferentiated island arc; 10 – fore-arc and back-arc ophiolite allochthons; 11 – metamorphic complexes; 12 – Precambrian microcontinents; 13 – Siberian craton; 14 – main post-accretion faults (a) and thrusts (б); 15 – boundaries of structural zones (a) and state boundary (б); 16 – names of lithotectonic units of the Tannuola-Khamsara island-arc system: fore-arc Sayan-Tuva group of lithotectonic zones: Ksh – Kurtushibinskaya; B – Borus; Ss – North Sayan and Khs – Khemchik-Systyghem; island-arc Tannuola-Khamsara group of zones: Tn – Tannuola Subzone; On – Ondum Subzone; Ож – Ozhu Zone; Хм – Khamsara Zone; back-arc East Tuva group of zones: Аг – Agardag; Кх – Kaakhem; Уо – Ulugoi; Хр – Kharal; Кб – Karabeldyr; Ао – Agoi metamorphic terrane; ТММ – Tuva-Mongolian microcontinent.

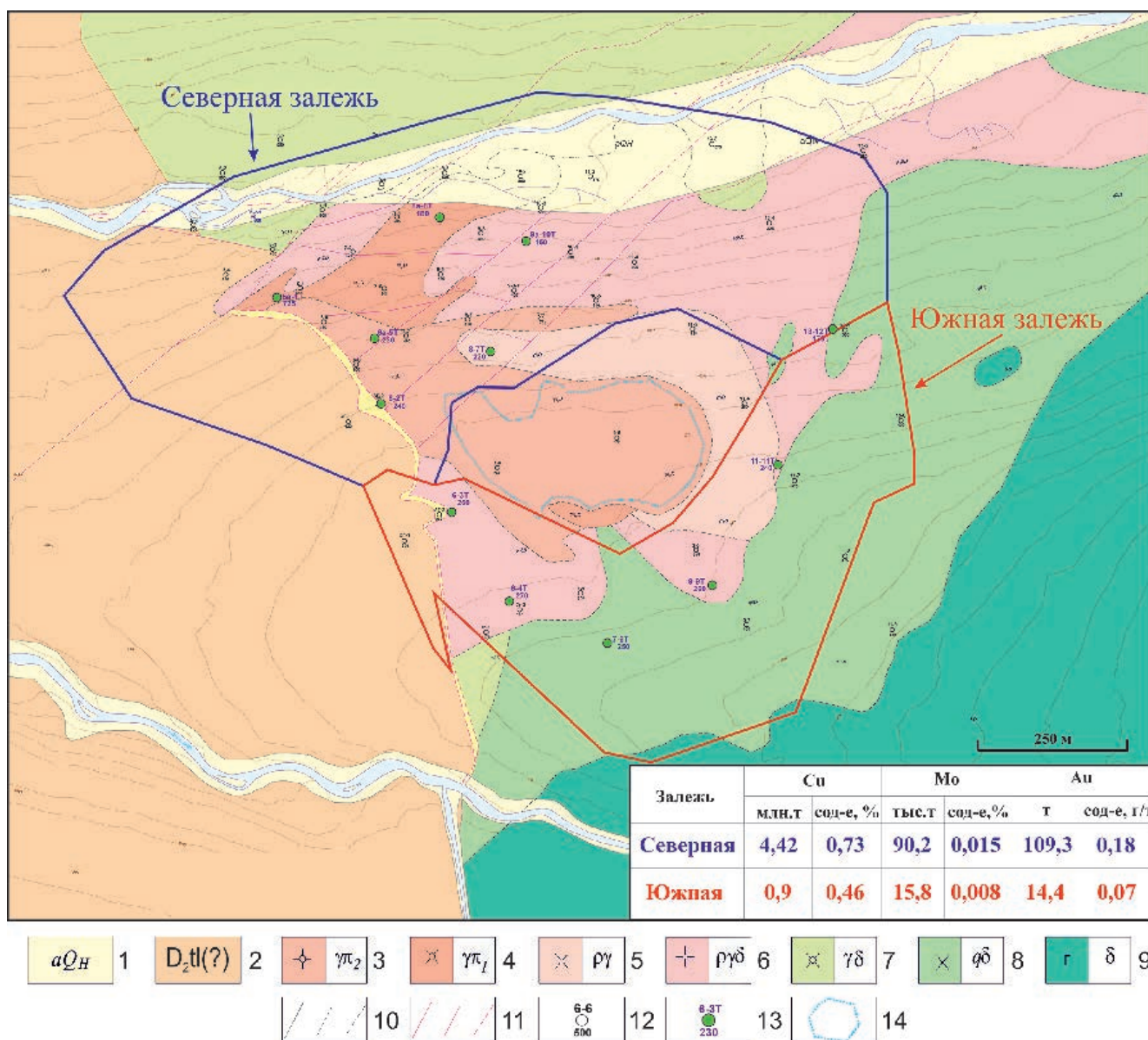


Рис. 2. Геологическая карта месторождения Ак-Суг с проекцией рудных залежей, составлена авторами в ходе НИР 2020–2022 гг. совместно с недропользователями и геологической службой месторождения.

1 – современные аллювиальные отложения (галечники, пески); 2 – девонские красноцветные туфогенно-осадочные отложения; 3–9 – аксугский комплекс: 3 – плагิโอгранит-порфиры (порфиры-II); 4 – тоналит-порфиры (порфиры-I); 5 – тоналиты порфировидные; 6 – тоналиты и плагิโอграниты слабопорфировидные; 7 – тоналиты; 8 – кварцевые диориты, тоналиты; 9 – габбро, диориты; 10 – геологические границы; 11 – разрывные нарушения; 12 – разведочные скважины до 2013 г.; 13 – разведочные скважины 2019 г.; 14 – серицит-кварцевые метасоматиты, «кварцевое ядро».

В таблице приведены геологические запасы и содержания главных рудных элементов по состоянию на 01.01.2020.

Fig.2. Geological map of the Ak-Sug deposit with projection of the orebody, composed by the authors during scientific works of 2020–2022 together with colleagues from geological survey of the deposit.

1 – Quaternary alluvial deposits (pebble, sand); 2 – Devonian red-colored tuffaceous-sedimentary deposits; 3–9 – Aksug complex: 3 – plagiogranite porphyry (porphyry-II); 4 – tonalite porphyry (porphyry-I); 5 – porphyritic tonalite; 6 – weakly porphyritic tonalite, plagiogranite; 7 – tonalite; 8 – quartz diorite, tonalite; 9 – gabbro, diorite; 10 – geological boundaries; 11 – faults; 12 – exploration boreholes before 2013; 13 – exploration boreholes of 2019; 14 – sericite-quartz metasomatites, «quartz core».

The table shows geological reserves and contents of the main ore elements as of 01.01.2020.

к периферии развиты кварц-серицитовые, хлорит-серицитовые метасоматиты и локально проявлена калишпатизация. Наиболее крупная зона измененных пород, обрамляющая месторождение, представлена пропилитами. Более локально проявлены зоны аргиллизации, эпидотизации и биотитизации. Зональность в распределении рудных минералов, в целом, соответствует типовой метасоматической зональности Au-Mo-Cu порфировых месторождений (Лобанов и др., 2023). Периферия месторождения представлена зоной пиритового ореола, сменяемой по направлению к его центру ореолом пирит-халькопиритовых руд. В пределах Северной рудной залежи отмечаются наиболее богатые рудные зоны с халькопиритовой и борнит-халькопиритовой минерализацией. Молибденовые руды не имеют четких границ и оконтурены по содержаниям Mo 0.003 %, медные – по изоконцентрате Cu 0.3 % (Лобанов и др., 2023). Изотопно-геохимические данные свидетельствуют, что наиболее вероятным источником серы сульфидных минералов являлся флюид мантийного (от –3 до +3 ‰) источника с ограниченным участием метеорных вод (Кужугет и др., 2019; Шадчин, 2022). По данным изучения флюидных включений в кварце в составе рудообразующего флюида преобладали вода и углекислота (Кужугет и др., 2015, 2019, 2023).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использованы прозрачные и полированные шлифы авторского коллектива и сотрудников геологической службы компаний ООО «Голевская ГРК» и ООО «Тывамедь», изготовленные в ходе выполнения работ по теме «Геолого-генетическая модель Ак-Сутского месторождения как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции». Полированные шлифы (~50 штук) изготовлены из керн разведочных скважин, преимущественно, из зон пирит-халькопиритовых и пиритовых руд, локально совпадающих с ореолами пропилитизации и кварц-хлорит-серицитовыми (кварц-серицит-хлоритовыми) метасоматитами.

Оптические петрографические определения проводились с помощью микроскопа Axioscope CZ 40A POL. Изучение полированных шлифов (аншлифов) выполнялось на микроскопе Olympus BX 51. Химический состав минералов определялся при помощи сканирующего электронного микроскопа

(СЭМ) Tescan Vega III SBH, оснащенного интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа Oxford X-Act в R&D центре ГМК «Норильский никель» Института цветных металлов Сибирского федерального университета (г. Красноярск) при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 2.3 нА, время съемки – 120 с. При анализе использованы образцы химически чистых элементов и соединений стандартов МАС (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 S (K α), Fe (K α), Co (K α), Ni (K α), Cu (K α), Zn (K α), As (L α), Sb (L α) и Pb (M α) 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 МАС (рег. № 9941) через каждые 60 мин. исследования. Результаты анализов обработаны с помощью программного обеспечения Oxford Instruments AZtec. В статье использованы аббревиатуры минеральных видов согласно (Warr, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Руды, проанализированные в полированных шлифах, характеризуются вкрапленными, прожилково-вкрапленными, шлировыми и каемочными (с реликтами замещения) текстурами. Структуры, преимущественно, аллотриоморфнозернистые, каткластические и интерстициальные. В результате настоящих исследований обнаружены некоторые рудные и нерудные минералы, ранее не описанные на месторождении: богдановичит, берцелианит, вольтскит, виттихенит, карролит, маккинстриит, михарит, самородный висмут, Со-содержащий пирит, шеелит и штрмейерит.

Сульфосоли

Редкий минерал *михарит* Cu₄FePbBiS₆ выявлен в ассоциации с висмутсодержащей блеклой рудой и айкинитом среди халькопирита, который цементирует раздробленные зерна пирита (рис. 3). Размеры зерен михарита варьируют от 19 × 21 до 21 × 62 мкм. Некоторые зерна располагаются вдоль границ агрегатов пирита и халькопирита и имеют вытянутую форму, другие – угловатую. Отдельные зерна по краям окружены тонкими каймами галенита. В халькопирите с включениями михарита также

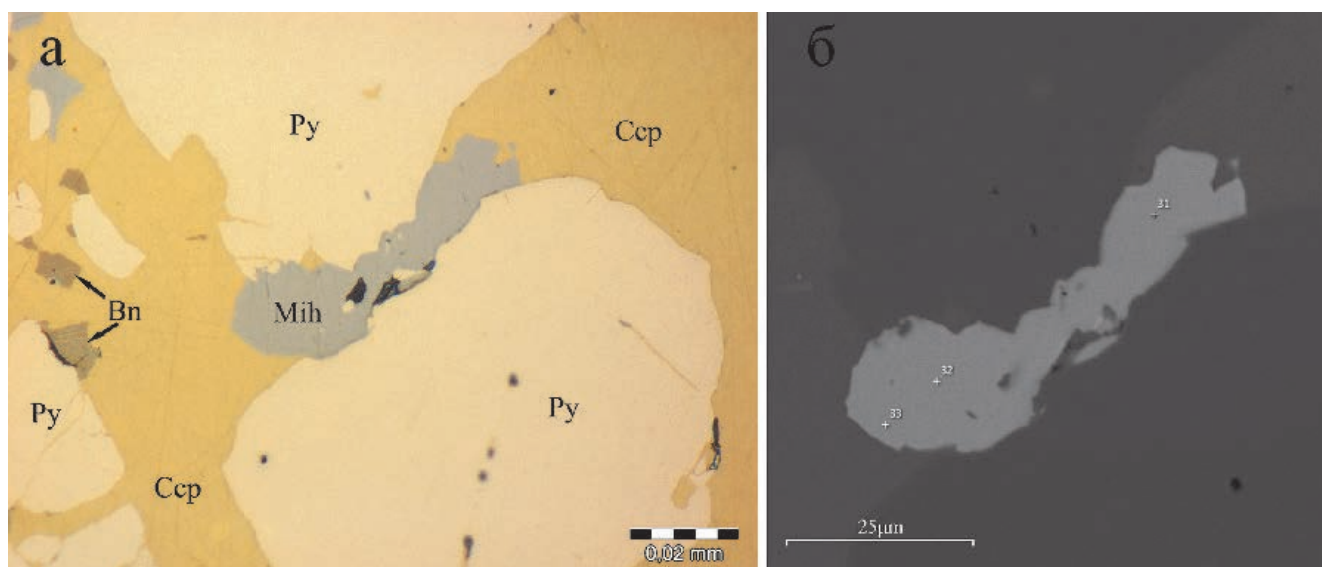


Рис. 3. Зерно михараита (Mih), расположенное на границе пирита (Py) и халькопирита (Ccp) с включениями борнит (Bn). Обр. 10-5/275.0. Здесь и далее на рисунках: а – отраженный свет; б – СЭМ фото.

Fig. 3. Miharaite grain (Mih) at the boundary of pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp) with bornite (Bn) inclusions. Sample 10-5/275.0. Hereinafter: a – reflected light; б – BSE image.

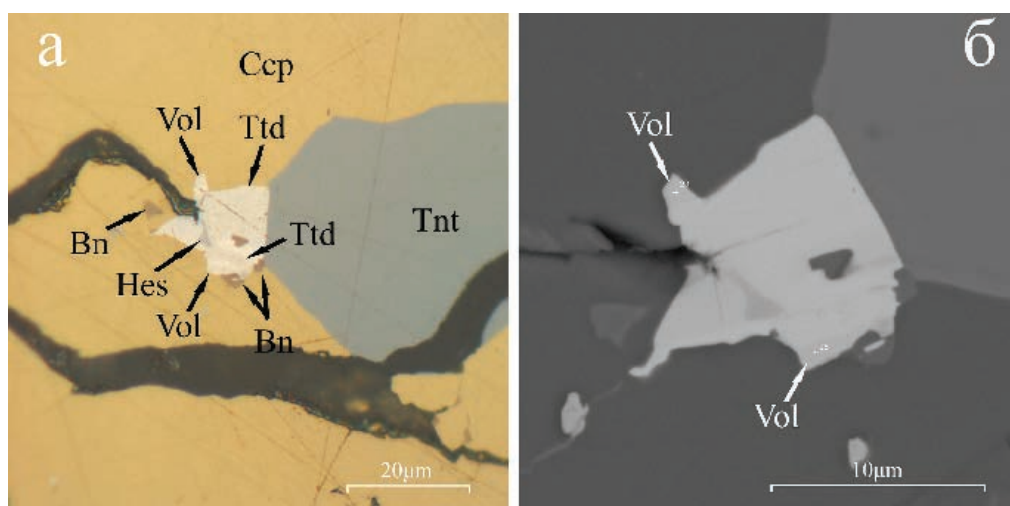


Рис. 4. Волюнскит (Vol) в ассоциации с тетрадимитом (Ttd), гесситом (Hes) и борнитом (Bn) на границе с халькопиритом (Ccp) и теннантитом (Tnt). Обр. 6-1/973.1.

Fig. 4. Volynskite (Vol) in assemblage with tetradymite (Ttd), hessite (Hes) and bornite (Bn) at the boundary with chalcopyrite (Ccp) and tennantite (Tnt). Sample 6-1/973.1.

отмечаются включения мелких зерен борнита. Избыток Fe и S в составе михараита, возможно, связан с захватом при анализе тонких включений пирита и халькопирита (табл. 2).

Волюнскит AgBiTe_2 обнаружен в одном образце из глубоких горизонтов месторождения (973.1 м) в ассоциации с гесситом, тетрадимитом, теллуrowисмутитом и висмутсодержащей блеклой рудой (рис. 4). Волюнскит образует тонкие и короткие (от 2 до 5–7 мкм) каймы по краям зерен тетрадимита и теллуrowисмутита и замещает их. Также

в сростании с этими минералами находятся халькопирит, блеклая руда и борнит. Состав изученного минерала близок к теоретическому (табл. 2).

Виттихенит Cu_3BiS_3 и самородный висмут Bi срastaются с Se- и Bi-содержащим галенитом и обнаружены среди пирит-халькопиритовых агрегатов (рис. 5). В составе сульфидных сростков часто присутствуют включения и каймы виттихенита размером до 5–10 мкм и мелкие (до 5 мкм) зерна галенита. Самородный висмут образует линзовидные, округлые или ксеноморфные агрегаты в

Таблица 2

Table 2

Химический состав рудных минералов Ак-Сутского месторождения

Chemical composition of ore minerals of the Ak-Sug deposit

№ рис.	№ ан.	Содержания элементов, мас. %										Сумма	Минерал	Формула	Образец
		S	Fe	Co	Cu	Se	Ag	Te	Pb	Bi					
3	32	21.90	7.25	—	27.70	—	—	—	23.96	19.57	100.38	Михарит	$\text{Cu}_{3.89}\text{Fe}_{1.16}\text{Pb}_{1.03}\text{Bi}_{0.83}\text{S}_{6.09}$	10-5/275.0	
	33	21.32	7.54	—	27.58	—	—	—	23.37	19.26	99.09		$\text{Cu}_{3.92}\text{Fe}_{1.22}\text{Pb}_{1.02}\text{Bi}_{0.83}\text{S}_{6.01}$		
4	23	—	—	—	—	—	18.48	44.86	—	36.67	100.00	Вольнскийт	$\text{Ag}_{0.98}\text{Bi}_{1.01}\text{Te}_{2.01}$	6-1/973.1	
	26	—	—	—	—	—	18.35	44.51	—	37.15	100.00		$\text{Ag}_{0.98}\text{Bi}_{1.02}\text{Te}_{2.00}$		
5	40	19.49	0.31	—	36.21	0.62	2.29	—	—	40.60	99.53	Виттихенит	$(\text{Cu}_{2.84}\text{Ag}_{0.11}\text{Fe}_{0.03})_{2.97}\text{Bi}_{0.97}(\text{S}_{3.02}\text{Se}_{0.04})_{3.06}$	10-5/275.0	
	43	19.40	0.50	—	36.84	0.98	1.80	—	—	40.67	100.20		$(\text{Cu}_{2.86}\text{Ag}_{0.08}\text{Fe}_{0.04})_{2.99}\text{Bi}_{0.96}(\text{S}_{2.99}\text{Se}_{0.06})_{3.05}$		
	33	—	1.07	—	1.16	—	—	—	—	96.17	98.40	Самородный висмут	$\text{Bi}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Cu}_{0.04}$	10-5/275.0	
	39	—	0.77	—	—	—	—	—	—	98.94	99.70		$\text{Bi}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}$		
	6	41	11.90	—	—	—	2.62	—	—	87.45	—	101.97	Se-содержащий галенит	$\text{Pb}_{1.02}(\text{S}_{0.90}\text{Se}_{0.08})_{0.98}$	5г-2/225.0
42		12.20	—	—	—	3.53	—	—	80.56	3.69	100.00	Se- и Bi-содержащий галенит	$(\text{Pb}_{0.94}\text{Bi}_{0.04})_{0.98}(\text{S}_{0.91}\text{Se}_{0.11})_{1.02}$	10-5/275.0	
6	54	4.77	—	—	—	24.11	25.30	—	—	46.38	100.55	Богдановичит	$\text{Ag}_{1.03}\text{Bi}_{0.98}(\text{Se}_{1.34}\text{S}_{0.65})_{1.99}$	11-9/268.0	
	56	4.76	—	—	1.37	23.23	24.46	—	—	45.30	99.11		$\text{Ag}_{1.05}\text{Bi}_{0.98}(\text{Se}_{1.42}\text{S}_{0.56})_{1.98}$		
7	52	—	—	—	—	0.71	62.89	36.40	—	—	100.00	Гессит	$\text{Ag}_{1.99}(\text{Te}_{0.98}\text{Se}_{0.03})_{1.01}$	11-9/268.0	
	57	—	—	—	—	—	61.28	38.71	—	—	99.99		$\text{Ag}_{1.96}\text{Te}_{1.04}$		
7	29	—	—	—	59.84	38.00	—	—	—	—	98.81	Берцелианит	$\text{Cu}_{1.94}(\text{Se}_{0.99}\text{S}_{0.07})_{1.06}$	5-4/263.1	
	30	—	—	—	60.28	37.93	—	0.96	—	—	100.19		$\text{Cu}_{1.94}(\text{Se}_{0.97}\text{S}_{0.07}\text{Te}_{0.02})_{1.06}$		
8	1	55.58	39.73	1.65	3.77	—	—	—	—	—	100.73	Co-Cu-содержащий пирит	$(\text{Fe}_{0.85}\text{Cu}_{0.07}\text{Co}_{0.03})_{0.95}\text{S}_{2.05}$	13-3/316.5	
	2	56.02	44.42	0.39	0.00	—	—	—	—	—	100.84	Co-содержащий пирит	$(\text{Fe}_{0.94}\text{Co}_{0.01})_{0.95}\text{S}_{2.05}$		
	3	55.38	38.94	1.26	5.19	—	—	—	—	—	100.78	Co-Cu-содержащий пирит	$(\text{Fe}_{0.83}\text{Cu}_{0.10}\text{Co}_{0.03})_{0.96}\text{S}_{2.04}$		
	4	56.14	44.47	0.38	0.00	—	—	—	—	—	100.98	Co-содержащий пирит	$(\text{Fe}_{0.94}\text{Co}_{0.01})_{0.95}\text{S}_{2.05}$		
9	26	40.86	1.34	36.52	20.65	—	—	—	—	—	99.35	Карролит	$\text{Cu}_{1.01}(\text{Co}_{1.94}\text{Fe}_{0.07})_{2.01}\text{S}_{3.98}$	11-7/154.1	
	28	40.27	3.22	34.86	20.26	—	—	—	—	—	98.61		$\text{Cu}_{1.00}(\text{Co}_{1.87}\text{Fe}_{0.18})_{2.05}\text{S}_{3.95}$		
10	21	15.78	—	—	31.14	—	53.38	—	—	—	100.29	Штрουμεйерит	$\text{Ag}_{1.00}\text{Cu}_{1.00}\text{S}_{1.00}$	3г-1/292.0	
	23	15.82	—	—	30.81	—	53.13	—	—	—	99.76		$\text{Ag}_{1.00}\text{Cu}_{0.99}\text{S}_{1.01}$		
11	2	14.01	1.41	—	23.58	—	61.92	—	—	—	100.92	Маккинстриит	$\text{Ag}_{5.26}(\text{Cu}_{3.40}\text{Fe}_{0.23})_{3.63}\text{S}_4$	3г-1/342.0	
	3	14.48	1.67	—	23.59	—	60.08	—	—	—	99.82		$\text{Ag}_{1.93}(\text{Cu}_{3.29}\text{Fe}_{0.26})_{3.55}\text{S}_4$		

Примечание. Здесь и в табл. 3: прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения. Формулы минералов рассчитаны на сумму атомов, равную 2 (Se-содержащий галенит), 3 (берцелианит, Co-Cu-содержащий пирит, волынский, гессит, штрουμεйерит), 4 (богдановичит), 7 (виттихенит, карролит), 12 (макинстриит), 13 (михараит).

Note. Here and in Table 3: dash – the element content is below detection limit. The empirical formulas are recalculated to the atom sum of 2 (Se-galena), 3 (berzelianite, Co-Cu-bearing pyrite, volynskite, hessite, stromeyerite), 4 (bohdanowiczite), 7 (wittichenite, carrolite), and 13 (miharaite).

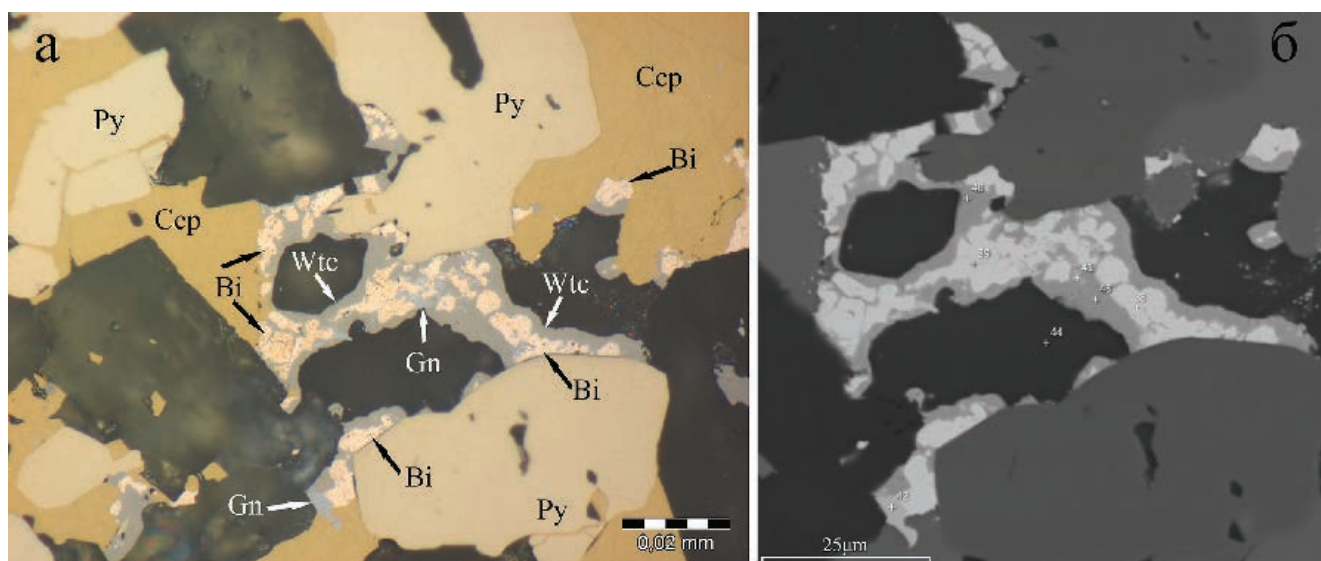


Рис. 5. Результат возможного разложения айкинита на виттихенит (Wtc), галенит (Gn) и самородный висмут (Bi) в ассоциации с пиритом (Py) и халькопиритом (Ccp). Обр. 10-5/275.0.

Fig. 5. Result of possible decomposition of aikinite on wittichenite (Wtc), galena (Gn) and native bismuth (Bi) in assemblage with pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp). Sample 10-5/275.0.

окружении виттихенита и галенита. Размеры зерен самородного висмута варьируют от 1–2 до 10 мкм. Реже его зерна достигают размера 0.02×0.04 мм. Состав виттихенита близок к теоретическому, но характеризуется небольшими примесями Ag и Se, типичными для этого минерала (Чвилева и др., 1988). Присутствие низких концентраций Fe и Cu в составе самородного висмута можно объяснить их вхождением (Fe в виде примеси до 1 мас. %) в айкинит (табл. 2).

Селениды

Богдановичит AgBiSe_2 представлен линзовидными, клиновидными, реже ксеноморфными зернами размером от 1.5×13 до 12×20 мкм, которые срastaются с халькопиритом, виттихенитом, гесситом и теннантитом (рис. 6). Чаще всего мелкие зерна богдановичита срastaются с гесситом и находятся среди теннантита. Очень редко богдановичит встречается в кварце на границе с пиритом. Аналогичный парагенезис (богдановичит + гессит) отмечен в ассоциации с виттихенитом. Состав богдановичита близок к стехиометричному (табл. 2), но отличается от него присутствием серы (до 4.77 мас. %), что, по-видимому, обусловлено вхождением богдановичита в состав халькопирит-теннантитовых сростков.

Берцелианит Cu_2Se обнаружен в одном кварц-карбонатном прожилке среди многочисленных зе-

рен мышьяковистой самородной меди (рис. 7). Зерна минерала имеют размеры $1.2 \times 1.5 - 6.2 \times 15.8$ мкм и, в основном, линзовидную, эллипсовидную или треугольную форму сечений. В тесном срastании с берцелианитом наблюдался флоренсит-(Ce). Состав минерала близок к теоретическому и характеризуется небольшой (до 1 мас. %) примесью Te в одном из проанализированных зерен (табл. 2).

Сульфиды

Селеносодержащий галенит отмечается в виде мелких (до 6–20 мкм) ксеноморфных включений в теннантите или халькопирите, часто в ассоциации с виттихенитом (рис. 5). Минерал содержит Se (до 2–3 мас. %) и Bi (до 4 мас. %) и хорошо рассчитывается на кристаллохимическую формулу (табл. 2).

Си-Со-содержащий пирит широко распространен в рудах Ак-Сугского месторождения, по сравнению с другими минералами, описанными в данной статье. Его количество в полированных шлифах в зоне пиритового ореола месторождения достигает первых процентов. Содержание Cu в нем составляет 3.77–5.19 мас. %, Co – 1.26–1.65 мас. % (табл. 2). Этот пирит неоднороден по окраске, зоны с повышенным содержанием Cu отчетливо выделяются розоватым оттенком (рис. 8). Кристаллы часто идиоморфные, их размеры достигают 35–45 мкм. Кристаллы не срastaются с другими рудными минералами и состоят из двух генераций:

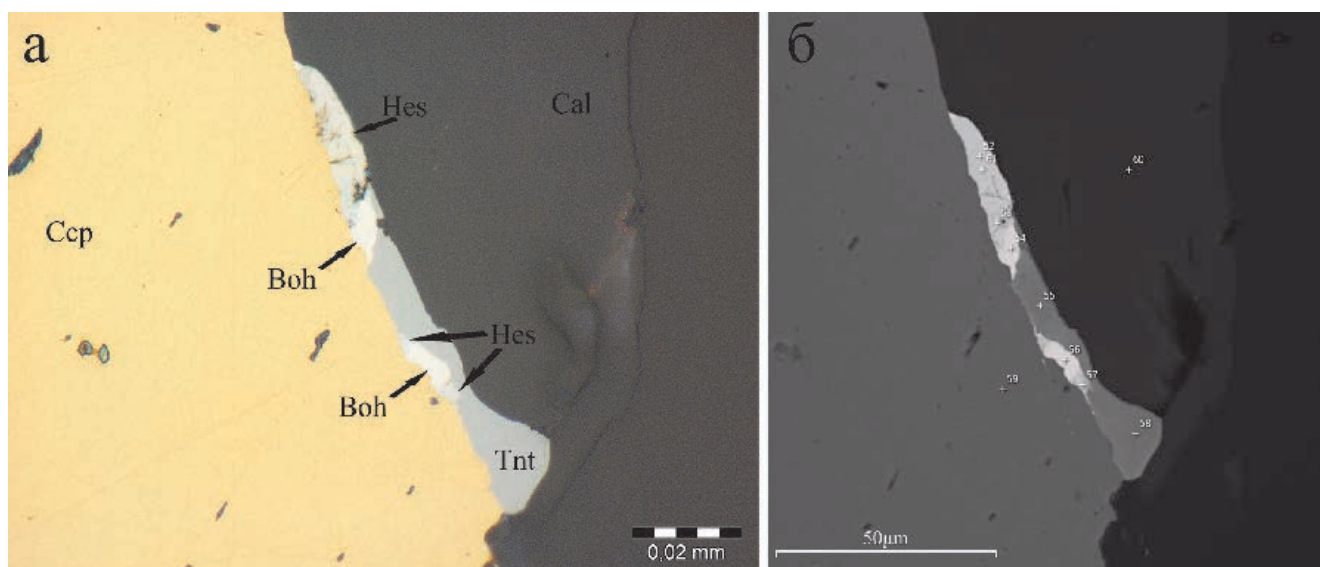


Рис. 6. Зерна богдановичита (Boh) на контакте с гесситом (Hes) и теннантитом (Tnt) в составе кальцитового (Cal) прожилка с халькопиритом (Ccp). Обр. 11-9/268.0.

Fig. 6. Bogdanovichite grains (Boh) at the contact with hessite (Hes) and tennantite (Tnt) in calcite (Cal) veinlet with chalcopyrite (Ccp). Sample 11-9/268.0.

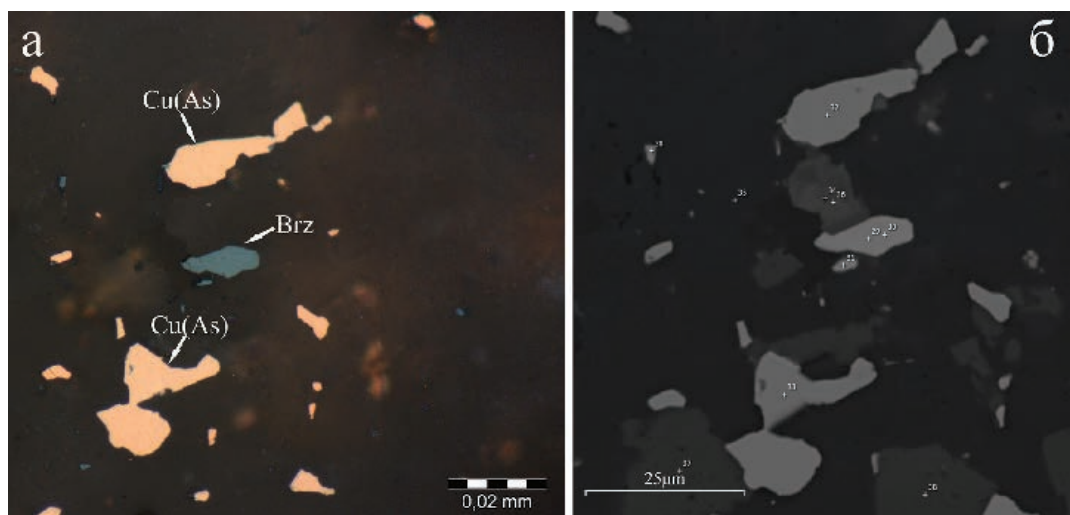


Рис. 7. Зерна берцелианита (Brz) в ассоциации с мышьяксодержащей гипергенной самородной медью (Cu(As)). Обр. 5-4/263.1.

Fig. 7. Berzelianite (Brz) grains in assemblage with As-bearing supergene native copper (Cu(As)). Sample 5-4/263.1.

ранней – в центральных частях кристаллов и поздней с Cu и Co – по краям. Между ними отмечаются узкие участки розового цвета, содержащие повышенные концентрации Cu. В кристалле на рис. 8 обнаружена зависимость между содержаниями Cu и Co: в зонах пирита без Cu, содержание Co составляет 0.38–0.39 мас. %, а на участках с более высоким содержанием Cu содержание Co возрастает до 1.26–1.65 мас. % (табл. 2).

Карролит CuCo_2S_4 в рудах месторождения Ак-Суг образует мелкие (максимальные размеры составляют 5×7.5 мкм) ограненные кристаллы

или ксеноморфные включения в агрегатах халькопирита и теннантита в ассоциации со сфалеритом, в которых он образует редкую вкрапленность или тонкие каймы по границам агрегатов (рис. 9). Реже наблюдаются цепочки идиоморфных кристаллов карролита в халькопирите. Состав карролита близок к стехиометричному (табл. 2), но имеет несколько повышенные содержания Fe, вероятно, обусловленные эффектом «матрицы» вмещающего халькопирита.

Штрмейерит AgCuS и маккинстриит $\text{Ag}_5\text{Cu}_3\text{S}_4$ обнаружены в ассоциации с халькопиритом,

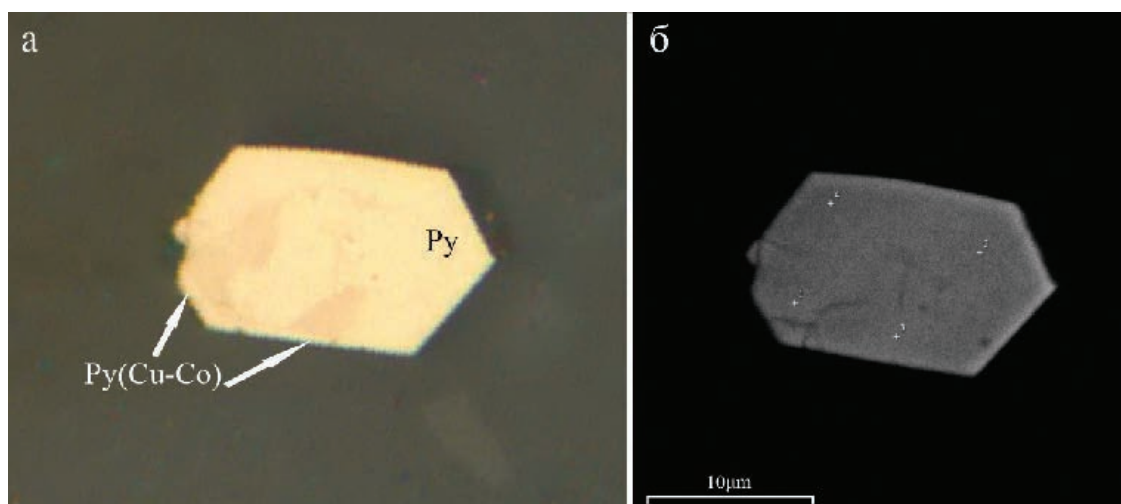


Рис. 8. Кристалл Cu- и Co-содержащего пирита (Py) в кварц-карбонатном прожилке. Обр. 13-3/316.5.
Fig. 8. Crystal of Cu- and Co-bearing pyrite (Py) in quartz-carbonate vein. Sample 13-3/316.5.

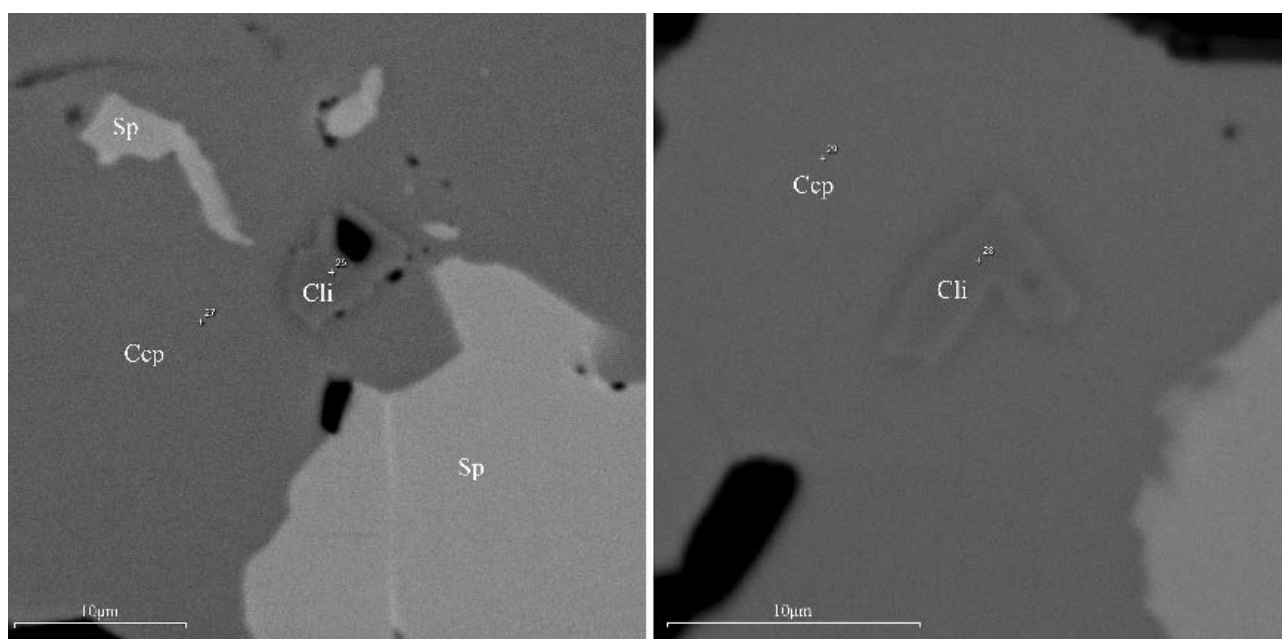


Рис. 9. Включения карролита (Cli) в халькопирите (Ccp) с включениями сфалерита (Sp)
СЭМ фото. Обр. 11-7/154.1.
Fig. 9. Carrollite inclusions in chalcopyrite (Ccp) with sphalerite inclusions (Sp).
BSE images. Sample 11-7/154.1.

борнитом и блеклыми рудами. Штроейерит более распространен, чем маккинстриит. Минерал входит в состав комплексной ассоциации, которая включает сфалерит, галенит, борнит, халькопирит и теннантит (рис. 10). Интерстициальные зерна штроейерита нарастают на халькопирит, борнит и галенит. Характерны каймы штроейерита по границам теннантита и галенита. В свою очередь, тонкие (микрометровые) каймы халькопирита обрастают штроейерит. Реже

минерал наблюдается внутри сфалеритовых агрегатов. В полированных шлифах из зоны окисления верхних горизонтов месторождения Ак-Суг отмечались зерна штроейерита со структурами распада, продуктами которого являются самородное серебро и ковеллин. Размеры зерен штроейерита варьируют от 6×9 мкм до 0.033×0.053 мм. Состав штроейерита стехиометричен (табл. 2).

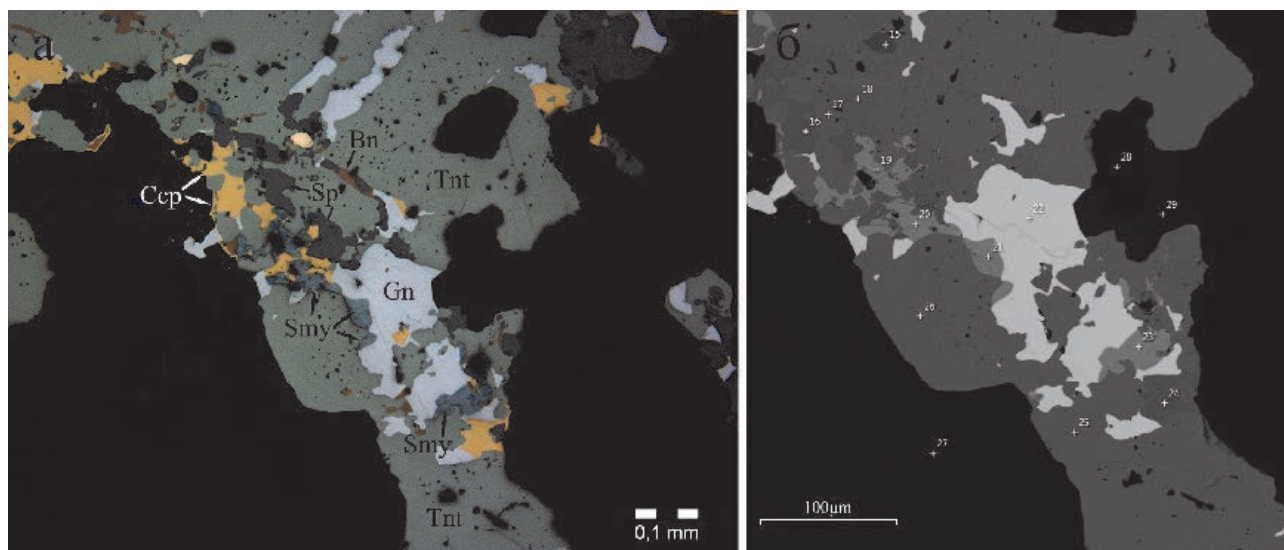


Рис. 10. Штрмейерит (Smy) в ассоциации с сульфидами (Ccp – халькопирит; Gn – галенит; Sp – сфалерит; Bn – борнит) и блеклой рудой (Tnt – теннантит). Обр. 3г-1/292.0.

Fig. 10. Stromeyerite (Smy) in assemblage with sulfides (Ccp – chalcopyrite; Gn – galena; Sp – sphalerite; Bn – bornite) and fahlore (Tnt – tennantite). Sample 3g-1/292.0.

Маккинстриит является редким минералом и был обнаружен в одном образце, отобранном на глубине 342 м (рис. 11). Он образует тонкие (толщиной от 3 до 8 мкм) изогнутые прожилки в халькопирите и реже замещает халькопирит-борнитовые сростки по краям, достигая размеров зерен до 14×22 мкм. Отклонения состава маккинстриита от стехиометрии (табл. 2), возможно, связаны с расположением его маломощных прожилков в халькопирите среди теннантитовых прожилков.

Оксиды

В составе кварц-карбонатных прожилков с мышьяковистой самородной медью в западной части месторождения (в зоне контакта интрузивных пород массива с вулканогенно-осадочными образованиями девонского возраста) установлены браннерит, а также шеелит.

Браннерит UTi_2O_6 образует пластинки длиной до 5–7 мкм внутри и по краям зерен мышьяковистой самородной меди (рис. 12). В составе включений определены U, Ti и O (табл. 3). Кроме браннерита, в ассоциации с самородной медью в составе поздних карбонатных и кварц-карбонатных прожилков ранее уже были отмечены кислородсодержащие минералы, такие как – флоренсит-(Ce) и ксенотим-(Y), а также фторапатит (Шведов и др., 2021).

Шеелит $CaWO_4$ относится к редким минералам Ак-Сугского месторождения. Он был обнаружен в единственном образце из плагиогранит-порфиров,

отобранном на глубине 225 м. Минерал образует ксеноморфные зерна размером от 0.06×0.09 до 0.05×0.11 мм внутри агрегатов борнита и халькозина (рис. 13). В ассоциации с шеелитом также присутствуют небольшие зерна сфалерита, халькопирита, селенсодержащего галенита и гематита. Из нерудных минералов с шеелитом ассоциируют кварц, карбонаты, реже – целестин. Состав шеелита стехиометричен (табл. 3), а небольшая примесь Cu в его составе (около 1 мас. %), возможно, связана с влиянием окружающих медьсодержащих минералов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Минеральный состав руд месторождения Ак-Суг характеризуется большим разнообразием и сложностью взаимоотношений минералов. Новые данные по минералогии месторождения позволили дополнить имеющиеся представления о составе его минеральных ассоциаций различных стадий формирования.

Порфировая стадия. Пирит на месторождении является одним из самых распространенных рудных минералов: его количество в пропилитизированных породах зоны пиритового ореола достигает 10–15 %. Со- и Cu-Со-содержащий пирит, по нашему мнению, представляет собой более позднюю генерацию данного минерала. Высокие (до 10.2 мас. %) содержания Cu в пирите известны давно (Auger, 1941; Frenzel, Otteman, 1967; Рудашевский и др., 1974), но объясняются по-разному.

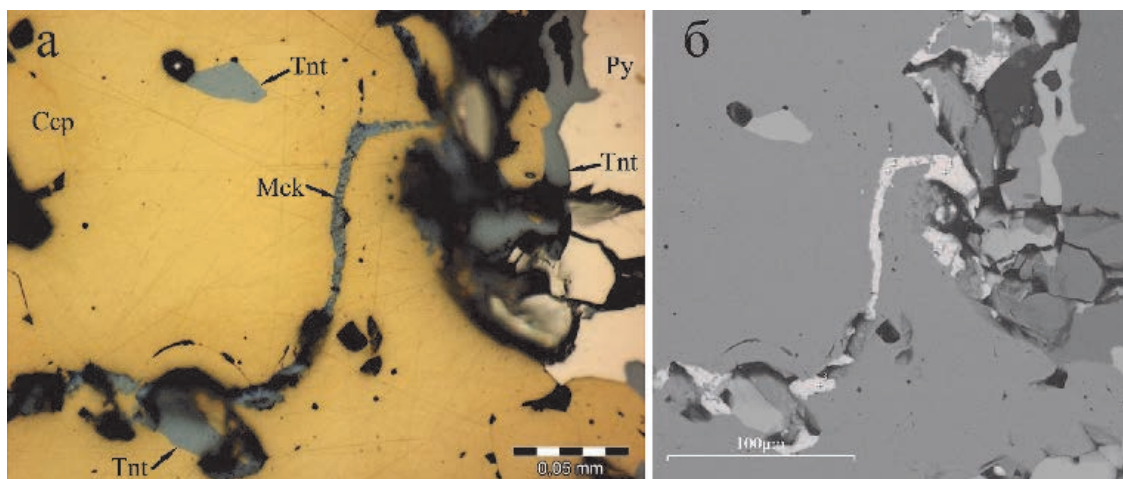


Рис. 11. Прожилочек маккинстриита (Mck) в халькопирите (Ccp).

Py – пирит; Tnt – теннантит. Обр. 3г-1/342.0.

Fig. 11. Mckinstryite veinlet (Mck) in chalcopyrite (Ccp).

Py – pyrite, Tnt – tennantite. Sample 3g-1/342.0.

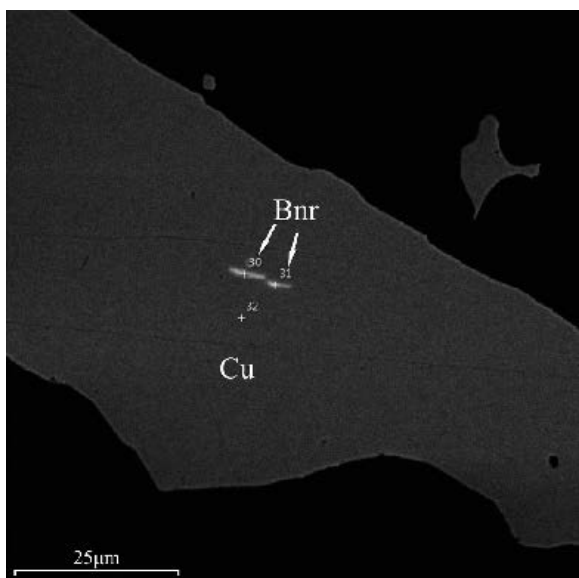


Рис. 12. Пластины браннерита (Bnr) внутри зерна самородной меди (Cu).

СЭМ фото. Обр. 5-4/263.1.

Fig. 12. Brannerite plates (Bnr) in native copper grain (Cu).

BSE image. Sample 5-4/263.1.

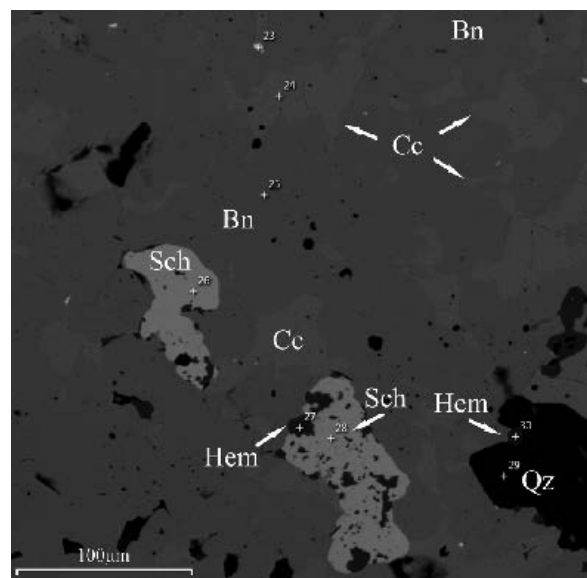


Рис. 13. Сrostки шеелита (Sch) и гематита (Hem) в борните (Bn)-халькозиновом (Cc) прожилке.

СЭМ фото. Обр. 5г-2/225.0.

Fig. 13. Intergrowths of scheelite (Sch) and hematite (Hem) in bornite (Bn)-chalcocite (Cc) veinlet.

BSE image. Sample 5g-2/225.0.

Химический состав кислородсодержащих минералов Ак-Сугского месторождения

Chemical composition of oxides of the Ak-Sug deposit

Таблица 3

Table 3

№ рис.	№ ан.	Содержания элементов, мас. %						Сумма	Минерал	Формула	Образец
		O	Ca	Ti	Cu	W	U				
12	30	25.98	—	23.79	—	—	50.21	99.98	Браннерит	$Ti_{2.11}U_{0.89}O_6$	5-4/263.1
	31	31.85	—	21.09	—	—	47.06	100.00		$Ti_{2.07}U_{0.93}O_6$	
13	26	25.25	14.45	—	—	59.90	—	99.60	Шеелит	$Ca_{1.08}W_{0.97}O_4$	5г-2/225.0
	28	21.66	13.68	—	1.01	63.57	—	99.92		$Ca_{0.99}WO_4$	

Примечание. Формулы минералов рассчитаны на 4 (шеелит) и 6 (браннерит) атомов кислорода.

Note. The mineral formulas are recalculated to 4 (scheelite) and 6 (brannerite) oxygen atoms.

Так, Д. Воган и Дж. Крейг считали, что этому, вероятно, способствуют повышенное давление и высокое содержание других примесей: например, As, а в нашем случае, вероятно, и Co (Воган, Крейг, 1981). Согласно (Radcliffe, McSween, 1969), наличие обогащенных медью зон в пирите, которые одновременно содержат повышенные концентрации As, объясняется с позиции теории лигандов. По мнению Н.С. Рудашевского и др. (1974), появление медистых и кобальтсодержащих зон в пирите обусловлено неравновесными условиями его кристаллизации из растворов, содержащих Cu и Co. Экспериментальными работами (Shimazaki, Clark 1970) установлено, что максимальная растворимость (до 82 мол. %) CuS_2 в пирите существует при температуре 100 °C, затем резко понижается при повышении температуры, и при 275 °C уже составляет всего 10 мол. % CuS_2 . Обнаружение Co- и Cu-содержащего пирита (содержания CoS_2 до 3.32 и CuS_2 до 9.71 мол. %) в составе руд месторождения Ак-Суг позволяет предполагать, что образование данных минеральных форм на месторождении происходило при температурах порядка 285–275 °C (Shimazaki, Clark, 1970), тогда как подавляющая масса порфирового оруденения (пиритовые, пирит-халькопиритовые и борнитовые руды) была сформирована при участии более высокотемпературных флюидов с температурами порядка 450–350 °C (Кужугет и др., 2023). Также в рудах Ак-Сугского месторождения неоднократно наблюдались ситуации, когда центральная часть агрегата пирита (ранняя генерация) была окружена халькопиритовой оболочкой, которая впоследствии заместила пиритом второй генерации с небольшой примесью Cu. По нашему мнению, значительная часть Co- и Cu-содержащего пирита осаждалась из обогащенных Co и Cu растворов одновременно с пропилитизацией по периферии месторождения. Отчетливая геохимическая ассоциация Fe-Co-S (Лобанов и др., 2023), выделенная по результатам факторного анализа геохимических данных, указывает, что кобальт входит в состав пирита.

Менее распространенным минералом кобальта на Ак-Сугском месторождении является карролит – минерал типичный для высокотемпературных стадий порфирово-эпитермальных, скарновых и колчеданных месторождений меди, формирующийся в ранних золото-пирит-халькопиритовых ассоциациях наряду с борнитом, пирротинном, кобальтином и Co-пиритом при температурах порядка 450–320 °C (Молошаг, 2009; Ковалев и др., 2019).

Эпитермальная и субэпитермальная стадии. Значительная часть минералов, охарактеризованная в данной статье, сформирована гидротермальными растворами в диапазонах температур 415–325 и 370–200 °C, соответственно (Кужугет и др., 2023). К таким минералам относятся берцелианит, михараит, волинскит, виттихенит, самородный висмут, галенит (в том числе, Se-содержащий) и браннерит. Они обнаружены в зонах борнит-халькопиритовых и халькопирит-теннантитовых руд, пространственно соответствующих стержневой части Ак-Сугской порфировой системы (Лобанов и др., 2023). Находки вышеупомянутых минеральных фаз являются единичными и, предположительно, могут быть связаны с эпитермальной и субэпитермальной стадиям. В ассоциациях с ними регулярно отмечаются пирит, халькопирит, борнит, айкинит, гессит, теннантит и тетраэдрит. В этих минералах постоянно обнаруживаются (в виде главных или примесных компонентов) Bi, Se, Cu, Ag, Fe, Te и Pb – типичные элементы эпитермальной и полиметаллической (галенит-сфалеритовой) минерализации верхних горизонтов и периферии порфировых систем (Sillitoe, 2010). Изоморфное вхождение Se в состав рудных минералов можно интерпретировать как свидетельство его наибольшей активности на данных стадиях рудогенеза. Согласно литературным данным (Pirard, Habert 2008), из Se-Cu-содержащего флюида при снижении температуры среды минералообразования и падения концентраций Co, а затем и Se может формироваться следующий ряд минералов: берцелианит Cu_2Se , дигенит $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ и халькозин Cu_2S . Температура формирования берцелианита оценивается примерно в 200 °C (Pirard, Habert, 2008). Срастания виттихенита, галенита и самородного висмута, предположительно, образовались в процессе разложения айкинита. Доказательством того, что самородный висмут мог образоваться в результате разложения айкинита, является отсутствие самородного висмута за пределами возможной реликтовой границы разложившейся сульфосоли, которая в настоящее время ограничена контуром виттихенитового агрегата. Также в ходе минераграфических исследований был зафиксирован айкинит со структурами разложения, по границам которого отмечались галенит и/или виттихенит, но отсутствовал самородный висмут. Сходный процесс был ранее отмечен на молибден-порфировом месторождении Ипчул (Республика Хакасия) (Иванкин, 1961).

Свидетельством изменения pH среды минералообразования могут служить вариации соотношений CO_2/CH_4 в газовой фазе, указывающие на изменение окислительно-восстановительных условий (Шапаренко, 2022). В ходе изучения состава газовой фазы флюида в кварцевых прожилках на Ак-Сугском месторождении методом валовой газовой хромато-масс-спектрометрии установлены широкие вариации этого показателя (неопубликованные данные авторов). Общий диапазон значений соотношений CO_2/CH_4 (230–20000) указывает на увеличение окисленности флюида при переходе от более ранних прожилков к поздним. Однако по данным (Смирнов и др., 2015) локально возможны и обратные изменения в связи с привнесом гидротермальными растворами восстановителей – ионов S^{2-} и $[S_2]^{2-}$ и образованием сульфидов (в описываемом случае виттехинита и галенита).

В составе мелких пластинок браннерита полностью отсутствует торий и редкие земли (табл. 3), что позволяет охарактеризовать его как средне-низкотемпературную (в пределах до 225–300 °C) модификацию (Гинзбург и др., 1989).

Богдановичит, штрмейерит, маккинстриит и шеелит образовались в низкотемпературную стадию (ниже 200 °C). Богдановичит присутствует среди среднетемпературных минералов – теннантита, халькопирита и гессита, но является самым поздним из них, и согласно литературным данным (Cabral et al., 2016), образуется при температурах не превышающих 120 °C. Штрмейерит и маккинстриит отмечаются в аналогичных минеральных ассоциациях с борнитом, халькопиритом и теннантитом. Авторы считают, что штрмейерит формируется за счет Ag-содержащих разностей блеклых руд (вероятно, аргентотеннантита или фрейбергита).

На Ак-Сугском месторождении основные запасы меди приурочены к тоналит-порфирам с суммой щелочей ($Na_2O + K_2O$ 4.5–5.5 мас. %). Подавляющая часть запасов молибдена связана с плагิโอгранит-порфирами с суммой щелочей 5.0–6.5 мас. %. С последними также связаны спорадические находки шеелита в ассоциации с халькозином и борнитом, возможно, отвечающие «специфической» Mo-W стадии рудообразования на месторождении. Также это подтверждается тем известным фактом, что молибденовая и сопутствующая ей вольфрамсодержащая минерализация в молибден-порфировых месторождениях (например, Сорское) чаще приурочена к интрузивным по-

родам с более высокими содержаниями кремнезема и щелочей относительно пород медно-порфировых объектов (Шадчин и др., 2023). Ранее из других минералов вольфрама на месторождении Ак-Суг отмечался только ферберит $FeWO_4$ (Монгуш и др., 2013; Кужугет и др., 2019).

Авторы считают, что шеелит на Ак-Сугском месторождении мог образоваться как самостоятельный первичный минерал, так и в результате замещения ферберита шеелитом + гематитом. Поскольку ферберит и изоморфный ему (но не описанный на месторождении Ак-Суг) гюбнерит $MnWO_4$ являются высокотемпературными минералами (температуры образования до 400–500 °C), при высоких температурах сосуществуют и смешиваются неограниченно, а Ca не может входить в их состав в значительном количестве (Рамдор, 1966). В нашем случае, понижение температуры рудоносного флюида и увеличение содержания Ca, например, из-за растворения осадочных карбонатов метаморфогенными водами могло привести к отложению шеелита. Считается, что формирование шеелита за счет вольфрамита чаще отмечается и активнее происходит в результате протекания щелочных реакций (Рамдор, 1962). Локальное повышение щелочности, повлиявшее на процессы минералообразования на Ак-Сугском месторождении, отмечалось нами ранее на основании изучения других минеральных парагенезисов.

ВЫВОДЫ

По результатам изучения вещественного состава руд Ак-Сугского Au-Mo-Cu порфирового месторождения выявлены ранее не охарактеризованные минералы: богдановичит, берцелианит, волинскит, виттехинит, карролит, маккинстриит, михараит, самородный висмут, Co-содержащий пирит, шеелит и штрмейерит. Общий тренд эволюции минеральных парагенезисов показывает, что в процессе минералообразования фугитивность серы металлоносных растворов постепенно снижалась. Это подтверждается значительным количеством рудообразующих сульфидных минералов (борнит, халькопирит, пирит), сформированных на ранних этапах рудогенеза. По мере снижения температуры и давления из рудоносного флюида формировались блеклые руды, теллуриды и селениды цветных и благородных металлов. На завершающих стадиях рудообразования формировались самородные металлы (Cu, Ag, Bi, Te). Значительные количества

меди и кобальта в рудном флюиде обуславливают возможность образования ранних высокотемпературных минералов, содержащих эти элементы как в качестве главных минералообразующих компонентов, так и в качестве примесей, например, Cu-Co-содержащий пирита и карролита.

В ходе эпитепимального и субэпитепимального этапов по мере снижения температуры и подъема рудоносного флюида в апикальные части интрузивного штока, широкое распространение получили минералы, содержащие Ag, Bi, Se и Te, такие как михарит, волинскит, виттихенит, самородный висмут, Se-содержащий галенит.

О поздних этапах рудо- и минералообразования свидетельствует формирование низкотемпературных кварц-карбонатных прожилков, сопровождающихся образованием редкоземельной, урановой (ксенотим-(Y), флоренсит-(Ce), браннерит, а также сульфатной (барит-целестин) минерализации. Не исключено, что их формирование отражает влияние наложенных процессов палеозой-раннемезозойского щелочно-гранитного магматизма в районе Кандатского разлома, приведших к образованию Арысканского Y, Zr, REE месторождения и ряда рудопроявлений среди гранитоидов окуневского комплекса в радиусе до 15 км от Ак-Сугского месторождения. Список низкотемпературных минеральных образований дополняют богдановичит, штрмейерит, маккинстриит, а также, возможно, шеелит.

Локальное влияние метеорных вод, смена окислительно-восстановительных условий с протеканием восстановительных реакций могли способствовать образованию небольших порций флюидов щелочного состава. По мнению авторов, в результате их влияния на минералообразующую среду могли образовываться самородный висмут (в результате разложения айкинита) и шеелит.

В результате проведенных работ на месторождении Ак-Суг обнаружены и охарактеризованы с различной степенью детальности минералы, принадлежащие к классам сульфидов, селенидов, сульфосоединений и сложных оксидов. Значительная часть этих минералов образовалась на поздних стадиях формирования месторождения, в ходе субэпитепимальной и эпитепимальной стадий. Широкое разнообразие аксессуарных минералов определяется локальными изменениями условий минералообразования.

ЛИТЕРАТУРА

- Берзина А.Н., Сотников В.И. (2001) Платина и палладий в рудах медно-молибден-порфировых месторождений Сибири и Монголии. *Доклады РАН*, 378 (5), 665–667.
- Берзина А.Н., Берзина А.П., Гимон В.О. (2019) Cu-Mo-порфировое месторождение Аксуг (Северо-Восточная Тува): хронология процессов магматизма и рудообразования (U-Pb, Re-Os изотопные данные), металлогенические следствия. *Геология и геофизика*, 60(9), 1330–1349. <https://doi.org/10.15372/GiG2019070>.
- Берзина А.Н., Сотников В.И., Экономоу-Элиопулос М., Элиопулос Д.Г. (2007) Первая находка меренскита (Pd,Pt)Te₂ в рудах Cu-Mo-порфировых месторождений России. *Геология и геофизика*, 48(8), 848–851.
- Воган Д., Крейг Дж. (1981) Химия сульфидных минералов. Москва, Наука, 575 с.
- Гинзбург А.И., Чернышева Л.В., Куприянова И.И. (1989) Типоморфизм минералов. Справочник. Москва, Недра, 560 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2013) Масштаб 1:200 000 Восточно-Саянская серия. Лист N-47-XIX (Ак-Суг). Объяснительная записка. Москва, МФ ВСЕГЕИ, 214 с.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М. (2007) Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии. *Геология и геофизика*, 48(1), 93–108.
- Добрянский Г.И., Сотников В.И., Берзина А.Н., Яровой С.А. (1992) Особенности магматизма Аксугского медно-молибденового месторождения / Магматизм и металлогения рудных районов Тувы: Сб. науч. тр. Новосибирск, Наука, Сиб. Отделение, 49–62.
- Забелин В.И. (1992) Элементы геолого-генетической модели Аксугского медно-молибденового месторождения / Магматизм и металлогения рудных районов Тувы: Сб. науч. тр. Новосибирск, Наука, Сиб. Отделение, 92–103.
- Иванкин Г.А. (1961) Айкинит с Ипчульского месторождения (Хакасия). Известия Томского политехнического института, 120, 30–31.
- Ковалев К.Р., Калинин Ю.А., Туркина О.М., Гимон В.О., Абрамов Б.Н. (2019) Култуминское золото-медно-железо-скарновое месторождение (Восточное Забайкалье, Россия): петрогеохимические особенности магматизма и процессы рудообразования. *Геология и геофизика*, 60, 749–771. <https://doi.org/10.15372/GiG2019078>.
- Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Минина О.В. (1985) Минералого-геохимические типы руд медно-порфировых месторождений – золотоносность и зональность. *Геохимия*, (10), 1417–1429.
- Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Хертек А.К., Монгуш А.О., Бутанаев Ю.В. (2023) Золото-молибден-медно-порфировое месторождение Ак-Суг (Восточный Саян): благороднометаллическая минерализация, РТ-параметры и состав рудоносного флюида. *Геология рудных мес-*

торождений, 65(7), 634–661. <https://doi.org/10.31857/S0016777023070031>.

Кужугет Р.В., Монгуш А.О., Анкушева Н.Н. (2019) Источники серы сульфидов медно-золото-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточная Тува). *Минералогия*, 5(4), 73–82. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-4-6>.

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-месторождения порфирового, Восточная Тува. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, 2(22), 45–52.

Молошаг В.П. (2009) Использование состава минералов для оценки физикохимических условий образования колчеданных руд Урала. *Литосфера*, 2, 28–40.

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

Монгуш А.А., Терлеев А.А., Токарев Д.А., Дружкова Е.К. (2013) Гранитоиды и известняки из конгломератов преддуговой зоны Таннуольско-Хамсаринской островодужной системы (Тува): геохимия, палеонтология, корреляция. *Вестник Томского государственного университета*, 372, 184–192.

Лобанов К.В., Глушков Ю.В., Самородский П.Н., Муромцев Е.А., Шведов Г.И., Макеев С.М., Макаров В.А., Шадчин М.В. (2023) Геолого-минералогическая и геохимическая зональность Мо-Au-Cu-порфирового месторождения Ак-Суг, Северо-восточная Тува, Россия. *Геосферные исследования*, (3), 28–51. <https://doi.org/10.17223/25421379/28/3>.

Рамдор П. (1962) Рудные минералы и их сростания. Москва, Издательство иностранной литературы, 1132 с.

Рудашевский Н.С., Кондратьев А.В., Болдырева М.М. (1974) Пирит, содержащий медь, кобальт, цинк и Cu-пирит из колчеданных руд Летнего месторождения (Южный Урал) / Минералы и парагенезисы минералов гидротермальных месторождений. Ленинград, Наука (Ленингр. Отд.), 13–19.

Руднев С.Н. (2010) Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны западной Монголии. Автореф. дисс. на соиск. степ. д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, ИГМ СО РАН. 37 с.

Смирнов С.З., Кулик Н.А., Литасов Ю.Д., Вишневский А.В., Страховенко В.Д. (2015) Основные понятия минералогии и процессы минералообразования: Учеб. пособие. Новосибирск, РИЦ НГУ, 167 с.

Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О., Берзина А.Н. (2003) Аксугское Cu-Mo-порфировое месторождение в Северо-Восточной Туве: Ag/Ag геохронология, источники вещества. *Геология и геофизика*, 44 (11), 1119–1132.

Чвилева Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М. (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. Москва, Недра, 504 с.

Шадлун Т.Н., Тронева Н.В., Велчев В. (1975) Мышьяковистые пирит и бравоит из месторождения Седмочисленицы / Изоморфизм в минералах. Москва, Наука, 113–122.

Шадчин М.В., Лосев В.И., Макаров В.А. (2023) Интрузивные комплексы Алтае-Саянской складчатой области как источник порфирового оруденения / *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых*. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 110–111.

Шадчин М.В. (2022) Изотопный состав серы халькопирита медно-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточный Саян). *Сборник тезисов докладов III Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче»*. Москва, ЦНИГРИ, 223–228.

Шапаренко Е.О. (2022) «Физико-химические условия формирования золоторудных месторождений Благодатное и Доброе (Енисейский кряж). Дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 206 с.

Шведов Г.И., Самородский П.Н., Макаров В.А., Муромцев Е.А., Шадчин М.В., Лобастов Б.М., Глушков Ю.В. (2021) Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва. *Руды и металлы*, 1, 77–92. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10005>.

Auger P.C. (1941) Zoning and district variation of the minor elements in pyrite Canadian gold deposits. *Economic Geology*, 36, 401–423. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.36.4.401>.

Cabral A.R., Ließmann W., Jian W., Lehmann B. (2016) Bismuth selenides from St. Andreasberg, Germany: an oxidised five-element style of mineralisation and its relation to post-Variscan vein-type deposits of central Europe. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7). <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1431-z>.

Frenzel G., Ottemann J. (1967) Eine Sulfidparagenese mit kupferhaltigem Zonarpyrit von Nukundamu, Fiji. *Mineralium Deposita*, 1, 307–316.

Pirard C., Hatert F. (2008) The sulfides and selenides of the Musonoï mine, Kolwezi, Katanga, Democratic Republic of Congo, *The Canadian Mineralogist*, 46, 219–231 <https://doi.org/10.3749/canmin.46.1.219>.

Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. (2017) Paragenesis and Re-Os molybdenite age of Cambrian Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit, Tyva Republic, Russian Federation. *Economic Geology*, 112(4), 1021–1028. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.4.1021>.

Radcliffe D., McSween H.T. (1969) Copper zoning in pyrite from Cerro de Pasco, Peru. *American Mineralogist*, 55 (3–4), 527–528.

Sillitoe R.H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>.

Shimazaki H., Clark L.A. (1970) Synthetic FeS_2 – CuS_2 solid solution and fukuchilite-like minerals. *Canadian Mineralogist*, 10, 648–664.

Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.

REFERENCES

Berzina A.N., Sotnikov V.I. (2001) Platinum and palladium in ores of copper-molybdenum-porphyry deposits of Siberia and Mongolia. *Doklady RAN (Doklady of the Russian Academy of Sciences)*, 378(5), 665–667. (in Russian).

Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. (2019) The Aksug Cu-Mo porphyry deposit (Northeastern Tuva): Chronology of Magmatism and Ore Formation Processes (U-Pb, Re-Os Isotope Data) and Metallogenic Implications. *Russian Geology and Geophysics*, 60 (9), 1060–1075. <https://doi.org/10.15372/RGG2019070>

Berzina A.N., Sotnikov V.I., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D. (2007) First finding of merenskyite (Pd,Pt) Te_2 in porphyry Cu-Mo ores in Russia. *Russian Geology and Geophysics*, 48 (8), 656–658. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.07.001>.

Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M. (1988) *Guide for the identification of ore minerals in reflected light*. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian).

Dobretsov N.L., Buslov M.M. (2007) Late Cambrian–Ordovician tectonics and geodynamics of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics*, 48(1), 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.006>.

Dobryanskiy G.I., Sotnikov V.I., Berzina A.N., Yarovoy S.A. (1992) Features of magmatism of the Aksug copper-molybdenum deposit. In: *Magmatizm i metallogeniya rudnykh rayonov Tuvy. (Magmatism and Metallogeny of Ore Regions of Tuva)*. Novosibirsk, Nauka, 49–62. (in Russian).

Ginzburg A.I., Chernysheva L.V., Kupriyanova I.I. (1989) *Typomorphism of minerals. Guide-book*. Moscow, Nedra, 560 p. (in Russian).

Ivankin G.A. (1961) Aikinite from the Ipchuly deposit (Khakassia). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta (Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute)*, 120, 30–31. (in Russian).

Kovalev K.R., Kalinin Yu.A., Turkina O.M., Gimon V.O., Abramov B.N. (2019) Kultuma gold-copper-iron-skarn deposit (East Transbaikalia, Russia): petrogeochemical features of magmatism and ore-forming processes. *Geosfernyye issledovaniya (Geosphere Research)*, 60, 749–771. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/GiG2019078>.

Krivtsov A.I., Migachev I F., Minina O.V. (1985) Mineralogical-geochemical types of ores of porphyry

copper deposits: gold content and zoning. *Geohimiya (Geochemistry)*, (10), 1417–1429. (in Russian).

Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Khertek A.K., Mongush A.O., Butanayev Yu.V. (2023) Ak-Sug gold-molybdenum-copper deposit (Eastern Sayan): precious metal mineralization, PT parameters and composition of ore-bearing fluid. *Geology of Ore Deposits*, 65 (7), 634–661. <https://doi.org/10.31857/S0016777023070031>.

Kuzhuget R.V., Khertek A.K., Lebedev V.I., Zabelin V.I. (2015) Features of the composition of native gold in the ore assemblages of the Ak-Sug gold-copper-molybdenum porphyry deposit, Eastern Tuva. *Geologiya i mineral'no-syr'yevyye resursy Sibiri (Geology and Mineral Resources of Siberia)*, 2 (22), 45–52. (in Russian).

Kuzhuget R.V., Mongush A.O., Ankusheva N.N. (2019) Sulfur sources of sulfides of the Ak-Sug porphyry copper-gold deposit (Eastern Tuva). *Mineralogia (Mineralogy)*, 5(4), 73–82. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-4-6>. (in Russian).

Lobanov K.V., Glushkov Yu.V., Samorodskiy P.N., Muromtsev E.A., Shvedov G.I., Makeyev S.M., Makarov V.A., Shadchin M.V. (2023) Geological-mineralogical and geochemical zoning of the Ak-Sug porphyry Mo–Au–Cu deposit, Northeastern Tuva, Russia. *Geosfernyye issledovaniya (Geosphere Research)*, (3), 28–51. <https://doi.org/10.17223/25421379/28/3>. (in Russian).

Lykhin D.A., Yarmolyuk V.V., Vorontsov A.A., Travin A.V. (2019) Structure and age of the Raduga fluorite-beryl deposit (West Sayan mountains): problem of evaluation of the metallogenic potential of the region. *Reports Earth Sciences*, 488(1), 1039–1045. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19090289>.

Moloshag V.P. (2009) Application of mineral composition for the assessment of physicochemical conditions of formation of massive sulfide ores in the Urals. *Litosfera (Lithosphere)*, 2, 28–40. (in Russian).

Mongush A.A., Terleev A.A., Tokarev D.A., Druzhkova E.K. (2013) Granitoids and limestones from conglomerates of the forearc zone of the Tannuol-Khamsara island arc system (Tuva): geochemistry, paleontology, correlation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of Tomsk State University)*, 372, 184–192. (in Russian).

Mongush A.D., Lebedev V.I. (2013) Ak-Sug porphyry copper-molybdenum deposit: composition of rocks and ores. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya. Seksii nauk o Zemle RAYEN (News of the Siberian department. Section of Geosciences of the Russian Academy of Natural Sciences)*, 1(42), 22–29. (in Russian).

Nikiforov A.V., Khertek A.K., Kozlovskiy A.M. (2017) Ayskan rare earth deposit: first results of Sm–Nd isotope studies, Eastern Tuva. *Materialy III Vserossiyskoy shkoly-konferentsii (Materials of the III All-Russian School-Conference)*. Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN, 99–102. (in Russian).

Rhamdor P. (1962) Ore minerals and their aggregates. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1132 p. (in Russian).

- Rudashevskiy N.S., Kondrat'yev A.V., Boldyreva M.M. (1974) Cu-, Co-, and Zn-bearing pyrite and Cu-pyrite from massive sulfide ores of the Letnee deposit (South Urals). In: *Mineraly i paragenезисы минералов гидротермальных месторождений (Minerals and Assemblages of Minerals of Hydrothermal Deposits)*. Leningrad, Nauka, 13–19. (in Russian).
- Rudnev S.N. (2010) *Early Paleozoic granitoid magmatism of the Altai-Sayan fold region and the Ozernaya zone of Western Mongolia* (Doctor dissertation). Novosibirsk, IGM SO RAN, 37 p. (in Russian).
- Smimov S.Z., Kulik N.A., Litasov Y.D., Vishnevsky A.V., Strakhovenko V.D. (2015) *Basic concepts of mineralogy and mineral formation processes: Tutorial*. Novosibirsk, RIC NSU, 167 p. (in Russian).
- Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Shevchenko D.O., Berzina A.N. (2003) The Aksug porphyry Cu-Mo deposit in Northeastern Tuva: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and sources of matter. *Russian Geology and Geophysics*, 44(11), 1119–1132.
- Shadchin M.V. (2022) Sulfur isotopic composition of chalcopyrite of the Ak-Sug porphyry copper deposit (Eastern Sayan). *III Molodezhnaya nauchno-obrazovatel'naya konferentsiya TSNIGRI «Mineral'no-syr'yevaya bazaalmazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov – ot prognoza k dobyche»*. (III Youth Scientific and Educational Conference of TSNIGRI “Mineral Resource Base of Diamonds, Precious and Non-Ferrous Metals - from Forecast to Production”). Moscow, TSNIGRI, 223–228. (in Russian).
- Shadchin M.V., Losev V.I., Makarov V.A. (2023) Intrusive complexes of the Altai-Sayan fold region as a source of porphyry mineralization. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr: trudy XXVII Mezhdunarodnogo simpoziuma studentov i molodykh uchenykh imeni akademika M.A. Usova (Problems of Geology and Development of Enteriors: Proceedings of the XXVII International Symposium of Students and Young Scientists named after Academician M.A. Usov)*. Tomsk, TPU, 110–111. (in Russian).
- Shadlun T.N., Troneva N.V., Velchev V. (1975) Arsenic pyrite and bravoite from the Sedmochilitsa deposit. In: *Izomorfizm v mineralakh (Isomorphism in Minerals)*. Moscow, Nauka, 113–122. (in Russian).
- Shaparenko E.O. (2022) *Physical and chemical conditions of formation of the Blagodatnoye and Dobroe gold deposits (Yenisei Range)*. (Candidate dissertation). Novosibirsk, 206 p. (in Russian).
- Shvedov G.I., Samorodskiy P.N., Makarov V.A., Muromtsev E.A., Shadchin M.V., Lobastov B.M., Glushkov Yu.V. (2021) Arsenian native copper of the Ak-Sug porphyry gold-copper deposit, Eastern Tyva. *Rudy i metally (Ores and Metals)*, 1, 77–92. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10005>. (in Russian).
- State Geological Map of the Russian Federation. (2013) Scale 1:200 000 East Sayan series. Sheet N-47-XIX (Ak-Sug). Explanatory letter. Moscow, MF VSEGEI, 214 p. (in Russian).
- Voghan D., Craig J. (1981) *Chemistry of sulfide minerals*. Moscow, Nauka, 575 p. (in Russian).
- Zabelin V.I. (1992) Elements of geological and genetic model of the Aksug copper-molybdenum deposit. In: *Magmatizm i metallogeniya rudnykh rayonov Tuvy (Magmatism and Metallogeny of Ore Regions of Tuva)*. Novosibirsk, Nauka, 92–103. (in Russian).

Информация об авторах

Шадчин Максим Викторович – ассистент, Институт цветных металлов, Сибирский Федеральный Университет, shamamrmr@gmail.com.

Шведов Геннадий Иванович – доцент, Институт цветных металлов Сибирский Федеральный Университет, g.shvedov@mail.ru.

Макаров Владимир Александрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт цветных металлов Сибирский Федеральный Университет, vmakarov@sfu-kras.ru.

Лобастов Борис Михайлович – старший преподаватель, Институт цветных металлов Сибирский Федеральный Университет, lbm02@ya.ru.

Сильянов Сергей Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Институт цветных металлов, Сибирский Федеральный Университет, ssilyanov@sfu-kras.ru.

Сердюк Сергей Станиславович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт цветных металлов, Сибирский Федеральный Университет, geosss1@mail.ru.

Maksim V. Shadchin – Assistant, Institute of Base Metals, Siberian Federal University, shamamrmr@gmail.com
Gennady I. Shvedov – Associate Professor, Institute of Base Metals, Siberian Federal University, g.shvedov@mail.ru
Vladimir A. Makarov – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Institute of Base Metals, Siberian Federal University, vmakarov@sfu-kras.ru

Boris M. Lobastov – Senior Lecturer, Institute of Base Metals, Siberian Federal University, lbm02@ya.ru

Sergey A. Sil'yanov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Associate Professor, Institute of Base Metals, Siberian Federal University, ssilyanov@sfu-kras.ru

Sergey S. Serdyuk – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Institute of Base Metals, Siberian Federal University, geosss1@mail.ru