

На правах рукописи



**Шадчин Максим Викторович**

**Геология и условия образования руд  
медно-порфирового месторождения Ак-Суг  
(Северо-восточная Тува)**

1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных  
ископаемых, минерагения»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»)

**Научный руководитель:**

**Макаров Владимир Александрович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой Геологии месторождений и методики разведки Института цветных металлов СФУ, г. Красноярск

**Официальные оппоненты:**

**Звездов Вадим Станиславович** – доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом металлогении ФГБУ «ЦНИГРИ» (г. Москва).

**Неволько Пётр Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук, и.о. заведующего лаборатории рудообразующих систем, ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН» (г. Новосибирск).

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится «6» марта 2025 года в 14.00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.050.01, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН [https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles\\_dzubenko/shadchin/dis-Shadchin.pdf](https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/shadchin/dis-Shadchin.pdf).

Автореферат разослан «3» февраля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.050.01, к.г.-м.н.

А.В. Котляров

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Медно-порфиновые и молибден-медно-порфиновые месторождения являются мировыми лидерами по запасам Cu и Mo (более 65% и 60% соответственно), а также по добыче цветных и сопутствующих благородных металлов (до 75% общемировой Cu, около 50% молибдена до 20% Au, большая часть Re) [Sillitoe, 2010].

Супергигантские (>10 млн. т Cu), гигантские (3-10 млн. т Cu) и крупные (<3 млн. т Cu) порфиновые месторождения составляют основу горнодобывающей отрасли ряда стран, таких как Чили (месторождения El Teniente, Chuquibambilla), США (Butte, Bingham), Мексика (Cananea) [Clark, 1993]. В России потенциал порфиновых месторождений в экономике горнодобывающей отрасли раскрыт слабо. После запуска отработки месторождений Михеевское и Томинское на Урале в 2012 году, доля добываемой меди из порфиновых месторождений достигла 23,8% [Якубчук, 2022]. На протяжении последних 20 лет объем геологоразведочных работ на медно-порфиновые месторождения заметно вырос. На сегодняшний день Государственным балансом ГКЗ Роснедра учтено 6 медно-порфиновых месторождений (расположены по убыванию утвержденных запасов): Малмыжское (Хабаровский край), Песчанка (Чукотка), Ак-Сугское (Республика Тува), Михеевское и Томинское (Челябинская область), а также Иканское (Амурская область). К крупным по запасам Cu, Mo, Au относятся месторождения Песчанка, Малмыжское, Ак-Суг [Звездов, 2022]. В настоящее время большая часть прогнозно-поисковых работ на медно-порфиновые объекты в РФ проводится в восточных регионах страны в пределах потенциальных рудных районов мезо-кайнозойских вулканоплутонических поясов.

Ак-Сугское медно-порфиновое месторождение – единственный крупный по запасам Cu и Mo объект в Алтае-Саянском регионе (запасы руды – 534,8 млн. т., меди – 3633,3 тыс. т., молибдена – 77,9 тыс. т., золота – 83 т.). Очевидно, что потенциал данного региона на выявление порфиновых объектов далеко не исчерпан. В пределах Алтае-Саянской складчатой области (АССО) известна серия молибден-порфиновых месторождений (Сорское, Агаскырское, Ипчальское), крупнейшее из которых - Сорское, было выявлено еще в первой половине XX века и успешно разрабатывается в настоящее время. Кроме Ак-Сугского медно-порфинового месторождения, в настоящее время здесь выявлен и разведывается схожий с ним объект - месторождение Кызык-Чадр, что свидетельствует о существенном потенциале этого региона на выявление медно-порфиновых месторождений. В этой связи изучение геологического строения, генезиса и минералого-геохимических особенностей формирования медно-порфинового месторождения Ак-Суг, как крупного объекта-эталона в АССО, имеет важное научное и прикладное значения для построения геолого-генетической и прогнозно-поисковой моделей, а также для выработки критериев поиска и прогноза аналогичных месторождений.

**Объект исследования** – Ак-Сугское месторождение молибден-медно-порфиновой (золотоносной) формации.

**Целью исследования** является установление геологических и физико-химических условий образования рудных зон, а также выявление минералого-геохимических особенностей и зональности Ак-Сугского медно-порфинового месторождения.

### Задачи:

1. Изучить фондовую и опубликованную литературу по объекту исследования и его аналогам;

2. Установить возраст и геодинамическую обстановку формирования рудолокализирующих пород аксугского комплекса;
3. Изучить вещественный состав и типоморфные особенности рудной минерализации, определить последовательность рудообразования и пространственную локализацию оруденения, приуроченность к зонам метасоматитов;
4. На основе анализа геологических и минералого-геохимических данных выявить этапы формирования порфировой рудно-магматической системы и характер зональности гидротермально-метасоматических изменений;
5. Определить состав минералообразующего флюида и РТ-параметры формирования кварцево-жильных зон с рудной минерализацией;
6. Определить изотопный состав серы сульфидов, углерода и кислорода жильного кальцита для установления наиболее вероятных источников флюида и предполагаемых температур минеральных парагенезисов.

### **Фактический материал и личный вклад автора**

В исследовании автором использованы прозрачные (более 200 шт.) и полированные шлифы (более 100 шт.), а также графические и аналитические материалы результатов разведки Ак-Сугского месторождения (2019 г.), предоставленные сотрудниками компаний ООО «Голевская ГРК» и ООО «Тывамедь» в ходе выполнения работ по теме «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения, как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции».

В 2020-2021гг. при участии автора было отобрано более 100 образцов из керна технологических скважин, охватывающих и учитывающих изменения вмещающих пород и рудной минерализации как по латерали, так и в вертикальном разрезе. Коллекция была использована для изучения газово-жидких включений в кварце и кварц-карбонатных прожилках, минералого-петрохимических и изотопно-геохимических исследований.

Для построения объемной минералого-геохимической модели месторождения использованы данные рядового опробования (61752 пробы на 19 элементов), данные анализов 7451 групповых проб на 40 элементов, а также количественного минералогического анализа (500 проб).

Автором лично определены цель, задачи и методика исследований, проведен литературный обзор и анализ отечественной и зарубежной опубликованной и фондовой научной литературы по теме исследования и смежным областям, сформулированы защищаемые положения и выводы диссертационной работы. Для минералого-геохимических исследований пород и руд различных горизонтов и рудных залежей Ак-Сугского месторождения, изготовлены полированные шлифы и штуфы (более 50 шт.), а также подготовлены мономинеральные фракции (свыше 40 проб) и специализированные препараты (более 30). При участии автора выполнено минераграфическое изучение руд, электронно-микроскопические исследования, термобарогеохимические и часть изотопно-геохимических исследований. Созданы модели геолого-минералогической и метасоматической зональности месторождения, проведен факторный анализ геохимических данных.

Обработка геологической информации и аналитических данных выполнена автором с использованием специализированных программ и пакетов ГИС и ГГИС (Micromine, Leapfrog, Surfer, Grapher, Statistica, OriginPro и др.). Подготовка текста диссертационной работы и графического материала к ней выполнено непосредственно диссертантом.

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач в работе применены следующие методы (детальное описание методики приведено в 7 главе диссертации):

1. Оптическая микроскопия для изучения вмещающих пород, минерального состава и флюидных включений в прозрачных и полированных шлифах, пластинках (~ 300 препаратов);
2. Электронная микроскопия для изучения вещественного состава руд (SEM EDS/WDS) (~ 100 образцов и более 2000 анализов);
3. U-Pb датирование цирконов (LA-ICP-MS) дорудных и синрудных интрузивных фаз Аксугского плутона (5 образцов);
4. Силикатный анализ пород для определения содержания основных петрогенных элементов в виде их оксидов (265 определений);
5. ICP-AES для изучения элементного состава вмещающих пород и РЗЭ (45 определений);
6. Газовая хромато-масс-спектрометрия для изучения валового состава газовых включений кварцевых и карбонатных прожилков (4 образца); Рамановская спектроскопия и микротермометрические исследования для установления температур полной и частичной гомогенизации флюидных включений, эвтектики, плавления льда и сжиженных газов (20 кварцевых пластинок);
7. Определение изотопного состава серы сульфидных минералов и углерода/кислорода в карбонатных прожилках (~40 и 20 измерений соответственно);
8. Геохимическое картирование и объемное моделирование месторождения.

### **Основные защищаемые положения**

1. Согласно изотопному U-Pb датированию цирконов вмещающих пород Ак-Сугского месторождения, возраст тел тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров 3 фазы аксугского комплекса, локализующих основную массу Au-Mo-Cu оруденения, составляет  $523 \pm 7$  и  $521 \pm 6$  млн. лет соответственно. Полученные геохронологические данные позволяют скоррелировать возраст рассматриваемых интрузивных тел с одним из этапов островодужного магматизма Восточной Тувы.
2. В составе первичных ореолов Ак-Сугского Au-Mo-Cu-порфирового месторождения, установлено 8 обособленных геохимических ассоциаций, отражающих состав, геохимическую специализацию вмещающих пород и основные минеральные парагенезисы кольцеобразных минерализованных зон порфировой системы. Метасоматическая зональность проявлена в последовательной смене от периферии к центру зон пропицитизации, кварц-хлорит-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов (с реликтами зон калишпатизации и биотитизации) и окварцевания.
3. Кварцевые жилы рудных зон Ак-Сугского месторождения сформированы гидротермальными растворами углекислотно-водного состава в диапазоне температур  $79 - 500$  °C, давлений –  $0,4 - 122,1$  бар и солености от  $0,35$  до  $17,52$  мас. % (NaCl-экв.). В составе минералообразующих флюидов преобладают  $H_2O$  и  $CO_2$ . Изотопный состав серы ( $\delta^{34}S = -2,9 - +3,2\%$ ) главных сульфидных минералов месторождения свидетельствует о гомогенном мантийном источнике рудного вещества. Соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода ( $\delta^{13}C -3,6 - +2,2\%$ ;  $\delta^{18}O +10,4 - +21,8\%$ ) карбонатных прожилков указывают на полигенный источник углекислоты и воды, вовлеченных в рудно-метасоматический процесс.

### **Научная новизна**

Диссертационное исследование содержит актуальные данные о геологическом строении и возрасте становления Аксугского плутона, в том числе, его рудопродуктивных фаз, с которыми парагенетически связано одноименное медно-порфировое месторождение.

На основании авторских данных U-Pb датирования, с учетом ранее опубликованных результатов предшественников, дана оценка возрастного диапазона протекания интрузивного магматизма, рудоотложения и метасоматических процессов.

Впервые построены объемные модели минералогической, метасоматической и геохимической зональности Ак-Сугского месторождения, дана оценка уровня эрозионного среза рудно-магматической системы.

В работе приведены актуальные данные по вещественному составу руд (выявлено 15 не описанных ранее минеральных видов), уточнена схема стадийности и последовательности минералообразования. Впервые для руд Ак-Сугского месторождения детально охарактеризованы и пространственно локализованы обнаруженные мышьяк-содержащие разновидности самородной меди – альгодонит и  $\alpha$ -домейкит.

Впервые определены изотопные соотношения углерода и кислорода карбонатных прожилков, а также существенно дополнена информация об изотопном составе серы главных рудных минералов – халькопирита и пирита.

Определен состав летучих компонентов в индивидуальных флюидных включениях, изученных методами рамановской спектроскопии и микротермометрии. Впервые проанализирован валовый состав газовой фазы в кварцевых и карбонатных прожилках методом газовой хромато-масс-спектрометрии.

### **Практическая значимость**

Совокупность полученной геолого-геохимической информации об Ак-Сугском месторождении, как эталонном медно-порфировом объекте в Восточно-Саянской металлогенической провинции, способствует развитию представлений о генезисе и условиях локализации аналогичных рудных объектов в геологических структурах вышеуказанного региона и Алтае-Саянской складчатой области в целом. Это позволит применить представленные в работе данные для выделения поисковых критериев и признаков рудных объектов аналогичного генетического типа и может положительно повлиять на перспективы выявления новых и переоценке ранее изучавшихся рудопроявлений и месторождений. Актуальные данные о вещественном составе руд, минералого-геохимической зональности и уровне эрозионного среза порфировой системы могут быть использованы в производственной работе в процессе освоения Ак-Сугского месторождения для совершенствования технологии переработки руд и календарного планирования горных работ и управления рудопотоками.

### **Апробация работы**

Автором лично и в соавторстве опубликовано 12 работ, из них 3 статьи в российских журналах, рекомендованных ВАК, 1 монография. Основные результаты исследований были публично представлены на 9 научных конференциях и научных школах, из которых: *международные* – «Форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования»» (Санкт-Петербург, СПГУ, 2021, 2023), «XXV и XXVII молодежный научный симпозиум имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр»» (Томск, ТПУ, 2021, 2023), «XVII научная конференция студентов, аспирантов и молодых «Перспектив Свободный - 2021»

(Красноярск, СФУ, 2021); с международным участием – «III и IV Молодежная научно-образовательная конференция «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов - от прогноза к добыче»» (Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ», 2022, 2023); *всероссийские* – «XI молодежная научно-практическая школа «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, ИГЕМ РАН, 2022), «VI молодежная научно-практическая школа-конференция «Науки о Земле. Современное состояние»» (Геологический полигон «Шира», НГУ, 2023).

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы 229 с., диссертация содержит 92 иллюстрации и 37 таблиц. Список литературы состоит из 150 наименований.

**В первой главе** дана оценка состоянию проблемы исследований отечественных медно-порфировых месторождений, приведена краткая история открытия и изучения месторождения Ак-Суг, его положение в региональных структурах и геологическая характеристика рудного поля. **Вторая глава** посвящена описанию геологического строения Ак-Сугской интрузии, в породах которой локализовано изучаемое медно-порфировое месторождение. Приведена характеристика вмещающих пород и рудных тел, гидротермально-метасоматических околорудных изменений, отражены результаты U-Pb датирования интрузивных фаз массива и его геодинамическая позиция. Совокупность представленных данных служит обоснованием первого защищаемого положения. **В третьей главе** приведены данные статистической обработки геохимических и геологических данных по месторождению, на основании которых составлены и проинтерпретированы схемы минералого-геохимической и метасоматической зональности Ак-Сугского месторождения. Изложены результаты изучения вещественного состава руд и стадийности рудообразования. Материалы главы служат обоснованием второго защищаемого положения. **Четвертая глава** посвящена оценке перспектив глубоких горизонтов и уровню эрозионного среза Ак-Сугского месторождения. **Пятая глава** содержит данные о температуре, давлении и составе индивидуальных флюидных включений в кварцевых прожилках рудных зон месторождения. Рассмотрены и проинтерпретированы результаты изучения флюидной составляющей в кварцевых и карбонатных прожилках методом газовой хромато-масс-спектрометрии. На их основе охарактеризованы P-T условия рудообразования и состав рудоносного флюида. Материалы главы использованы при обосновании третьего защищаемого положения. **Шестая глава** посвящена результатам изотопно-геохимических исследований. Представлены обобщенные данные изучения изотопного состава серы сульфидных минералов, углерода-кислорода в карбонатных прожилках. На основании вышеизложенного обсуждаются предполагаемые источники минералообразующих флюидов и геохимические особенности формирования месторождения и его вмещающих пород. Материалы главы использованы при обосновании третьего защищаемого положения. **В седьмой главе** приведено краткое описание применяемых в ходе данного диссертационного исследования образцов и аналитических методов.

### **Благодарности**

Автор благодарит своего научного руководителя *Владимира Александровича Макарова* за помощь в организации и проведении исследований, подготовки диссертации и постоянное внимание к выполняемой работе.

За содействие в сборе фактического материала, положенного в основу данной работы, автор выражает благодарность сотрудникам ООО «Тывамедь» Ю.В. Глушкову и А.М. Шабалинскому. Автор благодарит сотрудников кафедр ГМиМР и ГМиП ИЦМ СФУ (г. Красноярск), коллег из ЦГИ «Прогноз» за обсуждение результатов исследований, организацию, помощь и интерес к выполняемой работе. За помощь в проведении большого объема различных аналитических исследований и обсуждении их результатов автор выражает благодарность сотрудникам лабораторий термобарогеохимии, изотопно-аналитической геохимии и рудообразующих систем ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и отдела минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ».

Глубокую благодарность за поддержку на всех этапах написания работы автор выражает своей семье, родным и близким людям. Всем, кто рядом и безвременно ушедшим.

На начальном этапе выполнение диссертационного исследования осуществлялось при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и Акционерного общества «Корпорация развития Енисейской Сибири» в рамках научного проекта № 20-45-242903.

#### КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-СУГ

Ак-Сугское медно-порфировое месторождение было открыто геологами экспедиции ВИМСа Г.В. Махиным и Н.Е. Костиным в 1952 г. при проведении поисков масштаба 1:100 000. Шурфами ими была вскрыта рудная зона мощностью 250 м со средним содержанием меди 0,88%, что послужило основанием для рекомендации к проведению детальных поисков. По результатам геолого-съёмочных и поисковых работ Н.Н. Стамборовского и О.И. Пятова в 1961-1964 гг. были оценены прогнозные ресурсы до глубины 100 м и составили 400 тыс. т. меди. С 1965 по 1980-е гг. большой объем поисково-оценочных работы проводили Н.Н. Стамборовский, Е.Ф. Дюба, М. А. Казанцев, В. И. Забелин, Б. П. Бордоносков и многие другие. В 1982-1985 гг. под руководством В. И. Забелина была проведена предварительная разведка Ак-Сугского месторождения, в соответствии с кондициями были подсчитаны запасы категорий С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>, но запасы в ГКЗ апробацию не проходили и НТС ПГО «Красноярскгеология» по ряду причин было рекомендовано не проводить детальную разведку. С 2007 по 2014 года разведку и подготовку к освоению вела ООО «Голевская ГРК». Согласно протоколу ГКЗ Роснедра №3907 от 31.10.2014 г. на госбалансе находится 534,8 млн.т. руды, из которых запасы меди составляют 3633,3 тыс. т., молибдена 77,9 тыс. т., золота 83 т (по категориям запасов В+С<sub>1</sub>+С<sub>2</sub>). Запасы золота были оценены по категории С<sub>2</sub> и составили 83 тонны. Усредненные содержания металлов по месторождению: Cu-0,73 %, Mo-0,017 %, Au-0,16 г/т.

Месторождение Ак-Суг расположено в Центрально-Азиатской части России на северо-востоке республики Тува в пределах Алтае-Саянской складчатой области, южнее зоны стыка Восточно-Тувинской и Кизир-Казырской складчатых систем, разделенных межрегиональным Кандатским разломом (рис. 1). С позиции геодинамической обстановки развития территории, район месторождения отвечает фрагменту Хамсаринской венд-раннекембрийской островной дуги [Руднев, 2010].

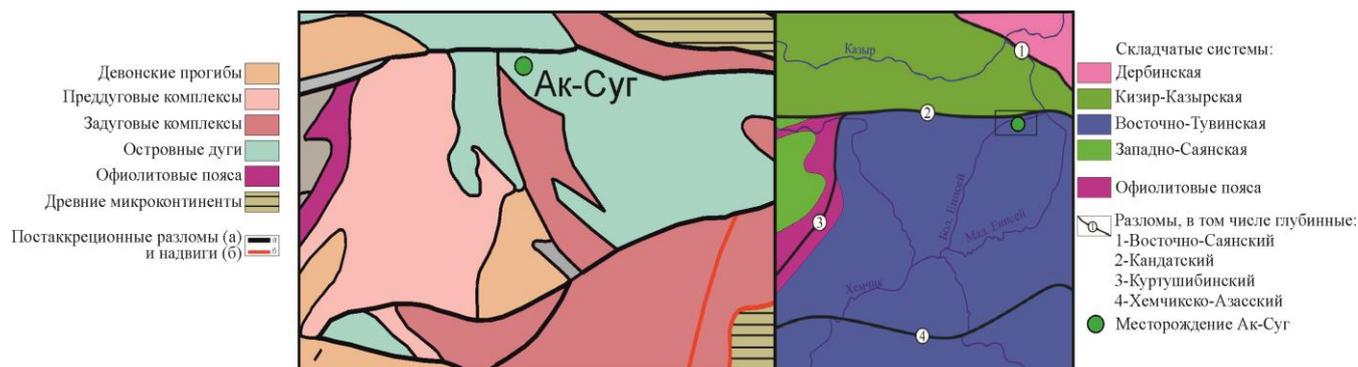


Рисунок 1. Схема тектонического районирования центральной и восточной Тувы. Составлена по данным [Монгуш А.А. и др., 2013; Государственная геологическая карта..., 2012] с добавлениями автора, черный прямоугольник – контур рис.2.

Структурно-тектоническая позиция района месторождения характеризуется зонами сопряжения глубинного Кандатского разлома с второстепенным Челдезрикским и оперяющими системами разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного направлений, контролирующими многофазный интрузивный массив аксугского комплекса. Стратифицированные подразделения в районе представлены отложениями хамсаринской свиты нижнего кембрия и толтаковской свиты среднего девона. По речным долинам развиты четвертичные отложения. Субвулканические образования представлены баянкольским комплексом. Интрузивный магматизм, кроме аксугского, представлен гранитоидами бреньского комплекса и основными (реже кислыми) породами таннуольского комплекса.

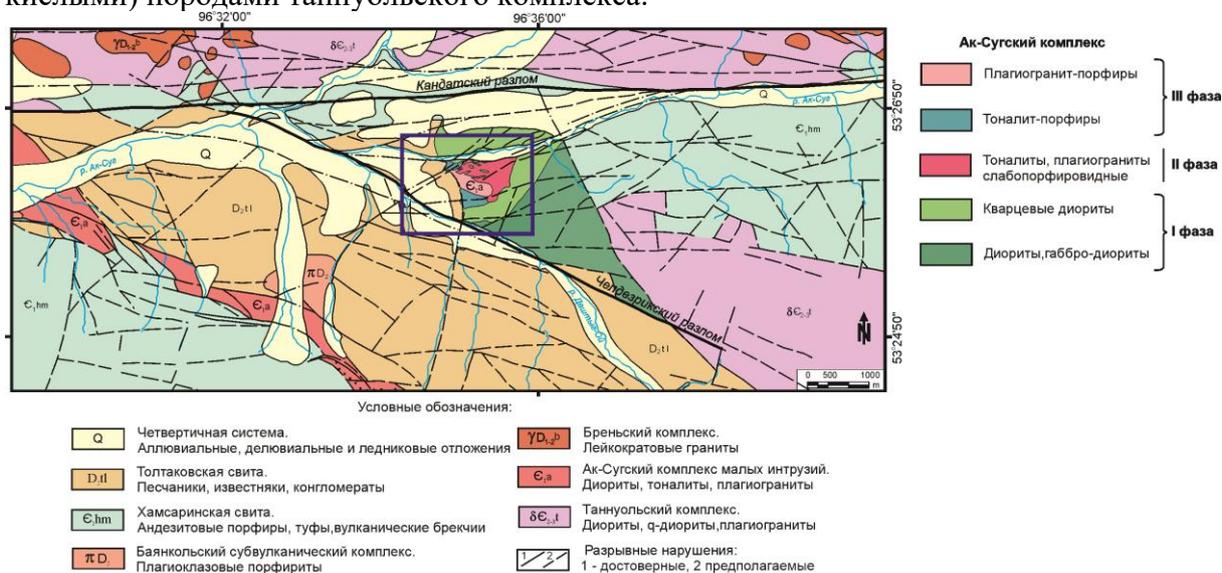


Рисунок 2. Схематическая геологическая карта района Ак-Сугского месторождения. Составлена по данным ООО «Тывамедь», [Pollard et al., 2017] с изменениями автора. Прямоугольник – контур рисунка 3.

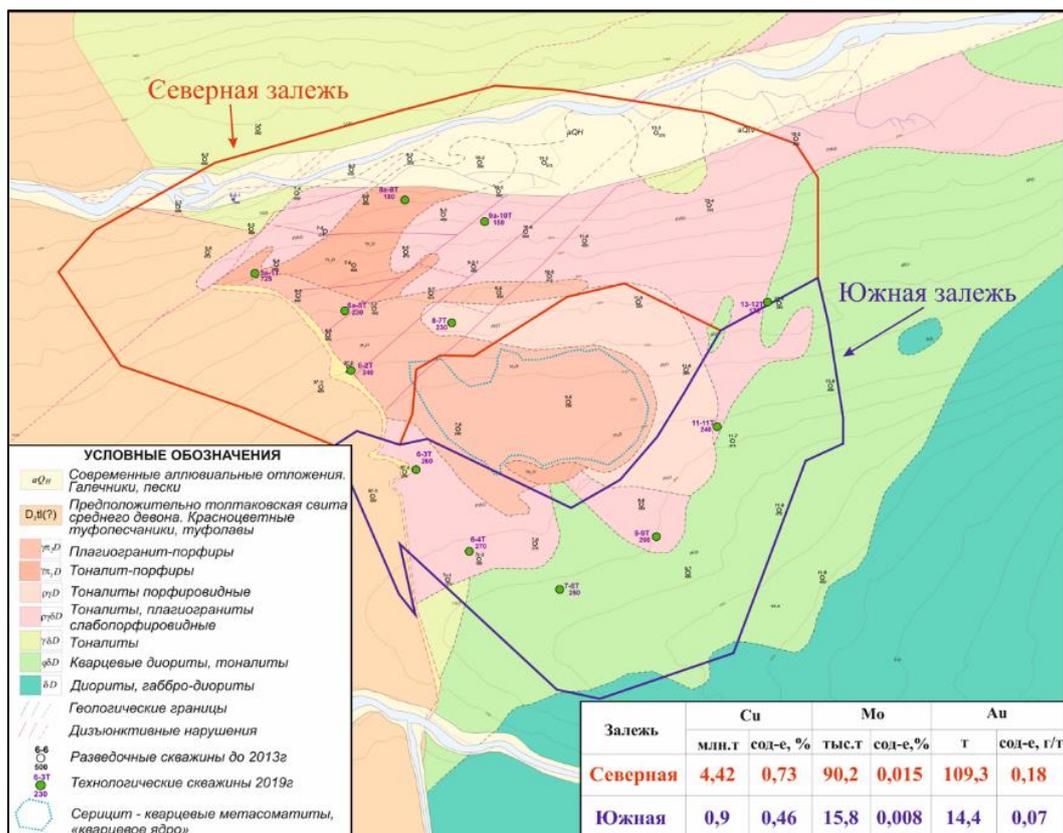


Рисунок 3. Геологическая карта месторождения Ак-Суг с проекцией рудных залежей.

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

Строение Ак-Сугского медно-порфирового месторождения определяется структурой одноименной полифазной интрузии, характеризующейся следующими разновидностями пород: габбро, диориты, кварцевые диориты (1 фаза); тоналиты и плагиограниты, в том числе слабопорфиоровидные (2 фаза). Центральная часть штока представлена двумя видами порфировых пород 3 фазы: тоналит-порфирами (порфиры-I) и плагиогранит-порфирами (порфиры-II), с которыми пространственно и парагенетически связано промышленное Au-Mo-Cu оруденение. Интрузия имеет зональное куполовидное строение с углами падения контактов до 80°.

Рудные тела месторождения представлены штокверками с вкрапленной и прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией во вмещающих породах. Наиболее богатые руды месторождения сконцентрированы в его Северной залежи со средними содержаниями меди около 0,73%, молибдена 0,015%. Вещественный состав руд Ак-Сугского месторождения весьма разнообразен и в настоящее время в рудах описано более 60 минеральных видов, среди которых преобладают сульфиды: халькопирит, борнит, пирит, молибденит, энаргит, халькозин. Из самородных металлов наиболее часто встречаются золото и медь, значительно реже самородное серебро, теллур и висмут. В зоне окисления развиты ковеллин, малахит, азурит, гипергенный халькозин, куприт, гипергенная самородная медь, гетит и гидрогетит. Породообразующие минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, карбонатами (кальцитом, доломитом, анкеритом), слюдами (биотитом, мусковитом-серцитом хлоритом), сульфатами (баритом, ангидритом, целестином). Среди аксессуарных минералов отмечаются циркон, эпидот, монацит, рутил, апатит, фторапатит.

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

**Первое защищаемое положение:** Согласно изотопному U-Pb датированию цирконов вмещающих пород Ак-Сугского месторождения, возраст тел тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров 3 фазы аксугского комплекса, локализирующих основную массу Au-Mo-Cu оруденения, составляет  $523\pm 7$  и  $521\pm 6$  млн. лет соответственно. Полученные геохронологические данные позволяют скоррелировать возраст рассматриваемых интрузивных тел с одним из этапов островодужного магматизма Восточной Тувы

Район Ак-Сугского месторождения и одноименного рудного узла относится к Хамсаринской зоне (островной дуге) венд-раннекембрийской Таннуольско-Хамсаринской островодужной системы, включающей в себя фрагменты островных дуг с крупными батолитами, пред- и задуговые осадочно-вулканогенные и вулканоплутонические структурно-вещественные комплексы, офиолитовые аллохтоны и докембрийский Тувино-Монгольский микроконтинент. В истории геотектонического развития района можно отметить венд-раннекембрийский островодужный и позднекембрийско-ордовик-силурийский аккреционной-коллизийный этапы с последующим причленением этой территории к южной окраине Сибирского кратона [Добрецов, Буслов, 2007; Руднев, 2010].

Датирование интрузивных пород, рудной минерализации и метасоматических образований Ак-Сугского месторождения неоднократно проводилось ранее различными научными коллективами и аналитическими методами (Ar-Ar, U-Pb, Re-Os). Результаты исследований предшественников варьируются в широком диапазоне возрастов от кембрия до раннего карбона. Для получения новых данных и актуализации накопленной информации была поставлена задача проведения изотопно-геохронологических исследований цирконов, выделенных из пород различных фаз аксугского комплекса.

Основная масса Au-Mo-Cu оруденения месторождения Ак-Суг пространственно и парагенетически связана с порфировыми штоками 3 фазы аксугского комплекса, включающих две разновидности пород – тоналит-порфиры (порфиры-I) и плагиогранит-порфиры (порфиры-II).

Тоналит-порфиры являются более ранними образованиями относительно плагиогранит-порфиров и по своему минеральному составу соответствуют гранодиорит (тоналит)-порфирам (Qz 20-25%, Pl<sub>15-25</sub> 45-50%, Fsp 10-15%, Hbl+Bt 7-15%). Они слагают тело неправильной формы (500x300 м) на западном фланге Аксугского массива в зоне его контакта с вулканогенно-осадочными отложениями толтаковской свиты. С телами тоналит-порфиров и пространственно сопряженными с ними метасоматитами связана преобладающая часть Au-Mo-Cu-порфирового оруденения, представленного, преимущественно, халькопиритом, борнитом, пиритом, молибденитом. Облик кристаллов циркона из образца данной фазы удлиненный, призматический, часто с хорошо сохранившимися гранями и размерами зерен до 250 мкм. CL-изображения кристаллов показывают частые ритмично-зональные каймы, параллельные граням и обрамляющие ядро, что характерно для магматических цирконов (рис. 4). Возраст единичных зерен варьирует в диапазоне от 498 до 553 млн. лет. Средний возраст (рис. 5) тоналит-порфиров составляет  $523\pm 7$  млн. лет (n=13).

Порфиры-II, по составу соответствующие плагиогранит/гранит-порфирам (Qz 25-35% Pl<sub>10-25</sub> 30-45%, Fsp 5-15%, Bt(Musc)+Hbl 2-8%) слагают тело неправильной формы в центральной части интрузивного массива. В плагиогранит-порфирах отмечается преимущественно молибденит-халькопиритовая минерализация. В более

подчиненных количествах присутствуют блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрит и редкие минеральные виды, представленные соединениями висмута, теллура, селена, мышьяка. Размер изученных кристаллов циркона из данных пород в среднем составлял 200 мкм (рис. 4). Облик цирконов плагиогранит-порфиров несколько отличается по зональности в CL – они имеют слабозональные и более ассиметричные каймы по сравнению с тоналит-порфирами. Возраст цирконов пробы изменяется от 494 до 546 млн. лет, средний возраст (рис. 5) тел плагиогранит-порфиров составляет  $521 \pm 6$  млн. лет ( $n=18$ ).

Согласно опубликованным данным [Руднев, 2010], островодужный интрузивный магматизм Восточной Тувы был представлен двумя стадиями с хронологическими рамками 570–560 и 540–520 млн. лет. Более молодые интрузивные образования (540–520 млн. лет) в районе месторождения представлены ультрабазит-базитовыми и гранитоидными ассоциациями Хамсаринского батолита с возрастными  $532 \pm 3$  и  $523 \pm 4$  млн. лет, которые, в свою очередь, коррелируют с образованиями аксугского комплекса габбро-диорит-гранодиорит-гранитной формации. В результате проведенных изотопно-геохронологических исследований подтверждается приуроченность времени формирования вмещающих пород Ак-Сугского месторождения ( $523 \pm 7$  и  $521 \pm 6$  млн. лет) и одноименного магматического комплекса к одному из этапов островодужного интрузивного магматизма Восточной Тувы.

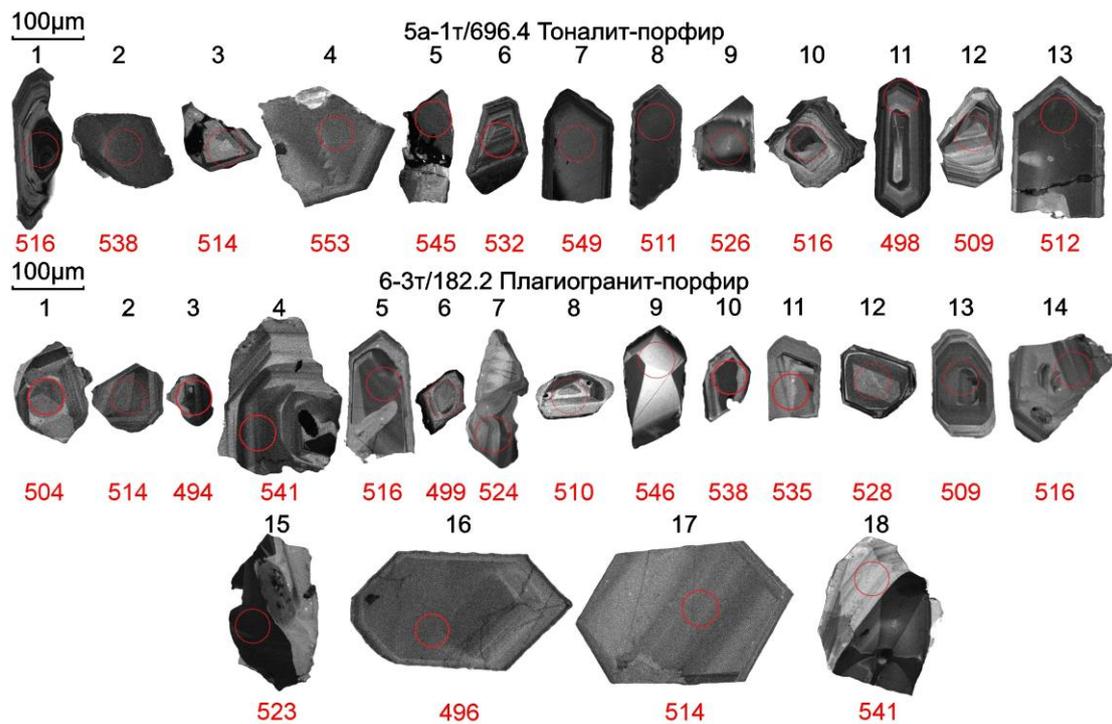


Рисунок 4. Катодолуминесцентные (CL) изображения цирконов 3 фазы аксугского комплекса.

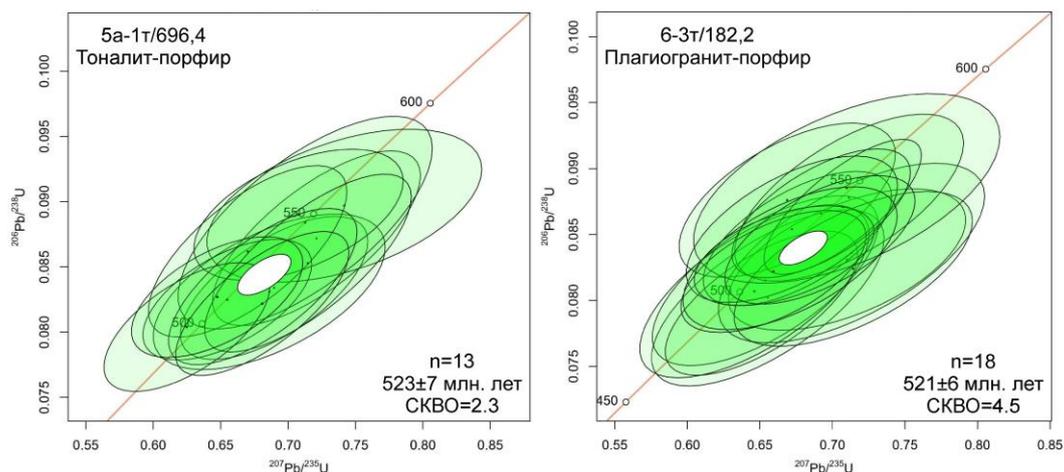


Рисунок 5. Диаграммы U-Pb датирования (LA-ICP-MS) цирконов порфировых фаз месторождения Ак-Суг.

**Второе защищаемое положение:** В составе первичных ореолов Ак-Сугского Au-Мо-Си-порфирового месторождения, установлено 8 обособленных геохимических ассоциаций, отражающих состав, геохимическую специализацию вмещающих пород и основные минеральные парагенезисы кольцеобразных минерализованных зон порфировой системы. Метасоматическая зональность проявлена в последовательной смене от периферии к центру зон пропилитизации, кварц-хлорит-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов (с реликтами зон калишпатизации и биотитизации) и окварцевания.

Статистической обработкой геохимических данных по первичным ореолам (61 752 рядовых и 7 451 групповых проб) выявлено 8 групп элементов (факторов F), образующих хорошо выраженные ассоциации.

Ассоциацию элементов (F1) с коррелирующими Al-V-Ti-Mg-Ga-Sc-Y-Na стоит считать отражением геохимических характеристик интрузивных пород массива, например, таких как плюмазитовость (пересыщение пород Al), с коэффициентами глиноземистости  $al'$  от 1,2 для габбро до 7,1 для плагиогранитов (высокоглиноземистые и весьма высокоглиноземистые породы). Наличие в данной ассоциации Na и отсутствие K, при факте, что в породах массива  $K_2O$  преобладает над  $Na_2O$  ( $0,1-0,5 < K_2O/Na_2O < 2-7$ ) указывает на значительную долю «метасоматического» K, отложенного в виде биотита и калиевого полевого шпата в зоне ранних высокотемпературных метасоматитов северной части месторождения.

Ряд элементов Fe-Co-S (F2) отвечает пиритовому ореолу и зоне пропилитизации месторождения, где часто (до первых %) отмечается пирит с кобальтом в виде изоморфной примеси. Содержание Co в таких пиритах достигает 0,1–2,5 %.

Полиметаллическая ассоциация (F3) Pb-Zn-Cd относится к группе околорудных (надрудных) элементов и развита на периферии и верхних горизонтах месторождения.

Группа редкоземельных элементов Ce-La-Y-P (F4), маркирует немногочисленные в масштабах месторождения жилки кварц-карбонатного состава, содержащие фторапатит, Y-ксенотим, Се-флоренсит и другие редкоземельные минералы.

Присутствие K и Au в главной рудной ассоциации (F5) Cu-Bi-Ag-Se-(As-K-Au) указывает на их генетическую связь, проявленную на этапе раннего высокотемпературного калиевого метасоматоза в момент формирования наиболее

богатых Cu и Au борнит-халькопиритовых и среднетемпературных теннантит-халькопиритовых руд.

Сульфосольная ассоциация с ртутью Sb-As-(Hg) (F6) отражает относительно широкое присутствие в рудах Северной залежи эпitherмальной энаргит-блеклорудной минерализации, характерной для верхнего уровня порфирировых систем [Лобанов и др., 2023].

Ряд элементов Ba-Sr-(Ca) (F7) указывает на сформированные в низкотемпературных гидротермальных условиях минералы этих элементов, таких как барит, целестин и, вероятно, виверит и стронцианит (последний может содержать небольшое количество Ca, изоморфно замещая Sr).

Молибденовая ассоциация Mo-Re (F8) образует отдельную пару элементов, подчеркивая отмеченную ранее пространственную и хронологическую разобщенность формирования Au-Cu и значительной доли Mo минерализации на Ак-Сугском месторождении.

Природные типы руд на месторождении выделены по данным минералогического картирования и представлены: пирит-халькопиритовыми и халькопирит-пиритовыми, пирит-борнит-халькопиритовыми, теннантит-(пирит)-халькопиритовыми, халькопирит-(халькозиновыми) и самородномедными разновидностями (рис. 6). В соответствии с выделенными типами руд, интенсивностью и масштабом их проявления в масштабе месторождения создана объемная модель минералого-геохимической зональности месторождения. Она отражает концентрически-зональное строение рудного поля и демонстрирует связь последовательности рудообразования с магматическим контролем проявленного оруденения (рис. 7 – 10), что является типичным [Звездов, 2022] для этого типа месторождений. Наиболее распространенными типами оруденения являются халькопирит-пиритовые и пирит-борнит-халькопиритовые руды. Халькопирит-пиритовые руды имеют наибольшее распространение в пределах Южной залежи, а также в восточной и северной частях Северной залежи. Пирит-борнит-халькопиритовые руды имеют широкое развитие в пределах Северной залежи. Теннантит-(пирит)-халькопиритовый тип руд характерен для глубоких горизонтов центральной и западной частей Северной залежи. Халькопирит-халькозиновые руды встречаются в северо-западной части Северной залежи. Самородномедный тип руд распространен в западной части месторождения, вдоль контакта с вулканогенно-осадочными породами девона. Кроме того, самородномедный тип ограниченно распространен в породах девона и имеет, очевидно, гипергенное происхождение. Молибденовые руды в самостоятельный тип не выделяются и оконтуриваются во вмещающих породах по природному бортовому содержанию  $Mo > 0,003\%$ .

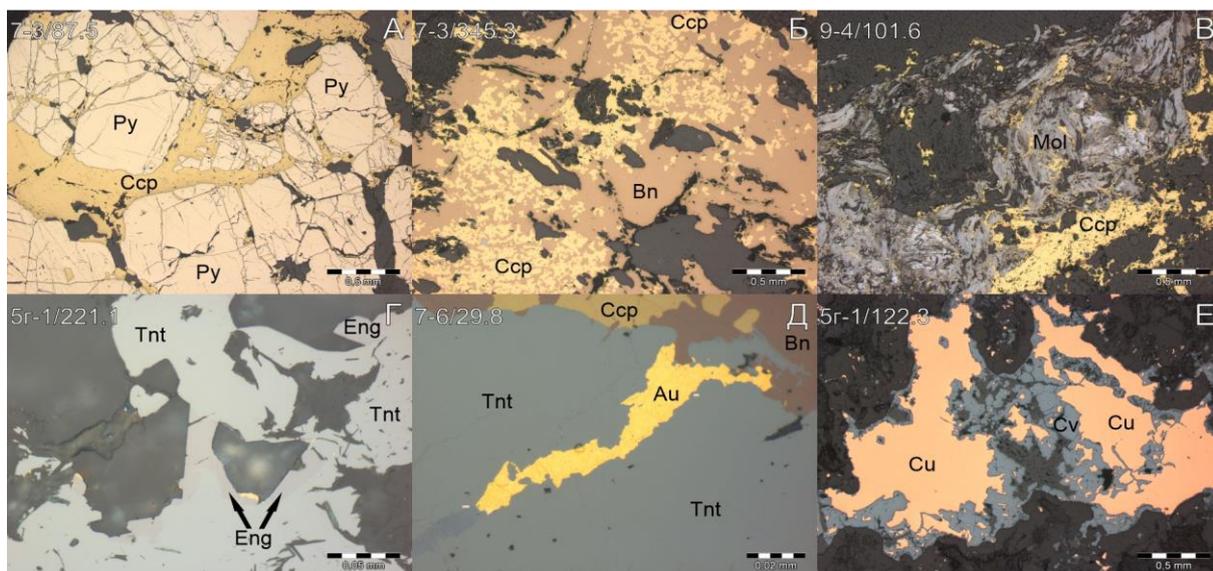


Рисунок 6. Минеральные ассоциации и типы руд месторождения Ак-Суг.

А – пирит-халькопиритовые; Б – борнит-халькопиритовые; В – халькопирит-молибденитовая ассоциация; Г – блеклорудно-халькопиритовая с энаргитом; Д – блеклорудно-халькопиритовая с борнитом и самородным золотом; Е – самородномедные с ковеллином.

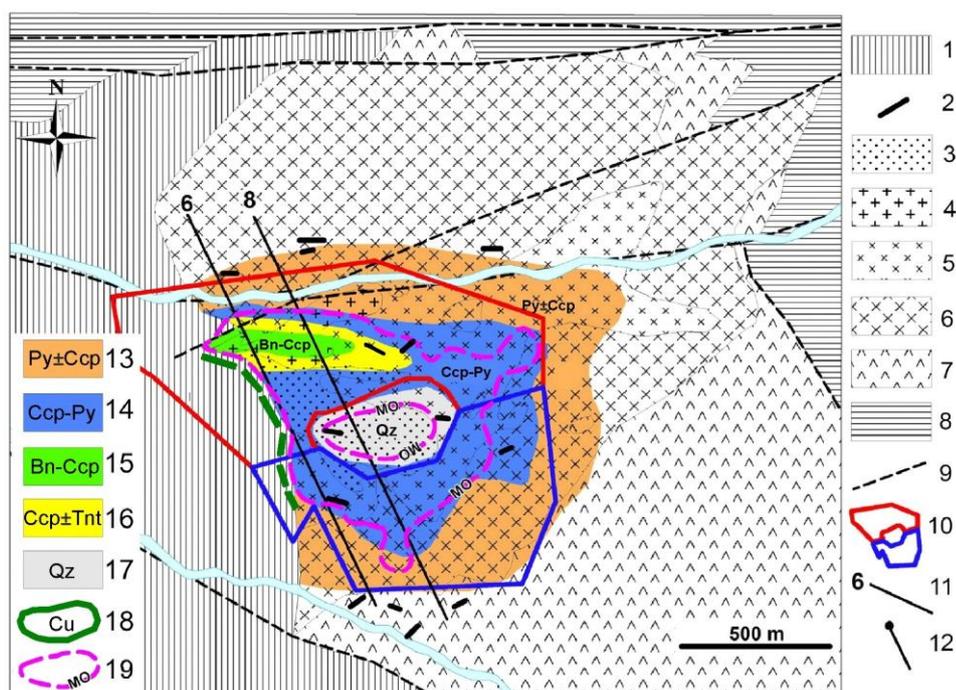


Рисунок 7. Схема минералогической зональности месторождения Ак-Суг.

Условные обозначения: 1 – девонские красноцветные туфогенно-осадочные отложения; 2 – дайки (вне масштаба, без разделения); 3 – плагиогранит-порфиры (порфиры II) и 4 – тоналит-порфиры (порфиры I) 3-й фазы; 5 – порфировидные тоналиты и плагиограниты 2-й фазы; 6 – кварцевые диориты, тоналиты 1-й фазы; 7 – габбро, диориты 1-й фазы; 8 – нижнекембрийские отложения хамсаринской свиты; 9 – разломы; 10 – контуры проекции на поверхность границ рудных залежей; 11 – разведочные линии и их номера, 12 – скважины; 13-19 минеральные зоны: 13 – пиритовая с халькопиритом ( $Py \gg Ccp$ ); 14 – халькопирит-пиритовая ( $Ccp \gg Py$ ); 15 – борнит-халькопиритовая; 16 – халькопиритовая с теннантитом; 17 –

интенсивного окварцевания; 18 – развития самородномедной минерализации; 19 – ореол развития молибденита ( $Mo > 0,003\%$ ).

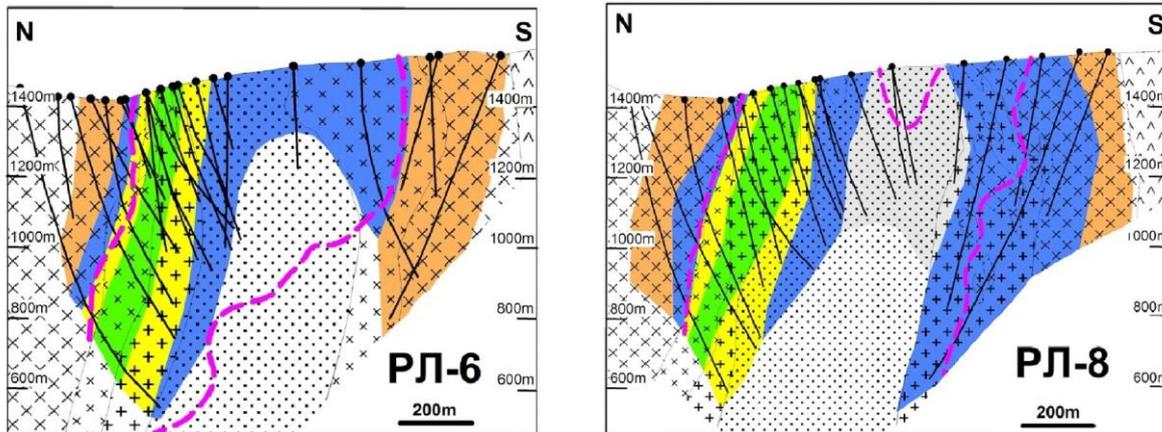


Рисунок 8. Разрезы к схеме минералогической зональности месторождения Ак-Суг. Условные обозначения см. на рис. 7.

Строение первичного геохимического поля месторождения Ак-Суг подчеркивает основные элементы его рудной и метасоматической зональности, отражая основные особенности формирования интрузивного массива и локализованного в нем оруденения. Приповерхностный первичный ореол меди, очерченный по изолинии 0,3%, имеет кольцообразную форму с «пустой» центральной частью («кварцевое ядро») и пространственно соответствует пирит-халькопиритовой минеральной зоне (рис. 7,8). Широко-вытянутый ореол меди по изолинии 0,5% фиксирует наиболее богатую часть Северной залежи, при этом изолиния 1,0% отвечает борнит-халькопиритовой минеральной зоне. Ореолы молибдена (рис. 7, 9) далеко не всегда перекрывают медные и, как правило, смещены относительно них ближе к геометрическому центру месторождения, которое занимает шток плагиогранит-порфиров (порфиров-П), а наиболее яркие из них (0,02% и 0,03%) группируются в его эндо- и экзоконтактовой части. Ореолы золота (рис. 9) развиты в пределах наиболее богатых ореолов меди, соответствующих борнит-халькопиритовой минеральной ассоциации, визуализируя тем самым существующую на минеральном уровне пространственную взаимосвязь этих элементов. Совпадающие с ореолами золота ореолы мышьяка (рис.9) свидетельствуют о золотоносности блеклорудной ассоциации. С блеклыми рудами также связаны и ореолы серебра, которые схожи с медными и золотыми (рис. 9В). Свинец и цинк (рис.9) образуют внешние ореолы, причем их наиболее яркие аномалии развиты в зоне пропицитов. Железо образует кольцообразный ореол, при этом участки с наиболее высоким его содержанием отвечают внутренней части пропицитовой зоны и пиритовому ореолу (рис. 7 – 9Б).

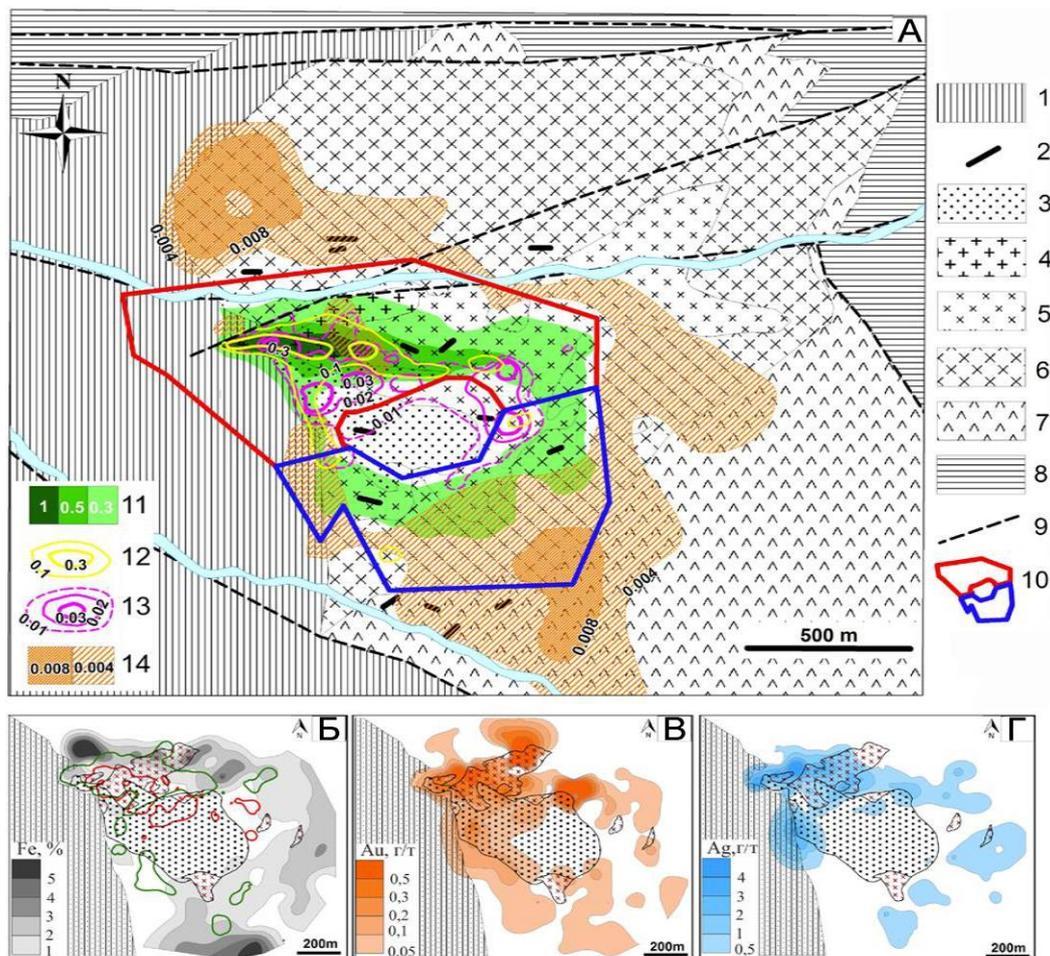


Рисунок 9. Схема геохимической зональности месторождения Ак-Суг.

Условные обозначения: 1-10 - см. рис. 7; 11-14 –содержание элементов: 11 – Cu (%), 12 - Au (г/т), 13 - Mo (%), 14 - Zn (%). Б-Г - взаиморасположение основных геологических элементов (условные обозначения см. на рис 3), ореолов железа (Б), золота (В) и серебра (Г) на горизонте 1300м (по данным бурения). Изолинии на Б: зеленые – 0,5% Cu, красные – 0,03% Mo.

Концентрическая зональность наблюдается и в последовательной смене от периферии к центру различных типов гидротермальных изменений (рис. 10). Наиболее крупная по площади зона измененных пород сложена пропилитами (Propylitic), которые обрамляют внешнюю периферическую часть месторождения и представлены карбонат-хлорит-эпидотовой минеральной ассоциацией. Изменения охватывают преимущественно гранитоиды первой фазы аксугского интрузивного комплекса. В пределах красноцветных отложений девона кольцо пропилитов разрывается, что является одним из свидетельств додевонского возраста гидротермальных изменений. По направлению к центру пропилиты сменяются кварц-серицитовыми (Phyllitic) и хлорит-серицитовыми (Sericitic-Clay-Chlorite или SCC) метасоматитами (рис. 10), которые часто формируют комплексный кварц-хлорит-серицитовый агрегат и являются доминирующим типом гидротермальных изменений на месторождении, вмещающая около 80% всех его запасов в породах 2 и 3 фаз. Наиболее сильные кварц-хлорит-серицитовые изменения наблюдаются в северной части месторождения, причем нередко их интенсивность настолько велика, что трудно диагностировать первичную породу, тем самым затрудняя диагностику участков проявления более раннего

высокотемпературного калиевого метасоматоза (Potassic), предшествующего кварц-хлорит-серицитовым изменениям. Калиевые метасоматиты наблюдаются в виде реликтовых зон калишпатизации (Kfs) и биотитизации (Bt). В центральной части месторождения, в пределах, главным образом, поздних плагиигранит-порфиров развиты существенно кварцевые метасоматиты (Qz), которые формируют слабоминерализованное «кварцевое ядро» овальной формы и образованы в результате интенсивного выщелачивания пород гидротермами после внедрения поздних порфиров 3 фазы. Аргиллизация является одним из наиболее поздних видов метасоматитов на месторождении. Она проявлена локально, преимущественно по контакту массива с толтаковской свитой и ограничена в зоне «кварцевого ядра» и не захватывает значительные площади, встречаясь в виде отдельных, структурно контролируемых, участков среди кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов.

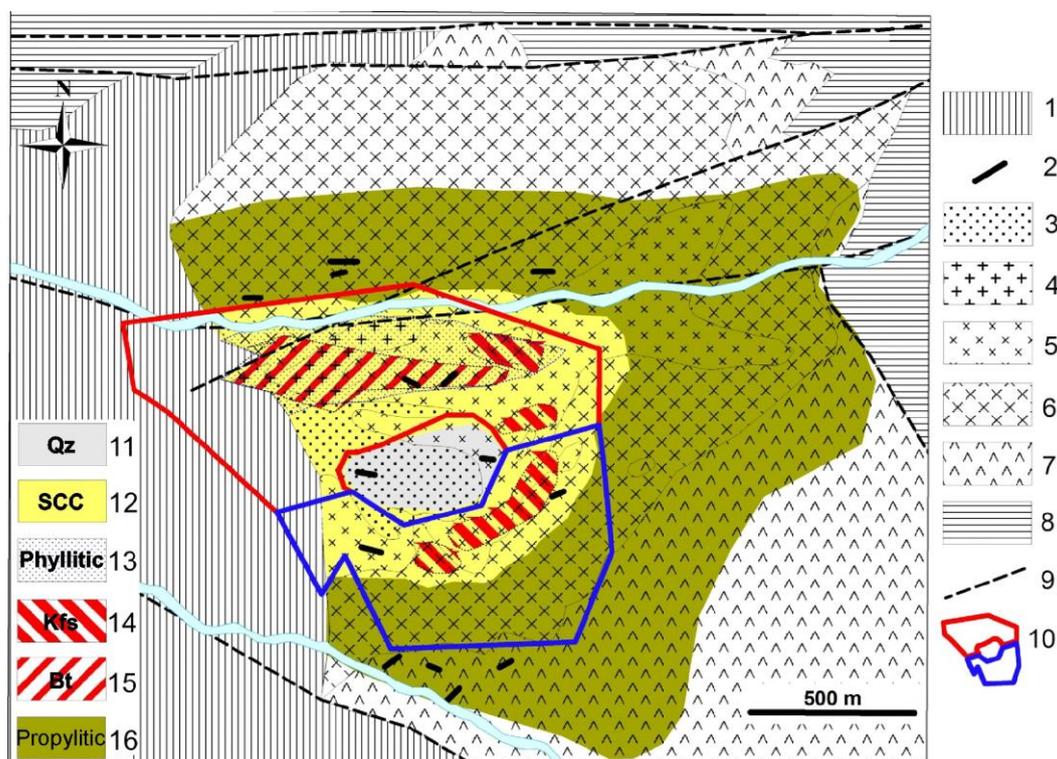


Рисунок 10. Схема метасоматической зональности месторождения Ак-Суг.

Условные обозначения: 1-10 - см. рис. 7; 11 – интенсивное окварцевание («кварцевое ядро»); 12 – кварц-хлорит-серицитовые; 13 – кварц-серицит-хлоритовые; 14 и 15 – калиевые (14 – калишпатизация, 15 – реликты зоны биотитизации); 16 – пропилиты.

Таким образом, в пределах месторождения Ак-Суг идентифицируются почти все типы гидротермальных изменений, характерные для порфировых объектов, хотя масштабы проявления каждого из них различны. На фоне типичной [Звездов, 2022] для месторождений этого типа концентрической зональности ясно просматривается асимметрия в ее внутреннем строении, которая выражается как в различной интенсивности гидротермальных изменений, так и в качественном наборе самих метасоматитов, проявленных в пределах Северной и Южной залежей, являясь в конечном итоге отражением структурно-геологических особенностей месторождения.

**Третье защищаемое положение:** Кварцевые жилы рудных зон Ак-Сугского месторождения сформированы гидротермальными растворами углекисотно-водного состава в диапазоне температур 79 – 500 °С, давлений – 0,4 – 122,1 бар и солёности от 0,35 до 17,52 мас. % (NaCl-экв.). В составе минералообразующих флюидов преобладают H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S} = -2,9 - +3,2\%$ ) главных сульфидных минералов месторождения свидетельствует о гомогенном мантийном источнике рудного вещества. Соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода ( $\delta^{13}\text{C} -3,6 - +2,2\%$ ;  $\delta^{18}\text{O} +10,4 - +21,8\%$ ) карбонатных прожилков указывают на полигенный источник углекислоты и воды, вовлеченных в рудно-метасоматический процесс.

Для установления РТ-параметров формирования кварцевых прожилков рудных зон Ак-Сугского месторождения изучались различные типы флюидных включений (ФВ), размером от 5 мкм, не имеющие признаков расшнурования и разгерметизации (рис. 11). Состав флюида в индивидуальных ФВ в кварце был определен методом рамановской спектроскопии, по результатам которой выявлено наличие двух основных составляющих флюида – H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в различных соотношениях (рис. 12).

При комнатной температуре было выделено три типа флюидных включений в кварце:

1. Однофазные газовые или жидкие ФВ (Ж<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, Г<sub>CO<sub>2</sub></sub>) отмечаются в зернах кварца в виде первично-вторичных и вторичных образований с размерами порядка 2-8 мкм;
2. Двухфазные газовой-жидкие ФВ (Ж<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+Г<sub>CO<sub>2</sub></sub>) представлены первичной (около 10-15 мкм), первично-вторичной и вторичной (2-5 мкм) генерациями. Соотношения жидкости и газа во включениях изменяется в соотношениях от 90:10 до 60:40;
3. Многофазные ФВ (Ж<sub>H<sub>2</sub>O</sub>±CO<sub>2</sub>+Г<sub>CO<sub>2</sub></sub>±КР) чаще всего имеют размеры до 10 мкм. Твердая фаза в таких ФВ представлена захваченным кристаллом рудного минерала, предположительно, гематита.

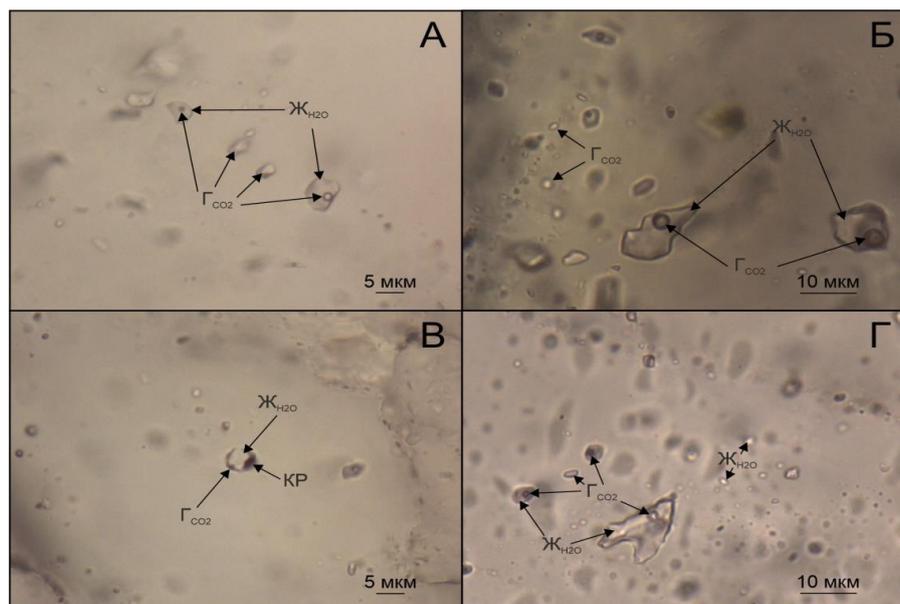


Рисунок 11. Флюидные включения в кварце рудных зон месторождения Ак-Суг.

А – первично-вторичные однофазные и двухфазные ФВ; Б – первичные двухфазные и вторичные однофазные ФВ; В – многофазное ФВ с кристаллом рудного минерала; Г – крупное первичное двухфазное ФВ в окружении более поздних однофазных газовых и жидких ФВ.

По результатам изучения индивидуальных флюидных включений в кварце рудных зон Ак-Сугского месторождения, установлено преобладание однофазных ФВ, над двухфазными и многофазными ФВ в количественном соотношении примерно 4:1. Соотношение количества включений водного состава по сравнению с включениями углекислотного состава (среди однофазных) изменяется в пропорциях от 3:1 до 1:1 (от кварцевых диоритов, тоналит-порфиров к плагиогранит-порфирам) в зависимости от рассматриваемых образцов среди пород массива. Таким образом, состав флюида кварцево-жильных зон Ак-Сугского месторождения постепенно изменялся от преимущественно водного до углекислотно-водного.

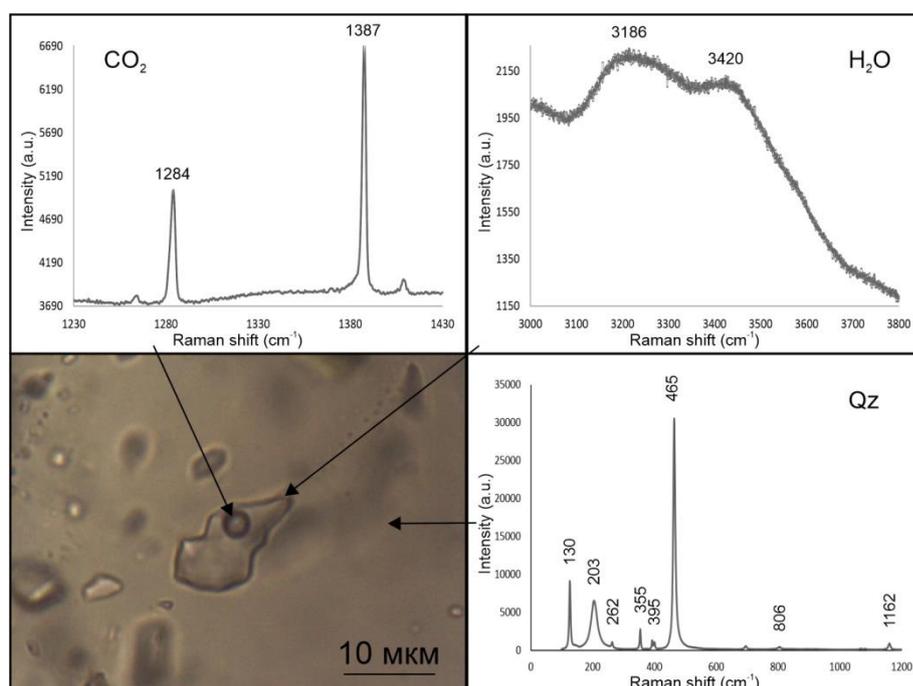


Рисунок 12. Рамановские спектры газовой ( $\text{CO}_2$ ) и водной ( $\text{H}_2\text{O}$ ) фаз в кварце (Qz) рудных зон месторождения Ак-Суг.

Термометрические данные, полученные при изучении флюидных включений в кварце тоналит-порфиров (порфиры-I) и плагиогранит-порфиров (порфиры-II) показывают, что формирование рудных зон Ак-Сугского месторождения в порфирах-I, с которыми связана преимущественно Au-Cu минерализация, протекало при температурах 79 – 500 °С, давлениях – 0,4 – 122,1 бар с солёностью растворов от 0,35 до 17,52 мас. % (NaCl-экв.) и плотностью 0,75 – 1,01 г/см<sup>3</sup>. Для порфиров-II и сопряжённой с ними Cu-Mo минерализацией данные несколько отличаются: температуры изменяются в диапазоне 111– 269 °С, давления – 1,4 – 51,0 бар, солёности от 0,53 до 8,55 мас. % (NaCl-экв.), плотность растворов составила 0,85 – 0,99 г/см<sup>3</sup>. Температура эвтектики ( $T_{\text{эвт}}$ ) водной фазы флюидных включений изменяется в интервале от –18,5 до –23,0 °С и близка к водно-солевой системе NaCl – H<sub>2</sub>O [Bodnar, Vityk, 1994]. Расчет PT параметров производился в Microsoft Excel с использованием таблицы для интерпретации микротермометрических данных ФВ, опубликованной в

работе [Steele-MacInnis et al., 2012]. Для ряда ФВ с температурами гомогенизации  $>350-500^{\circ}\text{C}$  не удалось установить температуру эвтектики или плавления последнего кристалла льда – данные по ним не использовались для расчета солености, давлений и плотностей.

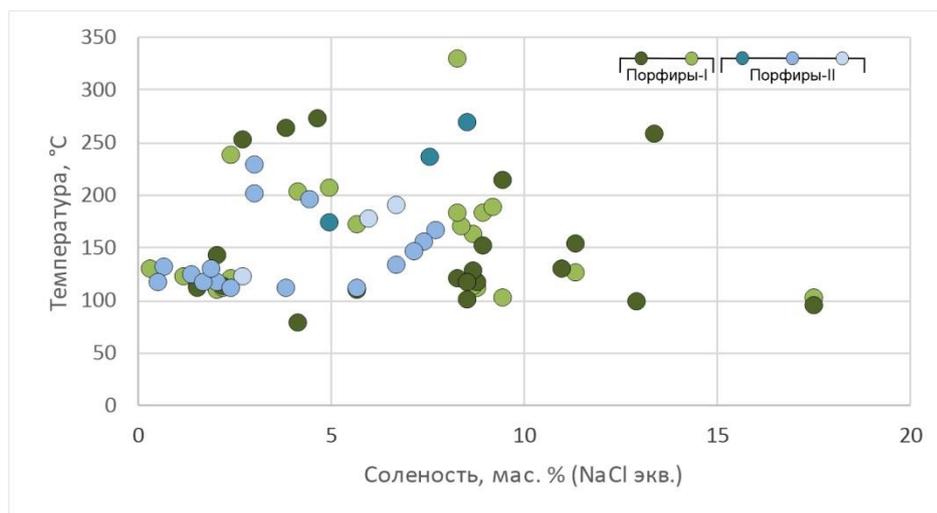


Рисунок 13. Диаграмма «температура-соленость» для рудообразующих флюидов

Полученные интервалы температур гомогенизации ФВ отражают основные условия и стадии формирования рудной минерализации на плутоногенно-гидротермальных порфировых месторождениях: высокотемпературные ( $500 - 300^{\circ}\text{C}$ ) с формированием гипотермальной Au-Mo-Cu-порфировой минерализации, среднетемпературные мезотермальные ( $300 - 200^{\circ}\text{C}$ ) с отложением эпитеpmальных, субэпитеpmальных (Au-Ag-Bi-Se-Te ассоциация), полиметаллических и сурьмяно-мышьяковистых минералов и низкотемпературные ( $200 - 70^{\circ}\text{C}$ ) с редкой субэпитеpmальной, карбонатной и редкоземельной минерализацией.

Значительная часть данных об изотопном составе серы (30 из 48 анализов) сульфидных минералов Ак-Сугского месторождения была получена в результате авторских исследований пирита и халькопирита с обеих рудных залежей. Для увеличения выборки значений и получения более обширной информации об источниках рудного вещества также использовались данные исследователей-предшественников, методика и результаты которых отражены в работах [Кужугет и др., 2019; Сотников и др., 2004]. Результаты исследований показали, что значения  $\delta^{34}\text{S}$  серы халькопирита, пирита и молибденита различных минеральных ассоциаций месторождения Ак-Суг (рис. 14) представлены достаточно выдержанным диапазоном значений от  $-2,9$  до  $+3,2$  ‰ со средним  $-0,1$  ‰ по 48 измерениям в выборке, что свидетельствует о гомогенности источника серы.

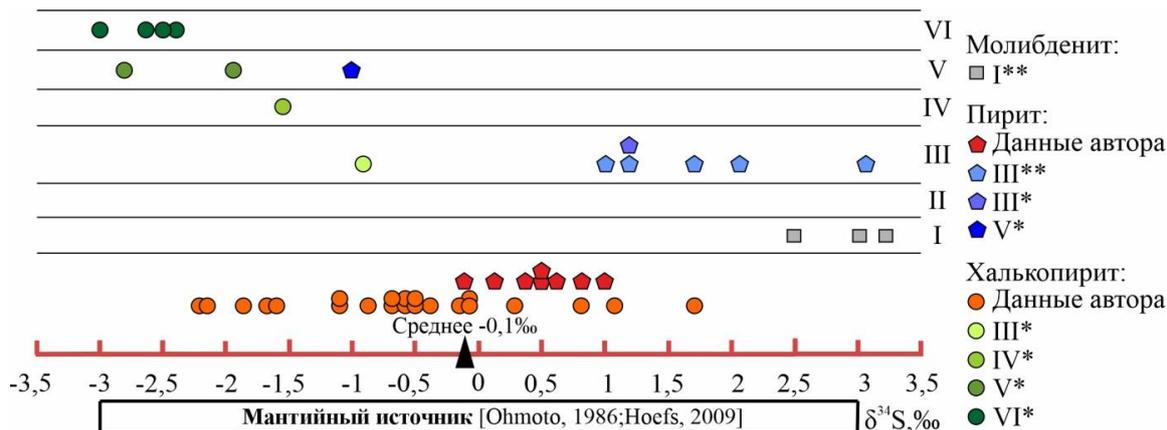


Рисунок 14. Изотопный состав серы сульфидных минералов месторождения Ак-Суг.  
Примечание: \*- данные Кужугет и др., 2019, \*\* - данные Сотников и др., 2004.

Наиболее вероятными ее источниками являлись флюиды мантийного (от -3 до +3‰) происхождения с ограниченным участием метеорных вод. Отмечается, что большинство значений  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов гидротермальных месторождений находится в диапазоне от -3 до +1‰ (по Hoefs, 2015), что соответствует значительной части вышеупомянутых соотношений. Результаты изотопно-геохимических исследований месторождения Ак-Суг также хорошо сопоставляются с диапазоном  $\delta^{34}\text{S}$  серы магматического происхождения (от -5 до +5 ‰) и являющимся характерным для большинства медно-порфировых месторождений мира (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, Goldhaber, 1997).

Изотопные составы углерода и кислорода жильного кальцита месторождения Ак-Суг характеризуются диапазонами:  $\delta^{13}\text{C}$  от -3,6 до 2,2 ‰ со средним значением  $\delta^{13}\text{C}$  -1,1 ‰,  $\delta^{18}\text{O}$  от 10,4 до 21,8 ‰ со средним 14,1 ‰ для 19 измерений. Все полученные значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  были использованы для построения графика (рис.15) распределения изотопов в системе координат  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$  и тренда изменения изотопных величин по уравнению декарбонизации Релеевского типа (Дубинина, 2013).

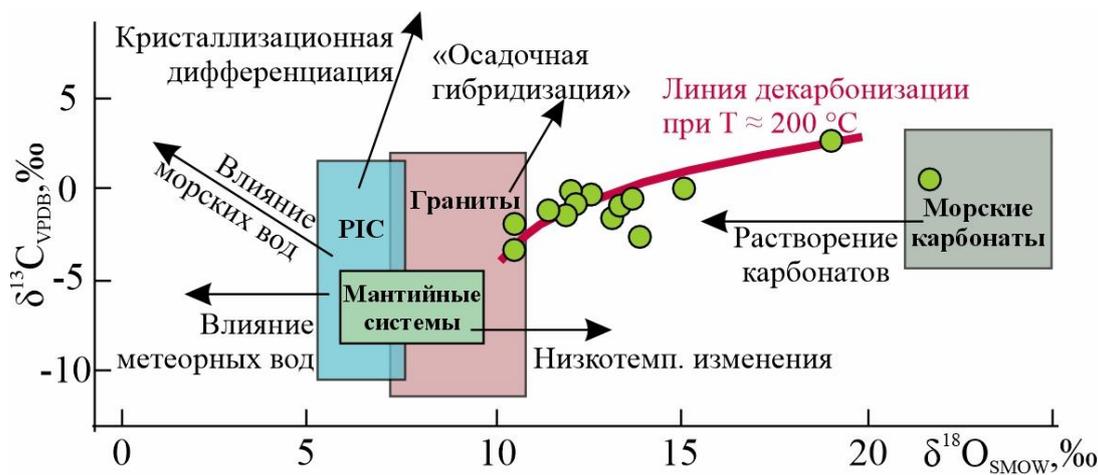


Рисунок 15. Изотопный состав углерода и кислорода жильного кальцита рудных зон Ак-Сугского месторождения на диаграмме  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$  с полями источников вещества и трендами изменений изотопных соотношений.

Изотопный состав проанализированных кальцитов характеризуется умеренно узким диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\Delta=5,8\%$ ) и широким диапазоном  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\Delta=11,4\%$ ), что с наибольшей долей вероятности может свидетельствовать о неоднородности источников кислорода воды, участвовавшей в образовании жильного кальцита Ак-Сугского месторождения.

Изотопный состав углерода и кислорода месторождения Ак-Суг свидетельствует о том, что подавляющая часть проанализированных карбонатных прожилков формировалась из растворов, образовавшихся в результате низкотемпературного ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ) растворения осадочных карбонатов метаморфогенными водами в условиях повышенной кислотности среды, с определенным количеством воды и галогенидов (F, Cl) [Изотопные соотношения..., 2023]. При этом вещество «осадочных карбонатов», вовлеченное в «современную» карбонатную и кварц-карбонатную жильные системы попало значительно раньше и могло быть мобилизовано из морских кембрийских отложений. Об этом свидетельствуют точки вверху графика, близкие к полю осадочных карбонатов, чью «изотопную картину» они унаследовали. В процессе проходящей декарбонизации, кроме переотлагающегося кальцита дополнительно выделяется углекислый газ, обедняющий изотопную систему  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ . Переотлагающиеся жильные кальциты обедняются преимущественно изотопом  $\delta^{18}\text{O}$ , о чем свидетельствует приближение точек анализов к полям PIC (прим. PIC-Primary Igneous Carbonatites/первичные магматические карбонатиты). Немаловажное значение на изотопный состав изучаемых карбонатов могли оказать такие факторы как: поступление воды других источников, продолжающийся метасоматоз. Не стоит исключать из внимания близость "свежих" интрузивных тел дайкового комплекса и образующиеся карбонаты локальных флюидов. Образование прожилков с наложенной низкотемпературной редкоземельной минерализацией происходило позже остальных и сопряжено с завершением гидротермально-метасоматических процессов. Данные по изотопному составу  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в жильном кальците Ак-Сугского месторождения различных стадий минералообразования подтверждают неоднородный полигенный источник вещества рудных зон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного изучения геологического строения и условий образования руд медно-порфирового месторождения Ак-Суг автором были получены новые данные о возрасте проявления интрузивного магматизма, с которым пространственно и парагенетически связано молибденовое, медное и золотое оруденение. Возраст внедрения тоналит-порфиров, с которыми связана большая часть вкрапленной и прожилково-вкрапленной минерализации, определенный U-Pb методом по цирконам, составил  $523 \pm 7$  млн. лет. Возраст плагиогранит-порфиров центральной части интрузивного многофазного штока оценивается в  $521 \pm 6$  млн. лет. Полученные данные позволяют с уверенностью говорить о раннекембрийском возрасте интрузивного магматизма, продуктивного на порфировое оруденение.

Проявленная во время становления массива геологическая зональность, заключающаяся во «вложенности» более поздних интрузивных фаз в раннюю интрузивную раму, является характерной чертой крупных порфировых систем. Хронология и стадийность внедрения интрузивных фаз нашла своё отражение в четко проявленной концентрической минералого-геохимической и метасоматической зональности, также согласующихся между собой. Внешнему пропиловому ореолу метасоматических изменений на месторождении соответствует зона ранних пирит-халькопиритовых руд в тоналит-порфирах. В них же размещена и зона кварц-хлорит-серицитовых метасоматитов с богатыми халькопирит-пиритовыми залежами. Небольшим по размерам реликтовым зонам калиевых преобразований, представленных калишпатизацией и биотитизацией отвечают зоны борнит-халькопиритовых и халькопирит-теннантитовых руд. С результатом магматической и постмагматической деятельности плагиогранит-порфиров связана зона интенсивного окварцевания в центре интрузии («кварцевое ядро») и образование рассеянной молибденовой минерализации. С завершающим этапом рудообразования связано образование низкотемпературной минерализации в карбонатных и кварц-карбонатных прожилках и медной (самородная медь, халькозин, куприт и др.) минерализации по контакту с породами толтаковской свиты в зоне гипергенеза.

Источником серы, участвующей в образовании сульфидных минералов, является мантия, что подтверждается как авторскими данными исследований, так и результатами предшественников. Об этом глубинном гомогенном источнике свидетельствует диапазон значений  $\delta^{34}\text{S}$  в диапазоне от  $-2,9$  до  $+3,2\%$ . Вариации изотопных составов углерода и кислорода карбонатных прожилков с месторождения Ак-Суг свидетельствуют о продолжительной эволюции как магматических, так и постмагматических процессах, изменяющих изотопную систему  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ . Источником воды для образования карбонатных прожилков служили преимущественно насыщенные F, Cl метаморфические воды, а углекислота привносилась путем декарбонизации (преимущественно низкотемпературной) осадочных карбонатов. Рудный флюид, по данным газовой хромато-масс-спектрометрии кварцевых и карбонатных прожилков и рамановской КР-спектроскопии кварцевых прожилков, имеет углекислотно-водный состав. Для флюида безрудных участков характерен преимущественно водный состав. Подобное изменение состава флюида порфировой системы свидетельствует о частичной смене окислительно-восстановительных условий среды рудообразования.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В изданиях перечня ВАК РФ*

1. 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-порфирирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва // Руды и металлы. 2021. № 1. с. 77–92.

2. Лобанов К.В., Макаров В.А., Макеев С.М., Шведов Г.И., Муромцев Е.А., **Шадчин М.В.**, Глушков Ю.В., Самородский П.Н. Геолого-минералогическая и геохимическая зональность Мо-Ау-Си-порфирирового месторождения Ак-Суг, Северо-восточная Тува, Россия // Геосферные исследования. 2023. № 3. с. 29–54.

3. **Шадчин М.В.**, Шведов Г.И., Макаров В.А., Лобастов Б.М., Сильянов С.А., Сердюк С.С. Новые данные по минералогии руд Ау-Мо-Си-порфирирового месторождения Ак-Суг (Северо-восточная Тува)//Минералогия. 2024. №3. с. 32–51.

*Избранные тезисы конференций*

4. Макаров В.А., **Шадчин М.В.**, Шведов Г.И. и др. Ак-Сугское месторождение-эталонный медно-порфирировый объект Восточно-Саянской металлогенической провинции / Сибирский федеральный университет; Институт цветных металлов – Красноярск, 2024. – 174 с.

5. **Шадчин М.В.** Вещественный состав руд и минералогическая зональность медно-порфирирового месторождения Ак-Суг (Восточный Саян) / М.В. Шадчин // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XIX Международного форум-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 22–26 мая 2023 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. с. 344–346.

6. **Шадчин М.В.** Изотопный состав серы халькопирита медно-порфирирового 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». (10-12 апреля 2022 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). М.: ЦНИГРИ. 2022. с. 223–228.

7. **Шадчин М.В.** Изотопные соотношения углерода и кислорода карбонатов медно-порфирирового месторождения Ак-Суг // Рудная школа 2023 Сборник тезисов докладов IV Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». (15-17 февраля 2023 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). М.: ЦНИГРИ. 2023. с. 172–177.

8. **Шадчин М.В.** Интрузивные комплексы Алтае-Саянской складчатой области как источник порфирирового оруденения / **М.В. Шадчин**, В.И. Лосев, В.А. Макаров// Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXVII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященный 160-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 140-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, Томск, 03–07 апреля 2023 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. с. 110–111.

9. **Шадчин М.В.**, Макаров В.А. Разработка геолого-генетической модели Ак-Сугского месторождения – эталонного медно-порфирирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции // «Науки о Земле. Современное состояние» VI молодежная научно-практическая школа-конференция. 30 июля – 5 августа 2023 года, Геологический полигон «Шира», НГУ, 2023. с. 199–201.