

На правах рукописи



СТАРОСТИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ КЫЗЫКЧАДРСКОГО
РУДНОГО ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА ТЫВА)**

1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых,
минералогия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

Научный руководитель: **Гирфанов Михаил Миргалимович**, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела международного сотрудничества ФГБУ «ЦНИГРИ»

Официальные оппоненты: **Якубчук Александр Сергеевич**, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова», Геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, доцент.

Шатов Виталий Витальевич, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», Центр прогнозно-металлогенических исследований, директор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»

Защита состоится 22 октября 2024 г. в 10 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета 30.1.001.01 (Д 216.022.01), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

Адрес: 117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научно-технической библиотеки ФГБУ «ЦНИГРИ» (по адресу: г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1) и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»:

https://www.tsnigri.ru/ru/starostin_i_a.html

https://www.tsnigri.ru/disser/Starostin/Starostin_I_A_DIS.pdf

Автореферат разослан «___» августа 2024 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета



С.С. Двуреченская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность изучения перспективного Кызыкчадрского рудного поля с потенциально промышленным месторождением Кызык-Чадр определяется его значением как резервной сырьевой базы для проектируемого Аксугского ГМК в Восточной Тыве. В то же время, месторождение Кызык-Чадр вызывает научный интерес как один из наиболее древних объектов медно-порфирирового типа в Алтае-Саянском регионе, вовлеченный в интенсивную тектоническую переработку на последующих геотектонических этапах. Характерные черты геологической позиции, строения, вещественного состава и зональности месторождения Кызык-Чадр положены в основу адаптированной геолого-поисковой модели, для использования при прогнозировании и проведении геологоразведочных работ в целях дальнейшего укрепления МСБ меди, молибдена и золота Алтае-Саянского региона.

Цели и задачи работы

Цель работы – установление геологического строения Кызыкчадрского рудного поля, определение типовых черт и условий образования медно-порфирирового и сопряженного с ним золото-сульфидно-кварцевого оруденения; разработка рекомендаций по направлениям и методике геолого-поисковых работ на оруденение медно-порфирирового типа в Алтае-Саянской металлогенической провинции.

Основные задачи, решаемые в рамках данной работы:

- Уточнение палеогеотектонической позиции Кызыкчадрского рудного поля в пределах юго-восточного сегмента Алтае-Саянского складчатого пояса.
- Уточнение геологического строения, вещественного состава руд и рудовмещающих пород, рудно-метасоматической, минералого-геохимической зональности Кызыкчадрского рудного поля, месторождения Кызык-Чадр, молибден-медно-порфирировых и золото-сульфидно-кварцевых рудных тел в его пределах. На этой основе провести сопоставление оруденение Кызыкчадрского рудного поля с типовыми объектами медно-порфирирового семейства.
- Уточнение и детализация прогнозно-поисковой модели Кызыкчадрского рудного поля и месторождения Кызык-Чадр.
- Разработка рекомендаций по проведению дальнейших поисковых и оценочных работ на медно-порфирировое и золото-сульфидно-кварцевое оруденение в пределах Кызыкчадрского рудного поля и других перспективных площадей Алтае-Саянской металлогенической провинции.

Научная новизна исследований

Предложена современная интерпретация палеогеотектонической позиции Кызыкчадрского рудного поля в пределах южной части Алтае-Саянского региона, на основе которой намечены участки возможного проявления рудоносной плутонической формации и связанного с ней медно-порфирирового оруденения. Выявлены и систематизированы особенности геологического строения и вещественного состава оруденения месторождения Кызык-Чадр, отличающие его от типовых медно-порфирировых объектов. Впервые установлены элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности состава руд и метасоматитов месторождения Кызык-Чадр, дополняющие минералогическую рудно-

метасоматическую зональность. Дополнены и детализированы прогнозно-поисковые модели Кызыкчадрского рудного поля и месторождения.

Практическая значимость.

В результате выполненных исследований намечены площади для постановки прогнозно-минерагенических работ на оруденение порфирирового типа в пределах южной части Алтае-Саянского сегмента Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП); рекомендовано проведение оценки глубоких горизонтов рудоносной зоны месторождения Кызык-Чандр на промышленное медно-порфирировое оруденение, намечены участки первоочередных буровых работ; выявленные элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности состава руд и метасоматитов в объеме рудного пространства месторождения, рекомендованные для апробации и применения в качестве новой поисковой методики, позволяющей определять центральные, наиболее продуктивные части минерализованных зон на ранних стадиях геолого-поисковых работ; дополнена геолого-поисковая модель оруденения медно-порфирирового типа, адаптированная к геологическим условиям Алтае-Саянский металлогенической провинции в целях определения направлений и оптимизации проведения дальнейших прогнозно-минерагенических и оценочных работ.

Фактический материал и методы изучения. Работа основана на материалах, собранных автором в период с 2017 по 2023 год в ходе полевых и камеральных исследований объектов Кызыкчадрского рудного поля (Республика Тыва) в составе группы ФГБУ «ЦНИГРИ». Работы выполнялись в рамках Государственного контракта «Вещественный состав и зональность медно-порфирирового оруденения южной части Кызыкчадрского рудного узла (Республика Тыва)» (2017–2020 гг.) и подраздела «Опытно-методические работы по применению метода масс-спектрометрического анализа с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) сульфидов с целью выявления и использования «скрытой» минералого-геохимической зональности» Государственного задания ФГБУ «ЦНИГРИ» (2022–2023 гг.), а также тематического плана ФГБУ «ЦНИГРИ».

Исследования проводились с использованием разработанных в ФГБУ «ЦНИГРИ» методик структурно-формационного и рудно-формационного анализа разноранговых металлогенических площадей, а также специализированного изучения геологического строения, вещественного состава и рудно-метасоматической зональности, как наиболее информативных в поисковом отношении элементов медно-порфирировых систем.

В ходе полевых исследований автор лично участвовал в проведении детального и крупномасштабного минералого-петрографического картирования в пределах Кызыкчадрского рудного поля и его обрамления. Выполнено выборочное специализированное изучение естественных обнажений, поверхностных горных выработок и керна скважин. Отобраны образцы и пробы пород, руд и метасоматитов, характеризующих различные части рудовмещающего пространства Кызыкчадрского рудного поля и входящих в его состав рудных объектов, для выполнения различных видов лабораторно-аналитических исследований.

В камеральный период при непосредственном участии соискателя выполнен комплекс лабораторно-аналитических исследований отобранных образцов и проб на базе лабораторий различных организаций. Проведено

специализированное изучение пород, руд и метасоматитов в прозрачных шлифах (300 штук) и аншлифах (200 штук); выполнен изотопный масс-спектрометрический анализ серы сульфидов (40 шт.), рентгеновские и ИК-спектроскопические исследования светлых слюд метасоматитов (20 шт.) (ФГБУ «ЦНИГРИ»). Выполнен силикатный анализ проб основных разновидностей интрузивных пород (32 проб) (АО «Сибирское ПГО» (АО «Росгео»). Выполнен масс-спектрометрический анализ с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) сульфидов (107 проб) (ИГЕМ РАН).

Автором выполнены обобщение и интерпретация полученных результатов с учетом данных предшествующих исследований: составлены разномасштабные графические материалы, отражающие основные закономерности геологического строения, рудно-метасоматической и «скрытой» минералого-геохимической зональности; петрохимические диаграммы, отражающие различия состава и эволюции интрузивных комплексов в пределах Кызыкчадрского рудного поля и его окружения.

В целях решения задачи определения региональных закономерностей локализации оруденения порфирирового типа в структурах юго-восточного сегмента Алтае-Саянского складчатого пояса собрана фондовая и опубликованная информация о геологическом строении и металлогении южной части Алтае-Саянского региона, в пределах которого располагается изучаемый объект. В металлогеническую интерпретацию вовлечены картографические и другие отчетные материалы предшествующих геолого-съемочных и тематических работ в пределах 6 листов ГКК-1000 (N-45–47, M-45–47).

Цифровая обработка используемой информации, в т.ч. создание цифровых карт, разрезов, различных диаграмм, выполнены с использованием программного обеспечения Esri ArcGIS 10.6, Surfer 18.1, STATISTICA 10.0, Microsoft Office 2019, CorelDraw 2021.

Защищаемые положения:

1. Кызыкчадрское рудное поле контролируется интрузиями порфирировой фазы рудоносного габбро-диорит-гранодиорит-гранитового Кызыкчадрского комплекса (E_{2-3}), прорывающего массив габбро-тоналит-плагиогранитового таннуольского комплекса (E_2) в пределах локального провиса его кровли. Ожинский рудный узел, в состав которого входит рудное поле, расположен в области сочленения последовательно сформированных геоструктур: островодужных вулканических поясов ($V-E_1$), аккреционно-коллизийных «батолитовых» массивов и рудоносных «малых» интрузий (E_{2-3}), а также ареалов вулканоплутонических ассоциаций кислого и субщелочного состава собственно коллизийного этапа ($O-D_1$), что отражает длительную магматическую активность в пределах Ожинского рудного узла и его ближнего окружения.

2. Геологическое строение, вещественный состав руд, метасоматитов и вмещающих пород и рудно-метасоматическая зональность месторождения Кызыкчадр в целом отвечают типовой модели медно-порфирировых месторождений. В то же время, установлен ряд характерных особенностей его морфологии и зональности этого объекта: ярко-выраженный линейный характер минерализованной зоны и рудных тел; редуцированность калиевой метасоматической зоны при резком преобладании филлизитовой зоны; практически полное отсутствие в метасоматитах вторичного биотита; ограниченное распространение магнетитовой и

халькопиритовой рудных минеральных ассоциаций. Эти особенности обусловлены формированием месторождения в пределах долгоживущей разломной зоны, экранирующим эффектом вмещающей полифазный интрузив метаморфизованной сланцевой толщи и преимущественно кислым составом пород этого интрузива.

3. Для месторождения Кызык-Чадр установлена «скрытая» минералого-геохимическая зональность, выявляемая инструментальными физико-химическими методами (рентгеноструктурный анализ, LA-ICP-MS) и позволяющая выделять наиболее продуктивные части минерализованных зон на ранних стадиях геолого-поисковых работ по соотношению фенгит/мусковит в гидротермальных светлых слюдах и распределению элементов-микропримесей в пиритах и халькопиритах. В качестве поискового критерия предложены комплексные (мультипликативные) коэффициенты зональности: $K(\text{пи}) = \text{Cu}^{2*}\text{Mo}/\text{Pb}*\text{Zn}*\text{Bi}$ (для пирита) и $K(\text{хп}) = \text{Co}*\text{Mo}/\text{Se}*\text{Bi}$ (для халькопирита), значения которых последовательно уменьшаются от центра к периферии рудоносного штокверка Кызык-Чадр.

4. В результате выполненных исследований выделены площади для постановки прогнозно-минерагенических работ на оруденение порфирирового типа в пределах южной части Алтае-Саянского сегмента ЦАОП; рекомендовано проведение оценки глубоких горизонтов рудоносной зоны месторождения Кызык-Чадр на промышленное медно-порфирировое оруденение; дополнена геолого-поисковая модель оруденения медно-порфирирового типа Кызыкчадрского рудного поля, отличительной особенностью которой является детализация зональности рудно-метасоматических образований месторождения и интеграция в нее элементов «скрытой» минералого-геохимической зональности; обоснована целесообразность постановки опытно-методических работ на месторождениях порфирирового типа различных регионов с целью разработки методики выявления «скрытой» минералого-геохимической зональности на медно-порфирировых объектах.

Апробация диссертации. Основные результаты и защищаемые положения работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: VIII Российская молодёжная научно-практическая школа «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, ИГЕМ РАН, 2018 г.); IX-я Международная научно-практическая конференция «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ», 2019 г.); I-я, III-я, IV-я Молодежные научно-образовательные конференции ФГБУ «ЦНИГРИ»: «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов — от прогноза к добыче» (Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ», 2020, 2022, 2023 гг.).

Результаты исследований вошли в состав геологического отчета о выполненных работах по договору с АО «Сибирское ПГО» (АО «Росгеология») «Вещественный состав и зональность медно-порфирирового оруденения южной части Кызыкчадрского рудного узла (Республика Тыва)» в рамках Госконтракта № 62 от 04.09.2017 г. и главы геологического отчета по подразделу: «Опытно-методические работы по применению метода масс-спектрометрического анализа с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) сульфидов с целью выявления и использования скрытой минералого-геохимической зональности при локальном прогнозировании медно-порфирирового оруденения (на примере месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва)» Государственного контракта ФГБУ «ЦНИГРИ» за 2022 и 2023 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано десять работ, из них четыре статьи в рецензируемых научных журналах.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 146 страниц состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 71 рисунок, 3 таблицы и список литературы, включающий 81 наименование.

Благодарности. Автор выражает благодарность за помощь, содействие и поддержку при проведении исследований и подготовке данной работы своему научному руководителю – канд. геол.-мин. наук М.М. Гирфанову, а также дирекции ФГБУ «ЦНИГРИ»: доктору геол.-мин. наук А.И. Иванову, канд. геол.-мин. наук Е.А. Наумову, канд. геол.-мин. наук А.Г. Волчкову. За существенную помощь при подготовке диссертационной работы автор благодарит Советника ФГБУ «ЦНИГРИ» доктора геол.-мин. наук И.Ф. Мигачева. За содействие в интерпретации материалов региональных работ автор выражает признательность канд. геол.-мин. наук А.И. Черных.

За помощь и проведение лабораторно-аналитических исследований автор благодарит доктора геол.-мин. наук С.Г. Кряжева, канд. геол.-мин. наук С.С. Двуреченскую (ФГБУ «ЦНИГРИ»); канд. мат. наук В.Д. Абрамову, канд. геол.-мин. наук Е.В. Ковальчук (ИГЕМ РАН), канд. геол.-мин. наук М.С. Никольского (ИГЕМ РАН).

За содействие при проведении совместных полевых и камеральных работ автор признателен А.В. Андрееву, О.В. Авиловой, И.В. Гудковой, Э.В. Закиевой, В.Э. Мельничину, И.О. Столярову, Е.В. Тарасовой (ФГБУ «ЦНИГРИ»).

За конструктивную критику, ценные советы и рекомендации автор выражает признательность К.М. Минькину, доктору геол.-мин. наук В.С. Звездову, канд. геол.-мин. наук О.В. Мининой, канд. геол.-мин. наук С.Г. Мишенину, канд. геол.-мин. наук В.Е. Васюкову (ФГБУ «ЦНИГРИ»); канд. геол.-мин. наук В.А. Минаеву, канд. геол.-мин. наук С.А. Устинову (ИГЕМ РАН); канд. геол.-мин. наук Е.И. Ярцеву, канд. геол.-мин. наук Л.Н. Шишаковой (МГУ им. Ломоносова).

Автор благодарит сотрудников АО «Сибирское ПГО» М.И. Семенова, И.А. Бабкина, В.А. Москалева, Д.Н. Юрмазова за помощь при проведении полевых работ в Республике Тыва, консультации и предоставленные материалы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Кызыкчадрское рудное поле находится на востоке Республики Тыва, в 100 км к северу от города Кызыл, в восточных отрогах Западного Саяна.

В геологическом отношении Кызыкчадрское рудное поле располагается в южной части Алтае-Саянского сегмента Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП). Оно локализовано в зоне влияния субширотного глубинного разлома, в краевой части интрузивного палеоподнятия, образованного полиформационным Ожинским батолитоподобным плутоном, сложным породами габбро-тоналит-плагиогранитовой (таннуольский комплекс, ϵ_2) и габбро-диорит-гранодиорит-гранитной (кызыкчадрский комплекс, ϵ_{2-3}) формаций, прорывающим метаморфизованную вулканогенно-осадочную толщу (V- ϵ_1) и перекрытым ордовикскими, силурийскими и раннедевонскими отложениями. В металлогеническом отношении Ожинскому плутону отвечает одноименный рудный узел, включающий рассматриваемое рудное поле и несколько перспективных площадей в ранге прогнозируемых рудных полей, требующих дополнительного

изучения. Прожилково-вкрапленное медно-молибденовое и жильно-прожилковое золото-медно-кварцевое оруденение Кызыкчадрского рудного поля пространственно и генетически связано с поздними порфировыми фазами внедрения штокообразного полифазного массива кызыкчадрского комплекса [3].

Основной перспективный объект Кызыкчадрского рудного поля – среднее по масштабам золотосодержащее молибден-медно-порфировое потенциальное месторождение Кызык-Чадр (апробированные прогнозные ресурсы кат. P₁+P₂: Cu – 870 тыс. т, Mo – 40 тыс. т, Au – 40 т, Ag – 200 т). Оно открыто в 1950-х годах, детальные поиски проведены в 1970-х годах. В 2017–2020 годах АО «Сибирское ПГО» АО «Росгео» на объекте проведены поисковые работы, в которых принимала участие группа ФГБУ «ЦНИГРИ» с участием автора [3].

Результаты выполненных автором исследований положены в основу подготовленной диссертационной работы.

Защищаемое положение № 1. Кызыкчадрское рудное поле контролируется интрузиями порфировой фазы рудоносного габбро-диорит-гранодиорит-гранитового Кызыкчадрского комплекса (Є₂₋₃), прорывающего массив габбро-тоналит-плагиогранитового таннуольского комплекса (Є₂) в пределах локального провиса его кровли. Ожинский рудный узел, в состав которого входит рудное поле, расположен в области сочленения последовательно сформированных геоструктур: островодужных вулканических поясов (V-Є₁), аккреционно-коллизийных «батолитовых» массивов и рудоносных «малых» интрузий (Є₂₋₃), а также ареалов вулканоплутонических ассоциаций кислого и субщелочного состава собственно коллизийного этапа (O-D₁), что отражает длительную магматическую активность в пределах Ожинского рудного узла и его ближнего окружения.

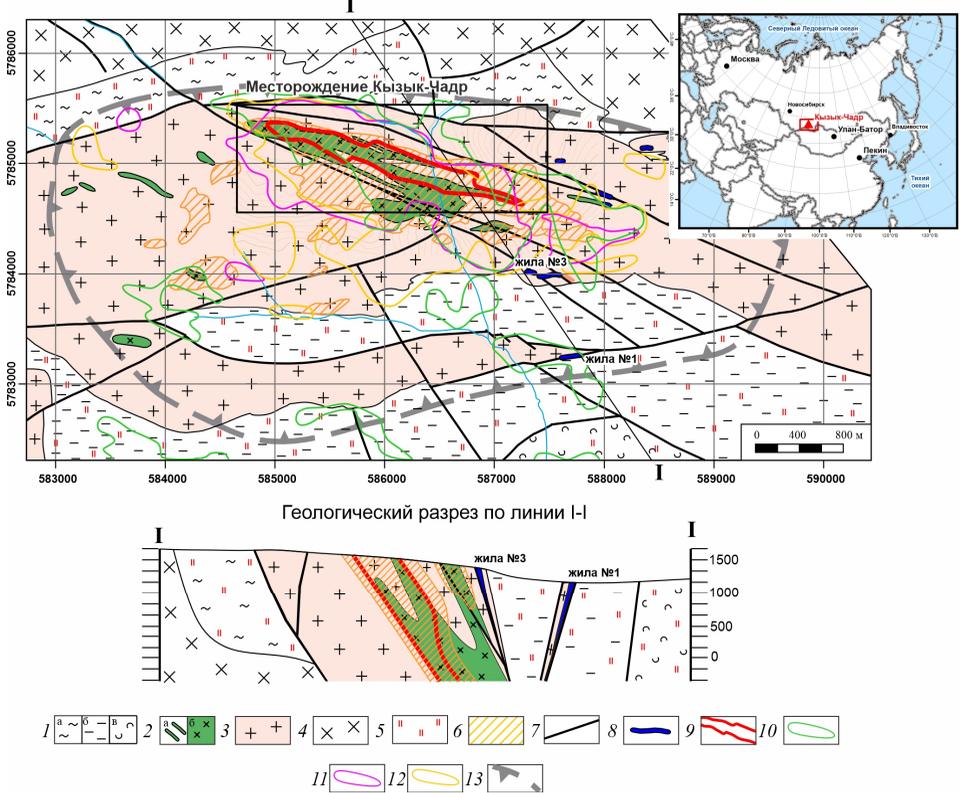
Тувинский аккреционно-коллизийный магматический пояс (Ветров, Черных, 2019), с которым связывается медно- и молибден-порфировое, а также золотое оруденение Алтае-Саянской области, представляет собой северо-западный сегмент более крупной Тувино-Монгольской магматической дуги (Михалаский, 2015). По времени формирования (Є₂–D₁) эта структура относится к каледонскому этапу геотектонического развития (Буслов, 2013; Руднев, 2021; Семенов, 2019).

В целях определения закономерностей локализации оруденения Кызыкчадрского рудного поля в региональных структурах автором рассмотрена достаточно обширная территория – юго-восточный сегмент Алтае-Саянского складчатого пояса. Этот регион располагается в пределах шести листов ГКК-1000 (N-45–47; M-45–47) и включает разнотипные и разновозрастные геологические структуры и рудные объекты.

Кызыкчадрское рудное поле с наиболее перспективным к настоящему времени одноименным месторождением располагается в пределах Ожинского рудного узла, включающего также три прогнозируемых рудных поля (Тараскырское, Глухариное и Бийхемское) и Улубгусскую перспективную площадь, располагающуюся на труднодоступном левобережье р. Бол. Енисей.

Кызыкчадрское рудное поле включает штокверковое рудное тело одноименного месторождения и несколько золото-кварц-сульфидных жил и жильно-прожилковых зон, в том числе наиболее крупную из них жилу № 1

(Рисунок 1). Рудные тела и минерализованные зоны вскрыты канавами и пересечены буровыми скважинами по серии профилей.



1 – туматтайгинская свита ($E_{1т}$): а) вулканогенно-осадочные отложения, нерасчлененные б) песчаники и алевролиты пестроцветные, в) туфы, туфобрекчи, туфоконгломераты с прослоями лав среднего состава, алевролитов, песчаников; 2-3 кызыкчадрский габбро-диорит-гранодиорит-гранитный комплекс ($E_{2-3к}$): 2 – кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, кварцевые порфиры, нерасчлененные: а – отдельные дайки, б – «порфировый интрузив», образованный сближенными телами порфировых пород различного состава; 3 – граниты, гранодиориты, кварцевые монзониты, диориты и габбро-диориты, нерасчлененные; 4 – таннуольский диорит-тоналит-плагιοгранитовый комплекс (E_2); 5 – ороговикование; 6 – зоны развития интенсивных гидротермально-метасоматических изменений (преимущественно кварц-хлорит-серцитового состава) и сульфидной минерализации; 7 – разрывные нарушения; 8 – (золото-сульфидно)-кварцевые жилы; 9 – контур штокервового меднорудного тела по бортовому содержанию Si 0,2%; 10–12 – вторичные ореолы рассеяния: 10 – меди, 11 – молибдена, 12 – золота; 13 – контур Кызыкчадрского рудного поля.

Рисунок 1. Схема геологического строения Кызыкчадрского рудного поля (по Р.Т. Уссар, 1978; И.А. Бабкин и др., 2019; А.В. Андреев и др., 2020 с изменениями и дополнениями). Рамка – контур схемы месторождения Кызык-Чадр (Рисунок 4).

Жила №1 с рудами золото-сульфидно-кварцевого типа была первым выявленным объектом рудного поля, неоднократно разведывалась, частично отработана (Уссар, 1978). Она приурочена к крупному разрывному нарушению,

ограничивающему тектоническую линзу катаклазированных гранитоидов кызыкчадрского комплекса, заключенную в алевросланцевой толще. Жила содержит богатые золото-халькопирит-борнитовые руды (с содержаниями золота до 150 г/т и меди до 20 %), однако имеет небольшие размеры (170×95×0,1–4,5 м) и запасы – 311,6 кг золота по жиле ($C_{cp} Au = 8,2$ г/т), 1 400 т меди ($C_{cp} Cu = 4,6$ %) (Варанд, 1954).

Автором выполнена специализированная интерпретация имеющихся мелкомасштабных геологических и металлогенических карт на основе методики структурно-формационного анализа и рудноформационного анализа (Кривцов и др, 2007; Мигачев, 1993; Звездов, 2023). Составлена схематическая структурно-формационная карта южной части Алтае-Саянского сегмента масштаба 1:3 000 000, на которой показаны разновозрастные структурно-формационные комплексы, отвечающие различным геотектоническим стадиям и палеогеотектоническим обстановкам образования в пространственно-временных рядах океан – островная дуга – континент; главные региональные тектонические нарушения.

Составлена сводная металлогенограмма, отражающая последовательность смены геотектонических режимов и соответствующих им структурно-формационных комплексов и рудных формаций, рассматриваемого региона от докембрия до среднего палеозоя (Рисунок 2). Выполненный палеогеодинамический анализ основан на представлениях ряда исследователей Алтае-Саянского региона (Буслов, 2013; Ветров, Черных, 2019; Гордиенко, 2016; Гусев, 2014; Кривцов, 2007; Михалаский, 2015; Руднев, 2021; Якубчук, 2017).

Анализ составленных картографических материалов показал, что интрузивные образования начальной стадии развития Тувинского магматического пояса (таннуольский и кызыкчадрский комплексы, E_{2-3}) сосредоточены в пределах области распространения фрагментов интенсивно деформированных островодужных структур ($V-E_1$), на границе с Сибирской платформой. Это согласуется с выводом, что рудоносный магматизм и медно-порфировое оруденение Кызык-Чадра связано со стадией аккреции океанической островной дуги к Сибирскому континенту в среднем-позднем кембрии (E_{2-3}), сопровождавшейся коллизией типа дуга-континент (Буслов, 2013; Гордиенко, 2016; Якубчук, 2017) с интенсивными тектоническими дислокациями и начальной, аккреционно-коллизивной стадией формирования Тувинского магматического пояса (Гусев, 2014; Семенов, 2019; Черных, 2021).

Основной объем магматитов пояса представлен интрузивами габбро-тоналит-плагиогранитовой формации таннуольского интрузивного комплекса и его аналогов, формировавшихся в широком возрастном диапазоне $515 \pm 4 - 499 \pm 6$ млн лет (Берзина, 2016). Они образуют батолитоподобные плутоны, с которыми связаны локальные магматогенные поднятия. Судя по редким опубликованным данным определения абсолютного возраста пород, в короткий промежуток времени (около 5–10 млн лет) такие плутоны в рассматриваемом регионе прорываются малыми по размерам штокообразными интрузивами различной формационной принадлежности, несущими золото-молибден-медное оруденение.

Медно-порфировое оруденение рассматриваемого Кызыкчадрского рудного поля приурочено к интрузиям самостоятельного кызыкчадрского габбро-диорит-гранодиорит-гранитного комплекса среднего-позднего кембрия ($508 \pm 7 - 490 \pm 4$ млн

субщелочного (D₁) составов. Образование этих ассоциаций связывается с собственно коллизионной стадией развития пояса (Семенов, 2016).

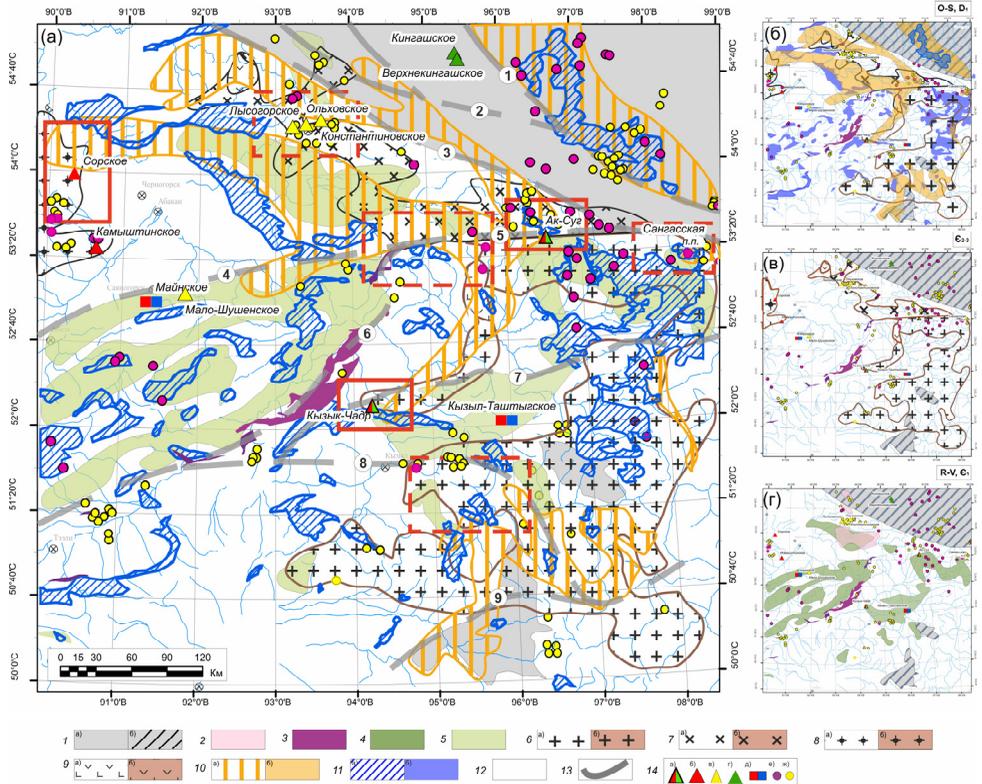
С учетом выполненного геодинамического анализа, автором составлена схематическая карта распространения магматических образований южной части Алтае-Саянского сегмента (Рисунок 3). На составленной схеме видно, что позиция известных в пределах региона месторождений, относящихся к медно-молибден-порфировому рудно-формационному семейству (Ак-Суг, Сорское, Кызык-Чадр), отвечает участкам пространственного совмещения магматических ареалов трех геотектонических стадий: островодужных вулканических поясов венда-раннего кембрия, аккреционно-коллизионных «батолитовых» массивов и прорывающих их локально проявленных «малых» интрузий среднего-позднего кембрия (маркирующих проявления коллизии дуга-континент), а также более поздних вулканоплутонических ассоциаций кислого и субщелочного состава собственно коллизионного этапа ордовик-раннего девона.

Совмещение разновременных магматических образований, по-видимому, отражает длительно сохраняющуюся магматическую активность в таких участках. Это позволяет предполагать присутствие в них еще не выявленных проявлений рудоносных «малых» интрузий, аналогичных по составу образованиям кызыкчадрского комплекса.

Защищаемое положение № 2. Геологическое строение, вещественный состав руд, метасоматитов и вмещающих пород и рудно-метасоматическая зональность месторождения Кызык-Чадр в целом отвечают типовой модели медно-порфириновых месторождений. В то же время, установлен ряд особенностей: ярко-выраженный линейный характер минерализованной зоны и рудных тел; редуцированность калиевой метасоматической зоны при резком преобладании фидлизитовой зоны; практически полное отсутствие в метасоматитах вторичного биотита; ограниченное распространение магнетитовой и халькопиритовой рудных минеральных ассоциаций. Эти особенности обусловлены формированием месторождения в пределах долгоживущей разломной зоны, экранирующим эффектом вмещающей полифазный интрузив метаморфизованной сланцевой толщи и преимущественно кислым составом пород этого интрузива.

Основным объектом рудного поля, определяющим его экономическое значение, является медно-порфириновое рудопроявление (потенциальное месторождение) Кызык-Чадр – крупнообъемный кварц-сульфидный штокверк с золотосодержащими молибден-медными рудами. Размеры штокверкового рудного тела составляют около 2 350 м по простиранию, 175–250 м по мощности, и прослежены до глубины 500 метров при средних содержаниях меди 0,34 %, молибдена 0,015 %, золота 0,156 г/т (Рисунок 4).

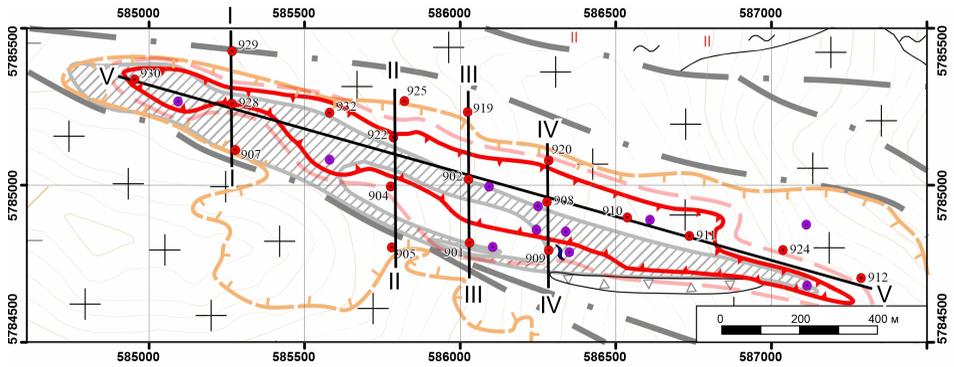
Для месторождения и рудного поля в целом установлены все необходимые элементы классической (А.И. Кривцов, 1981) модели медно-порфириновой системы. Это интрузивная рама; конформный интрузивный массив продуктивной формации; «порфириновый интрузив»; тела эксплозивных брекчий; зональный относительно порфиринового интрузива ореол гидротермально-метасоматических изменений; штокверковые рудные тела, сложенные комплексом рудных минеральных ассоциаций; «пиритовый ореол»; сопутствующая жильная минерализация.



Структурно-формационные комплексы: 1 – докембрийских кратонных блоков (в т.ч. Сибирская платформа): а – на схематической карте, б – на врезках; 2 – рифей-вендской зрелой островной дуги (только на врезке); 3 – вендский офиолитовый (аккреционной призм); 4 – раннекембрийские зрелой островной дуги (только на врезке); 5 – рифей-вендские и раннекембрийские островодужные, нерасчлененные (только на карте); 6–9 – средне-позднекембрийских аккреционно-коллизийных обстановок (6–8 – батолитовых плутонов: 6 – таннуольского, 7 – ольховского, 8 – когтахского интрузивных комплексов) (а – на карте, б – на врезке); 9 – вулканиты (а – на карте, б – на врезке); 10 – ордовик-силурийские образования гранит-лейкогранитного, гранит-монцит-сиенитового и трахибазальт-трахириолитового состава коллизийной стадии развития ВПП (а – на карте, б – на врезке); 11 – раннедевонские образования монцитидного, гранит-лейкогранитного и трахиандезитбазальт-дацит-трахириолитового состава коллизийного ВПП (а – на карте, б – на врезке); 12 – прочие; 13 – главные разломы (1 – Ийско-Канский, 2 – Главный Саянский, 3 – Восточно-Саянский, 4 – Саяно-Минусинский, 5 – Кандатский, 6 – Куртушибинский, 7 – Хемчикско-Азасский, 8 – Баянхольский, 9 – Агардагско-Окинский); 14 – месторождения и рудопроявления полезных ископаемых: а) молибден-медно-порфировые, б) молибденовые, в) золоторудные, г) медно-никелевые; д) колчеданно-полиметаллические; е) рудопроявления молибдена; ж) рудопроявления золота.

Рисунок 3. Распространение кембрийских, ордовикско-силурийских и раннедевонских магматических образований в южной части Алтае-Саянского сегмента ЦАОП (красными рамками показаны участки пространственного совмещения ареалов распространения магматических образований трех геотектонических стадий): а – схематическая структурно-формационная карта, б–г – карты-врезки для геотектонических стадий: б – ордовик-силур и

ранний девон (коллизонная стадия развития ВПП), в – средний-поздний кембрий (аккреционно-коллизонная стадия), г – рифей-венд и ранний кембрий (островодужная стадия).



1 – туматтайгинская свита ($\text{C}_{11т}$): метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения, нерасчлененные, ороговикованные; кызыкчадрский габбро-диорит-гранодиорит-гранитный комплекс ($\text{C}_2\text{-zk}$): 2 – среднезернистые граниты, кварцевые диориты, мелко-среднезернистые гранодиориты, нерасчлененные; 3 – кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, кварцевые порфиры, нерасчлененные «порфировый интрузив», образованный сближенными телами порфировых пород различного состава; 4 – брекчи; 5 – разрывные нарушения; 6 – зоны развития интенсивных гидротермально-метасоматических изменений (преимущественно кварц-хлорит-серицитового состава) и сульфидной минерализации; 7 – кварцевая жила немасштабная; 8 – контур меднорудного тела по $\text{C}_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,2 %; 9 – контур распространения медной минерализации по $\text{C}_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,05 %; 10 – скважины пройденные: а – в 2017–2019 гг., б – в 1976–1977 гг.

Рисунок 4. Схема геологического строения месторождения Кызык-Чадр.

Рудоносный «порфировый интрузив» месторождения Кызык-Чадр имеет крутопадающую пластинообразную, линейно вытянутую форму, сложен несколькими петрографическими разновидностями (генерациями) пород порфировой структуры: кварцевыми диорит-порфиритами, гранодиорит-порфирами, «кварцевыми порфирами» гранит-порфирового состава, которые интенсивно дислоцированы, что затрудняет их расчленение. Такая морфология и сложное строение порфирового интрузива объясняются приуроченностью к крутопадающим разрывным нарушениям в пределах долгоживущей разломной зоны в аккреционно-коллизонной обстановке.

Зональность гидротермально-метасоматических изменений проявлена в смене с удалением от апикальных и эндо-экзоконтактовых частей порфирового интрузива следующих концентрически-расположенных генерализованных метасоматических зон: калиевой (кварц-калишпатовой с хлоритом); внутренней пропилитовой (кварц-альбит-хлоритовой); филлизитовой (кварц-серицитовой с хлоритом); внешней пропилитовой (эпидот-хлоритовой). По секущим зонам трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудным тектоническим нарушениям) развиты интенсивное кварц-серицитовое изменение и карбонатизация (кальцит).

Метасоматическая зональность в объеме месторождения отражена на обобщенной модели в вертикальном сечении (Рисунок 5) (составленной на основе комплекта поперечных разрезов с метасоматической нагрузкой) и на продольном разрезе (Рисунок 6 а).

Таким образом, набор типов гидротермальных изменений и зональность их расположения в целом отвечают типовым медно-порфировым объектам, таким, как Актогай, Кальмакыр, Песчанка и другие (Кривцов и др., 1982; Звездов, 2023; Гирфанов, 1993).

Существенными особенностями ореола гидротермально-метасоматических образований месторождения Кызык-Чадр по сравнению с типовыми медно-порфировыми объектами являются: резкое преобладание кварц-серицитовых метасоматитов над калишпатовыми, практически полное отсутствие вторичного гидротермального биотита и его реликтов в составе метасоматитов калиевой и внутренней пропилитовой зон. Для медно-порфировых систем такие особенности связываются с высокой флюидонасыщенностью (высокими отношениями вода/порода) рудовмещающего пространства, повышенной кислотностью и пониженной магнезиальностью гидротермальных растворов.

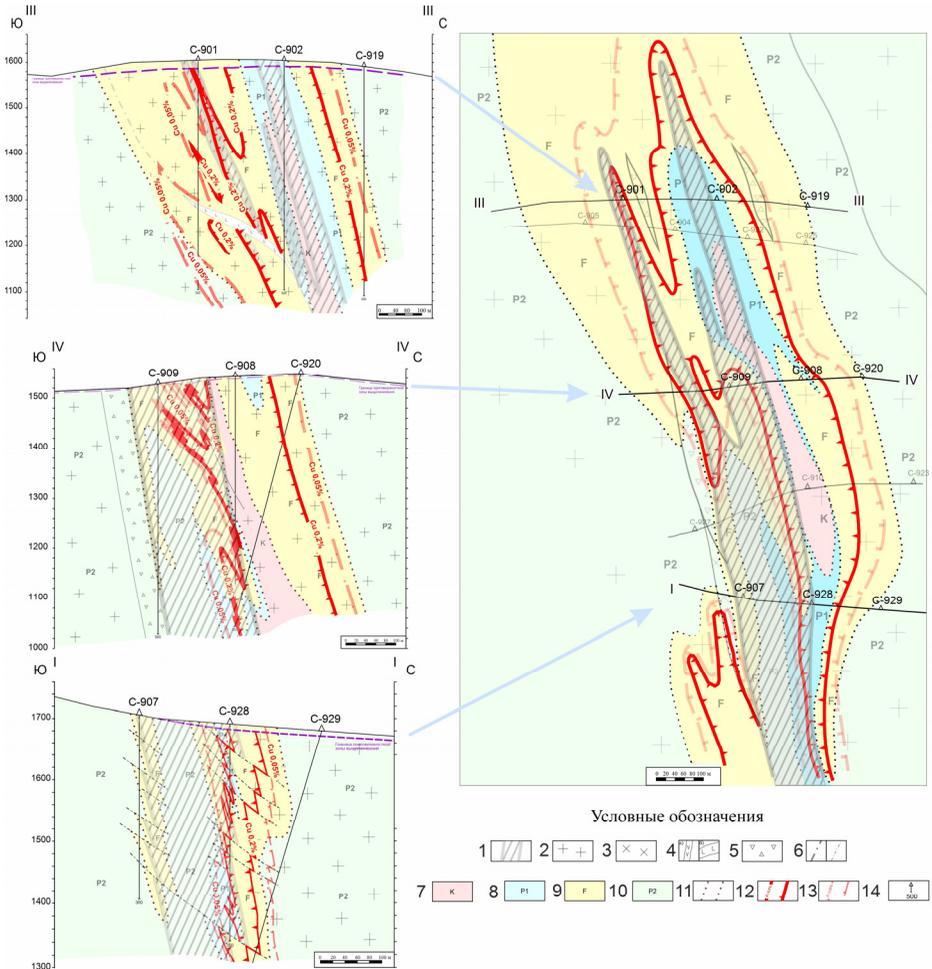
Для месторождения Кызык-Чадр такая обстановка может объясняться формированием оруденения в относительно «закрытой» рудно-магматической системе – в пределах вмещающего блока интенсивно трещиноватых гранитов, облекаемого экранирующими сланцами.

Перечень выявленных рудных минералов, набор рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр и их зональность также, в целом, соответствуют установленным для типовых медно-порфировых месторождений.

Главные рудные минералы месторождения Кызык-Чадр – халькопирит и пирит; второстепенные – молибденит, сфалерит, блеклые руды, магнетит; редкие – борнит, галенит, арсенопирит, самородное золото, энаргит; гипергенные – халькозин, малахит, азурит, ковеллин, гидрогётит. Рудные минеральные ассоциации сменяются с удалением от апикальных и эндо-экзоконтактовых частей порфирового интрузива (от центра к периферии рудно-метасоматического ореола) в последовательности: магнетитовая – халькопиритовая – молибденит-пирит-халькопиритовая – пиритовая; полисульфидная борнит-блеклорудно-галенит-сфалеритовая минеральная ассоциация в сочетании с кварц-серицит-карбонатными метасоматитами приурочена к линейным зонам интенсивной трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудным разрывным нарушениям) и локализуется как на флангах, так и в центральных частях месторождения.

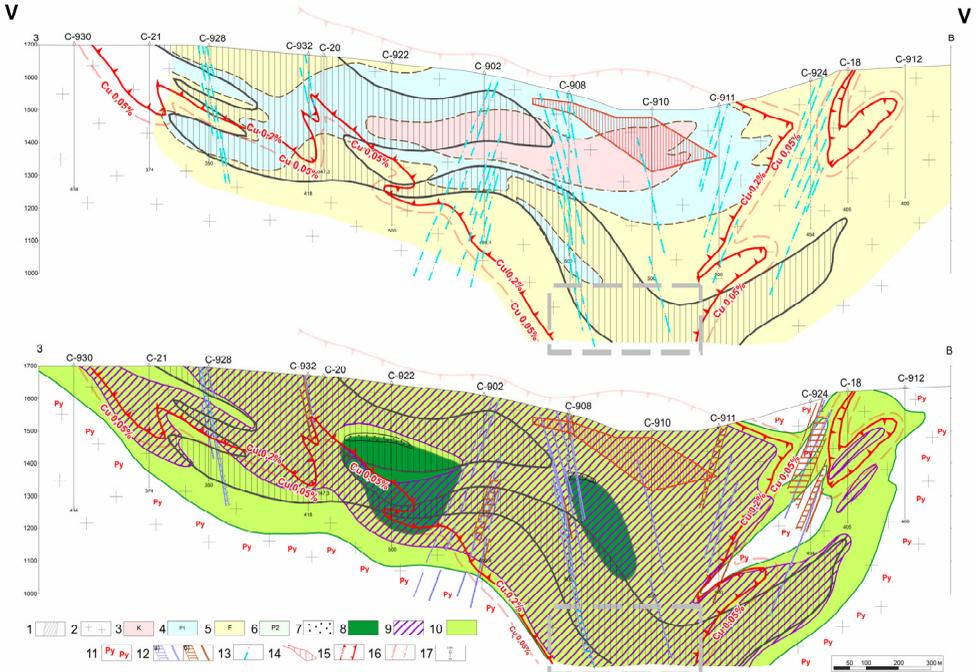
Рудно-минералогическая зональность отражена на продольном разрезе (Рисунок 6 б), иллюстрирующем распределение рудных минеральных ассоциаций в объеме месторождения.

Особенностью месторождения Кызык-Чадр является ограниченное распространение магнетитовой и халькопиритовой ассоциаций. Это вполне соответствует отмеченному редуцированному распространению калиевой метасоматической зоны, к которой они преимущественно приурочены.



1 – рудоносный порфировый интрузив: кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры; 2 – граниты среднезернистые, часто катаклазированные; 3 – кварцевые диориты, гранодиориты среднезернистые; 4 – дайки: андезит-порфиров (а); долеритов, базальтовых-порфиров (б); 5 – брекчии; 6 – разрывные нарушения (а), зоны трещиноватости и катаклаза с интенсивными кварц-карбонатными изменениями (б); 7–10 – генерализованные зоны гидротермально-метасоматических изменений: 7 – калиевая (основные минералы: *Q*, *Kfsp*; второстепенные: *Chl*, *Ab*), 8 – внутренняя пропилитовая (основные минералы: *Q*, *Chl*, *Ab*; второстепенные: *Kfsp*, *Ser*, *Cc*), 9 – филлизитовая (основные минералы: *Ser*, *Q*, *Chl*; второстепенные: *Ab*, *Cc*), 10 – внешняя пропилитовая (основные минералы: *Chl*, *Ep*, *Cc*; второстепенные: *Ser*, *Q*, *Ab*); 11 – границы генерализованных зон гидротермально-метасоматических изменений; 12 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,2 %; 13 – контур распространения медной минерализации по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,05 %; 14 – скважины АС «Сибирское ПГО» 2017–2019 гг. и их глубина, м.

Рисунок 5. Обобщенная модель метасоматической зональности месторождения Кызык-Чадр (вертикальная проекция), сформированная в результате сопоставления геологических разрезов с метасоматической нагрузкой по линиям поискового бурения с разными уровнями эрозионного среза.



1 – рудоносный порфировый интрузив: кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры; 2 – граниты среднезернистые, часто катаклазированные; 3–6 – генерализованные зоны гидротермально-метасоматических изменений: 3 – калиевая (основные минералы: Q , $Kfspr$; второстепенные: Chl , Ab), 4 – внутренняя пропилитовая (основные минералы: Q , Chl , Ab ; второстепенные: $Kfspr$, Ser , Cc), 5 – филлизитовая (основные минералы: Ser , Q , Chl ; второстепенные: Ab , Cc), 6 – внешняя пропилитовая (основные минералы: Chl , Er , Cc ; второстепенные: Ser , Q , Ab); 7–12 – области распространения рудных минеральных ассоциаций (от ранних к поздним): 7 – магнетитовой (реликты), 8 – халькопиритовой, 9 – молибденитовой ($Mo \geq 0,005\%$), 10 – пирит-халькопиритовой ($Cu \geq 0,05\%$), 11 – пиритовой; 12 – полисульфидной (а – галенит-сфалеритовой $Pb+Zn \geq 0,01\%$, б – блеклорудной $As+Sb \geq 0,01\%$); 13 – зоны интенсивной трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудные тектонические нарушения); 14 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} Cu 0,4\%$; 15 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} Cu 0,2\%$; 16 – контур распространения медной минерализации по $S_{\text{борт}} Cu 0,05\%$; 17 – скважины АС «Сибирское ПГО» 2017–2019 гг. и их глубина, м.

Рисунок 6. Продольные схематические геологические разрезы месторождения Кызык-Чандр с элементами метасоматической зональности (а) и с рудной минералого-геохимической (б) нагрузкой (серой пунктирной рамкой отмечено предполагаемое продолжение рудной зоны на глубоких горизонтах месторождения).

Золотая минерализация развита неравномерно и фиксируется как в сочетании с максимумами проявления молибденит-пирит-халькопиритовой ассоциации, так и в связи с полисульфидной и мышьяковистой минерализацией в зонах трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудных тектонических нарушений). Морфология зон рудной минерализации конформна морфологии порфирового интрузива и рисунку зон метасоматических изменений.

Рудное тело месторождения Кызык-Чадр по бортовому содержанию 0,2 % меди хорошо согласуется с областью распространения молибденит-пирит-халькопиритовой минеральной ассоциации и приурочено к области сопряжения калиевой, внутренней пропиловитовой и внутренних частей филлизитовой зон.

Таким образом, наличие основных элементов типовой модели медно-порфировой рудно-магматической системы позволяет уверенно относить месторождение Кызык-Чадр к медно-порфировому рудно-формационному (геолого-промышленному) типу.

В то же время, автором выявлен ряд особенностей (ярко выраженный линейный характер и крутое падение рудных тел и рудоносной зоны в целом, редуцированное распространение калиевых изменений с практически полным отсутствием реликтов вторичного биотита, а также резкое преобладание филлизитовых изменений в объеме месторождения; ограниченное распространение магнетитовой и халькопиритовой рудных минеральных ассоциаций), отличающих Кызык-Чадр от типовых эталонных месторождений медно-порфирового типа. Установленные отличия объясняются причинами, связанными с формированием объекта в аккреционно-коллизонной обстановке.

Кроме того, спецификой Кызыкчадрского рудного поля является интенсивная тектоническая деформация всех элементов медно-порфировой системы, включая многочисленные смещения контуров порфирового интрузива и конформного ему рудного тела, брекчирование, милонитизацию и катаклиз пород, руд и метасоматитов, которые объясняются деформациями на последующих стадиях геотектонического развития, определяющихся пострудными деформациями.

Защищаемое положение № 3. Для месторождения Кызык-Чадр установлена «скрытая» минералого-геохимическая зональность, выявляемая инструментальными физико-химическими методами (рентгеноструктурный анализ, LA-ICP-MS) и позволяющая выделять наиболее продуктивные части минерализованных зон на ранних стадиях геолого-поисковых работ по соотношению фенгит/мусковит в гидротермальных светлых слюдах и распределению элементов-микропримесей в пиритах и халькопиритах. В качестве поискового критерия предложены комплексные (мультипликативные) коэффициенты зональности: $K(\text{пи}) = \text{Cu}^{2*} \cdot \text{Mo} / \text{Pb} * \text{Zn} * \text{Bi}$ (для пирита) и $K(\text{хп}) = \text{Co} * \text{Mo} / \text{Se} * \text{Bi}$ (для халькопирита), значения которых последовательно уменьшаются от центра к периферии рудоносного штокверка Кызык-Чадр.

В практике геолого-поисковых работ все большее внимание уделяется разработке минералого-геохимических методик, основанных на «векторном» принципе – определении закономерностей в изменении содержаний элементов-микропримесей в составе минералов-индикаторов, а также других типоморфных свойств таких минералов, по направлению к промышленному оруденению. Такие вариации состава индикаторных минералов в объеме рудовмещающего пространства, которые устанавливаются только с применением высокоточного локального микроанализа, рассматриваются в качестве «скрытой» минералого-геохимической зональности (Еремин, 1977; Еремин, Сергеева, Шишаков, 1979; Гирфанов, 1993).

С целью выявления элементов «скрытой» зональности для месторождения Кызык-Чадр, автором применены два минералого-геохимических метода: (1) определение отношения фенгит/мусковит в светлослюдистых метасоматитах по данным рентгеноструктурного анализа и установление различий этого параметра для центральных и фланговых зон месторождения и (2) определение вариаций в пространстве месторождения концентраций микропримесей в сульфидах методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией (LA-ICP-MS).

Для исследований были отобраны образцы руд и метасоматитов из керна скважин, вскрывших различные части рудно-метасоматического ореола месторождения Кызык-Чадр: из внутренних зон этого ореола с медно-порфировой минерализацией и из его фланговой «безрудной» зоны.

Изучение распределения в пространстве вариаций фазового состава светлых слюдов выполнено с использованием рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии. Изучены диоктаэдрические слюды изоморфного ряда мусковит $\text{KA}_2[(\text{OH},\text{F})_2|\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ – фенгит $\text{K}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Al}[(\text{OH},\text{F})_2(\text{Al},\text{Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}]$. В слюдах определялся параметр элементарной ячейки с $\sin \beta$, зависящий от изоморфизма мусковит-фенгит (Кряжев, 2017). Количественные определения параметров ячейки и расчет соотношения фенгит/мусковит в изоморфном твердом растворе выполнены С.Г. Кряжевым (Отдел минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ»). Проанализированы и обработаны данные по 20 образцам.

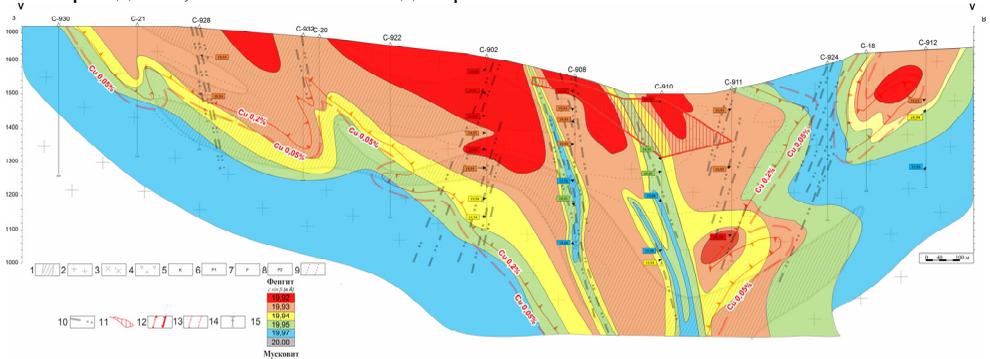
Интерпретация аналитических результатов позволила автору выявить четко проявленную тенденцию в изменении минерального состава серицитов светлослюдистых метасоматитов в объеме рудовмещающего пространства месторождения Кызык-Чадр: в центральной и глубоких частях рудно-метасоматического ореола в серицитах преобладает фенгитовая составляющая, а к его флангам и верхним частям последовательно увеличивается доля мусковитового компонента. Намеченная «скрытая» зональность состава серицитов в объеме месторождения Кызык-Чадр имеет выраженный концентрический характер и отражена на составленной модели в продольном сечении (Рисунок 7).

Изучение распределения в пространстве вариаций состава микропримесей в пиритах и халькопиритах выполнено с использованием масс-спектрометрического анализа с индукционно-связанной плазмой с системой лазерной абляции (LA-ICP-MS). Определения выполнены В.Д. Абрамовой (ИГЕМ РАН). Проанализированы и обработаны данные по 107 образцам.

Автором были составлены моноэлементные разрезы в продольном сечении месторождения Кызык-Чадр (Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Bi, Mo, Ag, As, Au, МПГ). На разрезах отмечены вариации содержаний отдельных элементов-примесей в пиритах и халькопиритах в объеме минерализованных зон.

Интерпретация полученных данных с использованием цифровых методик обработки позволила автору выявить закономерные черты зональности распределения микропримесей основных элементов индикаторов в объеме месторождения. Отмечено, что от центра к периферии рудного тела в пиритах отчетливо снижается содержание меди, серебра, молибдена и соотношение серебра к кобальту, а также увеличивается доля никеля, мышьяка и соотношения кобальта к меди, а в халькопиритах уменьшается содержание кобальта, молибдена, цинка, суммы платиноидов.

Наибольшей контрастностью характеризуются разработанные автором комплексные (мультипликативные) коэффициенты зональности: $K(\text{пи}) = \text{Cu}^2 * \text{Mo} / \text{Pb} * \text{Zn} * \text{Bi}$ (для пирита) и $K(\text{хп}) = \text{Co} * \text{Mo} / \text{Se} * \text{Bi}$ (для халькопирита), значения которых последовательно уменьшаются от центра к периферии рудоносного штокверка Кызык-Чадр (Рисунок 8). В числителе коэффициентов зональности помещены элементы, характерные для центральных частей месторождения, а в знаменателе – для фланговых частей.



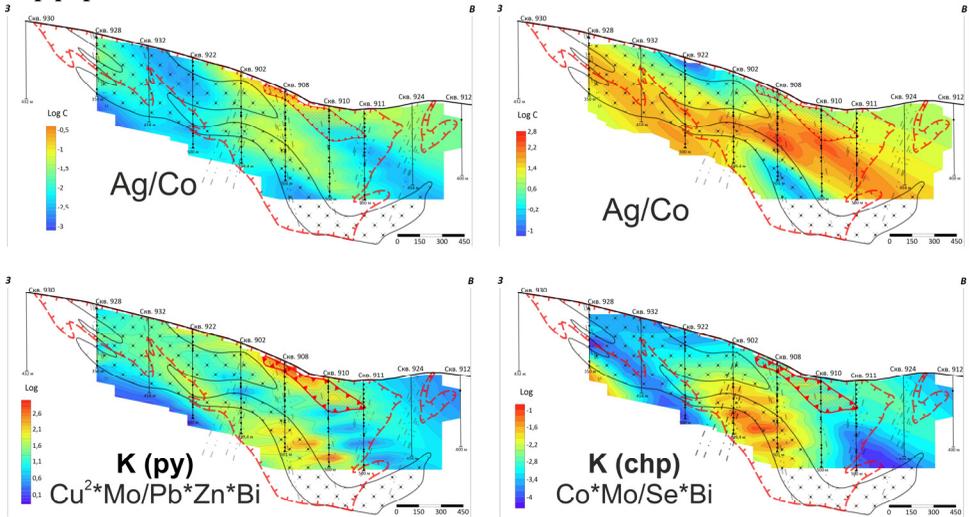
1 – рудоносный порфировый интрузив: кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры; 2 – граниты среднезернистые, часто катаклазированные; 3 – кварцевые диориты, гранодиориты среднезернистые; 4 – брекчи; 5–8 – генерализованные зоны гидротермально-метасоматических изменений: 5 – калиевая, 6 – внутренняя пропилитовая, 7 – филлизитовая, 8 – внешняя пропилитовая; 9 – границы метасоматических зон; 10 – зоны интенсивной трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудные тектонические нарушения); 11 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,4%; 12 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,2%; 13 – контур распространения медной минерализации по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,05%; 14 – скважины АО «Сибирское ПГО» 2017–2019 гг. и их глубина, м; 15 – индикатор «скрытой» минералогической зональности: значения с $\sin \beta$, определенные в пробах светлослюдистых метасоматитов по данным рентгеноструктурного анализа.

Рисунок 7. Модель «скрытой» минералогической зональности месторождения Кызык-Чадр по соотношению фенгит/мусковит в светлослюдистых метасоматитах в продольном сечении. Цвета зон соответствуют цветам значений индикатора в условных обозначениях.

Выявленные тенденции «скрытой» минералого-геохимической зональности, установленные с использованием различных физико-химических методов (рентгенофазовый и микронзондовый анализы, инфракрасная спектроскопия, масс-спектрометрия с лазерной абляцией), согласуются с установленной традиционными методами концентрической минералогической рудно-метасоматической зональностью месторождения.

Защищаемое положение № 4. В результате выполненных исследований: выделены площади для постановки прогнозно-минерагенических работ на оруденение порфирового типа в пределах южной части Алтае-Саянского сегмента ЦАОП; рекомендовано проведение оценки глубоких горизонтов рудоносной зоны месторождения Кызык-Чадр на промышленное медно-порфировое оруденение; дополнена геолого-поисковая модель оруденения медно-порфирового типа Кызыкчадрского поля, отличительной особенностью которой является детализация зональности рудно-метасоматических образований месторождения и интеграция в нее элементов

«скрытой» минералого-геохимической зональности; обоснована целесообразность постановки опытно-методических работ на месторождениях порфирирового типа различных регионов с целью разработки методики выявления «скрытой» минералого-геохимической зональности на медно-порфирировых объектах.



1 — точки отбора проб; 2 — контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,2 %; 3 — контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,4 %; 4 — рудоносный порфирировый интрузив: кварцевые диорит-порфиристы, гранодиорит-порфиры; 5 — зоны интенсивной трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудные тектонические нарушения); 6 — скважины АО «Сибирское ПГО» 2017–2019 гг. и их глубина, м.

1 – точки отбора проб; 2 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,2 %; 3 – контур меднорудного тела по $S_{\text{борт}} \text{Cu}$ 0,4 %; 4 – рудоносный порфирировый интрузив: кварцевые диорит-порфиристы, гранодиорит-порфиры; 5 – зоны интенсивной трещиноватости, катаклаза и милонитизации (малоамплитудные тектонические нарушения); 6 – скважины АО «Сибирское ПГО» 2017–2019 гг. и их глубина, м.

Рисунок 8. Модель «скрытой» минералого-геохимической зональности месторождения Кызык-Чадр по соотношению элементов-микропримесей в пиритах и халькопиритах: вариации отношения Ag/Co и комплексных (мультипликативных) коэффициентов зональности: $K(\text{py}) = \text{Cu}^2 * \text{Mo} / \text{Pb} * \text{Zn} * \text{Bi}$ (для пирита) и $K(\text{chp}) = \text{Co} * \text{Mo} / \text{Se} * \text{Bi}$ (для халькопирита) (по данным LA-ICP-MS).

На основе результатов выполненных исследований автором подготовлены практические рекомендации по направлениям прогнозно-минералогических, поисковых и оценочных работ на оруденение медно-порфирирового и сопряженных типов Алтае-Саянского региона.

Выбор площадей для постановки прогнозно-минералогических работ. Определение условий локализации молибден-медно-порфирирового оруденения Кызыкчадрского рудного поля в региональных структурах позволило наметить, в пределах южной части Алтае-Саянского сегмента ЦАОП площади, перспективные на выявление медно-молибден-порфирирового оруденения. По аналогии с позицией известных объектов (Кызыкчадрское, Аксугское, Сорское рудные поля), в качестве перспективных площадей выбирались участки в ранге потенциальных рудных районов (1 500 км²), в пределах которых совмещены ареалы распространения разнотипных и разновозрастных магматических образований – вулканогенно-

осадочных формаций островодужного типа (V-Є₁), крупных интрузивов габбро-тоналит-плагиигранитовой формации (Є₂) и (3) вулканоплутонических образований кислого и субщелочного составов (O-D₁). При выборе перспективных площадей учитывалось также наличие известных проявлений меди, молибдена, золота (см. Рисунок 4).

Выделенные площади рекомендуются для постановки прогнозно-минерагенических работ на оруденение порфирирового типа, поскольку в их пределах наиболее вероятно обнаружение ранее не выявленных ареалов распространения продуктивных на медно-порфирировое оруденение интрузивных образований, аналогичных образованиям рудоносного кызыкчадрского интрузивного комплекса габбро-диорит-гранодиорит-гранитной формации (Є₂₋₃).

Определение направлений геологоразведочных работ на месторождении Кызык-Чадр. Выполненная детальная характеристика основных черт геологического строения, вещественного состава, рудно-метасоматической, минералого-геохимической зональности потенциально промышленного месторождения Кызык-Чадр и одноименного рудного поля, в том числе их специфических особенностей, позволяет предложить рекомендации по направлениям дальнейших геологоразведочных работ в пределах этого объекта. Интерпретация разработанной объемной модели рудно-метасоматической зональности и выявленных элементов «скрытой» минералого-геохимической зональности Кызык-Чадра указывает на распространение промышленного медно-молибден-порфирирового оруденения месторождения на глубину до 700–800 м и более. В качестве наиболее перспективной части рудоносной зоны месторождения Кызык-Чадр выделен блок в пределах поисковых профилей в восточной части рудной зоны месторождения. Этот блок характеризуется наиболее полнопроявленным зонально построенным комплексом околорудных метасоматитов и включает весь набор продуктивных рудных минеральных ассоциаций (см. Рисунок 6).

При проведении последующих детализационных работ в пределах указанного блока рекомендуется проходка нескольких структурных скважин до глубины 800 м в целях оценки перспектив глубоких горизонтов месторождения. Кроме того, возможно выявление на глубине не вскрытых на поверхности новых кулисообразных рудных тел в западной части рудоносной зоны.

Совершенствование геолого-поисковой модели медно-порфирирового оруденения. Детальная характеристика и систематизация структурно-тектонических, петрологических, литолого-петрографических, минералого-геохимических факторов, определивших геологическое строение, вещественный состав руд и зональность оруденения Кызыкчадрского рудного поля, молибден-медно-порфирировых с золотом и сопряженных золото-сульфидно-кварцевых рудных тел в его составе, их типовые черты и специфические особенности, позволили подготовить обновленный, адаптированный к условиям региона вариант разноранговой (рудный узел – рудное поле – поисковый участок/рудопроявление) геолого-поисковой модели медно-порфирирового оруденения (в табличной форме). Модель предназначена для комплексной интерпретации результатов геолого-поисковых работ регионального и локального масштабов, предварительной оценки известных и вновь открываемых объектов медно-порфирирового типа разного

масштаба, в том числе рудопроявлений медно-молибден-порфирового рудно-формационного семейства. Модель может быть использована в целях определения направлений и оптимизации проведения дальнейших прогнозно-поисковых и оценочных работ в пределах южной части Алтае-Саянского сегмента ЦАОП и на смежных территориях.

Рекомендации по использованию «скрытой» минералого-геохимической зональности при поисках медно-порфирового оруденения. Установленная на основе результатов применения комплекса физико-химических методов (рентгеноструктурный анализ, LA-ICP-MS) схема «скрытой» минералого-геохимической зональности месторождения Кызык-Чадр (см. Рисунок 7, 8) интегрирована в актуализированный вариант геолого-поисковой модели оруденения медно-порфирового типа Кызыкчадрского рудного поля и Алтае-Саянского региона в целом. Установленные тенденции зональности распределения в пространстве типоморфных признаков минералов-индикаторов, включая вариации содержаний элементов-микропримесей в рудообразующих сульфидах, могут использоваться при предварительном оконтуривании рудоносных штокверков, оценке уровня эрозионного среза оруденения и прогнозировании позиции наиболее богатых частей рудных тел на стадии поисковых работ.

В целях разработки и внедрения методики поискового применения «скрытой» минералого-геохимической зональности для широкого использования при геологоразведочных работах на медно-порфировое оруденение рекомендована постановка опытно-методических работ и апробация данной методики на месторождениях порфирового типа различных регионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований определены типовые черты и особенности геологического строения, закономерностей локализации, геологических условий образования молибден-медно-порфирового и сопряженного с ним золото-сульфидно-кварцевого оруденения Кызыкчадрского рудного поля, в том числе:

- показано, что медно-порфировое оруденение Кызыкчадрского рудного поля сформировано в связи с развитием Тувинского аккреционно-коллизийного магматического пояса. Позиция Кызык-Чадра и других промышленных месторождений медно-молибден-порфирового рудно-формационного семейства характеризуется приуроченностью к участкам пространственного совмещения ареалов магматических образований нескольких стадий развития Тувинского ВПП – «батолитовых» интрузивов и малых интрузий аккреционно-коллизийной стадии (Є₂₋₃) и более поздних вулканоплутонических ассоциаций кислого и субщелочного состава собственно коллизийной стадии (O-D₁) – при наличии субстрата, сложенного метаморфизованными островодужными вулканогенно-осадочными толщами (V-Є₁);

- установлены особенности, отличающие месторождение Кызык-Чадр от типовых медно-порфирических месторождений: линейный характер рудных тел и минерализованной зоны в целом, редуцированное распространение калиевой метасоматической зоны с практически полным отсутствием вторичного биотита и его реликтов, резкое преобладание филлизитовых изменений в объеме

месторождения, ограниченное распространение магнетитовой и халькопиритовой минеральных ассоциаций, а также интенсивный пострудный динамометаморфизм;

- показано, что особенности геологического строения, вещественного состава и зональности рудных объектов Кызыкчадрского рудного поля определялись формированием оруденения в пределах долгоживущей разломной зоны, экранирующим эффектом вмещающей интрузив метаморфизованной сланцевой толщи и преимущественно кислым составом вмещающих интрузивных пород и согласуются с аккреционно-коллизией обстановкой формирования оруденения. Интенсивная дислоцированность пород, руд и метасоматитов рудного поля связана с влиянием последующей коллизии;

- для месторождения Кызык-Чадр выявлены устойчиво повторяющиеся элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности, установленные с использованием инструментальных физико-химических методов. «Скрытая» зональность проявляется в пространственных вариациях соотношения фенгит/мусковит в гидротермальных светлых слюдах и распределения элементов-микропримесей в пиритах и халькопиритах и согласуется с минералогической рудно-метасоматической зональностью.

Обновлена и адаптирована к условиям Кызыкчадрского рудного поля геолого-поисковая модель оруденения медно-порфирикового типа. Отличительной особенностью разработанной модели является детализация зональности рудно-метасоматических образований месторождения и интеграция в нее элементов «скрытой» минералого-геохимической зональности, установленной на основе результатов применения комплекса физико-химических методов (рентгеноструктурный анализ, LA-ICP-MS). Разработанная геолого-поисковая модель с успехом использована при проведении поисковых и оценочных работ в пределах Кызыкчадрского рудного поля, рекомендуется для применения в целях регионального и локального прогнозирования и определения направлений поисковых работ на медно-порфириковое оруденение в Алтае-Саянской металлогенической провинции и других перспективных регионах.

По результатам выполненных исследований разработаны практические рекомендации по направлениям и методике дальнейших геолого-поисковых работ: выделены площади для постановки прогнозно-минералогических работ на оруденение порфирикового типа в пределах южной части Алтае-Саянского сегмента ЦАОП; рекомендовано проведение оценки глубоких горизонтов рудоносной зоны месторождения Кызык-Чадр, намечены участки первоочередных буровых работ; рекомендована постановка опытно-методических работ на месторождениях порфирикового типа различных регионов с целью разработки и внедрения методики поискового применения «скрытой» минералого-геохимической зональности для широкого использования при геологоразведочных работах на медно-порфириковое оруденение.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список публикаций в изданиях, входящих в список ВАК

1. Андреев А.В., Гирфанов М.М., Старостин И.А. и др. Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирикового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва // Руды и металлы. 2021. № 1. С. 57–76.

2. **Старостин И.А.**, Гирфанов М.М., Ярцев Е.И. Геологическое строение, метасоматическая и скрытая минералогическая зональность медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва). Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 5. С. 90–94.

3. **Старостин И.А.**, Черных А.И., Гирфанов М.М. Палеогеотектоническая позиция Кызыкчадрского медно-порфирового рудного поля (Республика Тыва) // Руды и металлы, 2023. № 4. С. 52–73.

4. **Старостин И.А.** Скрытая минералого-геохимическая зональность месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва) по данным лазерного микроанализа сульфидов // Руды и металлы, 2024. № 1. С. 78–102.

Другие публикации

5. **Старостин И.А.**, Авилова О.В., Андреев А.В., Гирфанов М.М. Рудопроявление Кызык-Чадр (Республика Тыва) – перспективный объект меднопорфирового типа // В книге: Новое в познании процессов рудообразования. Сборник материалов. 2018. С. 330–332.

6. **Старостин И.А.**, Авилова О.В., Андреев А.В., Гирфанов М.М. Рудно-метасоматическая зональность медно-порфирового рудопроявления Кызык-Чадр (Республика Тыва) // В книге: Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. 2019. С. 200.

7. Гирфанов М.М., Андреев А.В., Авилова О.В., **Старостин И.А.** Геолого-поисковая модель золотосодержащих медно-порфировых объектов Кызыкчадрского рудного поля (Республика Тыва) // В книге: Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов. IX Международной научно-практической конференции. 2019. С. 166–167.

8. **Старостин И.А.**, Авилова О.В., Андреев А.В. Золотосодержащее молибден-медно-порфировое месторождение Кызык-Чадр в Туве: особенности рудно-метасоматической зональности и морфологии рудных тел // В книге: «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». Сборник тезисов докладов. I молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. Москва, 2020. С. 183–186.

9. **Старостин И.А.**, Гирфанов М.М., Андреев А.В. Геологическое строение, метасоматическая и «скрытая» минералогическая зональность медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва) // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов: Сборник тезисов докладов. III Молодежная научно-образовательная конференция ФГБУ «ЦНИГРИ». Москва, 2022. С. 166–167.

10. **Старостин И.А.**, Гирфанов М.М., Столяров И.О. Палеотектоническая позиция Кызыкчадрского рудного поля (Республика Тыва) в региональных геотектонических структурах // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов: Сборник тезисов докладов. IV Молодежная научно-образовательная конференция ФГБУ «ЦНИГРИ». Москва, 2023. С. 166–167.

Старостин И.А.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ КЫЗЫКЧАДРСКОГО РУДНОГО
ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА ТЫВА)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук

Подписано в печать 19.07.24.
Формат 60x90 1/16 Объем: усл. печ. л 1.0
Тираж 99 экз.

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных
и благородных металлов»
(ФГБУ «ЦНИГРИ»)

Адрес 117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1