На правах рукописи



ВЕСНИН Владислав Сергеевич

Оценка перспективности гранитоидов на порфировое Cu-Mo-Au оруденение по комплексу минералого-геохимических признаков (на примере шахтаминского комплекса, Забайкальский край)

1.6.10. – геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель:

Неволько Пётр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник (заведующий лабораторией) лаборатории рудообразующих систем Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Плотинская Ольга Юрьевна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии рудных месторождений, ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН» (г. Москва).

Леонтьев Василий Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора Центра прогнозно-металлогенических исследований, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научноисследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «Институт Карпинского») (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ») (г. Красноярск).

Защита состоится «22» мая 2025 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

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) 373-05-18/+7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО PAH: https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/vesnin/dis-Vesnin.pdf

Автореферат разослан «15» апреля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.050.01, кандидат геолого-минералогических наук

А.В. Котляров

введение

Актуальность исследования

Медно-порфировые месторождения и связанные с ними эпитермальные и скарновые месторождения обеспечивают около 75% мирового производства меди, 50% молибдена и 20% мирового производства золота [Sillitoe, 2010; Cooke et al., 2015]. При этом в России наблюдается сильная диспропорция добычи меди относительно мировых трендов. Так, в начале тысячелетия доля порфировых месторождений в добыче меди составляла около 1%. Однако наличие попутного золота и рост мировых цен на медь сделали возможным начать в 2012 году уральских медно-порфировых месторождений (Михеевское. отработку Томинское) [Якубчук, 2022]. К началу 2023 года в России доля балансовых запасов медно-порфирового типа достигла 24,3% [Тетенькин и Петров, 2023]. Увеличение доли порфировых месторождений связана с постепенной выработкой ресурсной базы разведанных ещё в СССР месторождений. В то время вопрос наличия меди решался за счёт большого количества месторождений колчеданного типа и норильских медно-никелевых руд. Возросший вклад добычи меди из объектов порфирового семейства месторождений инициировал значительный интерес исследователей к данной тематике. За последние несколько лет в свет вышло большое количество работ, посвященных изучению различных аспектов вещественного состава руд и генезиса порфировых месторождений России [Звездов и др., 2021, 2023; Лобанов и др., 2023; Макаров и др., 2024; Мигачёв и др., 2022; Плотинская, 2020, 2023; Шадчин др., 2024; Шведов и др., 2021; Plotinskaya et al., 2023^{a,6}].

Месторождения медно-порфирового семейства связаны с порфировыми магматическими породами среднего и кислого состава. Большинство порфировых месторождений связывают с центральными частями известково-щелочных порфировых магматических систем, сформированных в зонах субдукции [Richards, Известково-щелочные образования 2011]. 2003. широко распространены по всему миру, но крупные порфировые месторождения встречаются редко [Williamson et al., 2016]. При этом, возникает проблема увязки оруденения с конкретными геологическими телами: многофазность интрузивного магматизма, схожесть валового химического состава пород и их близкий возраст существенно затрудняет вычленение рудоносного штока из большого разнообразия интрузивов в пределах порфирово-продуцирующих плутонов. Избирательная способность к генерации рудной минерализации отдельных магматических тел в пределах каждого из месторождений далеко не всегда ясны и очевидны. Не секрет, что выявление новых порфировых месторождений требует слаженной и длительной работы различных специалистов. На фоне этого выделение фертильных (потенциально продуктивных на порфировое оруденение) магматических комплексов или отдельных интрузивных тел, которые с наибольшей вероятностью могут формировать порфировую минерализацию, среди безрудных нерудоносных комплексов имеет важное значение на всех стадиях геологического изучения недр от региональных исследований до стадии

3

поисково-оценочных работ.

Одним из активно развивающихся в течении последних десятилетий методов поиска порфировых месторождений является использование комплекса минералов-индикаторов в совокупности с валовым составом пород. Подобного рода работы базируются на большом объеме информации, касающейся как валового состава, так и геохимических характеристик отдельных минералов. Так особенности элементного состава (типохимизма) обширного круга минералов регистраторы могут быть использованы как вариаций условий минералообразования, как маркеры потенциальной продуктивности, или же как прямые индикаторы потенциальной продуктивности [Cooke et al., 2017]. минералого-геохимических Исследования, направленные разработку на признаков фертильности и их верификацию на известных порфировых месторождениях и перспективных площадях в России проводятся начиная с 2020 года [Аленичева и др., 2024; Веснин и др., 2024; Звездов и Чурилова, 2024; Петров и др., 2020; Шатов и др., 2024; Berzin et al., 2024; Nevolko et al., 2021; Petrov et al., 2021; Svetlitskaya and Nevolko, 2022]. Для обоснованного подхода к выявлению минералогических признаков рудоносности необходимо иметь отчетливое представление о петрографии, петрохимии, геохимии и возрасте формирования магматических образований.

Магматические породы шахтаминского комплекса, являющиеся объектом исследования, широко распространены в Восточном Забайкалье, но не все интрузии сопровождаются промышленным оруденением. Обычно в пределах площадей месторождений выделяют несколько магматических тел с близкоодновременным возрастом, иногда довольно контрастных по составу. Тем не менее, минерализация, в свою очередь, связана только с некоторыми из них. Выделение фертильных («fertile» - потенциально рудоносных) магматических комплексов или интрузивных тел, которые с наибольшей вероятностью могут формировать порфировую минерализацию, от безрудных («barren») на ранних стадиях поисковых и/или региональных работ имеет важное практическое значение. Таким образом, выявление минералогических и петрогенетических индикаторов потенциальной рудоносности магматических пород на порфировое оруденение является чрезвычайно актуальной тематикой современных исследований.

<u>Объектами исследования</u> являются магматические породы Шахтаминского Мо-порфирового и Быстринского Cu-Fe-Au скарново-порфирового месторождений, расположенные в Газимурозаводском районе Забайкальского края.

Цель исследования – выявление и верификация валовых геохимических и минералого-геохимических индикаторов рудоносности на порфировое оруденение магматических пород шахтаминского комплекса, распространенных в пределах Быстринского Cu-Fe-Au скарново-порфирового и Шахтаминского Мо-порфирового месторождений.

Задачи исследования

- Охарактеризовать особенности геологического строения объектов

исследования, ознакомиться с опубликованной литературой по порфировым месторождениям и минералам-индикаторам;

- Дать петрографическую, петрохимическую и геохимическую характеристику магматических пород;

- Определить U-Pb возраст и геохимические характеристики цирконов из магматических пород;

- Определить состав основных компонентов апатита и биотита;

- Установить редкоэлементный состава апатита;

- Обработать и интерпретировать полученные результаты, верифицировать существующие критерии дифференциации рудоносных магматических пород от безрудных.

Фактический материал и методы исследования

Фактическим материалом послужили образцы и шлифы магматических пород, отобранных с различных массивов и мелких штоков в районе Шахтаминского и Быстринского месторождений, большая часть которых была предоставлена научным руководителем. Часть штуфных проб была отобрана лично автором во время полевого сезона в составе коллектива лаборатории рудообразующих систем (№214) ИГМ СО РАН в 2021 году. При выполнении работы для всех образцов было произведено петрографическое описание. Для решения поставленных задач были использованы различные аналитические методы, в том числе: рентгено-флуоресцентный и масс-спектрометрия (60 проб), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (261 анализ циркона и 105 анализов апатита), U-Pb датирование по цирконам (251 точечный анализ), рентгеноспектральный микроанализ (267 анализов апатита и Аналитические работы 420 анализов биотита). выполнялись в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН и лаборатории SGS. Все полученные данные обработаны и представлены в виде диаграмм и таблиц. Дана интерпретация типоморфных характеристик минералов-индикаторов.

Защищаемые положения

1. Рудопродуцирующие магматические породы на Быстринском и Шахтаминском месторождениях представлены гранодиорит-порфирами И гранит-порфирами, сформированными в позднеюрское время (160-162 млн лет) на заключительном этапе формирования многофазных массивов шахтаминского которых образовались рудопродуцирующие комплекса. Расплавы, ИЗ высокой степенью водонасыщенности и гранитоиды, характеризовались окисленности, о чем свидетельствует геохимические характеристики их цирконов (рассчитанные аномалии Eu/Eu*>0,4, и отношение Yb/Dy>4).

2. В составе апатита рудоносных магматических пород Быстринского Cu-Au-Fe скарново-порфирового месторождения установлены повышенные содержания хлора (>0,8 мас.%,) и SO₃ (>0,1 мас.%) относительно гранитоидов безрудных штоков. При этом апатиты рудоносных магматических пород Шахтаминского Мо-порфирового месторождения содержат в повышенном количестве только SO₃ (ср. знач. 0,20 мас.%). Геохимические особенности апатита (Eu/Eu*>0,4) указывают на водоносыщенность и окисленность расплавов

рудоносных штоков обоих месторождений.

3. Специфика состава биотита позволяет выделять гранитоиды потенциально перспективные на порфировое оруденение. На основе содержаний F, TiO₂, MgO, FeO, Al₂O₃, SiO₂, Cl в биотите магматических пород Быстринского Cu-Au-Fe скарново-порфирового и Шахтаминского Мо-порфирового месторождений возможно разделение гранитоидов, продуктивных на Cu-порфировую и Мо-порфировую минерализацию.

<u>Научная новизна</u>

Диссертационная работа содержит новые актуальные данные о составе гранитоидов, распространенных в пределах Быстринского и Шахтаминского месторождений. Впервые показаны различия в валовом геохимическом составе пород рудопродуцирующих фаз, с которыми генетически связана промышленная минерализация.

С использованием современного высокоточного методами датирования прослежена цирконов (LA-ICP-MS) хронология развития магматизма Быстринском и Шахтаминском месторождениях. Показано, что формирование магматических рудоносных И безрудных пород происходило близкоодновременно в узком интервале времени (160-162 млн лет).

Полученные впервые оригинальные данные о геохимических характеристиках цирконов и апатитов из рудоносных и безрудных гранитоидов шахтаминского комплекса. Впервые проведена верификация существующих критериев фертильности магматических пород шахтаминского комплекса, а также предложены авторские критерии дискриминации.

Практическая значимость

Комплексный анализ индикаторов рудоносности гранитоидов, базирующийся на геохимических характеристиках пород и содержащихся в них акцессорных (циркон, апатит) и породообразующих (биотит) минералах, отражает ключевые характеристики продуктивных порфировых магм – высокую окисленность и высокие содержания воды, Cl и S. Минералы-индикаторы (PIMs porphyry indicator minerals) позволяют оценить рудный потенциал гранитоидной интрузии к формированию Cu-Mo-порфирового оруденения и являются важным элементом прогноза порфировых месторождений. Определение порфировых минералов-индикаторов критически важно для совершенствования генетической модели продуктивных порфировых систем и разработки принципиально новых критериев поиска месторождений порфирового семейства.

Представленная в диссертации методика по определению минералогогеохимических критериев рудоносности магматических пород на порфировое оруденение может применяться на всех стадиях ГРР от прогнозных и рекогносцировочных до проектных поисково-оценочных. Применение методики на каждом из этапов позволяет не только получить практически исчерпывающую информацию о природе и специфики магматизма на участке, но и может нести внушительный положительный экономический эффект.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах по

перечню ВАК и 7 тезисов в материалах конференций. Основные положения работы были публично представлены на российских и международных конференциях: Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2021, 2022); на XXIX молодежной научной школе «Металлогения древних и современных океанов-2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике» и XXX юбилейной молодежной научной школе «Металлогения древних и современных океанов-2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике» и XXX юбилейной молодежной научной школе «Металлогения древних и современных океанов-2024. РУДОГЕНЕЗ» (Миасс, 2023, 2024); международной научно-практической конференции «Металлогения золота центрально-азиатского орогенного пояса и его обрамления», посвященная 300-летию Российской академии наук (Кызыл, 2024).

Структура и объем работы

Объём работы составляет 218 страниц, включая 46 рисунков, 2 таблицы и 9 приложений. Список литературы состоит из 210 наименований.

В главе 1 представлена информацию о современном состоянии проблемы поисковых критериев месторождений медно-порфирового семейства И обоснование выбора минералов-индикаторов для исследования. В главе 2 изложена методика исследования. В главе 3 представлена геологическая характеристика Быстринского и Шахтаминского месторождений. Глава 4 посвящена петрографическому изучению, петрохимической характеристике и установлению возраста пород объектов исследования. В главе 5 изложены результаты изучения особенностей состава минералов-индикаторов И верификация существующих поисковых критериев по их составу.

<u>Благодарности</u>

Автор выражает особую благодарность научному руководителю, кандидату геолого-минералогических наук Петру Александровичу Неволько, за чуткое руководство над выполняемой работой, помощь в организации и проведении исследований.

За ценные советы и практическую помощь в работе над фактическим материалом благодарность выражается сотрудникам лаборатории рудообразующих систем: д.г.-м.н. И.В. Гаськову, к.г.-м.н. Т.В. Светлицкой, к.г.-м.н. П.А. Фоминых, к.г.-м.н. В.В. Колпакову. Автор глубоко признателен за конструктивную критику и рекомендации по улучшению содержательной части работы сотрудникам ИГМ СО РАН: д.г.-м.н. А.Э. Изоху, д.г.-м.н. Ю.А. Калинину, д.г.-м.н. Н.Д. Толстых, д.г.-м.н. О.М. Туркиной, д.г.-м.н. Н.Н. Круку, к.г.-м.н. М.Л. Куйбиде, к.г.-м.н. Р.А. Шелепаеву, к.г.-м.н. М.О. Шаповаловой, к.г.-м.н. И.С. Кириченко. Отдельная благодарность аналитикам ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН за помощь при проведении аналитических работ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400237-8).

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ БЫСТРИНСКОГО И ШАХТАМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Исследуемый район расположен в восточной части Забайкальского края на расстоянии около 470 км к востоку-юго-востоку от города Чита. Шахтаминское Мо-порфировое и Быстринское Си-Аи-Fe-порфирово-скарновое месторождения приурочены к Газимуровской региональной тектонической зоне, которая находится на территории Ага-Борзинской структурно-формационной зоны, в пределах Монголо-Охотского орогенного пояса [Зорин и др., 1998; Zorin et al., 2001; Коваленкер и др., 2019]. В исследуемом районе широко распространены магматические породы палеозойского и мезозойского возрастов. В результате субдукции литосферной плиты Монголо-Охотского океана под Монголо-Китайский континент сформировались палеозойские гранитоиды [Зорин и др., 1998]. Мезозойская магматическая активность связана со средне-позднеюрским пост-коллизионным и меловым рифтогенным этапами в истории развития региона. Для Монголо-Охотского пояса важно выделить три особенности: распространённые повсеместно зеленосланцевые толщи, пояс габбротоналитовых интрузий и гранитогнейсовые купола. Все эти особенности является типоморфными для зон столкновения континентов [Зоненшайн и др., 1990; Берзина и др., 2013].

Быстринское месторождение

Площадь Быстринского Cu–Au–Fe–порфирово-скарнового месторождения сложена терригенно-карбонатными отложениями раннекембрийского, среднедевонского и раннеюрского возрастов. Осадочные породы прорваны гранитоидами средне-позднеюрского шахтаминского комплекса, слагающими многофазный Быстринский массив. Ранняя фаза, сложенная монцонитами и монцодиоритами (BEP), прорвана более мелкими штоками гранит-порфиров (BLP1), а также гранодиорит-порфиров поздней фазы (BLP2–5) (**рис. 1**).

На месторождении преобладает скарновая минерализация, приуроченная к контакту гранитоидов и кембрийских (в меньшей мере, девонских) карбонатных пород; порфировый тип руд распространен в подчиненном количестве и локализуется в телах гранитоидов. Среди рудных минералов на месторождении наиболее широко распространены магнетит, халькопирит, пирит и пирротин; к второстепенным относятся молибденит, шеелит и вольфрамит [Коваленкер и др., 2019]. По актуальным данным суммарные запасы категорий В, С1 и С2 оценены в 2,3 млн. т. меди, 270 т. золота, 1320 т. серебра [О компании – ГРК Быстринское], а запасы железа составляют 75 млн. т. [Шевчук и др., 2010]. В настоящий момент разрабатываются открытым способом Верхне-Ильдиканский и Быстринский-2 участки, с промышленными комплексными сульфидно-магнетитовыми Си-Аи рудами в скарнах, в то время как Малый Медный Чайник и Южно-Родственный будут введены в эксплуатацию в 2032 и 2033 годах, соответственно [О компании ГРК Быстринское].



Рис. 1. Геологическая карта Быстринского месторождения [Коваленкер и др., 2019] и положение изученных образцов: 1 – позднеюрские базальты, андезиты, лампрофировые дайки (нерчинскозаводской комплекс); 2 – позднеюрские гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры поздней фазы (шахтаминский комплекс); 3 – позднеюрские диориты, монцониты, монцонит-порфиры поздней фазы (шахтаминский комплекс); 4 – средне-поздне юрские андезиты, базальты и его туфы, субвулканические андезиты (шадоронский комплекс); 5 – раннеюрские песчаники, алевролиты, аргиллиты (государевская свита); 6 – средний девон: (а) песчаники, (б) алевролиты, (в) известняки (ильдиканская свита); 7 – ранний кембрий: (а) известняки, (б) доломиты (быстринская свита); 8 – скарны; 9 – разломы: (а) доказанные, (б) предполагаемые; 10 – положение изученных штоков гранитоидов; 11 – участки месторождения: (I) Верхне-Ильдиканский, (II) Малый Медный Чайник, (III) Южно-Родственный, (IV) Быстринский-2; 12 – точки отбора образцов.

Шахтаминское месторождение

Шахтаминское Мо-порфировое месторождение расположено в 50 км к юго-западу от Быстринского. Вмещающими породами Шахтаминского месторождения выступают магматические породы одноименного массива, являющегося петротипом шахтаминского комплекса в Восточном Забайкалье. Многофазный гранитоидный Шахтаминский массив порывает пермские гранодиориты ундинского комплекса (SHP) и нижнеюрские терригенные отложения (**рис. 2**).



Рис. 2. Геологическая карта Шахтаминского месторождения [ГГК-200 М-50-Х, М-50-IV] и положение изученных образцов: 1 – позднеюрские дайковые тела: (а) – граниты, гранодиорит порфиры; (б) – базальты, лампрофиры (нерчинскозаводской комплекс); 2 – позднеюрские гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры поздней фазы (шахтаминский комплекс); 3 – позднеюрские граниты, гранодиорит-порфиры ранней фазы (шахтаминский комплекс); 4 – позднеюрские монцониты, монцонитпорфиры ранней фазы (шахтаминский комплекс); 5 – раннеюрские песчаники, гравелиты (кавыкучинская свита); 6 – раннеюрские песчаники, алевролиты, аргиллиты (таменгинская свита); 7 – пермские граниты, гранодиориты (ундинский комплекс); 8 – разломы: (а) установленные, (б) предполагаемые; 9 – участок Шахтаминского месторождения; 10 – положение изученных штоков гранитоидов; 11 – точки отбора образцов.

Крупное тело порфировидных гранодиоритов ранней фазы шахтаминского

комплекса (породы рамы, SEP – Shakhtama Early Porphyry) прорвано серией более мелких штокоподобных тел лейкогранит-порфиров (SLP1-2), гранодиорит–порфиров (SLP3,5) и гранит-порфиров (SLP4) поздней фазы шахтаминского комплекса. Мо-порфировая минерализации на месторождении представлена молибденит-содержащими кварцевыми жилами и участками штокверкового прожилкования в метасоматически измененных гранитоидах, сопряженными с карбонат(±кварц)-полиметаллическими жилами и прожилками [Юргенсон и др., 2023].

Ранняя минерализация характеризуется светлым кварцем, содержащим редкую вкрапленность крупночешуйчатого молибденита и ещё более редкую вкрапленность шеелита, пирита и халькопирита. Поздняя наложенная минерализация представлена мелкозернистым кварцем с мелкочешуйчатым молибденитом и незначительным количеством пирита и халькопирита.

Более подробные современные минералогические исследования предлагают схему минералообразования, включающую пять стадий [Юргенсон и др., 2023]. Месторождение разрабатывалось с 1941 по 1993 года двумя шахтами до глубины 400 м и двумя штольнями [Быбин, 2006]. Неотработанные запасы руды составляют 430,56 тыс. т. и содержат 2413,72 т Мо [Ершов, 2006]. По другим данным Мо – 50 тыс. т, Си – 50 тыс. т [Berzina et al., 2014]. Последние исследования показывают, что Шахтаминское месторождение характеризуется небольшим эрозионным срезом и вскрытая его часть обладает признаками отложения в малоглубинных условиях с перспективами развития оруденения на глубину [Юргенсон и др., 2023].

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение: Рудопродуцирующие магматические породы на Быстринском и Шахтаминском месторождениях представлены гранодиорит-порфирами гранит-порфирами, сформированными и в позднеюрское время (160-162 млн. лет) на заключительном этапе формирования многофазных массивов шахтаминского комплекса. Расплавы, из которых образовались рудопродуцирующие гранитоиды, характеризовались высокой степенью водонасышенности и окисленности. о чем свидетельствует характеристики (рассчитанные геохимические их цирконов аномалии Eu/Eu*>0,4 и отношение Yb/Dy>4).

Отличительной спецификой проявления магматизма на порфировых месторождениях является его многофазность, при этом рудоносными являются не все проявления магматизма, а лишь некоторые из них. Так, на Быстринском Си-Fe-Au скарново-порфировом месторождении безрудные породы ранней фазы, монцодиоритов, монцонитов И прорываются рудоносными порфиры гранодиорит-порфирами и безрудными гранит-порфирами поздней фазы (рис. 1). Мо-порфировом месторождении Ha Шахтаминском порфировидные гранодиориты ранней фазы шахтаминского комплекса прорываются безрудными лейкогранит-порфирами, гранодиорит-порфирами, и рудоносными гранитпорфирами (**рис. 2**). Увязка порфировой минерализации с конкретными магматическими телами базируется на прямых геологических наблюдениях и литературных данных. Так, на Быстринском месторождении, участки промышленной минерализации Быстринский-2, Южно-Родственный, Малый Медный Чайник и Верхне-Ильдиканский пространственно и генетически ассоциированы со штоками со 2 по 5 (BLP2-5) (**рис. 1**). На Шахтаминском месторождении, согласно полевым наблюдениям и литературным данным, промышленная минерализация приурочена к 4 штоку гранит-порфиров (SLP4) [Сидоренко, 1961; Берзина и др., 2013; **рис. 2**].

Несмотря на относительно длительную историю изучения Быстринского месторождения, опубликованные геохронологические данные скудны. Единственное упоминание о возрасте интрузивных пород Быстринского месторождения, полученного K-Ar методом по флогопиту из магнезиальных скарнов (163 ± 3 млн лет), приводится в работе Коваленкер и др. [2016]. Проведенное датирование цирконов U-Pb методом пород различных фаз внедрения шахтаминского комплекса, проявленного в пределах Быстринского месторождения, позволило не только уточнить период магматической активности, но и показать узкий временной интервал его проявления. Для пород монцонитов и монцодиоритов ранней фазы (ВЕР) и гранит-порфиров поздней фазы (BLP1) определён возраст 163,3 ± 0,5 и 159,4 ± 0,7 млн лет, соответственно. Для гранодиорит-порфиров поздней фазы (BLP2-5), установлен возраст 160,8 ± $0.5, 161.6 \pm 0.5, 160.3 \pm 0.6$ и 162.2 ± 0.4 млн лет, соответственно (Приложение 1).

Опубликованные литературные данные о возрасте интрузивных пород Шахтаминского месторождения варьируют от 163 до 153 млн лет (U-Pb датирование; [Берзина и др., 2013]) и от 169 до 156 млн лет (Ar-Ar датирование; [Сотников и др., 1998]). Геохронологические исследования цирконов, отобранных из пород различных фаз внедрения позволил сузить возрастной интервал формирования от ранних к поздним фазам шахтаминского комплекса от 164 до 161 млн. лет (**Приложение 2**). Установленный возраст рудоносных гранит-порфиров составил 161,5 \pm 0,6 млн лет, что соответствует возрасту молибденита, определённому методом Re-Os датирования (160-153 млн лет; [Berzina et al., 2003]).

Датирование интрузивных пород различных фаз шахтаминского комплекса, проявленных на Быстринском и Шахтаминском месторождениях доказывают их формирование в связи с единым магматическим процессом. Особую актуальность такое заключение имеет в силу различной рудной нагрузки отдельных интрузивных тел.

Цирконы из рудопродуцирующих гранодиорит-порфиров поздней фазы шахтаминского комплекса Быстринского месторождения (BLP2-5; n=99) характеризуются отрицательной Eu аномалией с отношениями Eu/Eu* в диапазоне 0.28-0.93 (ср.зн. 0.55). В цирконах монцонитов и монцодиоритов (BEP) ранней фазы и гранит-порфирах (BLP1) поздней фазы, не несущих промышленную минерализацию, Eu/Eu* аномалия значительно меньше (0,19-0,25, ср.зн. 0,22 и 0,06-0,23, ср.зн. 0,14, соответственно). Аналогичная

закономерность установлена и на Шахтаминском месторождении. Зерна циркона рудопродуцирующего гранит-порфира (SLP4) имеют высокие отношения Eu/Eu* (0,26-0,76, ср.зн. 0,59; n=15). При этом, безрудные гранодиориты ранней фазы (SEP,n=15), лейкограниты и гранодиориты поздней фазы (SLP1.2 и SLP3.5, n=77) характеризуются меньшими значениями Eu/Eu* (0,17- 0,33, ср.зн. 0,26 и 0,15-0,4, ср.зн. 0,27, соответственно). Таким образом, цирконы из пород поздних фаз шахтаминского комплекса Быстринского и Шахтаминского месторождений, с которыми генетически связано оруденение (SLP4, BLP2-5), характеризуются Eu/Eu* > 0,4 (рис. 3). Величина европиевой аномалии более 0,4 в цирконах порфирово-продуцирующих гранитоидов является их типоморфной устанавливается характеристикой И на многочисленных порфировых месторождениях мира [Ballard et al., 2002; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; 2017; Pizzaro et al., 2020]. Значение Eu/Eu* > 0,4 в цирконах указывает на высокую фугитивность кислорода родоначальных магм в силу преобладание Eu³⁺ над Eu²⁺ в расплаве [Ballard et al., 2002; Burnham and Berry, 2012; Trail et al., 2012; Smythe and Brenan, 2016].

Следует отметить, что на величину Еи аномалии может влиять фракционная кристаллизация плагиоклаза [Richards, 2011; Wang et al., 2014; Deering et al., 2016; Lu et al., 2016]. Если фракционирование плагиоклаза происходило в ходе эволюции магматического расплава, то можно наблюдать линейный тренд уменьшения Eu/Eu* со временем и/или понижением температуры. При этом, согласно ряду исследований, высокое содержание воды в магме (≥4 мас. % H₂O), подавляет раннее фракционирование плагиоклаза на глубоких уровнях коры в условиях высокого давления [Alonso-Pérez et al., 2009; Richards, 2011; Bissig et al., 2017; Rottier et al, 2020], что в свою очередь приводит к значению Eu/Eu* близких к единице в эволюционировавших водосодержащих расплавах [Richards and Kerrich, 2007; Richards et al., 2012; Chiaradia et al., 2012; Loucks, 2014]. В этом случае амфибол приобретает доминирующую роль во фракционной кристаллизации [Tiepolo and Tribuzio, 2008; Chiaradia et al., 2011, 2012; Richards et al., 2012]. Амфибол, как правило, обогащен MREE по сравнению с HREE, а следовательно ранняя его кристаллизация приведет к увеличению отношения Yb/Dy в остаточном расплаве [Davidson et al., 2007]. Комбинируя рассмотренные параметры можно предположить, что закономерное увеличение отношения Yb/Dy и Eu аномалии в цирконах является свидетельством фракционной кристаллизации амфибола при подавленной кристаллизации плагиоклаза, что в свою очередь указывает на повышенное содержание воды в расплаве (≥4 мас. %) и фракционную кристаллизацию в условиях высокого давления. Повышенное содержание воды контролирует степень плавления, высокая степень окисленности вызывает разложение сульфидных фаз, высвобождая металлы в фазу силикатного расплава, т.е. обогащает расплав металлами и серой. Относительно длительная дифференциация в глубинных очагах приводит к насыщению расплавов металлами в количестве, достаточном для формирования промышленной минерализации [Park et al., 2021].

13

Дополнительным параметром оценки фугитивности кислорода может являться величина Ce аномалии в цирконах. Для расчета величины Ce/Ce* в цирконах использовались два метода: "Nd-Sm" метод [Loader et al., 2017] и метод степенной зависимости [Nevolko et al., 2021], поскольку традиционный метод расчёта Се аномалии (Ce/Ce*= Ce_n/(La_n*Pr_n)^{0,5}) ограничен крайне низкими содержаниями La и/или Pr, которые редко выше пределов обнаружения LA-ICP-MS. Оценённые Ce/Ce* по цирконам различными методами демонстрируют сильное перекрытие значений для рудопродуцирующих порфиров и безрудных пород как Быстринского, так и Шахтаминского месторождения. По указанным причинам в работе был использован более надёжный метод определения степени окисленности магматического расплава, выражающийся в численной оценке ∆FMQ - фугитивности кислорода (lgfO₂) относительно фаялит-магнетиткварцевого буфера (FMQ), основанный на концентрациях Се, Ті и U в цирконах [Loucks et al., 2020]. При этом рассчитанные значения как для рудоносных порфиров, так и для безрудных, также имеют существенное перекрытие (рис. 3а). Медианные значения $\Delta FMQ > 1$ установлены для трёх из пяти штоков рудоносных порфиров (BLP2, BLP4 и SLP4), что свидетельствует о кристаллизании расплавов в условиях стабильности сульфатной формы серы (ΔFMQ >1), растворимость которой в гранитных расплавах существенно повышается, относительно сульфидной [Jugo et al., 2010].

Приведенные на рисунке 3 графики демонстрируют высокую степень дискриминации гранитоидов на рудоносные и безрудные при использовании пары параметров Yb/Dy и Eu/Eu*, установленных в цирконах. При этом степень окисленности, выраженная в Δ FMQ, варьирует в относительно широком диапазоне от ~+0,5 до +2 как для рудоносных пород, так и для безрудных.



Рис. 3. Графики зависимости (а) Eu/Eu* к Δ FMQ и (б) Yb/Dy к Eu/Eu* по анализам зерен циркона из пород Быстринского и Шахтаминского месторождения. На графике (а) Eu/Eu* и Δ FMQ представлены в виде медианных значений (точки) и межквартильного интервала (минимальные и максимальные границы планок погрешности соответствуют 1-му и 3-му квартилю). Δ FMQ оценено по [Loucks et al., 2020].

Второе защищаемое положение: В составе апатита рудоносных Быстринского магматических пород Cu-Au-Fe скарново-порфирового месторождения установлены повышенные содержания хлора (>0,8 мас.%,) и SO₃ (>0,1 мас.%) относительно гранитоидов безрудных штоков. При этом апатиты магматических пород Шахтаминского Мо-порфирового рудоносных месторождения содержат в повышенном количестве только SO₃ (ср. знач. 0,20 мас.%). Геохимические особенности апатита (Еи/Еи*>0,4) указывают на водоносыщенность и окисленность расплавов рудоносных штоков обоих месторождений.

В породах шахтаминского комплекса на Быстринском месторождении установлено повышенное содержание Cl в апатите из безрудных монцонитов ранней фазы (ВЕР, 0,94-1,93 мас.%, ср.зн. 1,44 мас.%) и рудоносных гранитпорфиров и гранодиорит-порфиров поздней фазы (BLP2-5, 0,97-1,36 мас.%, ср. зн. 1,17 мас.%). Минимальные содержание Cl установлено в апатите из безрудных гранит-порфиров первого штока поздней фазы (BLP1, 0,19-0,72 мас.%, ср.зн. 0,36) (рис. 4а,г). На Шахтаминском месторождении повышенное содержание Cl выявлено в апатите гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров поздней фазы (SLP3- SLP5, от 0,06 до 0,71 мас.%; ср.зн. 0,34, 0,35 и 0,52 мас.%, соответственно), и порфировидных гранитов ранней фазы (SEP, 0,12-0,51 мас.%, ср. зн. 0,39). Минимальное содержание Cl типично для апатита вмещающих гранодиоритов ундинского комплекса (SHP, 0,11-0,24 мас.%, ср.зн. 0,17 мас.%) и лейкогранитпорфиров поздней фазы (SLP1 и SLP2; 0,03-0,29 мас.%, ср. зн. 0,15 и 0,6 мас. %, соответственно) (рис. 46,д). При этом, содержание Cl во всех изученных апатитах ниже, чем в типичных гидротермальных апатитах (более 3%; [Palma et al., 2019]). Для всех исследованных зёрен апатита установлена сильная отрицательная корреляция (r = -0.87) между F и Cl (рис. 4в).

апатите из рудоносных штоков Быстринского месторождения, В характеризующегося значительно большими запасами меди (2,2 млн т; Шевчук и др., 2010), чем Шахтаминское месторождение (50 тыс т; Berzina et al., 2014), установлено более высокое содержание Cl (>0,8 мас.% для образцов из рудоносных гранодиорит-порфиров, BLP2-5). При этом, особая роль галогенов (особенно хлора) в формировании рудных месторождений, в том числе меднопорфировых, установлена достаточно давно [Бушляков, 1978; Холоднов и др, 1978; Chivas, 1981; Сотников и др., 1982, 1993]. Для апатита Мо-порфирового Шахтаминского месторождения характерны более низкие содержания СІ (менее 0,7 мас.%), вероятно в следствии его малого содержания в родоначальном расплаве, что могло стать причиной низкого содержания меди в расплаве и, как следствие, в рудах месторождения. Это объясняется тем, что халькофильные элементы (в первую очередь медь), а также золото, более чувствительны к концентрации Cl, чем к F. Растворимость этих металлов значительно возрастает с увеличением содержания Cl, поскольку он необходим для образования переносимых гидротермальными флюидами комплексов. Одновременно с этим можно сделать вывод, что в Мо-порфировых месторождениях содержание хлора

в магматической системе, вероятно, не играет решающей роли. Поскольку молибден в гидротермальных системах переносится в виде сложных кислородных комплексов [Kouzmanov, Pokrovski, 2012], решающее значение для формирования молибденовой минерализации, отводится степени окисленности флюида и содержание воды в родоначальном расплаве.



Рис. 4. Диаграммы состава апатита из магматических пород в координатах F–Cl и Cl–SO₃ (мас.%): (а, г) – апатиты из гранитоидов Быстринского месторождения; (б, д) - апатиты из гранитоидов Шахтаминского месторождения; (в, е) - вся выборка с разделением на апатиты из рудоносных и безрудных пород. Где: BEP – монцониты и монцодиориты ранней фазы шахтаминского комплекса, BLP – поздняя фаза шахтаминского комплекса (BLP1 представлена гранит-порфирами, а BLP2-5 – гранодиорит-порфирами); SHP – вмещающие гранодиориты ундинского комплекса, SLP – поздняя фаза шахтаминского комплекса, SLP – гранодиориты ранней фазы шахтаминского комплекса, SLP – поздняя, SLP3,5 – гранодиорит-порфирами, а SLP4 – гранит-порфирами).

Среди исследованных апатитов магматических пород поздней фазы Быстринского месторождения повышенное содержание серы установлено как в апатите рудопродуцирующих гранодиорит-порфиров (BLP2–5), так и безрудных гранит-порфирах (BLP1) – (0,2-0,29, ср.зн. 0,17 и 0,1-0,33, ср.зн. 0,13 мас.% SO₃, соответственно). При этом содержание серы в апатите из монцонитов ранней фазы (BEP) не превышает 0,04 мас.% SO₃, за исключением одного анализа с содержанием 0,32 мас.% SO₃ (**рис. 4г**). Для апатита лейкогранит-порфиров поздней фазы (SLP1–2) Шахтаминского месторождения характерно относительно повышенное содержание серы (0,13-0,36, ср.зн. 0,14 мас.% SO₃), а минимальные значения выявлены для апатита вмещающих пород ундинского комплекса (SHP) и гранодиоритов ранней фазы шахтаминского комплекса (SEP) (0,1-0,24, ср. зн.

0,05 и 0,1-0,35, ср. зн. 0,11 мас.% SO₃, соответственно). Наибольшее содержание серы установлено в порфирах, слагающих штоки с третьего по пятый (SLP3–5, от 0,0-0,36, ср. зн.: 0,14, 0,20, 0,19 мас.% SO₃, соответственно) (**рис. 4**д).

Апатиты рудоносных гранодиорит-порфиров Быстринского месторождения характеризуются повышенным содержанием SO₃ (>0,1 мас. %); тогда как апатиты из гранит-порфиров Шахтаминского месторождения на основании содержания SO₃ не могут быть достоверно выделены из группы безрудных пород. Повышенное содержание серы в апатите напрямую связывается в фугитивностью кислорода. При высокой степени окисленности, сера в расплаве находится, главным образом, в сульфатной форме, что препятствует ранней сульфидной сегрегации (раннему удалению серы из магмы в виде сульфида) и обеспечивает накопление серы в ходе фракционирования магматического расплава [Richards, 2003; Loucks, 2014]. Это подтверждается в том числе и экспериментальными данными, в которых концентрация серы в апатите увеличивается с ростом фугитивности кислорода [Peng et al., 1997].

Как показали результаты проведенных исследований, критически важным летучим компонентом порфировых систем является сера, выступающая как монитор окислительно-восстановительных условий, так и необходимая для экстракции металлов и формирования сульфидной минерализации. Тогда как хлор является критически важным компонентом только для Cu-(Au)-порфировых систем. Исходя из этого предлагается дискриминационная диаграмма в координатах $Cl-F-10*SO_3$ (**рис. 5**), позволяющая выделять потенциально продуктивные гранитоиды на Cu-Au-порфировую минерализацию. Диаграмма отражает: 1) содержание летучих в апатите (в первую очередь Cl, который необходим для формирования хлоридных комплексов); 2) содержание серы в апатите, которое указывает на окислительно-восстановительную обстановку (повышенное содержание шестивалентной серы свидетельствует о высокой степени окисленности исходной магмы).

Геохимическая характеристика апатита из магматических пород, в частности величина европиевой аномалии, может быть использована для оценки условий кристаллизации. Европиевая аномалия объясняется тем, что Eu^{3+} имеет близкий ионный радиус с Ca^{2+} и легче замещает его в структуре апатита (в сравнении с Eu^{2+}). Соответственно, численное выражение Eu/Eu^* отношения в апатите будет возрастать с увеличением степени окисленности расплава, из которого он формируется [Piccoli and Candela, 2002]. Кроме того, на величину Eu аномалии может влиять фракционная кристаллизация плагиоклаза.

Установлено, что для апатита из гранит-порфиров рудоносного штока Шахтаминского месторождения (SLP4) значение Eu/Eu* варьирует от 0,33 до 0,66 (ср. зн. 0,54). На Быстринском месторождении в апатите рудоносных порфиров (BLP2–5) значение Eu/Eu* составило от 0,36 до 0,62 (ср. зн. 0,47). Для апатита из пород безрудных штоков типичным является существенно более выраженная отрицательная европиевая аномалия (**Приложение 3**), численное значение которой варьируют от 0,05 до 0,49 (ср. зн. 0,26). Пограничным значением величины европиевой аномалии для апатита из гранитоидов рудоносных штоков Быстринского и Шахтаминского месторождений можно считать Eu/Eu* >0,4.

Европиевая аномалия в апатите, подтверждает данные по циркону, и указывает на фракционную кристаллизации амфибола при подавленной кристаллизации плагиоклаза, а также высокое содержания магматической воды для расплавов, из которых формировались рудоносные гранитоиды.



Рис. 5. Трёхкомпонентные диаграммы дискриминации апатита из рудоносных и безрудных магматических пород в координатах $Cl-F-10*SO_3$ (мас.% нормированные на 100%): (а) по результатам текущего исследования; (б) 1-7: состав апатита из рудоносных магматических пород по литературным данным (Cu-Au порфировые месторождения: 1 – Ред Крис [Zhu et al., 2018], 2 – Кармен де Андаколло [Richards et al., 2017], 3 – Малмыж (неопубликованные данные); Cu-Mo порфировые месторождения: 4 – Цулун [Xu et al., 2021], 5 – Чжунуо [Xu et al., 2021]; Мо порфировые месторождения: 6 - Хуоцзихэ [Xing et al., 2020], 7 - Дахэйшань [Xing et al., 2021]; 8 - состав апатита из гранитоидов шахтаминского комплекса, с которыми не ассоциировано оруденение (неопубликованные данные)).

Третье защищаемое положение: Специфика состава биотита позволяет выделять гранитоиды потенциально перспективные на порфировое оруденение. На основе содержаний F, TiO_2 , MgO, FeO, Al_2O_3 , SiO_2 , Cl в биотите магматических пород Быстринского Си-Аи-Fe скарново-порфирового и Шахтаминского Мо-порфирового месторождений возможно разделение продуктивных Си-порфировую гранитоидов, на u Мо-порфировую минерализацию.

Предшественниками неоднократно предпринимались попытки дискриминации гранитоидов И установления их потенциальной металлогенической нагрузки на основании состава магматических слюд [Мипоz, 1984; Brimhall and Crerar, 1987; Ague and Brimhall, 1988; Liu et al., 2023]. С целью подобного верификации разделения, полученные при проведении микрозондового анализа составы биотитов из гранитоидов шахтаминского комплекса были вынесены на предложенные дискриминационные диаграммы. На диаграмме в координатах IV(F)–IV(F/Cl), точки состава биотита из рудоносных и безрудных гранитоидов Шахтаминского и Быстринского месторождений отвечают полям Си и Си-Аи порфиров (Приложение 4). При этом, даже точки состава биотита из рудоносных гранитоидов Шахтаминского Мо-месторождения располагаются в поле Си-порфирового оруденения. Биотиты рудоносных штоков Быстринского и Шахтаминского месторождений показывают значения IV(F) и IV(F/Cl), сопоставимые с таковыми для медно-порфировых месторождений в мире: Сарчешмех, Далли, Даррех-Зар, Каханг и Кулонг ([Boomeri et al., 2010; Ayati et al., 2008; Parsapoor et al., 2015; Afshooni et al., 2013; Tang et al., 2019a], соответственно). Однако в этих работах не рассматриваются биотиты магматических пород, не связанных с минерализацией. Аналогичная ситуация прослеживается на втором графике в координатах log(X_{Mo}/X_{Fe}) - log(X_F/X_{OH}), предложенная Brimhall and Crerar [1987]: в поле медно-порфировых месторождений попала только часть составов биотитов из рудоносных штоков Быстринского месторождения и единичные составы биотита из безрудных гранитоидов (Приложение 4). В поле молибден-порфировых месторождений оказались только единичные составы биотита из безрудных гранитоидов. Идентичная ситуация прослеживается и в других опубликованных работах [Zhang et al., 2016; Tang et al., 2019б; Azadbakht et al., 2020]. Существующие графики наглядно демонстрирует, что предложенные дискриминационные параметры не могут эффективно разделить биотиты из гранитоидов, генетически связанных с Си- и Мо-порфировыми минерализациями между собой, а также в целом отделить рудоносные интрузии от безрудных.

В связи с невалидностью имеющихся дискриминационных диаграмм и сложным многокомпонентным составом биотита, был проведён линейный дискриминантный анализ. Анализ опубликованной литературы, касающейся состава биотита порфировых месторождений, вывил ряд трудностей. В первую очередь они заключались в непредставительных анализах, использование которых для линейного дискриминантного анализа недопустимо. Часто в опубликованных источниках приводилось малое количество данных или же отнесение к рудоносным интрузиям вызывало сомнение. Малый объем выборки нежелателен при проведении дискриминантного анализа. Поэтому в качестве обучающей выборки выступили данные по составу биотита Быстринского Cu-Au-Fe-порфирово-скарнового и Шахтаминского Мо-порфирового месторождений. В тестовую выборку были включены неиспользуемые в обучающей выборке составы биотита Шахтаминского и Быстринского месторождений (по три анализа с каждого штока), с привлечением данных о составе биотитов медно-порфировых месторождений Maxep-Абад [Siahcheshm et al., 2012], Даралоу [Zarasvandi et al., 2019], Бату-Хиджау [Idrus, 2018], Даррех-Зар [Parsapoor et al., 2015], и молибденместорождений Донгоу [Jin порфировых et 2018] Жирекен al., И (неопубликованные данные).

Результатом линейного дискриминантного анализа являются две дискриминантные функции:

 $Df_{Cu} = -2,8867 \times F - 2,231 \times TiO_2 - 1,184 \times MgO - 0,9905 \times FeO + 1,1355 \times Al_2O_3 + 1,0941 \times SiO_2 + 9,0487 \times Cl - 15,6189$

 $Df_{Mo} = 1,52658 \times F - 0,06641 \times TiO_2 + 1,25849 \times MgO + 0,16343 \times FeO - 0,66214 \\ \times Al_2O_3 - 0,79398 \times SiO_2 + 1,16421 \times Cl + 16,83976$

где содержания компонентов даны в мас.%. Функция Df_{Cu} позволяет различить биотиты из порфировых разностей гранитоидов, ассоциирующих с медной минерализацией, от биотитов из порфировых гранитоидов, связанных с молибденовой минерализацией и безрудных гранитоидов. Функция Df_{Mo} дискриминирует биотиты из гранитоидов, продуктивных на молибденпорфировую минерализацию, от биотитов безрудных пород и гранитоидов, связанных с медно-порфировой минерализацией. Наибольший вклад в различение групп вносят переменные F, MgO, TiO₂ и FeO. По полученным классификационным уравнениям по анализам из тестовой выборки была построена кросс-таблица с результатами классификации (**табл. 1**). Для биотитов из продуктивных гранитоидов медно-порфировых месторождений фиксируется высокая степень полноты и точности классификации, и меньшая для биотитов, связанных с молибден-порфировой минерализацией.

	l.	lрогноз		
Кросс-таблица	Безрудные	Cu	Mo	Полнота
Безрудные	57	0	4	93,44 %
Cu	4	87	0	95,6 %
Мо	17	0	49	74,24 %
Точность	73,08 %	100 %	92,45 %	

Таблица 1. Кросс-таблица по результатам классификации тестовой выборки.

Для верификации разработанной дискриминационной диаграммы на неё были вынесены точки составов биотита различных порфировых месторождений мира (рис. 6). Поле биотита магматических пород Си и Си-Аи порфировых месторождений имеет минимальное перекрытие с полем безрудных. При этом, область фигуративных точек биотитов Мо-порфировых месторождений имеет сильное перекрытие с полем биотитов из безрудных гранитоидов и биотитом лейкогранитов (SLP2). Вероятно, процессы фракционной кристаллизации привели к схожим содержаниям компонентов, по которым производится дискриминация биотитов лейкогранитов (SLP2) и рудоносных гранит-порфиров Использование биотита пород, кристаллизовавшихся (SLP4). ИЗ высокодифференцированных магм, для дискриминации по предложенной диаграмме, вероятно, предложенная стоит избегать. Таким образом, дискриминационная диаграмма может быть использована для выявления на основании состава биотита потенциально рудоносных на Си-порфировое и, в меньшей степени, Мо-порфировое оруденение.



Рис. 6. Дискриминационная диаграмма биотитов в координатах Df_{Mo}-Df_{Cu} для (a) Быстринского Шахтаминского месторождений (б) биотитов И и ИЗ месторождений различных типов минерализации: 1 – Быстринское Cu-Au-Fe порфирово-скарновое месторождение; 2 - Си-Аи порфировое месторождение Бату-Хиджау [Idrus, 2018]; 3 – Си-Аи порфировое месторождение Махер-Абад [Siahcheshm et al., 2012]; 4 – Си порфировое месторождение Даралоу [Zarasvandi et al., 2019]; 5 – Си-Мо порфировое месторождение Даррех-Зар [Parsapoor et al., 2015]; 6 – Шахтаминское Мо порфировое (данная работа); 7 – Мо – порфировое месторождение Донгоу [Jin et al., 2018]; 8 - Жирекенское Мо-порфировое (неопубликованные авторские данные); 9 - W-Mo-Cu месторождение Сиссион Брук [Zhang et al., 2016]; 10 – Си-Мо (±W) порфирово-скарновое месторождение Матоу [Zhu et al., 2014]; 11 – биотиты из неминерализованных образцов (значительная часть точек построена по данным из этой работы и небольшая часть по литературным данным). Красными крестами отмечены центроиды групп.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование минералов-индикаторов является крайне перспективным направлением при поисковых работах, поскольку их дискриминационные характеристики более универсальные и характеризуют состав материнского минералы-индикаторы справедливо условии, расплава. Это при что магматического происхождения и не испытывали наложенных метасоматических Универсальность изменений. применяемых методических подходов подтверждается согласованностью выделяемых дискриминационных признаков исследователями на порфировых месторождениях по всему миру.

Критически важными параметрами при формировании порфировых месторождений является высокая степень окисленности, повышенные содержания воды и летучих компонентов в исходных расплавах. Об окисленности и повышенном содержании воды исходных магм, из которых кристаллизовались гранитоиды поздней фазы шахтаминского комплекса и с которыми генетически связана порфировая минерализация, свидетельствует величина европиевой аномалии (Eu/Eu*>0,4) и Yb/Dy>4 отношения, установленные по циркону. На повышенную фугитивность кислорода расплава указывает также повышенная европиевая аномалия и содержание SO₃ в апатите (>0,4 и >0,1 мас.%, соответственно). Повышенные содержания хлора в апатите рудоносных гранитоидов (>0,8 мас%) установлены для богатого медью Быстринского Cu-Au-Fe скарново-порфирового месторождения, в то время как в апатите и биотите в т.ч. рудоносных гранитоидов Шахтаминского Мо-порфирового месторождения прослеживается повышенные содержания ϕ тора.

основании изучения состава разработана Ha биотита была диаграмма, дискриминационная потенциально позволяющая выделять рудоносные на порфировое оруденение гранитоиды, а также предполагать их металлогеническую специализацию. Предложенная диаграмма верифицируется литературными данными и отличается наибольшей валидностью по сравнению с уже существующими.

петролого-минералогических Методика исследований позволяет проводить выделение интрузивных пород, перспективных на промышленное порфировое оруденение. Все определяемые параметры валового состава пород и характеристики индикаторных геохимические минералов являются обоснованными с точки зрения генетических моделей порфирового оруденения. Все устанавливаемые параметры по каждому из индикаторов имеют одинаковый вес (обязательный, но не достаточный!). Только по полному набору фертильных характеристик представляется возможным делать обоснованные заключения. Недопустимо использование «одиночных» индикаторов, базирующихся на одном минерале или только на валовом составе пород. Анализ общей картины, включающей особенности валового состава пород и состава индикаторных минералов (циркон, апатит, биотит), может способствовать положительному исходу поисковых работ.

Список научных трудов по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Nevolko P.A., Svetlitskaya T.V., Savichev A.A., **Vesnin V.S.**, Fominykh P.A. Uranium-Pb zircon ages, whole-rock and zircon mineral geochemistry as indicators for magmatic fertility and porphyry Cu-Mo-Au mineralization at the Bystrinsky and Shakhtama deposits, Eastern Transbaikalia, Russia. // Ore Geology Reviews. 2021. V.139. P. 104532.

2. Веснин В.С., Неволько П.А., Светлицкая Т.В., Фоминых П.А., Бондарчук Д.В. Состав апатита как инструмент оценки рудоносности порфировых систем (на примере Шахтаминского Мо-порфирового и Быстринского Си-Аи-Fe-порфирово-скарнового месторождений, Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2024. Т. 66, № 1. – С. 113-132.

3. Веснин В.С., Неволько П.А., Светлицкая Т.В., Шаповалова М.О. Оценка перспективности порфирового Си-Мо-Аи оруденения по составу биотита (на примере Шахтаминского Мо и Быстринского Си-Аи-Fe месторождений, Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2025 – *принята в печать в 3 выпуск*

Избранные тезисы докладов:

1. Веснин В.С. Состав и возрастные характеристики магматических пород Шахтаминского Мо-порфирового месторождения / В. С. Веснин // Геология. МНСК-2021: Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 12–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021. – С. 65.

2. Веснин В.С. Геохимия цирконов как отражение фертильности гранитоидов шахтаминского комплекса // Геология: Материалы 60-й Международной научной студенческой конференции (МНСК-2022), Новосибирск, 10–20 апреля 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. – С. 71-72.

3. Веснин В.С. Состав апатита как отражение перспективности магматических пород шахтаминского комплекса на порфировое Cu-Mo-Au оруденение, Восточное Забайкалье // Металлогения древних и современных океанов. – 2023. – Т. 29. – С. 78-83.

4. Веснин В.С. Оценка перспективности магматических пород на порфировое Cu-Мо-Au оруденение по составу биотита на примере шахтаминского интрузивного комплекса, Восточное Забайкалье // Металлогения древних и современных океанов. – 2024. – Т. 30. – С. 153-157.

5. Веснин, В. С. Состав биотита и оценка перспективности магматических пород на порфировое Сu-Mo-Au оруденение на примере шахтаминского интрузивного комплекса (Восточное Забайкалье) // Металлогения золота Центрально-Азиатского орогенного пояса и его обрамления : Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации и 300-летию Российской академии наук, Кызыл, 05–08 сентября 2024 года. – Кызыл: Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской Академии наук, 2024. – С. 18-22.



Диаграммы U-Pb конкордантного возраста по цирконам Быстринского месторождения. Возраст был рассчитан с использованием IsoplotR [Vermeesch, 2018].

Приложение 2.



Диаграммы U-Pb конкордантного возраста по цирконам Шахтаминского месторождения. Возраст был рассчитан с использованием IsoplotR [Vermeesch, 2018].

Приложение 3.



Нормированные на хондрит [Sun, McDonough, 1989] спектры редкоземельных элементов в апатите из магматических пород Шахтаминского (a, в) и Быстринского месторождений (б, г).

Приложение 4



Шахтаминского Положение точек состава биотита Быстринского И месторождений на дискриминационных диаграммах: а – в координатах IV(F) – IV(F/Cl), где поля Си-порфировых, Мо-порфировых и Sn-W-Be месторождений показаны по [Munoz, 1984], а поле Cu-Au по [Liu et al., 2023]; б – петрогенетические типы гранитоидов в координатах log(X_{Mg}/X_{Fe}) - log(X_F/X_{OH}), контаминированный І-тип, I-SC сильно I-MC **у**меренно гле контаминированный І-тип, І-WC - слабо контаминированный І-тип, І-SCR сильно контаминированный и восстановленный І-тип по [Ague and Brimhall, 1988]. Поля, относящиеся к Мо-, Сu- и W- месторождениям, показаны по [Brimhall and Crerar, 1987].