

На правах рукописи



ВЫДРИЧ ДЕНИС ЕВГЕНЬЕВИЧ

**СТРУКТУРА, ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПРОГНОЗНАЯ
ОЦЕНКА МОЛИБДЕНОВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДИС
(РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))**

Специальность: 25.00.11 – Геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
«Всероссийский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского»

Научный руководитель: **Шашорин Борис Николаевич**
доктор геолого-минералогических наук,
ФГБУ «ВИМС», ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Чевычелов Виталий Юрьевич**
доктор геолого-минералогических наук,
ИЭМ РАН, заведующий лабораторией моделей
рудных месторождений

Бурмистров Алексей Алексеевич
кандидат геолого-минералогических наук,
МГУ имени М.В.Ломоносова, Геологический
факультет, Кафедра геологии, геохимии и
экономики полезных ископаемых, доцент

Ведущая организация: **Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии РАН
(ИГЕМ РАН)**

Защита состоится «21» мая 2020 года в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.121.04 при ФГБОУ ВО «Российский
государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных
советов (каб.4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая,
д. 23, <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Вр. и. о. Ученого секретаря
диссертационного совета Д 212.121.04



А. К. Литвиненко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Сырьевая база молибдена РФ занимает пятое место в мире, однако на ее долю приходится 1,0–2,0 % мирового производства металла, а потребность в молибдене в последние годы удовлетворяется импортом. В условиях санкций проблема импортозамещения оказывается актуальной в связи с ростом потребления молибдена из-за увеличения производства высоколегированных сталей, числа заказов оборонного сектора, наращиванием объемов бурения на нефть и газ, появлением новых сфер применения металла. Вместе с тем, в соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы РФ до 2030 года молибден отнесён к пятой группе полезных ископаемых, для которых минерально-сырьевая безопасность может считаться лишь частично обеспеченной. Предполагается, что к 2025–2030 году рентабельные запасы молибдена в России сократятся. Дефицит молибденовых концентратов на рынке может послужить в ближайшие годы причиной роста цен на металл и всплеска развития отрасли, поэтому вопрос опережающего наращивания отечественной сырьевой базы металла и улучшения её структуры приобретает важное народнохозяйственное значение. В русле мероприятий, нацеленных на решение данной задачи, и подготовлена диссертация, характеризующая объект и обосновывающая возможность выявления крупномасштабного молибден-золоторудного объекта.

Месторождение Бадис, расположенное в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутия), относится к штокверковому типу, который имеет преобладающее значение в запасах молибдена России и играет главную роль в его добыче. Месторождение Бадис входит в перспективную группу объектов для наращивания минерально-сырьевой базы и при положительных результатах оценки, освоение его может создать дополнительный источник металла (Mo+Au+Cu и возможно Re) в восточных регионах РФ. Тем более что освоение БАМа, планы по созданию горно-металлургического кластера, на базе Эльгинского месторождения угля, Таёжного железорудного и Эльконского урановорудного месторождений, развитие гидроэнергетики, золотодобычи, увеличивают перспективы экономического роста региона. Благоприятно и расположение Бадисского рудного узла — в 40 км от железнодорожной ветки Улак-Эльга. В этой связи расширение здесь сырьевой базы молибдена и Au, оказывается весьма важным, давая дополнительный импульс развития территории и повышая её инвестиционную привлекательность. Кроме того, ценность рассматриваемого рудного объекта повышается из-за наличия таких попутных компонентов как медь, рений, золото. Вышеизложенное и определяет высокую актуальность представленной диссертационной работы.

Цель и задачи исследований. Цель исследований состояла в установлении структурно-вещественных закономерностей локализации и условий формирования молибденового и сопутствующего оруденения на месторождении Бадис, оценке его рудного потенциала, а также возможностей и перспектив наращивания запасов месторождения на флангах и глубину.

Реализация данной цели предусматривала решение следующих задач:

- провести анализ геотектонической позиции месторождения Бадис в общей структуре района и его металлогенических особенностей;
- расшифровать внутреннее строение и структуру месторождения, факторы рудоконтроля и закономерности локализации оруденения;
- изучить вещественный состав пород и руд, стадийность минералообразования;
- проанализировать геологическую историю развития, изучить особенности рудопродуктивного магматизма, геохимическую зональность и эрозионный срез;
- разработать прогнозно-поисковую модель, на основе которой оценить рудный потенциал месторождения и перспективы его увеличения на флангах и глубину;
- дать рекомендации по направлениям дальнейших геологоразведочных работ и повышению инвестиционной привлекательности объекта.

Фактический материал и личный вклад автора. В основе диссертации — итоги полевых и камеральных исследований, выполненные автором, в ходе реализации договора между ФГБУ «ВИМС» и ГУГПП РС (Я) «Якутскгеология», по изучению месторождения Бадис. Работа выполнялась три года в рамках Государственного контракта № 08/13 от 13.05.2013 — «Поисковые работы на рудном поле Бадис (Республика Саха (Якутия))». Диссертант являлся главным исполнителем семи основных разделов отчёта по договору. Им изучено и задокументировано около 2000 пог. м керна и более 500 пог. м канав, пройдено 45 км детальных маршрутов, подробно закартографировано 3 крупных коренных обнажения. Исследована трещинная тектоника рамы и рудопродуктивных гранитоидов, установлена последовательность формирования трещин и роль различных их типов в строении штокверка. Изучены петрографические и геохимические характеристики гранитоидов, а также вещественный состав руд и околорудных изменений. Определены ведущие минеральные ассоциации и стадийность минералообразования. Проанализировано (рентгеноспектральным анализом, ICP-ms, электронно-зондовым микроанализом и др.) 200 образцов. Изучено более 200 шлифов, 50 аншлифов и 30 протолок. Составлены и уточнены геологические карты и разрезы, позволившие установить геолого-структурные и минералого-геохимические особенности месторождения. Разработана многофакторная прогностическая модель месторождения Бадис, положенная в основу его прогнозной оценки, выполненной в сравнении с эталонными месторождениями. Проведён анализ опубликованных и фондовых материалов по объекту и общеметодической литературы по молибденовым месторождениям. При оценке перспектив молибденного оруденения использованы принципы отраслевого рудно-формационного анализа, разработанные в ВИМСе В.Т. Покаловым для месторождений молибдена, а также интерпретация геофизических съемок, проведённых коллегами (А.И. Макаров и др.). Это позволило наметить необходимые для сравнения объекты-аналоги и сыграло позитивную роль при оценке промышленных перспектив Бадиса и разработке направлений дальнейших работ.

Методы исследований. Основным методом исследований явилось геологическое картирование, которое позволило выделить структурно-

морфологические типы рудных тел, прояснить их структурную позицию, расшифровать закономерности локализации оруденения, выявить геохимическую зональность и оценить эрозионный срез месторождения. Региональная тектоническая позиция анализировалась с помощью мелко- и среднемасштабных геологических, тектонических и минерагенических карт, с привлечением результатов дешифрирования космоснимков Landsat ETM+ и созданием ГИС-проектов. Структурная позиция оруденения исследовалась с использованием детальных геолого-структурных карт, планов и разрезов, полученных в ходе оценки месторождения. Изучение этапности деформаций, приведших к формированию штокверковых, жильных и брекчиево-вкрапленных рудовмещающих структур, осуществлялось путем историко-геологического анализа с восстановлением положения осей напряжений и деформаций. Позиция и особенности локализации оруденения, его геохимические характеристики и зональность анализировалась на схемах, разрезах, с построением статистических рядов, расчётом коэффициентов концентрации, дисперсии и использованием факторного анализа.

Для характеристики вещественного состава руд и стадийности в аншлифах и шлифах изучались взаимоотношения минералов и прожилков. Для тонкой характеристики минерального состава руд использовались данные электронно-зондовых исследований, проведённые к.г.-м.н. Г.Н. Нечелюстовым. По результатам рентгеноспектрального анализа осуществлялась петрохимическая типизация пород при помощи диаграмм $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$, Харкера, Дж. Пирса, индекса ASI и др. Все аналитические исследования проводились в Аналитическом центре ФГБУ «ВИМС». Основная часть работы выполнена в программе Microsoft Word, построение разрезов и карт проводилось при помощи геоинформационных программ ArcGIS, различные диаграммы и схемы строились в графическом редакторе Grapher и Corel Draw. Для выполнения петрохимических пересчетов применялась программа PetroExplorer. Кроме того, для статистической обработки информации использовались программы Statistica, Microsoft Excel, программы комплексной интерпретации Gold Digger, Surfer, модуль Geostatistica в ArcMap и программа интерпретации геолого-геофизических данных Коскад 3Д.

Научная новизна работы.

1. Охарактеризованы деформационные парагенезисы и этапы становления структуры рудного поля месторождения Бадис (Бадисской рудно-магматической системы). Впервые установлено, что в структуре месторождения доминирующими и наиболее благоприятными для рудолокализации явились тектонические нарушения северо-восточной ориентировки. Они контролируют расположение богатых жильно-штокверковых зон со «стержневыми» кварцевыми жилами. Концентрические и радиальные разрывы играют подчинённую роль в рудоконтроле.

2. На основе изученного петрографического состава и петрохимических характеристик гранитоидов выявлено, что мезозойский порфиновый шток имеет многофазное концентрически-зональное строение и центростремительную схему развития. Установлено, что молибденовая минерализация ассоциируется с

гранодиорит-порфирами второй фазы; сульфидная (полиметаллическая) — с трубкой explosивных брекчий.

3. На основе диагностики минерального состава руд охарактеризована многостадийность рудообразования, обоснована принадлежность оруденения к семейству золотосодержащих медно-молибден-порфировых месторождений медно-молибденовой рудной формации. Показана временная последовательность и пространственное положение попутной золотой минерализации.

4. Впервые на основе выявленной структурной, рудно-метасоматической и геохимической зональности объекта создана инновационная многофакторная прогностическая модель месторождения, которая позволила количественно оценить его эрозионный срез и рудный потенциал на глубину.

Практическая значимость. Осуществлена количественная оценка рудного потенциала месторождения, сделано заключение о перспективах наращивания запасов месторождения на флангах и глубину, разработаны рекомендации по направлениям дальнейших геологоразведочных работ. В том числе по рациональной ориентировке поисково-разведочных пересечений штокерка горными выработками и скважинами. Это позволило повысить инвестиционную привлекательность объекта и более целенаправленно ориентировать геологоразведочные работы в соответствии с общей структурой и зональностью. Автор входил в группу экспертов при апробации прогнозных ресурсов месторождения, а его общеметодические разработки использовались (филиал ГУГГП РС (Я) «Якутскгеология» «Алданский») и др., при поисках в Якутии, а также при проведении аналогичных работ на других территориях.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований неоднократно докладывались на Ученом совете ФГБУ «ВИМС» и научно-производственных совещаниях в филиале ГУГГП РС (Я) «Якутскгеология» «Алданский». Они были представлены на ряде международных и региональных конференций и симпозиумов: IV Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2015); XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2015); VI научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2015); Всероссийская научно-практическая конференция, посвящённая 60-летию ФГУП «ИМГРЭ» «Роль геохимии в развитии минерально-сырьевой базы ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов» (Москва, 2016). XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2019). Основные итоги работы используются при научно-методическом сопровождении геологоразведочных работ, осуществляемых ФГБУ «ВИМС» в соответствии с поручениями Федерального агентства по недропользованию.

По тематике диссертации имеется 11 публикаций, том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из трёх глав, в каждой из которых обосновывается отдельное защищаемое положение, а также введения,

заключения и списка литературы из 103 наименований. Объем работы 133 страницы, включая 61 рисунок и 13 таблиц.

Благодарности. Диссертант выражает признательность научному руководителю д.г.-м.н. Б.Н. Шашорину за терпение и наставничество. Благодарит за поддержку и помощь Н.Л. Рахманова. Он признателен д.г.-м.н. С.В. Белову за консультации. Улучшению диссертации способствовали советы: А.И. Макарова, В.В. Рябцева, к.г.-м.н. Т.И. Гетманской, д.г.-м.н. Р.В. Голевой. Неоценима помощь к.г.-м.н. А.П. Трофимова при обработке геохимических данных. Благодарен к.г.-м.н. В.В. Домчаку за предоставленные первичные геохимические материалы и к.г.-м.н. М.А. Белобородову — первичные геофизические материалы. Большую роль в развитии автора сыграли сотрудники ВИМСа: д.г.-м.н. И.Г. Печенкин, д.г.-м.н., проф. Б.И. Пирогов, к.г.-м.н. О.А. Арманд, В.В. Руднев, к.г.-м.н. Е.В. Матвеева. Диссертант признателен профессорско-преподавательскому составу Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета — его альма-матер. Автор благодарит сотрудников ГУГПП РС (Я) «Якутскгеология» К.А. Воробьева, Е.В. Анисимову и всех коллег, оказывавших помощь при внедрении результатов и содействие при проведении полевых работ.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

I. Структурный каркас месторождения Бадис образует мезозойский шток порфировых гранитов, внедрившийся в тектоническом узле пересечения двух крупных региональных разрывных нарушений: субширотного Станового и северо-западного Таксагандинского. В домезозойской и мезозойской истории развития Бадисского узла выделяются ряд этапов, определивших его вещественные и морфологические особенности и комбинированную линейно-кольцевую структуру месторождения.

Месторождение Бадис расположено на сочленении южной окраины Алданского щита со Становой складчатой областью в зоне пересечения субширотного Станового и северо-западного Таксакандинского (Тыркандинского по [Глуховский и др., 1974] и [Забродин и др., 2015]) глубинных разломов (Рисунок 1).

Становой разлом является главной разрывной геоструктурой района и определяет его металлогению. Он прослеживается в виде шовной зоны и отделяет Алданский щит от складчатой области Становика, расположенной южнее. Его тектоническая активность проявлялась с протерозоя до мезозоя и обусловила метаморфизм от гранулит-амфиболитовой фации до зеленосланцевой. По данным Л.М. Парфенова [1984], причиной мезозойской активности явилось столкновение континентальной окраины, существовавшей на обрамлении Сибирской платформы, с островной дугой. В результате коллизии возникла обстановка сжатия, приведшая к интенсивным сдвиго-надвиговым дислокациям.

Таксакандинский разлом является структурой более низкого ранга и возник в результате правостороннего взбросо-сдвига по восточному сегменту Станового разлома, где доминировали напряжения сжатия, вектор которого ориентирован

субмеридионально, несколько отклоняясь к юго-юго-востоку [Имаев и др., 2000, Фотиади и др., 1994]. По данным В.С. Имаева и др., такое поле сжимающих напряжений, существовало и в позднемезозойское время, наследуя более древнее напряженно-деформированное состояние. Обстановка сжатия на южной окраине Алданского щита подтверждается геотермобарометрическими исследованиями [Александров, 2010]. О подобном характере геодинамического развития свидетельствует и восстановление осей палеотектонических напряжений по методике М.В. Гзовского [Глуховский, Синцерова, 1974]. При этом ось среднего главного нормального напряжения σ_2 отклоняется к северо-западу, приближаясь к простирацию Таксакандинского разлома, зона пересечения которого со Становым определила положение Бадисской рудно-магматической системы.

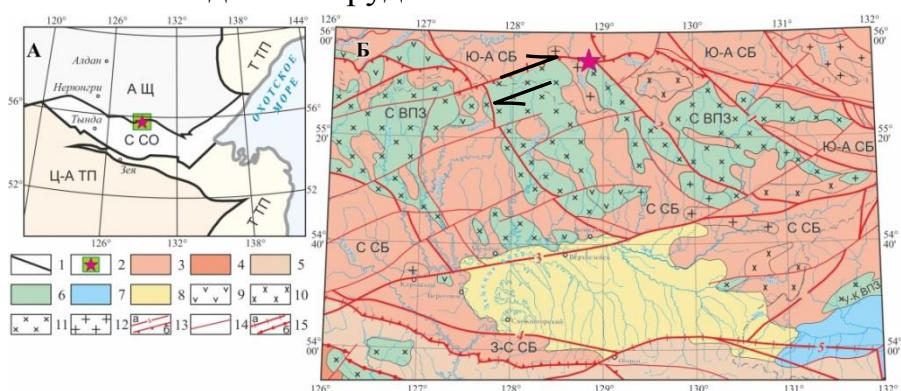


Рисунок 1. Тектоническая позиция рудного поля Бадис

А — Схема региональных структур; Б — Тектоническая схема севера листа N-52 по [Сережников, Волкова, Яшнов и др., 2005]: 1 — глубинные разломы; 2 — рудное поле и месторождение Бадис; АЩ — Алданский щит, ССО — Становая складчатая область, Ц-А ТП — Центрально-Азиатский тектонический пояс, ТТП — Тихоокеанский тектонический пояс; 3 — Алдано-Становой щит: Ю-А СБ — Южно-Алданская система блоков (СБ), С СБ — Становая СБ, З-С СБ — Западно-Становая СБ; 4 — Буреинский массив; 5 — Амуро-Охотская система; 6 — Мезозойские активизационные структуры: С ВПЗ — Становая вулканоплутоническая зона (ВПЗ), У-К ВПЗ — Удско-Куйдусунская ВПЗ; 7–8 — Кайнозойские впадины: 7 — Боконская, 8 — Верхнезейская; 9–12 — преобладающие формации: 9 — андезитовая, 10 — кварцево-диоритовая, 11 — гранит-гранодиоритовая, 12 — гранитоидная, 13 — Глубинные разломы (а), в их числе надвиги (б): 1 — Становой (стрелки указывают смещения бортов), 2 — Таксакандинский, 3 — Зейский, 4 — Желтулакский, 5 — Северо-Тукурингский; 14 — Второстепенные разломы; 15 — Краевые швы: а — Алдано-Станового щита, б — Буреинского массива

Таксакандинский и аналогичные разломы создают глыбово-блоковую расчленённость территории. В её пределах проявлены разрывы северо-восточного простираения, к которым приурочены многочисленные тела бластомилонитов и дайки. Пересечение Таксакандинского разлома со Становым, будучи наиболее ослабленным, явилось областью проницаемости, которая и определила геотектоническую позицию месторождения, сформированного в период мезозойской активизации и связанного с внедрением штока гранитоидов.

Анализ структурно-геодинамической обстановки, приведшей к формированию деформационных парагенезисов, определивших тектоническую позицию месторождения и его структурных элементов, свидетельствует, что геодинамика формирования этих парагенезисов связана с тангенциальными взбросо-сдвиговыми движениями по Становому разлому, что подтверждается приподнятым северным крылом, сложенным археем Алданского щита. Механизм деформаций в зонах сдвига хорошо изучен [Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Sylvester, 1988], что позволило идентифицировать наблюдаемые геологические

структуры с теоретическими и экспериментальными моделями. Разрывы, возникающие в ходе развития геодинамики сдвигов, приведены на Рисунок 2. Сопоставление структур месторождения и их идентификация с моделями даёт основание заключить, что северо-восточные дайки и blastsмилониты приурочены к надвигам, возникшим в обстановке сжатия в результате правостороннего взбросо-сдвига по главному сместителю. В пределах таких структур активно проявляется динамометаморфизм. Об унаследованном его характере свидетельствует то, что амфиболитовая (высшая) фация метаморфизма типична для докембрийских пород рамы. Средним же, зеленосланцевым степеням (тектонофациям) динамометаморфизма подвергнуты преимущественно мезозойские гранитоиды Бадисского штока. Те и другие динамометаморфиты развиваются по одним и тем же северо-восточным деформационным структурам, закономерно проявлявшимся в виде надвигов, возникавших в обстановке сжатия в результате правостороннего взбросо-сдвига по Становому разлому.

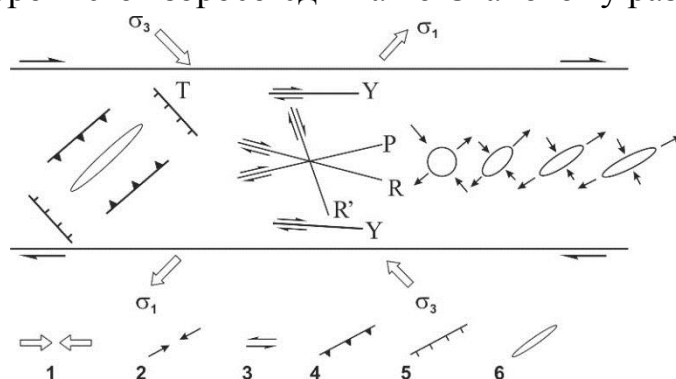


Рисунок 2. Основные типы и ориентация структур, возникающих в зоне динамического влияния сдвига [Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Sylvester, 1988]

1 - ориентация региональных напряжений: σ_3 – наибольшего сжатия, σ_1 – наибольшего растяжения; 2 – ориентация локальных напряжений; 3 - направление перемещений; 4 – надвиги (идентифицируются с северо-восточными разрывами, по которым на Бадисе развиты blastsмилониты и дайки); 5 – сбросы; 6 – складки. R - трещины Риделя (синтетические сдвиги), ориентированные под углом 10–20° к главному разлому; R' и P – антитетические сдвиги, ориентированные под углом 60–75° к главному разлому; T - трещины растяжения, сбросы, ориентированные под углом около 45° к главному разлому (идентифицируются с Таксакандинским разломом северо-западного простирания); Y – сдвиги, параллельные главному разлому

В зонах надвигов динамометаморфизм охватывает полосы до 10–20 м, в которых развиты микросдиги; состав их зависит от вмещающей среды и представлен кварцем, хлоритом, серицитом, альбитом, калиевым полевым шпатом, биотитом. Породы средних тектонофаций характеризуются линзовидно-полосчатыми текстурами. Для высших тектонофаций обычны гнейсовидные и сланцеватые текстуры. Таким образом, характер напряженно-деформированного состояния сохранялся от докембрия до мезозоя, определяясь унаследованной геодинамикой в области Станового разлома, и динамометаморфиты развивались в рамках единых сдвиго-надвиговых северо-восточных дизъюнктивов. В докембрии они образовывались в обстановке пластического течения на глубинах 5–15 км, когда тангенциальный стресс был наибольшим. Менее напряжённая геодинамическая ситуация имела место в условиях меньших глубин и квазипластического течения во время формирования мезозойских динамометаморфитов. Позднее, при образовании штокверка, в условиях хрупких

деформаций, возросла роль радиальных напряжений, связанных с внедрением порфирового штока (Рисунок 3).

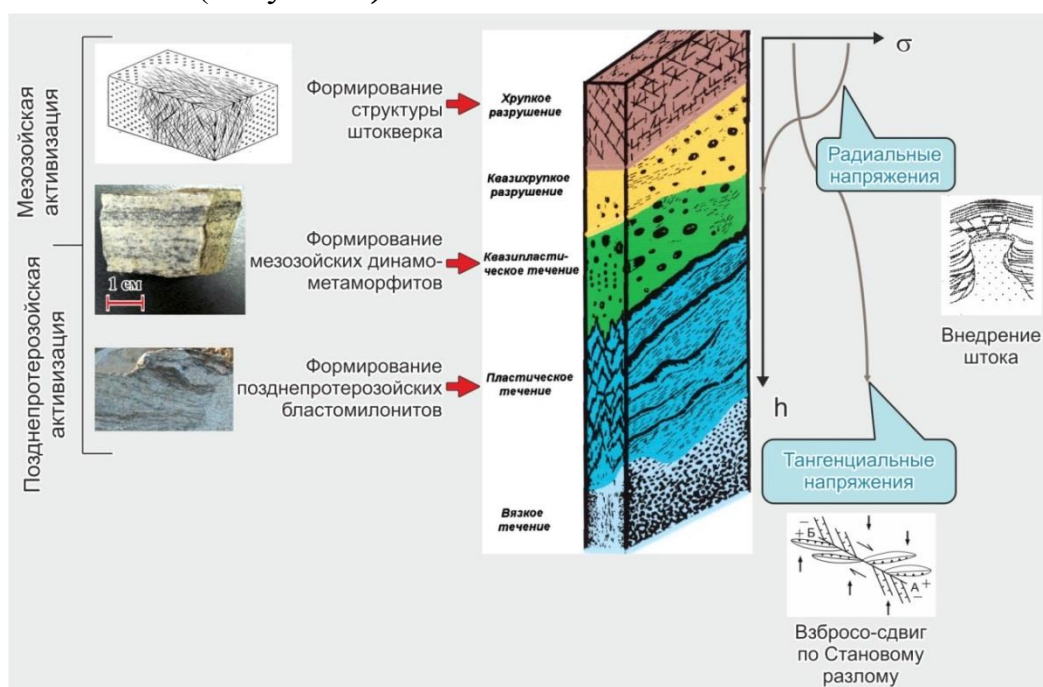


Рисунок 3. Напряжённо-деформированное состояние геосреды при формировании месторождения (с использованием модели строения разлома по [Шерман, 1977, 2009])

В динамометаморфитах встречается молибденит. Это свидетельствует о процессах рудоподготовки в позднепротерозойскую эпоху, активизировавшихся в мезозое. Впоследствии трещинные парагенезисы северо-восточного направления испытали раскрытие, когда ось растяжения (ось σ_1) располагалась дискордантно к ним и имела северо-западную ориентировку. В этой геодинамической обстановке были сформированы гранитоидные дайки северо-восточного простирания и рудоносные жильно-штокверковые зоны, наследовавшие это направление.

Ключевой элемент структуры месторождения — шток гранитоидов. Область проницаемости на пересечении Таксакандинского разлома со Становым явилась центральной осью формировавшейся рудно-магматической системы. Обстановка локального растяжения возникла вследствие раздвигания, приведшего к декомпрессии, обеспечив условия для частичного плавления, подъёма обогащённой флюидами магмы и её многофазного внедрения. Шток размером $1,1 \times 2,5$ км имеет многофазное строение (Рисунок 4). Первая фаза локализуется по периферии и образована роговообманково-биотитовыми гранодиоритами. Вторая располагается ближе к центру и сложена в основном роговообманково-биотитовыми гранодиорит-порфирами (Рисунок 5). Для второй фазы характерны вариации состава (Рисунок 6), что свидетельствует об интенсивной дифференциации. Со второй фазой связана молибденовая и сопутствующая минерализация, на что указывает ранжированный ряд элементов относительно медианы гранитов рудного поля Бадис (Рисунок 7). Коэффициент концентрации суммы элементов закономерно нарастает от 8,51 (для первой фазы), до 13,42 для второй. Анализ геохимической специализации (Рисунок 8) также свидетельствует о накоплении халькофильных и сидерофильных элементов в магматитах второй фазы штока при одновременном снижении литофильных.

Ядерную часть штока занимает взрывчатая трубка брекчий размером 500×700 м. Брекчия (Рисунок 9) состоит из обломков кварца, гранодиорит-порфиров и пород рамы. Породы секутся многочисленными кварцевыми прожилками и гидротермально изменены.

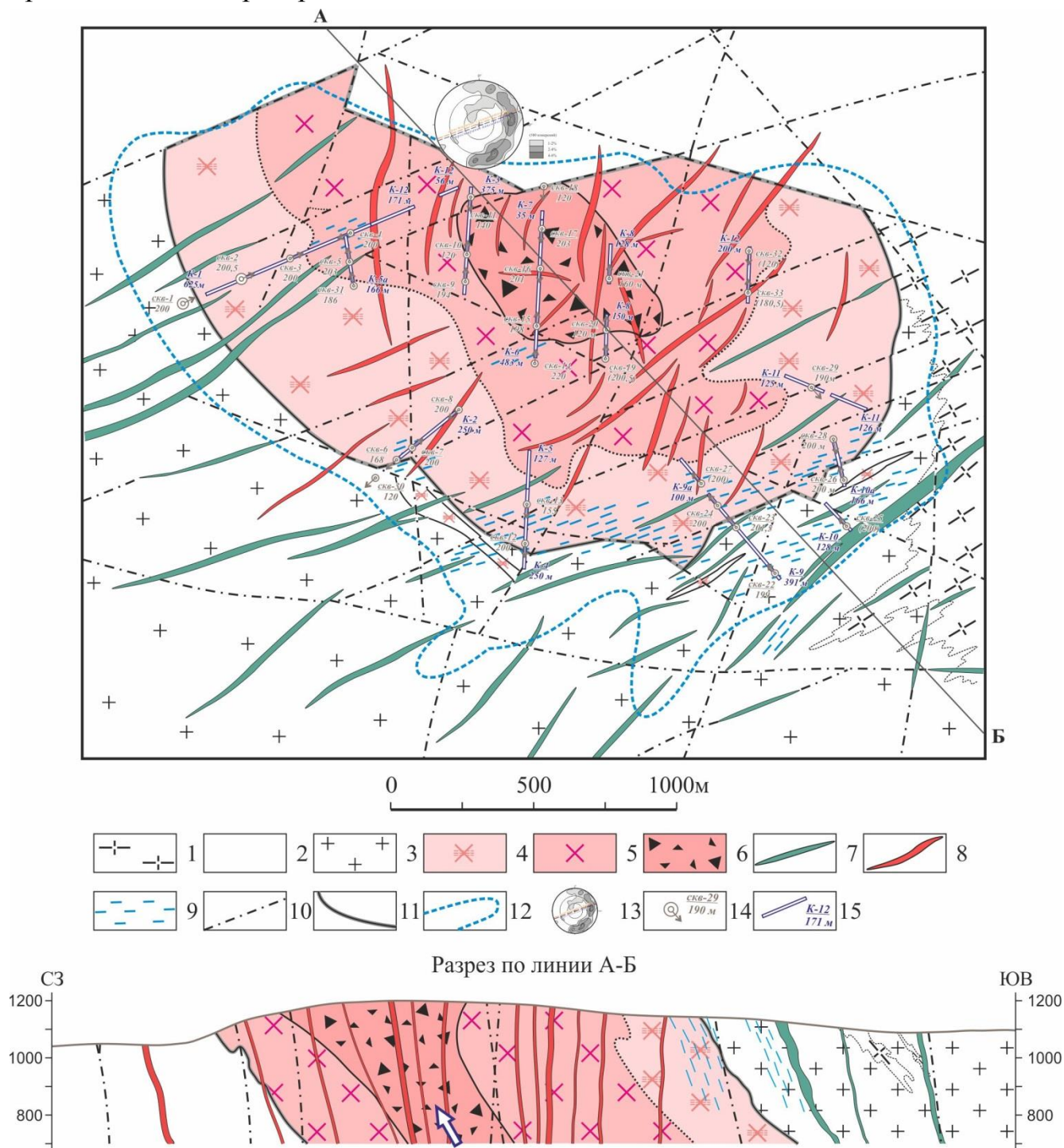


Рисунок 4. Схема геологического строения и разрез месторождения Бадис (по Ю.П. Кастрыкину с дополнениями)

1 — протерозойские сланцы; 2 — диафориты; 3 — протерозойские гранито-гнейсы; 4–6 — порфировый шток: 4 — гранитоиды первой фазы, 5 — гранитоиды второй фазы; 6 — трубка взрывчатых брекчий; 7 — дайки в трещинах северо-восточного простирания; 8 — радиальные и концентрические дайки; 9 — сгущение жильно-прожилковых зон; 10 — тектонические нарушения; 11 — контуры штока; 12 — вторичный ореол молибдена по изолинии 0,01%; 13 — диаграмма ориентировки трещин; 14–15 — горно-буровые работы ГУГПП РС(Я) "Якутскгеология" 2013–2015 гг.: 14 — скважины, 15 — каналы. Стрелка на разрезе — направление внедрения магматических масс

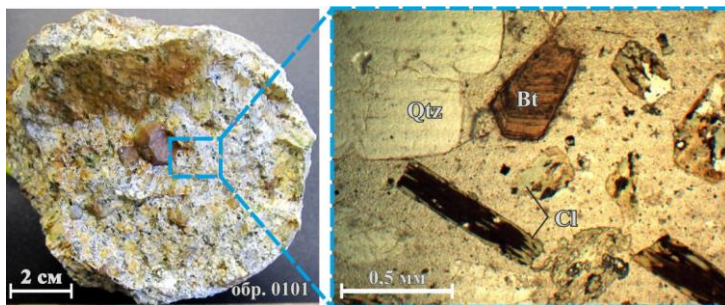


Рисунок 5. Биотитовый гранодиорит-порфир второй фазы штока. Справа — фотография шлифа в проходящем свете без анализатора

Буквами обозначены минералы: Qtz — кварц, Bt — биотит, Cl — хлорит

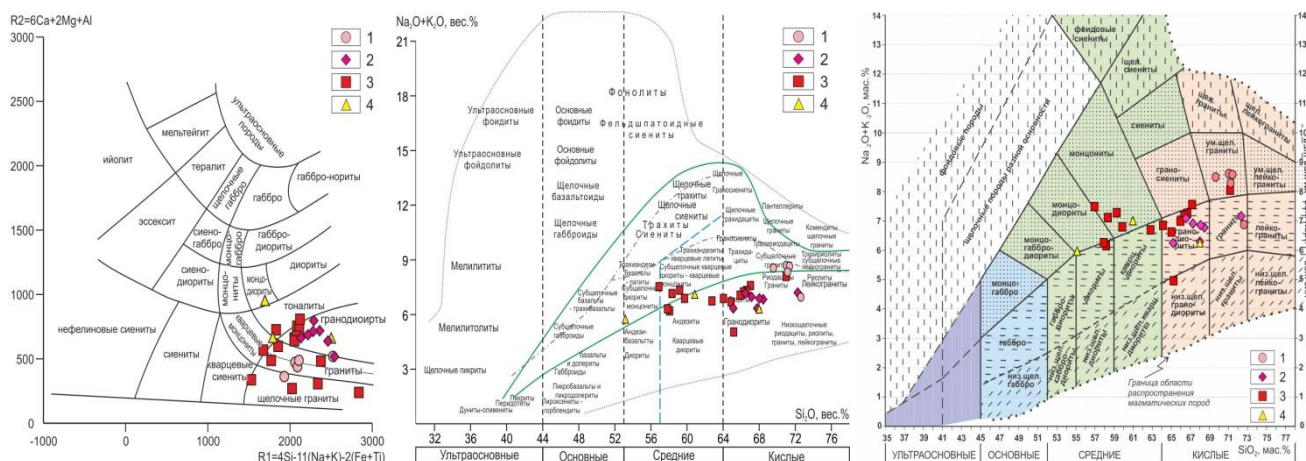


Рисунок 6. Положение пород месторождения Бадис на классификационных диаграммах: слева — диаграмма De La Rosh по [De La Rosh and etc., 1980]; в центре — магматических горных пород Терминологической комиссии Петрографического комитета (1983); справа — TAS-диаграмма плутонических пород по [Шарпенюк и др., 2013]

1 — протерозойские гранитоиды; 2 — гранитоиды первой фазы раннемелового штока; 3 — гранитоиды второй фазы раннемелового штока; 4 — раннемеловые дайки

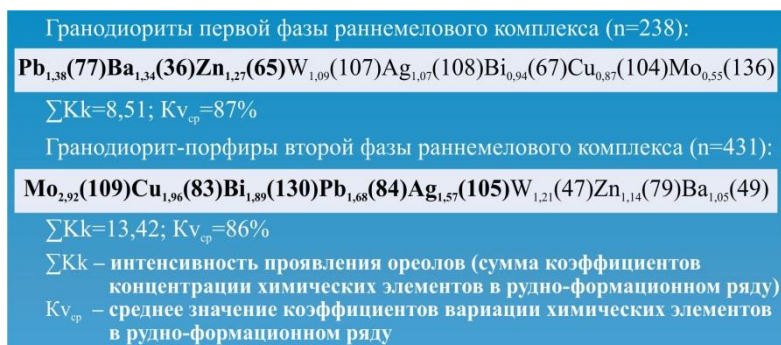


Рисунок 7. Геохимические ряды элементов для гранитоидов Бадисского порфирового штока



Рисунок 9. Брекчии взрывной трубки. Характерен желтовато-бурый цвет породы и остроугольность обломков

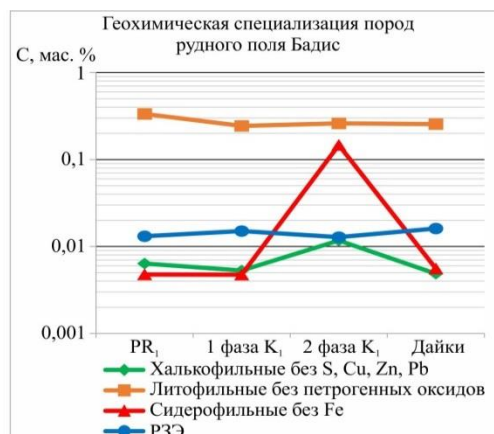


Рисунок 8. Тренды геохимической специализации магматических пород



Важными элементами структуры месторождения, составляющими его каркас, являются гранитоидные дайки. Среди них выделены две системы, различающиеся расположением и механизмом формирования. К первой, наиболее проявленной, относятся дайки северо-восточного простирания, использовавшие трещины, возникшие в результате взбросо-сдвига по Становому разлому. Вторая система представлена совокупностью радиальных и менее развитых концентрических даек. Эти дайки локализируются в брекчиевой трубке и по её обрамлению. Причиной их формирования являются радиальные усилия при интрузивном давлении. Ориентировка их определяется исходя из диаграммы трещиноватости, в обрамлении трубки брекчий (см. Рисунок 4). Плоскость пояса крутопадающих трещин наклонена к северо-западу под углом 20° . Перпендикуляр к этой плоскости показывает ориентировку вектора радиальных усилий (ось σ_3). Он расположен в северо-западном направлении, испытывая воздымание под углом 70° .

Таким образом, поле напряжений при формировании месторождения оказывается интегральным. На региональный тангенциальный стресс, связанный с движениями по Становому разлому, накладываются локальные радиальные напряжения одноосного сжатия-растяжения, вызванные внедрением магматического диапира, включающего две фазы гранитоидов, трубку брекчий и систему радиально-концентрических даек. Диапир, сформировавший Бадисский шток, имеет концентрически зональное строение и развивался по центростремительной схеме. При этом магма внедрялась во всё более высокие горизонты, а интенсивность её воздействия нарастала, достигнув кульминации при образовании трубки брекчий.

Помимо штока и даек, важнейшим элементом структуры месторождения являются рудные тела. Ведущим, определяющим геолого-промышленный тип, является штокверковое оруденение. Штокверк развит в эндо-экзоконтакте штока, где формирует подковообразную зону. Плотность прожилков 10–80 на 1 м^2 ; мощность от мм до первых см. Размеры штокверка $2,5 \times 1,2 \text{ км}$. Преобладают прожилки кварца с тонкочешуйчатым молибденитом (Рисунок 10). Часто центры прожилков сложены молибденитом, а зальбанды — кварцем. В штокверке содержание Мо от 0,001 до 0,05 %, иногда до 0,1–0,2 %. Встречается золото — до 0,3 г/т, медь до 0,01–0,03 %. Доля штокверкового типа с рядовыми рудами (Мо — 0,03 %, в отдельных блоках до 0,05 %) от общей массы составляет 70–75 %.

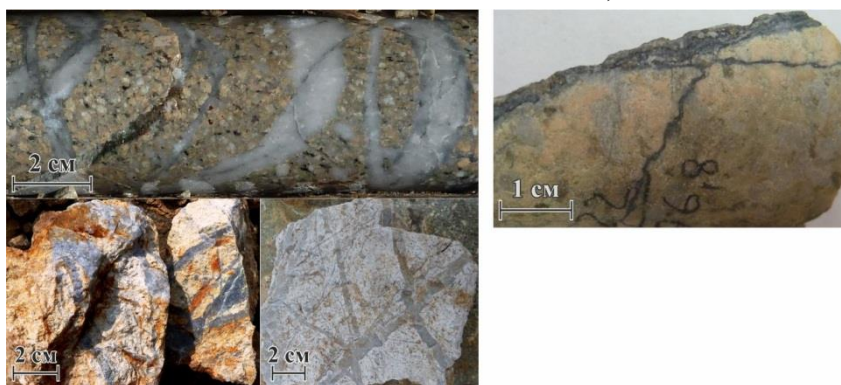


Рисунок 10. Прожилки штокверка: слева — доминирующие, представленные мелкозернистым кварцем с тонкочешуйчатым молибденитом; справа — более редкие нацело выполненные молибденитом

В штокверке выделяются насыщенные прожилками (30–80 шт. на 1 м^2) зоны северо-восточного простирания. Ширина зон от первых метров до 100–150 м. В

них часты «стержневые» кварцевые жилы мощностью 0,1–1,2 м с богатой молибденовой минерализацией (Рисунок 11). Содержание Мо в жилах 0,05–1,0 %. Содержание золота достигает 0,3–0,5 г/т, а меди — 0,1 %. Доля жильного типа с богатыми рудами (с содержанием Мо 0,05–1,0 %) — 10 %. Наличие этих зон — следствие структурной подготовки, выразившейся в использовании северо-восточных дизъюнктивов как рудовмещающих.

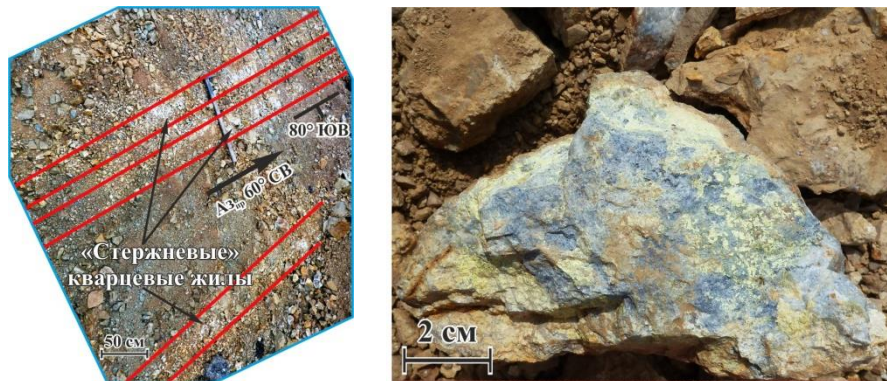


Рисунок 11. Северо-восточные «стержневые» кварцевые жилы, обогащенные молибденитом

Брекчиевый тип руд (Рисунок 12) локализуется в взрывной трубке и слагает вытянутое к запад-северо-западу тело размером 800×400 м. Молибденит приурочен к обломкам. Руды сульфидизированы. Количество пирита, халькопирита и молибденита 5–10 %. В брекчиях содержания Мо — 0,005–0,03 %; Си в среднем 0,06 %. Содержание Au выше, чем в других типах: в среднем 1,0 г/т, максимально — 10 г/т. Доля брекчиевого типа с рядовыми и бедными рудами (с содержанием Мо до 0,02 %) составляет 10%.

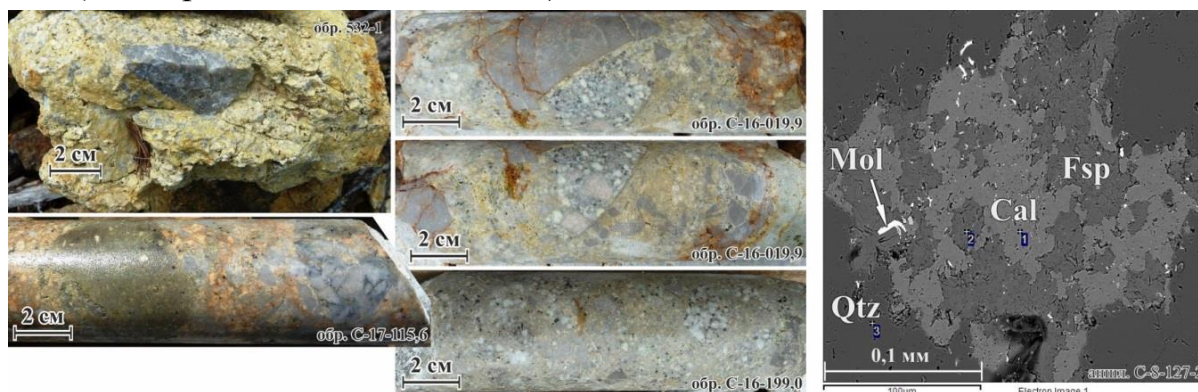


Рисунок 12. Типы руд: слева — брекчиевый тип, молибденит в обломках кварца; справа — вкрапленный тип, фотография аншлифа в обратнорассеянных электронах

Буквами обозначены минералы: Qtz — кварц, Mol — молибденит, Fsp — калиевый полевой шпат, Cal — кальцит

Вкрапленно-метасоматические руды (см. Рисунок 12) развиты в западной части штока, где ими сложены участки с расплывчатыми границами размером от 50×100 м до 250×400 м, общей площадью около 0,17 км². В данном типе руд содержание Мо от 0,015 до 0,05–0,3 %, Au 0,1–0,5 г/т, местами до 1,5–3,0 г/т, Си до 0,3 %. Доля руд этого типа 5–10 %. Вкрапленное оруденение имеет значение лишь в сочетании с другими разностями. Для продуктивных штокверков вкрапленная минерализация типична [Фролов, 1987], и месторождение Бадис не выбивается из общей тенденции, что есть позитивный критерий.

II. Рудный процесс тесно связан с формированием гранитного штока – его второй фазой внедрения. Выделяются шесть стадий минералообразования, проявившихся синхронно со структурообразованием и определивших рудно-метасоматическую зональность месторождения. Основная масса молибденовой минерализации сформировалась в кварц-молибденитовую стадию и парагенетически связана со второй фазой штока порфировых гранитоидов. Полиметаллическая минерализация с попутным золотом ассоциирует с трубкой брекчий и образовалась после отложения молибдена в кварц-карбонатно-сульфидную стадию.

Метасоматические процессы (Рисунок 13) тесно связаны с формированием структуры месторождения. Наиболее ранней является биотитизация, развитая по гранодиорит-порфирам. Кварц-полевошпатовый метасоматоз проявляется в виде калишпатизации и окварцевания, охватывая шток и его экзоконтакт. Калишпатизация ассоциирует с биотитизацией и выражается в замещении калиевым полевым шпатом плагиоклаза. В метасоматитах присутствует вкрапленность молибденита. Нередко кварц-полевошпатовые метасоматиты образуют тела северо-восточного простирания мощностью до 10–12 м. Метасоматическое объемное окварцевание развито по штоку гранитоидов и незначительно за его пределами. Помимо объемного метасоматоза, окварцевание зависит от развития кварцевых прожилков: при увеличении их числа — растёт и объём кварцево-прожилковой массы. Масштабы штокверкового окварцевания обусловлены интенсивностью рудовмещающей трещиноватости. Дорудная пропилитизация интенсивно проявлена в кварц-калишпатовых метасоматитах; пострудная — наложена на штокверковое окварцевание и связана с завершением постмагматического процесса. Пиритизация развита в штоке и наиболее значительна в трубке брекчий. В брекчиях, на ранее возникшие метасоматиты,

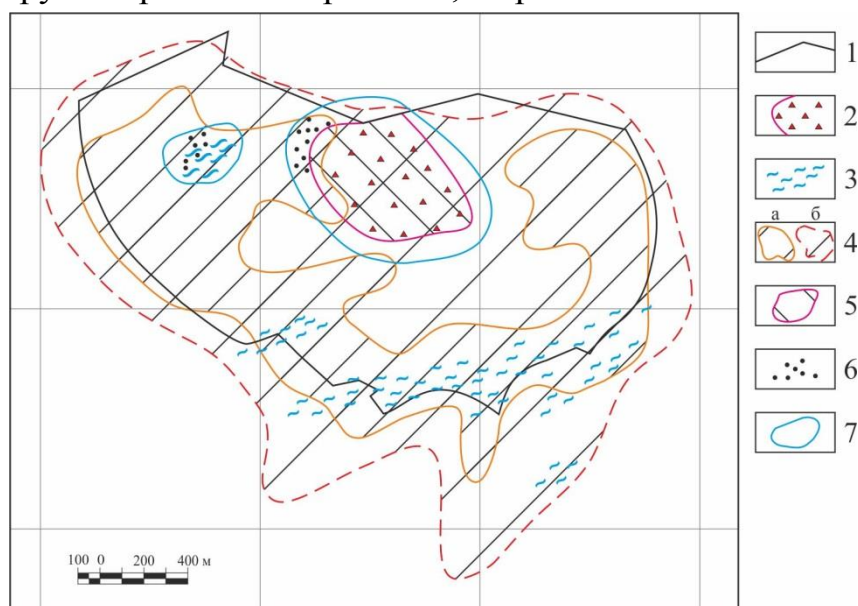


Рисунок 13. Рудно-метасоматическая зональность (по [Кастрыкин, 1978] с дополнениями)

1 — контур штока; 2 — трубка брекчий с интенсивной пиритизацией; 3 — жилы с богатым оруденением и зоны аргиллитизации; 4 — зона штокверка с развитием ортоклаз-биотит-кварцевых метасоматитов и пропилитов: а) с богатым б) с рядовым оруденением; 5 — зона развития брекчиевых руд и сульфидизации; 6 — зона развития кварц-магнетитовых прожилков; 7 — зона аргиллитизированных пород

накладывается низкотемпературная аргиллитизация. К числу завершающих метасоматических процессов относится и эпидотизация.

Выделено шесть стадий минералообразования (Рисунок 14), проявившихся синхронно со структурообразованием.

Динамометаморфическая стадия ранняя. С ней связано образование кварц-биотит-хлоритовых бластомилонитов северо-восточного простирания. Стадия отразилась в гнейсовидном, линзовидно-полосчатом облике пород, возникшем за счет бокового сжатия, приведшего к одноосной переориентировке минералов. Значимой рудной минерализации не отмечается, поэтому её следует считать рудоподготовительной. Следующие четыре стадии являются ведущими, знаменуя развитие рудных процессов, происходивших в мезозое.

Стадия Минералы	Динамо- метамор- фическая	Кварц- КПШ	Кварц- магнети- товая	Кварц- молибденитовая	Кварц- карбонатно- сульфидная	Гипер- генная
Кварц						
Плагиоклаз						
КПШ						
Роговая обманка						
Биотит						
Мусковит						
Серицит						
Хлорит						
Эпидот						
Тремолит						
Кальцит						
Доломит						
Опал						
Каолинит						
Монтмориллонит						
Циркон						
Рутил						
Апатит						
Шеелит						
Флюороит						
Магнетит						
Пирит						
Халькопирит						
Молибденит						
Сфалерит						
Галенит						
Золото						
Блеклые руды						
Сульфосоли						
Гидрослюды						
Ярозит						
Повеллит						
Ферримолибдит						
Гематит						
Гетит						
Борнит						
Ковелин						
Малахит						
Азурит						

Рисунок 14. Последовательность минералообразования на месторождении Бадис

Кварц-калишпатовая стадия фиксирует их начало и проявлена в калишпатизации и возникновении кварц-эпидотовых и кварц-эпидот-хлоритовых прожилков. В эту стадию выделяется ранний молибденит I.

Кварц-магнетитовая стадия представлена прожилками с магнетитом и небольшим количеством пирита.

Кварц-молибденитовая стадия является основной рудной стадией и связана с образованием штокверков и жил с основной массой молибденита II, который ассоциирует с пиритом. Молибденит представлен розетковидными срастаниями, реже деформированными чешуйками (Рисунок 15). Размеры агрегатов 1,0×2,5 мм; отдельных чешуек от 0,002×0,01 до 0,03×0,26 мм. Молибденит II имеет стандартный состав и содержит Re менее 0,02 % (Таблица 1). По данным химического анализа (аналитик Г.Г. Лебедева, ФГБУ «ИМГРЭ») содержание Re в молибдените достигает 150 г/т.

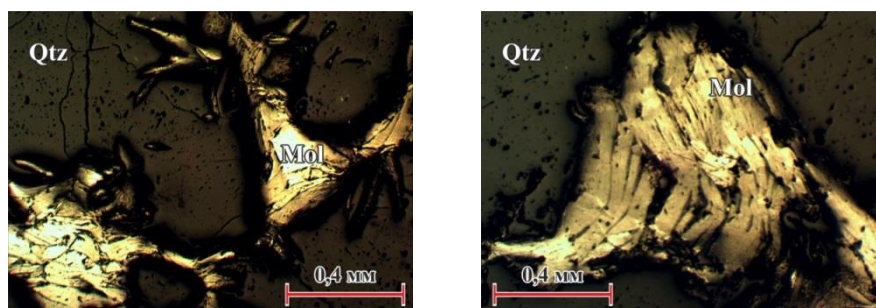
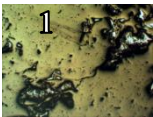
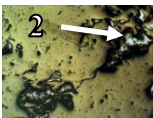


Рисунок 15. Розетки (слева) и деформированные чешуйки (справа) молибденита II (Mol) в кварце (Qtz). Изображения в отраженном свете без анализатора

Таблица 1. Результаты электронно-зондового микроанализа обр. с-7136 (аналитик Г.Н. Нечелюстов, ФГБУ «ВИМС»). Химический состав минералов (вес. %)

№ изм.	Si	O	Mo	S	Re	Total	Минерал
1 	46,81	53,33				100,14	Кварц
2 			59,61	39,75	< 0,02	99,36	Молибденит

Кварц-пирит-молибденитовые прожилки локализуются в 4 системах трещин: $350^\circ \angle 45^\circ$; $45^\circ \angle 80^\circ$; $215^\circ \angle 45^\circ$; $280^\circ \angle 65^\circ$ (Рисунок 16). Наиболее развита первая система. Её возникновение связано с движениями по Становому разлому. Эти прожилки локализуются на юго-востоке месторождения. Здесь же наиболее проявлены и «стержневые» кварцевые жилы с богатой минерализацией. Вторая и третья системы прожилков являются навстречу падающими (к центру штока), а четвёртая система по отношению к ним — диагональная. В целом разноориентированные прожилки опоясывают окружность штока полукольцом. К ним может быть отнесена и пятая прожилковая система ($335^\circ \angle 75^\circ$). Подобная структурная ситуация, как показано В.А. Невским и А.А. Фроловым [Невский, Фролов, 1985] возникает в условиях радиального давления при магматическом диапиризме. Именно такие усилия и привели к формированию ряда трещин, часть из которых впоследствии была заполнена кварцево-рудным веществом.

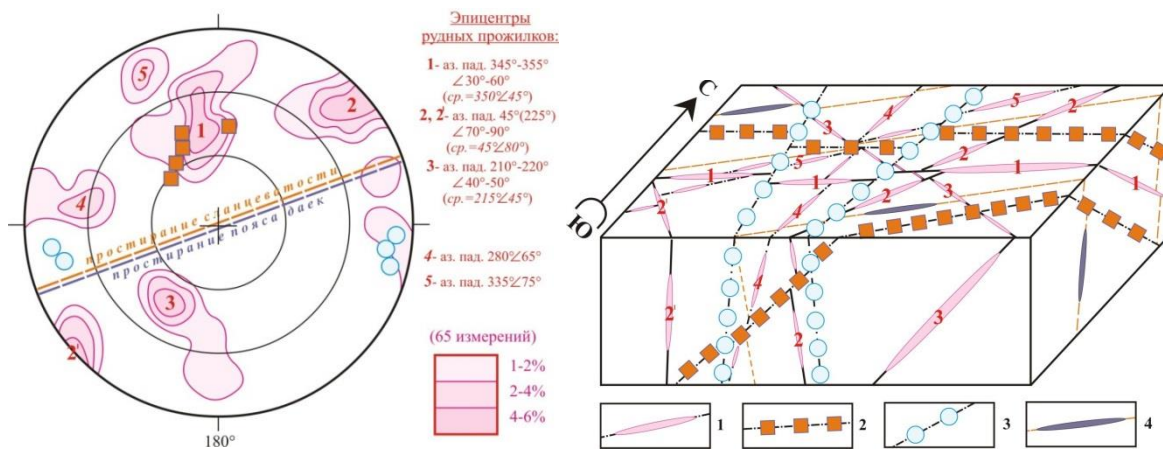


Рисунок 16. Ориентировки рудных прожилков и тектонических зон: слева — диаграмма изолиний равной плотности направлений ориентировок прожилков; справа — блок-диаграмма в перспективной проекции (составлено с использованием данных Ю.П. Кастрыкина)

1, 2, 3, 4 — кварц-пирит-молибденитовые прожилки; цветные кубики — прожилки с магнетитом; синие кружки — пострудные зоны дробления, окварцевания и пиритизации; 1 — кварц-пирит-молибденитовых; 2 — прожилки с магнетитом; 3 — пострудные зоны дробления, окварцевания и пиритизации. 4 — дайки гранодиорит-порфиров

Анализ внутреннего строения штоковерка свидетельствует, что основная масса кварц-пирит-молибденитовых прожилков имеет северо-восточное простирание согласно с простиранием бластомилонитов и даек (эпицентр 1). Вторая по значимости система имеет северо-западное простирание (эпицентр 2). Остальные системы являются второстепенными. В этой связи очень важна рациональная ориентировка разведочных пересечений. Исходя из принципа необходимости подсечения максимально возможного числа рудоносных прожилков, оценку Бадисского штоковерка наиболее целесообразно осуществлять ССЗ-ЮЮВ канавами и находящимися в их створе наклонными на ЮЮВ скважинами.

Кварц-карбонатно-сульфидная стадия является поздней рудной стадией и с ней связано образование кварц-карбонат-сульфидных прожилков, пересекающих вышеописанные кварц-молибденитовые прожилки (Рисунок 17). Сульфидная минерализация в них представлена халькопиритом, сфалеритом, галенитом, пиритом, реже блеклыми рудами и образует гнездово-вкрапленные текстуры руд. В эту стадию выделяется поздний «сажистый» молибденит III генерации (Рисунок 18).

Пирит является наиболее распространенным рудным минералом и отлагается на протяжении всего рудного процесса. Образует вкрапленную и прожилково-вкрапленную текстуры. Часто в нём присутствует вкрапленность халькопирита размером до 0,05 мм. Халькопирит — главный минерал — представляющий медную минерализацию, развит повсеместно. Наблюдается в кварц-карбонатных прожилках штоковерка и жилах в виде гнезд в ассоциации с пиритом, галенитом и сфалеритом (Рисунок 19). Сфалерит представлен клейофаном и образует зерна изометричной формы. В виде изоморфной примеси в нём присутствует кадмий (до 0,6 %). Галенит образует гнездово-вкрапленные выделения. Относительно пирита и сфалерита галенит является поздним, развивается по периферии и по трещинкам в этих минералах; в нём повышено содержание (вес. %) меди (0,38), серебра (0,23–0,95) и редко сурьмы (до 1,18).

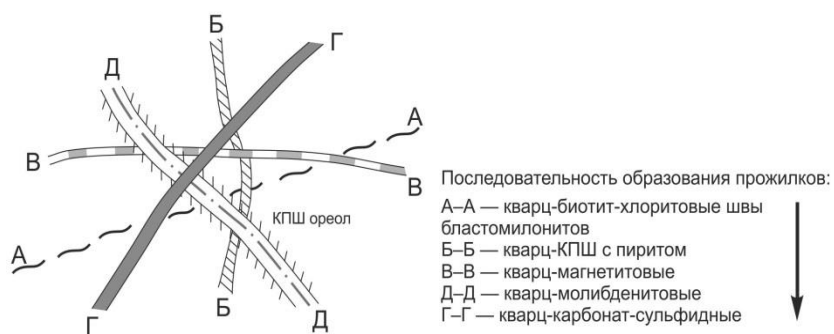


Рисунок 17. Взаимоотношения основных типов прожилков.

Штрих-пунктир по кварц-молибденитовым прожилкам (Д-Д) указывает на внутрирудные деформации, между ними и кварц-карбонат-сульфидными прожилками (Г-Г), в связи с формированием трубки брекчий



Рисунок 18. «Сажистый» молибденит поздней генерации. Слева — прожилок; справа — зеркало скольжения сдвигового характера

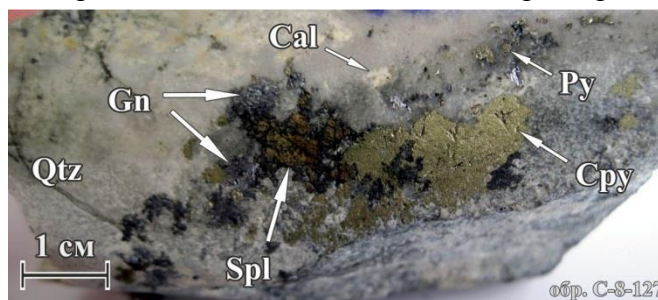


Рисунок 19. Кварц-карбонатная жила с полиметаллической минерализацией

Буквами обозначены минералы: Qtz — кварц, Cal — кальцит, Py — пирит, Cpy — халькопирит, Gn — галенит, Spl — сфалерит

С данной стадией минералообразования связано и золото. Оно образует тонкодисперсные субидiomорфные выделения в пирите и халькопирите, находящихся в кварцевых прожилках. Размер его зерен от первых микрометров до 10 мкм. В отраженном свете также наблюдаются зерна золота ксеноморфной, удлиненной формы, реже угловатые. В технологической пробе установлено свободное золото размером 0,2 мм. В шлихах также отмечены отдельные мелкие его знаки. В штокверке и жилах содержание золота достигало 0,3–0,5 г/т. В кварцевых метасоматитах его содержания составляли 0,1–0,5 г/т, местами до 1,5–3,0 г/т. В брекчиях содержания золота определялись около 1,0 г/т, максимально — 10 г/т [Глуховский и др., 1974]. Таким образом, золото следует рассматривать в качестве попутного элемента руд.

Гипергенная стадия заключительная и характеризует окисление сульфидов. Из вторичных минералов в зоне окисления встречаются повелит, ферримолибдит, лимонит, гетит, (гидрогетит), хризоколлa, малахит, азурит. Из зоны окисления вынесено от 15 до 24% молибдена. Таким образом, с глубиной средние содержания молибдена видимо будут выше, что следует учитывать при оценке.

Для определения микропримесей и более точного химического состава минералов выполнен масс-спектральный анализ (ICP-ms) монофракций, что

позволило установить геохимическую специализацию основных рудных минералов, которую следует учитывать при переработке и обогащении руд. Исследованиям подвергнуты пириты кварц-полевошпатовой стадии (пирит I) и кварц-молибденитовой (пирит II), а также халькопирит, сфалерит и галенит кварц-карбонатно-сульфидной стадии. Установлено, что пирит I характеризуется повышенным содержанием Li, V, Ni, Sr, Sn, Mo, Th и, что характерно, — редкоземельных элементов. При этом для него типичны наиболее высокие значения литофилов и сидерофилов. Это свидетельствует о литофильном геохимическом профиле кварц-полевошпатовой стадии. Повышенные содержания Mo в пирите этой стадии коррелируют с отложением в это время раннего молибденита I. Для пирита II основной рудной стадии характерны повышенные значения халькофильных элементов. Особенно высоки содержания примеси Cu, связанные с включениями халькопирита, что фиксируется и минераграфическими исследованиями. Аналогично повышенные содержания Zn и Pb в пирите II связаны с включениями сфалерита и галенита, что подтверждается и электронно-зондовым микроанализом. Рост количества халькофилов в пирите этой стадии, а также существенные количества сидерофилов коррелируется с их увеличением во второй фазе Бадисского штока (см. рис. 1.7), что подтверждает связь главной стадии рудогенеза с гранитоидами этой фазы. Для халькопирита установлены повышенные содержания V, Rb, Cs, Re. Для сфалерита — Ga, Cd, As, Sb, Ba; для галенита — Se, Ag, Te, Au, Tl, Bi. Для последнего обращают на себя внимание очень высокие значения суммы халькофильных элементов, что типично для сульфидных руд. Для галенита выявляются также и повышенные содержания Au.

III. Месторождение Бадис относится к семейству золотосодержащих медно-молибден-порфировых месторождений, для которого характерны масштабные объекты. Выявленные структурная, рудно-метасоматическая и геохимическая зональности свидетельствуют о преимущественно средне- и верхнерудном срезе и существенных перспективах глубоких горизонтов месторождения. Объект относится к категории крупных и имеет высокий рудный потенциал.

Важным при рудно-формационном анализе является изучение геохимических характеристик и зональности. Геохимические связи молибдена с другими металлами являются ведущими классификационными признаками. Для их установления рассчитаны статистические параметры элементов в выборках различных пород и для месторождения в целом. На основе корреляционного и факторного анализов выделены рудогенные геохимические ассоциации, которые использовались при определении генетического типа оруденения и его формационной принадлежности. При обработке результатов анализов 1025 проб рыхлых отложений получен следующий геохимический рудно-формационный ряд (индекс — коэффициенты концентрации относительно медианы выборки, в скобках — значения коэффициентов вариации в %): Mo_{1,73}(146) Bi_{1,58}(122) Cu_{1,43}(99) Pb_{1,39}(83) Ag_{1,32}(114) W_{1,18}(76) Ba_{1,18}(42) Zn_{1,14}(71). Характерны высокие коэффициенты концентрации и дисперсии для молибдена и специализация на

медно-висмут-молибденовую минерализацию, типичную для медно-молибденовой формации. Комплексность состава, высокая концентрация и дифференцированность ($\sum Kk_{\text{сумм.}} = 10,95$, $Kv_{\text{ср.}} = 94\%$) указывают на масштабность рудогенеза и присутствие значительного рудного объекта. Над петрографическими разностями получены следующие частные геохимические рудно-формационные ряды:

Вмещающие Бадисский шток древние граниты раннепротерозойского комплекса ($n=276$): $Bi_{1,6}(103)$ $Ba_{1,21}(35)$ $W_{1,16}(97)$ $Zn_{1,06}(67)$ $Pb_{1,01}(75)$ $Cu_{0,87}(82)$ $Ag_{0,85}(98)$ $Mo_{0,67}(118)$; $\sum Kk=8,43$; $Kv_{\text{ср.}}=88\%$.

Роговообманково-биотитовые гранодиориты первой фазы раннемелового комплекса ($n=238$): $Pb_{1,38}(77)$ $Ba_{1,34}(36)$ $Zn_{1,27}(65)$ $W_{1,09}(107)$ $Ag_{1,07}(108)$ $Bi_{0,94}(67)$ $Cu_{0,87}(104)$ $Mo_{0,55}(136)$; $\sum Kk=8,51$; $Kv_{\text{ср.}}=87\%$.

Роговообманково-биотитовые гранодиорит-порфиры второй фазы раннемелового комплекса ($n=431$): $Mo_{2,92}(109)$ $Cu_{1,96}(83)$ $Bi_{1,89}(130)$ $Pb_{1,68}(84)$ $Ag_{1,57}(105)$ $W_{1,21}(47)$ $Zn_{1,14}(79)$ $Ba_{1,05}(49)$; $\sum Kk=13,42$; $Kv_{\text{ср.}}=86\%$.

Брекчии раннемелового комплекса ($n=47$): $Mo_{3,03}(114)$ $Ag_{2,67}(103)$ $Bi_{2,16}(101)$ $Cu_{2,14}(97)$ $W_{1,32}(34)$ $Ba_{1,32}(33)$ $Zn_{1,03}(57)$ $Pb_{0,99}(39)$; $\sum Kk=14,66$; $Kv_{\text{ср.}}=72\%$.

Приведенные частные геохимические рудно-формационные ряды показывают, что с мезозойской активизацией и внедрением Бадисского штока связано нарастание интенсивности рудогенеза. Во время становления первой фазы данный процесс лишь вступил в начальную стадию ($\sum Kk$ немного выше, чем для гранитов рамы), для второй фазы и эксплозивных брекчий значения $\sum Kk$ существенно выше. Для этих пород получены наибольшие коэффициенты концентрации Mo , Cu , а также Bi . Это подтверждает выводы о связи молибденового и сопутствующего оруденения с заключительными фазами Бадисского штока и принадлежности к медно-молибденовой формации. По классификациям [Sillitoe, 2010] и др., оруденение относится к молибденит-халькопирит-порфировой формации, чем подчёркивается его связь с интрузиями порфирового типа, к которым относится Бадисский шток. Из полученных данных следует, что интенсивная рудоконцентрация, стартовавшая в период становления второй фазы штока, продолжалась и во время формирования трубки брекчий. Более того, судя по коэффициентам концентрации, интенсивность этого процесса нарастала.

Неотъемлемой частью исследований явилось определение латеральной зональности. Установлено (Рисунок 20), что ореолы Mo , Cu , частично W конформны штоку и наследуют кольцевые направления. При этом, если два главных металла руд занимают центр штока, то ореолы W их окаймляют и локализуются над первой фазой. Ореол Ag образует обрамление ореола W , но в его конфигурации проявляются линейные северо-восточные направления. Что касается ореолов Pb , Bi и Au , то они, слагая периферию, испытывают чёткий северо-восточный структурный контроль. Таким образом, установлено проявление латеральной зональности от центра к периферии: $Cu \rightarrow Mo \rightarrow W \rightarrow Bi \rightarrow (Pb, Zn) \rightarrow Ag \rightarrow Ba \rightarrow Au$, которая контролируется геологическими структурами месторождения. Особенно чётко это проявляется на схеме распределения рудных ассоциаций (Рисунок 21).

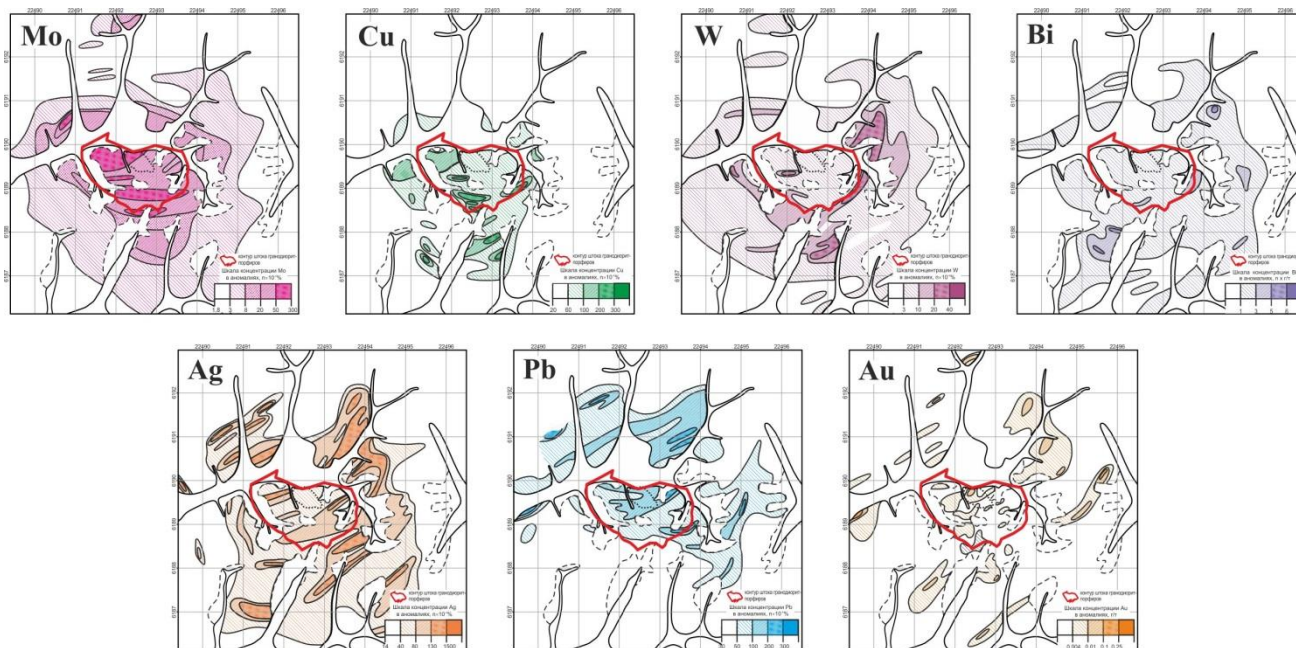


Рисунок 20. Схемы геохимических ореолов. Составлены по материалам [Домчак, 1989]

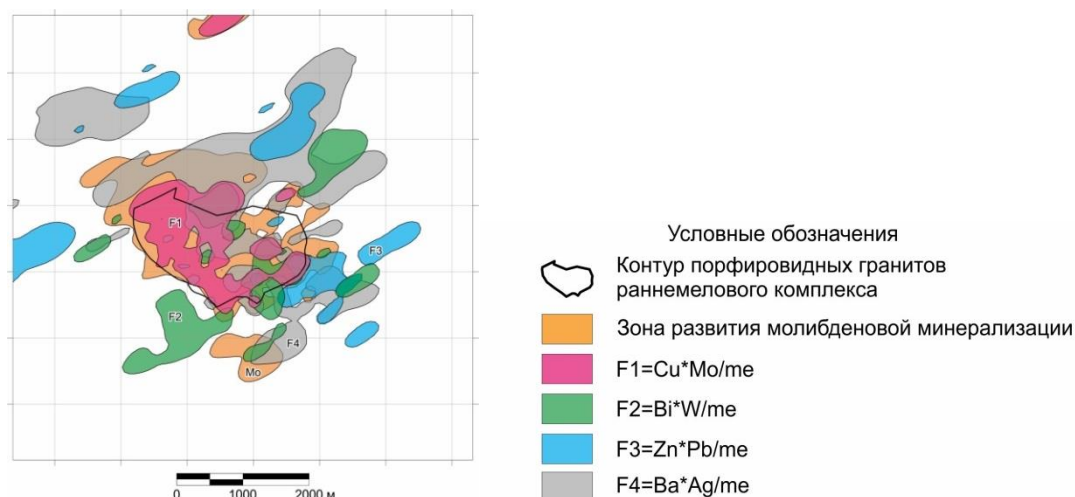


Рисунок 21. Схема зонального распределения рудных ассоциаций элементов F₁–F₄

Анализ зональности геохимических аномалий и факторов позволил оценить эрозионный срез участков. Пересечение всех факторов и большая площадь 1-ой рудной ассоциации (Cu, Mo) отвечают среднерудному срезу. Области наложения всех факторов при малой площади 1-ой ассоциации — верхнерудному уровню. Периферийные участки с наложением 2 (Bi, W), 3 (Zn, Pb) и 4-ой (Ba, Ag, Au) ассоциации соответствуют надрудному срезу. Из проведённого анализа метасоматитов (Рисунок 22) следует, что срез в целом соответствует среднерудному.

Для детализации выводов о геохимической зональности, размахе оруденения, срезе и рудно-формационной принадлежности при помощи программы Gold Digger обработаны результаты химического состава 8 652 коренных проб, построены разрезы отдельных фрагментов геохимического поля. Установлено, (Рисунок 23) что ореолы Cu локализуются на более низких уровнях по отношению к Mo. По горизонтам рассчитаны статистические параметры, выполнен факторный анализ, и выделены следующие частные рудно-формационные ряды элементов:

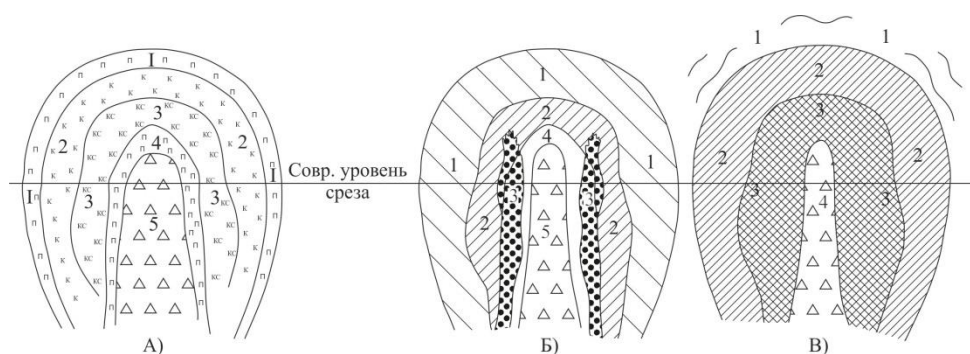


Рисунок 22. Зональность метасоматитов, рудной минерализации и положение уровня среза на месторождении Бадис. Составлено с использованием модели Ж.Д. Ловеллоа и Ж.М. Гилберта (1970)

А) Схема гидротермально изменённых пород: 1 — пропилиты; 2 — калиевые метасоматиты; 3 — кварц-серицитовые метасоматиты; 4 — пропилиты; 5 — эксплозивные брекчии. Б) Схема зональности минерализации: 1 — периферийная зона: халькопирит-сфалерит-галенит-золото-серебро; пирита 2 %; 2 — пиритовая зона: пирита 10 %, халькопирита 0,1–3 %, молибденита следы; 3 — зона «рядовых» руд: халькопирита 1–3 %, молибденита 0,03–0,1 %; 4 — зона «бедных» руд; 5 — брекчии с вкрапленностью пирита, халькопирита и молибденита в обломках. В) Схема расположения типов оруденения: 1 — зона строжневых жил; 2 — прожилково-жильная зона; 3 — штокверковая зона; 4 — зона эксплозивных брекчий

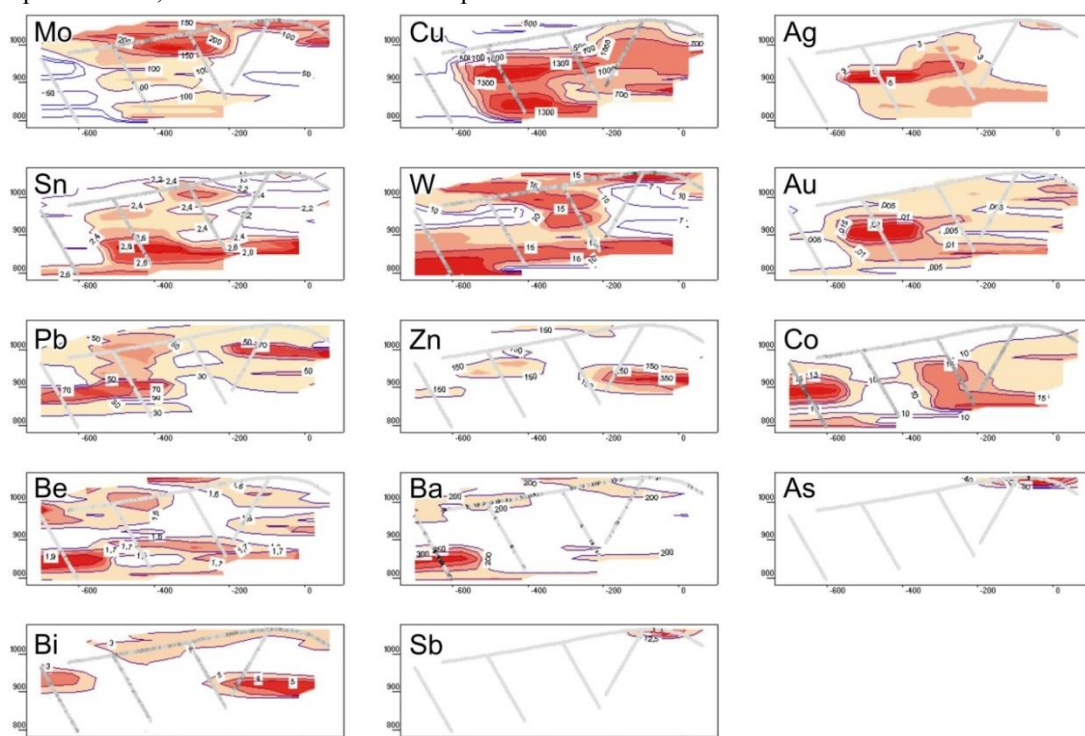


Рисунок 23. Первичные геохимические ореолы (г/т), западный фланг месторождения: продольный разрез в направлении ЮЗ-СВ, кан. № 1 скв. №№ 1–4

Горизонт №1 (>1050 м)

As_{2,1}(173) Ag_{1,6}(288) Au_{1,5}(150) Sb_{1,4}(147) Mo_{1,3}(89);

Горизонт №2 (1050–1000 м)

Zr_{1,7}(108) Cu_{1,6}(70) Pb_{1,5}(147) Bi_{1,4}(67) W_{1,4}(69) Ba_{1,3}(51) Ag_{1,3}(51) Ni_{1,3}(55) Mo_{1,2}(74);

Горизонт №3 (1000–950 м)

Pb_{2,3}(179) Ni_{1,8}(103) Au_{1,7}(120) Zr_{1,5}(119) Ag_{1,4}(58) Zn_{1,3}(93) Mo_{1,2}(115);

Горизонт №4 (950–900 м)

Zr_{2,3}(112) Au_{1,8}(218) Pb_{1,7}(189) W_{1,4}(83) Mo_{1,4}(98) Cu_{1,3}(87);

Горизонт №5 (900–850 м)

Zr_{2,7}(130) Pb_{2,2}(395) Au_{1,7}(110) Mo_{1,5}(162) Ni_{1,5}(69) W_{1,4}(81) Ba_{1,4}(52) Sn_{1,2}(43) Zn_{1,2}(57);

Горизонт №6 (<850 м)

Mo_{2,2}(172) Cu_{2,1}(85) Au_{2,0}(100) Pb_{1,6}(209) Ba_{1,6}(52) Zr_{1,6}(115) Ag_{1,5}(71) Sn_{1,3}(40).

Интересно поведение молибдена. Если до третьего горизонта роста его концентрации не отмечается, то, начиная с четвертого горизонта, она начинает увеличиваться, достигая максимума на шестом горизонте. Это даёт основание полагать, что при разбуривании глубин в этой части месторождения следует ожидать встречи продуктивной молибденовой минерализации. В целом же получен следующий геохимический рудно-формационный ряд (индекс — коэффициенты концентрации относительно медианы выборки, в скобках — значения коэффициентов вариации в %): Pb_{2,7}(327) Mo_{2,5}(405) Cu_{1,9}(136) Sb_{1,7}(316) Bi_{1,5}(201) Zn_{1,5}(211) Cd_{1,5}(135) W_{1,4}(92). Обращает внимание максимальный коэффициент вариации Mo, что свидетельствует об интенсивном перераспределении вещества, типичном при масштабных рудоконцентрациях. Определён также ранжированный ряд элементов относительно их кларков в гранитах: Mo_{94,5} Ag_{60,6} Sb_{41,3} Cu_{38,5} Cd_{29,7} As_{27,4} Bi_{22,7} Cr_{11,4} Co_{7,1} W_{6,2} Ni_{4,6} Pb_{4,2} Zn_{4,0} Ti_{1,7} V_{1,7}. Он также показывает, что оруденение может быть отнесено к медно-молибденовой (по В.Т. Покалову) рудной формации.

Основу разномасштабного прогнозирования составляют модели рудных объектов, описываемые набором признаков (критериев) разной информативности. Такой подход применён и автором. Геолого-структурные и минералого-геохимические характеристики составили фактографическую основу прогностической модели. Мерой информативности признака выступала его связь с оруденением в баллах: 3 — высокоинформативные; 2 — среднеинформативные; 1 — малоинформативные. Использовано более 30 признаков от региональных до локальных. Схематически модель представлена на Рисунке 24.

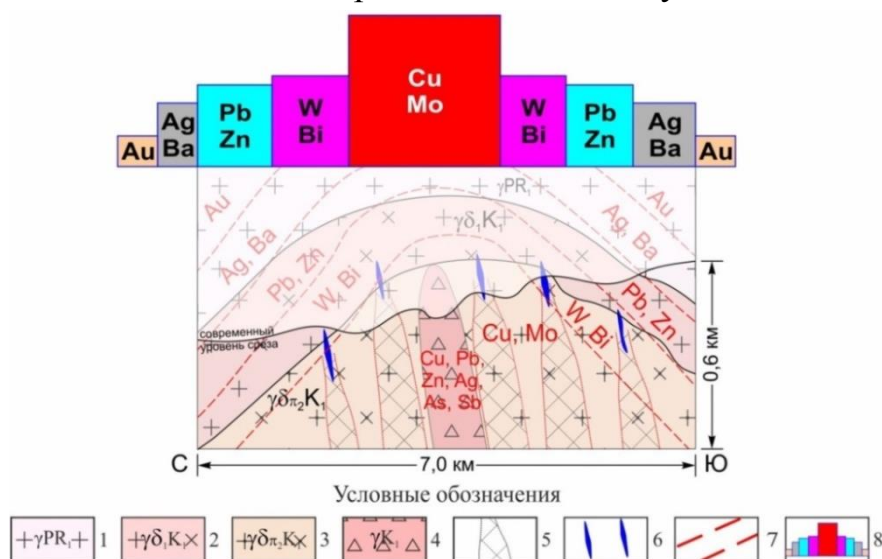


Рисунок 24. Схематическая прогностическая модель месторождения Бадис

1 — раннепротерозойские субщелочные граниты; 2 — гранодиориты первой фазы раннемелового комплекса; 3 — гранодиорит-порфиры второй фазы раннемелового комплекса; 4 — взрывчатые брекчии; 5 — зоны штокерского окварцевания; 6 — зоны прожилково-жильного окварцевания; 7 — геохимические ореолы; 8 — обобщенная гистограмма сумм коэффициентов концентрации химических элементов во вторичных ореолах

Бальные характеристики признаков дали возможность осуществить оценку с использованием аддитивного показателя перспективности (представляющего собой сумму баллов) и сравнить объект с месторождениями аналогами — Бугдаинским, Жирекенским и Сорским. Рассчитанный показатель перспективности месторождения Бадис вплотную приближается к эталонам и равен 95. Для слабородоносных объектов он обычно на 10–15 баллов ниже.

Для подтверждения позитивных прогнозов, автором, участвовавшим в апробации ресурсов, ретроспективно рассмотрена история прогнозных оценок различных лет. С учётом их, а также исходя из размаха рудной колонны, установлены следующие параметры прогнозных ресурсов месторождения: Мо — 410 тыс. т при содержании 0,025%; Си — 538 тыс. т при содержании 0,044%; Re — 78 т при содержании 35,5 г/т в молибденовом концентрате, что позволяет отнести его к разряду потенциально крупных объектов. Повышает значимость объекта его золотоносность, обусловленная тем, что полиметаллическая золотоносная ассоциация, отлагаясь позже молибденовой, заняла более высокие гипсометрические уровни, проникнув наиболее далеко вверх и подверглась в центре и на периферии различному эрозионному срезу, что дало основание оценить прогнозные ресурсы попутного золота в 10–15 тонн. По геолого-экономической оценке суммарная извлекаемая стоимость всех 4-х полезных компонентов составила около 10 млрд \$. При этом на молибден приходится 60 % от этой суммы, 30 % приходится на медь и 10 % на золото и рений. Такова прогнозно-ресурсная ситуация по рассматриваемому объекту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, целесообразно изложить последовательность структурных, рудно-магматических и метасоматических событий, приведших к формированию месторождения Бадис:

1. Допорфировый (рудоподготовительный) этап.

Заложение в зоне динамического влияния Станового разлома во время позднедокембрийской активизации первичного структурного каркаса территории. Здесь, в Становой зоне, в условиях правостороннего всбросо-сдвига возникли внутрисдвиговые и присдвиговые дизъюнктивы сжатия-растяжения, обеспечивающие формирование бластомилонитов и гранит-порфировых даек северо-восточного простираия. Проявившийся в это время динамометаморфизм и диафторез приводили к перераспределению элементов, формированию надфоновых ореолов и первоначальной рудоконцентрации. Древние толщи можно считать одним из потенциальных источников молибдена, в которых в ходе метаморфизма шло его первичное накопление.

2. Порфировый этап.

Тектонические движения в зоне Станового глубинного разлома во время мезозойской активизации проявлялись унаследовано и приводили к подновлению ранее возникших структур. Область его пересечения с грабенообразным Таксакандинским разломом северо-западного простираия, будучи наиболее проницаемой зоной, явилась местом внедрения Бадисского порфирового штока. Определив геотектоническую позицию месторождения. Шток развивался как

многофазный концентрически-зональный диапир и динамически воздействовал на ослабленную разломами кровлю, окончательно формируя её трещинный рудовмещающий каркас. При этом важная роль принадлежала ранее существовавшим тектоническим зонам северо-восточной ориентировки, которые испытывали подновление, наращивание и последующее раскрытие с заполнением кварцево-рудным веществом. Синпорфировое молибденовое оруденение ассоциирует с гранодиорит-порфирами второй фазы штока. С их внедрением связано образование ореола биотит-калишпат-кварцевых метасоматитов и отложение в жильно-прожилковых зонах главной массы молибдена.

3. Постпорфировый (эксплозивный) этап.

Продолжавшееся развитие рудно-магматической системы выразилось в росте флюидонасыщенности магмы, и телескопированном внедрении в высокие горизонты трубки эксплозивных брекчий, с которой ассоциируют ореолы аргиллизитов, серицит-кварцевых метасоматитов и золотосодержащая сульфидно-полиметаллическая минерализация. Завершается этап образованием радиально-концентрической системы даек, явившейся очевидно результатом давления снизу. Денудация рудно-магматической системы вскрыла блоки с надрудным, верхнерудным, и среднерудным уровнем эрозионного среза. Большая её часть сохранилась.

Таким образом, месторождение Бадис принадлежит к медно-молибденовой рудной формации и входит в семейство золотосодержащих медно-молибден-порфировых месторождений. Оно представляется аналогом, месторождений Бугдая, Жирекен, Сора и др. Его рудный потенциал может быть расширен при ведении целенаправленных геологоразведочных работ, особенно при изучении бурением до глубин порядка 600 м. Актуальность и целесообразность осуществления этого несомненна в условиях повышения мировых цен на медь, рений, золото, ожидаемого российского роста потребления молибдена, а также в связи с созданием в регионе горно-металлургического кластера.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Выдрич Д.Е., Белов С.В.** Ресурсный потенциал и промышленные перспективы молибденового месторождения Бадис // Использование и охрана природных ресурсов России. — 2018. — №4. — С. 7–16.

2. **Шашорин Б.Н., Руднев В.В., Макаров А.И., Выдрич Д.Е.** Геологическое строение и ресурсно-сырьевой потенциал металлоносных территорий Северного Сихотэ-Алиня // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 7. — С. 17–27.

3. **Шашорин Б.Н., Макаров А.И., Руднев В.В., Выдрич Д.Е.** Геолого-геофизическая модель Малмыжской рудно-магматической системы и возможности ее использования в прогнозировании (Северный Сихотэ-Алинь) // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 2. — С. 8–16.

4. **Выдрич Д.Е.** Новые данные о геологическом строении и промышленных перспективах молибденового рудопроявления Бадис (Южная Якутия) // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 6. — С. 15–21.

5. Данковцев Р.Ф., Шашорин Б.Н., **Выдрич Д.Е.** Плотностная инфраструктура недр Северо-Енисейского уран-золотоносного района и глубинные факторы минерагенического контроля // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 5. — С. 24–31.

6. Данковцев Р.Ф., Шашорин Б.Н., **Выдрич Д.Е.** Глубинные рудоформирующие энерго-магматические системы Енисейского кряжа и Байкитской антеклизы // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 3. — С. 8–16.

В других изданиях и материалах различных конференций:

7. Выдрич Д.Е. Новые представления о морфологических типах руд и стадийности минералообразования рудопроявления молибдена Бадис // XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва: Российский государственный геологоразведочный университет, 3–5 апреля, 2019 г.): в 7 т.: доклады / ред. коллегия: В.И. Лисов, В.А. Косьянов, О.С. Брюховецкий. — Т. II. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2019. — С. 53-56.

8. Выдрич Д.Е. Интерпретация аномальных геохимических полей медно-молибденового оруденения (рудное поле Бадис) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Роль геохимии в развитии МСБ ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов», 21–23 ноября 2016 г., Москва, ФГУП «ИМГРЭ». — М.: ИМГРЭ, 2016. — С. 48-49.

9. Выдрич Д.Е. Особенности молибденового рудопроявления Бадис (Южная Якутия) // Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых. Тезисы докладов шестой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов — М.: ФГУП «ВИМС», 2015. — С. 44-46.

10. Выдрич Д.Е. Геохимические особенности молибденового рудного поля Бадис // XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва: Российский государственный геологоразведочный университет, 8–10 апреля, 2015 г.): в 2 т.: доклады / ред. коллегия: В.И. Лисов, В.А. Косьянов, О.С. Брюховецкий. — Т. 1. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2015. — С. 186-187.

11. Выдрич Д.Е. Геолого-структурные особенности штокверковых месторождений молибденовой формации Восточной Сибири и Якутии (на примере Жирекенского и Бугдаинского месторождений и рудного поля Бадис) // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, 16–20 февраля 2015 г., Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ». — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. — С. 89-91.

Подписано в печать 16.03.2020 г.
Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,0
Отпечатано на ризографе.
Тираж 100. Заказ № 2

РИС «ВИМС»
119017, г. Москва, Старомонетный пер. дом 31