

На правах рукописи

Волк

Волкова Мария Михайловна

**ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ
ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО И ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНОГО
РУДООБРАЗОВАНИЯ**

**(на примере Джимидонского месторождения и
Шаухохского рудного поля Северной Осетии)**

Специальность 25.00.09 – геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого–минералогических наук**

Москва–2013

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова" и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Научные руководители: **Борисов Михаил Васильевич**,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заведующий кафедрой геохимии
геологического факультета МГУ (г. Москва)

Костицын Юрий Александрович,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент, заведующий лабораторией ГЕОХИ
РАН (г. Москва)

Официальные оппоненты: **Прокофьев Всеволод Юрьевич**,
доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник, ведущий
научный сотрудник ИГЕМ РАН (г. Москва)

Поляков Вениамин Борисович,
доктор химических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник ИЭМ
РАН (г. Черноголовка)

Ведущая организация: Российский государственный
геологоразведочный университет им.
С.Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) (г. Москва)

Защита состоится «13» декабря 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 501.002.06 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, корпус «А», геологический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27)

Автореферат разослан 11 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Киселева И.А.

Введение

Актуальность. Реконструкция условий и механизмов гидротермального рудообразования, физико-химических процессов, происходивших при формировании месторождений, относится к числу важнейших фундаментальных и прикладных проблем геохимии. В настоящее время многие проблемы гидротермального рудообразования не имеют достаточно обоснованных решений: источники рудных компонентов и флюида, формы переноса и причины отложения вещества, возраст и генетическая связь процессов рудообразования с теми или иными комплексами пород. Современные методы аналитической геохимии и новые подходы к изучению процессов (термодинамическое моделирование) позволяют добиться значительного эффекта при исследовании условий становления и развития рудообразующих систем.

Оба исследуемых объекта расположены в пределах Дигоро-Осетинской структурно-формационной и металлогенической мегазоны и можно предполагать, что процессы рудообразования на них проходили близко по времени и при однотипных источниках вещества. Жильные свинцово-цинковые месторождения Северной Осетии исследуются со времени начала их интенсивной эксплуатации в XIX веке. Описание наиболее известных из них (Садон, Згид) является классическим и входит в учебники и фундаментальные монографии (Смирнов, 1976; Рудные месторождения ..., 1978). Данные о них опубликованы в монографиях, многочисленных статьях и диссертациях: структурные условия локализации (Некрасов, 1980, 2007); зональная природа оруденения и металлогения района (Златогурская, 1960; Константинов, 1965; Геология и полезные..., 1969; Константинов и др., 2003); термобарогеохимия (Лазько и др., 1981; Ляхов и др., 1994; Грознова и др., 2006; Грознова, 2010); минералогия, геохимия и первичные ореолы (Тугаринов и др., 1975; Горжевский и др., 1987; Григорян, 1987, 1992; Трофимов, Рычков, 1979, 1988; Добровольская, 1989) и многое другое. Однако, только в работах М.В.Борисова с коллегами (1997, 1998, 2000, 2003, 2006, 2010 и др.) разрабатываются генетические модели формирования жильных гидротермальных месторождений (где месторождения Садонской группы приняты за эталонные) на основе обобщения данных предшественников, новых геохимических исследований и термодинамического моделирования. Джимидонское месторождение является единственным объектом района, на котором продолжают геологоразведочные работы, и можно отбирать материал для новых геохимических задач в подземных выработках. Поэтому данное месторождение явилось основой для дальнейшей разработки генетических проблем жильного гидротермального рудообразования при выполнении настоящей диссертации.

Золоторудные объекты Шаухохского рудного поля в геохимическом плане практически не изучены. В результате поисковых работ проведена локализация оруденения и оценка прогнозных ресурсов золота по категории P_2 – 9.4 т (Мисетов, Полквой, 2012). Важное практическое значение для поисков имеет определение возраста гидротермально-метасоматического процесса, который привел к образованию золото-сульфидного оруденения. Это позволит установить генетическую связь оруденения данного типа с эндогенными процессами, которые представлены юрским и неогеновым магматизмом. Определение возраста и построение модели процессов золото-сульфидного рудообразования явилось одной из задач диссертации.

Цель работы - определение условий рудообразования на полиметаллических и золоторудных объектах Северной Осетии на основе изучения закономерностей распределения элементов и равновесно-динамического моделирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- обобщение результатов предшествующих работ и получение новых данных о закономерностях распределения рудных и сопутствующих элементов в жильных телах полиметаллического месторождения Джими,
- определение возрастов пород, которые могли выступать в роли субстрата для мобилизации рудных компонентов при формировании месторождений Садонской группы,
- оценка источников вещественного состава жил месторождения Джими по характеру распределения РЗЭ и по данным исследования изотопного состава стронция в рудах и вмещающих породах,
- исследование методами термодинамического моделирования влияния Р-Т условий в области мобилизации и составов вмещающих пород на количественные соотношения минералов в полиметаллических рудных жилах,
- разработка методики подготовки проб для Rb-Sr анализа, и определение возраста гидротермально-метасоматического процесса, который привел к образованию золото-сульфидного оруденения Шаухохского рудного поля,
- разработка термодинамической модели процессов золото-сульфидного рудообразования в мраморизованных углистых известняках Шаухохского рудного поля.

Научная новизна работы заключается в тесном сочетании геохимических (изучение закономерностей распределения элементов в рудных телах и вмещающих породах с использованием новых методик и аппаратуры) и термодинамических (построение и анализ равновесно-динамических моделей процессов рудообразования) исследований.

Впервые для месторождений Садонской группы Rb-Sr методом установлен возраст позднеорогенного комплекса гранитного массива (полифазная гранитная формация, Белореченский и Уллукамский комплексы), который является основной рудовмещающей средой для большинства месторождений района (281 ± 7 млн. лет). Для вулканогенных пород осетинской свиты, которые также вмещают Pb-Zn оруденение, установлено время формирования - 183.1 ± 0.8 млн. лет.

Впервые для месторождений Садонского рудного района получены данные о закономерностях распределения редкоземельных элементов по разрезам через рудные жилы и во вмещающих породах. Установлено, что источником вещественного состава жильных полиметаллических руд могли являться палеозойские и докембрийские вмещающие породы при активизации гидротермально-метасоматических процессов в среднеюрское время. Этот вывод согласуется с результатами исследования изотопного состава стронция в рудных сфалеритах и вмещающих породах.

Методами термодинамического моделирования получены новые систематические данные, позволяющие связать свойства гидротермальной системы в области мобилизации рудных компонентов и в области жильного полиметаллического рудообразования. Установлены физико-химические параметры в области мобилизации рудных компонентов, при которых пирит-сфалеритовая ассоциация с преобладанием сфалерита сменяется монопиритовой (до 90%) или пирит-

сфалеритовая ассоциация с преобладанием пирита сменяется моносфалеритовой (до 70%). Такие варианты смены отмечены на месторождении Джими.

Разработана новая методика подготовки проб мраморизованных углистых известняков для анализа Rb-Sr методом и определён возраст золоторудно-метасоматических образований Шаухохского рудного поля.

Практическая значимость. Разработанная методика мягкого выщелачивания позволила Rb-Sr методом определить возраст золоторудно-метасоматических образований в мраморизованных углистых известняках Шаухохского рудного поля (157.2±4.1 млн. лет). Таким образом, формирование золотого оруденения в породах Шаухохского рудного поля связано с юрским дайковым комплексом диабаз-пикритовой формации, что может являться поисковым признаком для данного типа образований.

Фактический материал и методы исследования. Работа по теме диссертации проводилась по двум направлениям: геохимическому - изучение закономерностей распределения рудных, сопутствующих и редкоземельных элементов по разрезам через полиметаллические жилы и во вмещающих породах, определение возраста и изотопные исследования; термодинамическому - построение и анализ равновесно-динамических моделей гидротермального рудообразования.

Основой геохимических исследований послужил материал, собранный лично автором при проведении работ на месторождении Джими, территории Садонского горнорудного района и площади Шаухохского рудного поля (Северная Осетия, Россия, 2009, 2010, 2011 г.г.), а также материал из коллекции кафедры геохимии по другим месторождениям Садонского района. Большая часть аналитических определений используемых в работе, все геохронологические исследования и моделирование на ЭВМ выполнены лично автором. Содержания рудных и сопутствующих элементов в 25 рудных пробах и в 85 точках по профилям на полированных рудных разрезах-пластинах (рудная зона Бозанг, горизонты штолен 47 и 49, месторождение Джими) получены методом РФА в рентгеноспектральной лаборатории кафедры геохимии (энергодисперсионный анализатор РЛП-3, анализатор с радиоизотопным источником и частично портативный рентгено-флуоресцентный экспресс-анализатор NITON XL3t 900 с технологией GOLDD). Для всех рудных проб и пород описаны аншлифы и шлифы. Подготовка проб к анализу и определение концентраций редкоземельных элементов в 27 рудных пробах (рудные зоны Бозанг и Цагарсар) и 13 типах пород района методом ICP-MS осуществлялись на кафедре геохимии МГУ и в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН (Element-2 и Element-XR). Подготовка проб и Rb-Sr изотопные исследования проводились для более 30 образцов руд, пород и рудно-метасоматических образований в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН (многоколлекторный масс-спектрометр Triton). Методом LA ICP-MS получены U-Pb данные для более 300 зерен циркона для датировок некоторых типов пород района (ГЕОХИ РАН, Element-XR с лазерной установкой New Wave Research UP-213). Изучение ряда образцов проводилось в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ на сканирующем электронном микроскопе «Jeol JSM-6480LV» с энергодисперсионным спектрометром «INCA-Energy 350», а рентгенофазовые исследования выполнены на ДРОН-УМ1. Термодинамическое моделирование проведено с использованием пакета программ HCh и базы данных Unitherm (кафедра геохимии МГУ).

Основные защищаемые положения.

1. Возраст позднеорогенного комплекса гранитов садонского типа (полифазная гранитная формация, Белореченский и Уллукамский комплексы) составляет 281 ± 7 млн. лет. Источником вещества гранитов была зрелая континентальная кора, а исходным субстратом могли послужить породы аналогичные буронской свите. Полиметаллическое оруденение месторождения Джими не древнее возраста пород осетинской свиты 183.1 ± 0.8 млн. лет.

2. В формировании вещественного состава полиметаллических руд играют роль оба типа преобладающих пород Садонского района: палеозойские граниты (главные рудовмещающие породы на большинстве месторождений) и докембрийские кристаллические сланцы (типичные рудовмещающие породы только для Джимидонского месторождения).

3. Методами термодинамического моделирования установлено, что повышение давления или понижение температуры в области мобилизации рудных компонентов приводит к смене последовательности отложения сульфидов и определяет условия проявления монопиритовых и моносфалеритовых образований, что характерно для реальных руд. Установлена зависимость изменения общей продуктивности гидротермальной системы (по Zn, Pb, Cu) при росте давления и температуры.

4. Применение методики мягкого выщелачивания позволило Rb-Sr методом определить возраст золоторудно-метасоматических образований в мраморизованных углистых известняках Шаухохского рудного поля - 157.2 ± 4.1 млн. лет. Формирование золотого оруденения по времени совпадает с юрским дайковым комплексом диабаз-пикритовой формации и, вероятно, генетически с ним связано.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (96 наименований) и приложений. Общий объем – 179 страниц, включая 99 рисунков, 29 таблиц.

Публикации и апробация работы. Основные положения диссертации отражены в 14 опубликованных работах, в том числе в 3 статьях, две из которых в журналах рекомендованных ВАК (Вестник московского университета, 2011; Геохимия, 2014 (в печати)). Результаты исследований обсуждались и докладывались на российских и международных совещаниях и семинарах: VIII, X и XI Международных конференциях «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2007, 2011, 2013), Российской конференции «Уральская минералогическая школа - 2008» (Екатеринбург, 2008), Ежегодном семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (Москва, 2008), Российской конференции «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых и студентов» (Москва, 2009), XVI Российском совещании по экспериментальной минералогии (Черноголовка, 2010), Всероссийской конференции «Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования» (Москва, 2010), Пятой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2010), Russian-Swiss Seminar «Methods for modelling of geochemical processes: algorithms, data prediction, experimental validation, and relevant applications» (Moscow, 2011), V Российской конференции по изотопной геохронологии (Москва, 2012), Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Науки о Земле. Современное состояние» (Хакасия, 2013), IX Международной школе наук о Земле им. Л.Л. Перчука (Одесса, 2013).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научным руководителям М.В. Борисову и Ю.А. Костицыну за всестороннюю помощь, внимание и поддержку. За ценные советы и помощь в освоении элементного анализа методом ICP-MS автор признателен Д.А. Бычкову и Я.В. Бычковой. При выполнении U-Pb исследований в ГЕОХИ РАН неоценимую помощь оказала М.О. Аносова. Автор благодарен Р.А. Митояну за помощь в освоении рентгенофлуоресцентного анализа, Н.Н. Кривицкой за ценные советы при работе с аншлифами, Е.В. Коптеву-Дворникову за помощь в описании шлифов. Автор признателен В.О. Япаскурту за проведение микрорентгеноспектральных исследований и Д.А. Ксенофонтову за проведение рентгенофазового анализа. За помощь в проведении полевых работ автор выражает благодарность В.А.Бугулиеву, А.П. Полквому, А.В. Мисетову. Автор признателен всем сотрудникам кафедры геохимии, чьи доброе отношение и конструктивная критика способствовали написанию работы.

Глава 1. Геолого-геохимическая характеристика объектов исследования и постановка задач работы

Садонский рудный район расположен на северном склоне Большого Кавказа в пределах Дигоро-Осетинского горст-антиклинального поднятия и протягивается на 70-80 км с востока на запад. В его пределах размещается ряд Pb-Zn месторождений (Садон, Згид, Архон, Холст, Джими), составляющих наиболее продуктивную часть полиметаллического пояса Северного Кавказа.

Западная и центральная части Садонского рудного пояса пространственно совпадают с Садоно-Унальским горст-антиклинорием, который характеризуется двухъярусным строением. Нижний ярус сложен гранитами (PZ₃) и кристаллическими сланцами (буронская свита, PR₃-PZ₁), которые являются древнейшими образованиями района. Палеозойские граниты фундамента вмещают главные месторождения рудного пояса. Расположенный выше структурный ярус представлен комплексом вулканогенных (осетинская свита, J₁) и терригенных пород (J₁-J₂) (Некрасов, 1980).

Термобаргеохимические данные по месторождениям района (Лазько и др., 1981; Ляхов и др., 1994) дают представление о пределах изменчивости параметров гидротермальной системы: по температуре 415-65°C, по давлению 2.3-0.11 кбар. Градиенты по восстановлению жильных тел могли достигать 35-40°C и 250 бар на 100 м. Продуктивная кварц-галенит-сфалеритовая ассоциация образуется в диапазоне температур 345-120°C. Минералообразующие гидротермальные растворы имели хлоридно-карбонатный состав (доля хлоридов более 50%). Суммарная концентрация солей обычно составляет первые проценты (и не превышает 20%) условного NaCl.

Вероятным источником рудных компонентов гидротермальных жильных полиметаллических месторождений Садонского района являлись граниты садонского типа (полифазная гранитная формация, Белореченский и Уллукамский комплексы, PZ₃), которые вмещают основную часть рудных жил. Впервые такой вывод был сделан в работе Тугаринова А.И. с коллегами (1975) на основании данных по изотопии свинца. Непосредственным источником свинца послужили палеозойские граниты, сформировавшиеся в результате переплавления древнейших пород докембрия-раннего палеозоя, а процесс извлечения свинца связан с метасоматической переработкой полевошпатовой части гранитов в средней юре (Тугаринов и др., 1975). Косвенным подтверждением этого вывода являются исследования тонкой структуры распределения рудных элементов в первичных ореолах на разных горизонтах

месторождений Холст, Архон, Згид, Джими (Борисов, 1997, 2000), а также результаты термодинамического моделирования процессов мобилизации и рудообразования, полученные для этих объектов (Борисов, Шваров, 1996, 1998; Борисов, 2000; Borisov, 2003; Борисов и др., 2006).

Для этих месторождений предложена геологическая модель гидротермальной системы (Борисов и др., 2006). Основные ее элементы сводятся к следующему (рис. 1). В пределах Садоно-Унальского глубинного сброса в дорудное время происходила циркуляция минерализованных углекисло-хлоридных вод (возможно, генетически связанных с юрским солеродным бассейном). Внедрение в средней юре даек и штоков субвулканических и гипабиссальных пород и интенсивные тектонические подвижки инициируют гидротермальный процесс: интрузии создают необходимый источник тепла, закладываются рудоконтролирующие трещины скола и отрыва северо-западного и северо-восточного простирания, образуется зона разуплотнения пород.

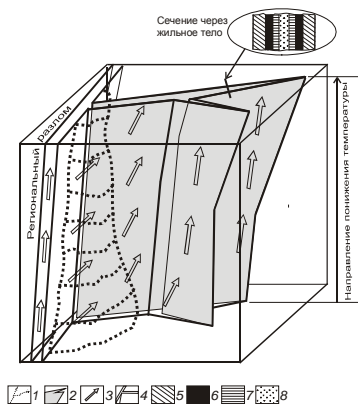


Рис. 1. Обобщенная схема гидротермальной системы.

1 - область мобилизации рудных компонентов; 2 - контакт вмещающих пород и трещинного канала, в котором формируется рудная жила; 3 - направление фильтрации гидротермального раствора (из регионального разлома через область мобилизации в трещинный канал); 4 - сочленение глубинного разлома и трещинного проводника; 5-8 идеализированная минеральная зональность жилы на уровне продуктивного Pb-Zn оруденения: 5 - ранняя кварц+пирит+сфалерит±галенитовая ассоциация; 6 - кварц+сфалерит±пирит±галенит±халькопиритовая ассоциация (часто «слои» практически мономинерального сфалерита); 7 - кварц+галенит±халькопиритовая ассоциация; 8 - кварцевое ядро жилы (Борисов и др., 2006).

Нагретые растворы из Садоно-Унальского сброса фильтруются через зону разуплотнения в палеозойских гранитах и вступают в реакцию с ними. Формируется область мобилизации различных компонентов, которая приурочена к зоне сочленения глубинного разлома и оперяющих трещин. Рудоносные растворы из области мобилизации движутся вверх по рудоконтролирующим трещинам. Постепенное охлаждение рудоносных растворов за счет обмена теплом с более холодными вмещающими породами и потери тепла при локальной гетерогенизации приводят к формированию полиметаллических жил выполнения и околожильных ореолов.

Джимидонское месторождение располагается на площади Садоно-Унальского рудного поля в пределах одноименного поднятия. Оно включает в себя три рудных зоны северо-восточного простирания: Восточно-Джимидонская, Цагарсар и Бозанг (Грознова и др., 2006). Рудные зоны месторождения Джими вскрыты серией штолен: № 8 (1760 м абс.высота), № 3 (1680 м), № 47 (1640 м), № 45 (1560 м), № 49 (1520 м) и №44 (1230 м). Штольни 8, 45 и 44 пройдены давно и недоступны уже более 15 лет.

Наиболее распространенными минералами месторождения Джими, как и в других месторождениях Садоно-Унальского района, являются сфалерит, пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит. В сфалеритах с глубиной отмечается закономерное увеличение содержания железа и уменьшение ртути, а в галенитах – возрастание

содержания висмута и сокращение сурьмы и серебра (Ляхов, Поздеев, 1983). В подчиненном количестве в рудах присутствуют марказит, магнетит, теннантит, тетраэдрит, висмутин и самородные висмут и мышьяк. Нерудные минералы представлены кварцем и карбонатами разного состава, в том числе Mn-содержащими, баритом, хлоритом, серицитом, полевыми шпатами (Грознова и др., 2006).

Свинцово-цинковые руды месторождения Джими образовались в результате многостадийного процесса. Выделяют четыре стадии (Бритаев и др., 1985): пирит-кварцевую (раннюю), пирит-сфалеритовую, кварц-галенит-сфалеритовую и карбонатную.

В отличие от большинства месторождений района (Згид, Садон, Архон и др.) на этом объекте основной рудовмещающей средой являются метаморфические породы буронской свиты. Их подстилают граниты садонского типа, которые контактируют с ними по пологим тектоническим нарушениям. В меньшей степени рудовмещающей средой являются небольшой шток гранит-порфира, не имеющий выхода на поверхность, и вулканогенно-терригенные образования верхнего структурного этажа (Давыдов и др., 1988). Данные о времени формирования пород, вмещающих месторождения Садонского рудного района, в основном, получены при сопоставлении с аналогичными породами региона. Практически все определения возраста гранитов садонского типа и сланцев буронской свиты сделаны в 50-70х годах прошлого века К-Аг методом по породам в целом (Лебедев, 1985, Давыдов, 1988), что вызывает сомнение в правильности результатов. Предположительный возраст гранитов садонского типа оценивают как верхний палеозой, а сланцев буронской свиты – нижний палеозой-докембрий. Единственное определение возраста для гранит-порфира сделано К-Аг методом - 143 ± 9 млн. лет (Давыдов и др., 1988). По палеонтологическим данным возраст вулканогенных пород осетинской свиты определяется как нижняя-средняя юра, а песчаников мизурской свиты – как плинсбахский ярус нижней юры.

Шаухохское рудное поле расположено в 20 км на ЮВ от Джимидонского месторождения в пределах Адайхох-Шаухох-Дарьяльской структурно-формационной зоны Северной Осетии (верховья реки Мидаграбиндон, абс. высоты 2000-2400 м). В результате поисковых работ по Шаухохскому рудному полю проведена локализация оруденения и оценка прогнозных ресурсов золота по категории P_2 – 9.4 т при бортовом содержании 0.9 г/т (Мисегов, Полквой, 2012). Золоторудные объекты Шаухохского рудного поля в геохимическом плане практически не изучены. Выявленное (ОАО “Севосгеологоразведка”) золотое оруденение на участках Кабутау и Ларцидон представлено золото-сульфидно-углеродистым семейством формаций. Главная роль в локализации оруденения принадлежит рудовмещающей толще пород углеродисто-терригенной формации, которые представлены конгломератами и гравелитами баддонской свиты (C_3), метапесчаниками и сланцами мидаграбинской свиты (C_3-P_1), мраморизованными углистыми мраморами гизельдонской свиты (P_{1-2}), кварцитопесчаниками кистинской свиты (J_1). Золото-сульфидное оруденение генетически может быть связано с какими-либо из разновозрастных магматических образований, известных в регионе. В пределах или вблизи Шаухохского рудного поля известны обнажения пород дайкового комплекса диабаз-пикритовой формации (J_2), субвулканической фации Ларцикомского штока (андезито-дациты и др., предположительно N_2), многочисленные выходы Джимарского полифазного массива гранитоидов плиоценового возраста (Лебедев и др., 2009).

На основании приведенных литературных данных по геолого-геохимической характеристике месторождений района в конце главы формулируются основные задачи новых исследований, на решение которых направлена настоящая работа.

Глава 2. Методы исследования полиметаллических жил и вмещающих пород Джимидонского месторождения, золото-сульфидного оруденения Шаухохского рудного поля

В главе описаны места отбора и привязки для всех проб, изучение которых выполнено в диссертации, а также методики подготовки проб к анализу, параметры измерений и метрологические характеристики использованных методов исследования.

Опробование рудных тел и пород. Основной полевой методикой пробоотбора по жильным рудным телам является детальное сплошное опробование. В горных выработках отбирается сплошная полоса ориентированных монолитов жилы (от контакта до контакта). Длина такого разреза в зависимости от мощности жилы может составлять от 0.15 м до 1.5 м или более. Монолиты распиливаются на пластины-спилы и отдельные пробы: шаг опробования 2-5 см, масса проб до 3-4.5 кг. Пробоподготовка завершается дроблением, квартованием и истиранием. Далее пробы анализируются на широкий круг элементов. В ходе полевых работ для проведения настоящих исследований был отобран материал по жилам рудной зоны Бозанг (шт. 47 и 49, апофизы Восточная и Западная-2, а также рудное тело Основное).

Для проведения геохронологических исследований были отобраны пробы пород, являющихся главными рудовмещающими для месторождений Садонского рудного поля. Для исследования процессов образования золото-сульфидной минерализации пород Шаухохского рудного поля был отобран материал, представленный породами, в которых локализовано оруденение.

Методы исследования. В работе использованы рентгеноспектральный анализ (энергодисперсионный анализатор РЛП-3, анализатор с радиоизотопным источником и частично портативный рентгено-флуоресцентный экспресс-анализатор NITON XL3t 900 с технологией GOLDD), анализ методом ICP-MS (Element-2 и Element-XR), Rb-Sr изотопные исследования (Triton), U-Pb изотопные исследования (Element-XR, лазер New Wave Research UP-213), микронзондовые исследования «Jeol JSM-6480LV» с энергодисперсионным спектрометром «INCA-Energy 350», рентгенофазовые исследования (ДРОН-УМ1). Термодинамическое моделирование проведено с использованием пакета программ NCh и базы данных Unitherm.

Глава 3. Геохимическая характеристика и распределение элементов в исследованных жильных телах и вмещающих породах Джимидонского месторождения

Вещественный состав руд, распределение рудных и сопутствующих элементов в полиметаллических жилах и возраст рудообразования.

Для всех исследованных разрезов по рудным жилам определены содержания Fe, Zn, Pb, Mn, Cu, As, Cd, (Sb, Ag, Ca) и описаны полированные шлифы. Методом РФА было проанализировано 25 проб по апофизам Западная-2, Восточная и рудному телу Основному (рудная зона Бозанг). Элементы, как правило, распределены по сечению жилы неравномерно. Средние содержания проанализированных элементов по жильным телам рудной зоны Бозанг можно представить в виде убывающей последовательности (в скобках указаны минимальные и максимальные значения

содержаний по интервалам опробования): Fe 18.17 (5.52-28.56%), Zn 10.61 (2.81-23.44%), Pb 3.40 (0.28-11.10%), Mn 0.22 (0.07-0.43%), Cu 0.36 (0.14-0.74%), Cd 0.028 (0.009-0.080%), As 0.32 (0.04-1.26%), Sb 0.011 (0.006-0.015%), Ag 0.002 (0.001-0.005%). Для жил рудной зоны Бозанг характерны высокие концентрации цинка. В отдельных рудных телах валовое содержание Zn достигает 20 мас.% (или сфалерита $\geq 30\%$), а локальные концентрации цинка в поперечных сечениях жил достигают 40 мас.% и более (ZnS до 60-70%).

По данным рудной микроскопии при формировании рудных тел месторождения Джими на ранних стадиях происходила кристаллизация кварца и пирита. На ранней стадии также происходило отложение сфалерита с эмульсионной вкрапленностью халькопирита (сфалерит первой генерации), но основная его масса кристаллизовалась позднее. На следующей стадии происходило отложение менее железистого сфалерита второй генерации и галенита. На заключительной стадии формирования выделялся карбонат.

По характеру распределения валовых содержаний Fe и Zn все рудные тела и апофизы месторождения Джими подразделяются на три группы. Для первой группы характерны высокие валовые содержания Fe и низкие содержания Zn. Для второй группы характерны более высокие валовые содержания Zn и низкие содержания Fe. Для третьей группы характерны соизмеримые валовые содержания Zn и Fe.

По результатам изучения закономерностей распределения элементов, исследования макро- и микросостава руд, а также на основании сопоставления с литературными данными и предшествующими работами была предложена вероятная последовательность процессов рудообразования.

Этап 1. Отложение кварц-пирит-сфалерит-галенитовой ассоциации, в которой преобладающим минералом является пирит при средних содержаниях сфалерита и низких галенита. Для части рудных тел формирование на этом завершается. Поэтому для тел первой группы характерны высокие содержания Fe и относительно низкие Zn и Pb.

Этап 2. Тектонические подвижки приводят к дополнительному раскрытию части уже сформированных сульфидных тел пиритовой стадии и формированию новых, опережающих основную жилу, трещин. Происходит отложение кварц-сфалеритовой ассоциации минералов, причем в сульфидных телах первого этапа образуется наложение сфалеритовой минерализации на раннюю пиритовую. Такое наложение отмечается при макро- и микроскопических наблюдениях. Формирование сфалеритового заполнения рудных тел второй группы происходит, в основном, на этом этапе рудообразования, поэтому в них фиксируются высокие валовые содержания Zn и низкие Fe.

Этап 3. Тектоническая активизация вызывает дополнительное раскрытие уже частично сформированных жил. Отлагаются минералы кварц-галенитовой с халькопиритом ассоциации. В рудных телах второй группы отложение галенита практически не происходит.

Этап 4. Заключительная карбонатная стадия. Отлагается кальцит в виде прожилков (мощностью до нескольких сантиметров), пересекающих сульфидные тела.

По данным о неравномерном распределении элементов по разрезам рудных тел можно говорить о переменном характере открытия трещинных каналов при развитии процессов гидротермального рудообразования. Так, в одной и той же жиле на различных её участках могли реализоваться минеральные ассоциации всех стадий

рудообразования или только их части. Кроме того, на Джими и других месторождениях района установлены межстадийные тектонические подвижки, которые сопровождались скачкообразным ростом температур и формированием новых или дополнительных раскрытий старых трещинных каналов. Эти дополнительные раскрытия произвольным образом разрывали уже частично сформированные рудные тела предшествующих стадий. Поэтому, например, сфалеритовое рудоотложение могло происходить как в центральных частях ранних жил с преобладанием пирита, так и по контактам.

В настоящей работе были сделаны попытки определить время формирования полиметаллического оруденения месторождения Джими. Для этого были проведены Rb-Sr исследования сфалеритов и околожильных метасоматитов. В обоих случаях система оказалась нарушенной, и время формирования оруденения определить не удалось. О времени образования месторождений Садонского рудного поля можно судить лишь по косвенным данным. Полиметаллические месторождения локализованы в породах разного возраста и состава, включая вулканогенно-осадочную толщу нижней-средней юры. Руды встречаются вплоть до низов байоса. Это ограничивает нижний предел возраста месторождений. Изотопные U-Pb исследования (Тугаринов, 1978; Тугаринов, 1983) позволили ограничить верхний предел формирования месторождений рубежом оксфорд-титон верхней юры.

Вещественный состав и возраст вмещающих оруденение пород

Несмотря на довольно длительную историю исследования месторождений Садонского рудного пояса, ещё остаются открытыми вопросы о времени формирования различных комплексов пород и об источниках вещества.

В строении месторождений Садонского рудного поля принимают участие различные комплексы пород. Рудовмещающими для большинства месторождений служат граниты Белореченского и Уллукамского комплексов, которые на современных картах объединяются в единую верхнепалеозойскую полифазную гранитную формацию (Прогнозно-металлогеническая карта Северной Осетии на золото, 2011). Часто граниты этих двух комплексов объединяют под названием гранитов садонских типа. Месторождение Джими, в отличие от других месторождений района, главным образом, локализовано в метаморфических породах буронской свиты, а садонские граниты имеют лишь подчиненное значение. В меньшей степени рудовмещающей средой являются вулканогенные породы осетинской свиты, а также небольшой шток гранит-порфира, не имеющий выхода на поверхность. Данные о времени формирования пород, вмещающих месторождения Садонского рудного района, в основном, получены в результате полевых наблюдений и сопоставления с аналогичными породами региона. В литературе имеются данные K-Ar определений возраста пород буронской свиты и садонских гранитов (Лебедько, 1985, Давыдов, 1988), но разброс значений довольно большой. Предположительный возраст гранитов садонского типа оценивают как верхний палеозой, а сланцев буронской свиты – нижний палеозой-докембрий.

В данном разделе диссертации для основных типов рудовмещающих пород приведены данные силикатного анализа, а также данные микроскопических исследований.

Граниты садонского типа. Раннеорогенный Белореченский комплекс представлен крупно-среднезернистыми гранитоидами. Из слюд преобладает мусковит,

часто развит хлорит. Средне-мелкозернистые граниты Уллукамского комплекса имеют секущие контакты по отношению к раннеорогенным гранитам.

Одной из задач было определение времени формирования гранитов Белореченского и Уллукамского комплексов.

Имеющиеся в нашей коллекции образцы гранитов садонского типа были детально изучены. В результате проведенных исследований пробы были разделены на три группы. Первая группа – крупнозернистые граниты, относящиеся к Белореченскому комплексу. Вторая группа - среднезернистые граниты, отвечающие позднеорогенному Уллукамскому комплексу. Третью группу составили промежуточные граниты – переходный тип от крупно- к среднезернистым. Для геохронологических Rb-Sr исследований были взяты 5 проб гранитов (порода в целом), отнесенных во вторую группу, поскольку они менее всего были затронуты вторичными изменениями.

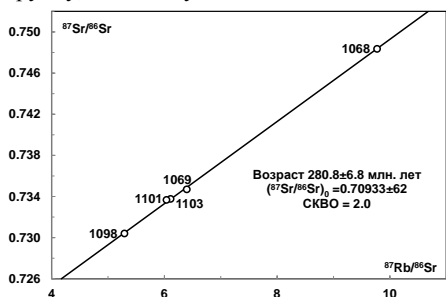


Рис. 2. Rb-Sr диаграмма для 5 проб гранитов (порода в целом), отнесенных по результатам микроскопических исследований к Уллукамскому комплексу.

Точки всех 5 образцов пород в целом в изохронных координатах дают линию, наклон которой отвечает возрасту 281 ± 7 млн. лет, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.70933 \pm 62$, СКВО=2 (рис. 2). Полученная зависимость является изохронной. Таким образом, результаты Rb-Sr датирования отражают нижнепермский возраст позднеорогенного комплекса садонских гранитов (полифазная гранитная формация, Белореченский и Уллукамский комплексы), что не противоречит геологическим наблюдениям, согласно которым возраст гранитов оценивался как PZ₃.

Полученное значение времени формирования гранитов позволило подойти к решению проблемы источника вещества гранитов. Для этого в настоящей работе были проведены исследования изотопного состава стронция садонских гранитов и метаморфитов буронской свиты.

На рис. 3 показаны начальные изотопные отношения стронция в садонских гранитах и изотопные отношения стронция в кристаллических и слюдяных сланцах буронской свиты, рассчитанные на время образования гранитов - 281 млн. лет. Начальные изотопные отношения стронция в гранитах лежат в интервале 0.7074 – 0.7119. Довольно высокие значения изотопных отношений стронция указывают на то, что источником вещества гранитов послужила зрелая континентальная кора. Широкий диапазон вариаций начального изотопного состава свидетельствует о гетерогенности источника, что также характерно для коровых пород. Изотопное отношение стронция в кристаллических и слюдяных сланцах буронской свиты, рассчитанное на время формирования гранитов, составляло 0.7069 и 0.7353 соответственно. Такое изотопное отношение стронция в слюдяном сланце обусловлено высоким Rb/Sr отношением в нем, что привело к накоплению большой радиогенной добавки ко времени формирования гранитов.

Для кристаллических и слюдяных сланцев и трёх проб гранитов по результатам силикатного анализа составов были рассчитаны коэффициенты глинозёмистости – ASI - $(\text{Al}/(\text{K}+\text{Na}+\text{Ca}))_{\text{mol}}$. Значения ASI гранитов довольно высокие и лежат в относительно

узком диапазоне от 1.20 до 1.35. Это позволяет утверждать, что субстратом, послужившим для формирования гранитов, было метаосадочное вещество, материал которого прошёл стадию выветривания. Такие значения ASI позволяют говорить о том, что садонские граниты относятся к S-типу (Chappell & White, 1974). Значение ASI для образца кристаллического кварц-хлорит-эпидотового сланца составило – 0.94, а для слюдяного сланца – 1.4.

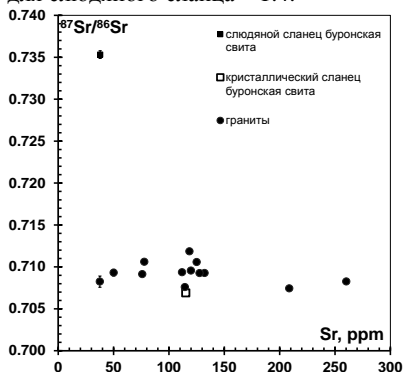


Рис. 3. Зависимость начальных изотопных отношений стронция от концентрации стронция для проб гранитов садонского типа и метаморфитов буронской свиты. осетинской свиты являются эффузивами и пирокластами магмы непостоянного химического состава.

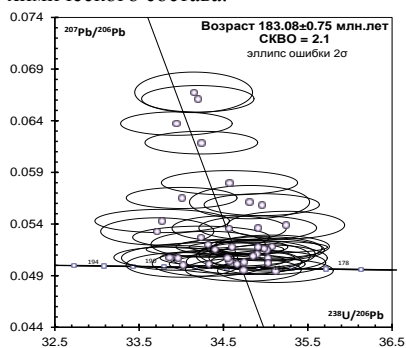


Рис. 4. Диаграмма Тера-Вассербурга, построенная по результатам исследования цирконов, выделенных из вулканогенных пород осетинской свиты.

аналитические точки, пересекает ось ординат выше самой древней точки на конкордии, в области $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.84$, что отвечает составу современного свинца. Очевидно, смещение части точек вдоль этой линии отражает примесь обыкновенного свинца в них, а не влияние какого-либо древнего события. Тем не менее, наличие примесного обыкновенного свинца в некоторых анализах вынуждает применять

Таким образом, основным источником вещества гранитов, вмещающих большинство месторождений Садонского рудного поля, послужило зрелое вещество континентальной коры. Породы, аналогичные буронской свите, могли послужить исходным субстратом для формирования гранитов. Такой вывод не противоречит данным, полученным при исследовании изотопного состава свинца (Тугаринов и др., 1975).

Породы **осетинской свиты** также являются рудовмещающими для месторождений Садонского рудного поля. Отложения осетинской свиты несогласно залегают на породах палеозойского фундамента. Вулканогенные породы

Изученные нами породы осетинской свиты представляют собой вулканы андезитового состава. По палеонтологическим данным, возраст осетинской свиты определяется как нижний-средний лейас (Панов, 1968).

Для определения возраста пород осетинской свиты были проведены U-Pb изотопные исследования цирконов. По значениям отношений $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ построена диаграмма Тера-Вассербурга (рис. 4). Эллипсами показана погрешность $\pm 2\sigma$. Часть данных на графике группируется вблизи конкордии, а несколько точек отклоняется от неё вверх по направлению к составу обыкновенного свинца. Дискордия, проведённая через все

модель с дискордией. Данные анализа по 35 зернам циркона дают значение возраста 183.1 ± 0.8 млн. лет, СКВО=2.1. Полученное значение возраста хорошо согласуется с известными геологическими данными (Панов, 1968). Поскольку вулканогенные породы осетинской свиты являются наиболее молодыми рудовмещающими породами для месторождения Джими, можно утверждать, что процесс рудообразования не древнее 183.1 ± 0.8 млн. лет.

Материалы данного раздела послужили основой для формулировки первого защищаемого положения.

Распределение редкоземельных элементов в рудах и вмещающих породах.

В настоящем исследовании сделана попытка оценить источники вещественного состава жил месторождения Джими по характеру распределения РЗЭ в рудах и вмещающих породах, данные о которых в литературе отсутствовали. Для определения РЗЭ использован метод ICP-MS (Element-XR, ГЕОХИ РАН; Element-2, МГУ). Вмещающие породы охарактеризованы 10 пробами. Граниты садонского типа (PZ₃) представлены пробами № 862, 1068, 1069. Породы буронской свиты (PR₃-PZ₁), охарактеризованы пробами № 917 – слюдяной сланец и № 919, 1065 – кристаллический сланец. Пробы № 1066, 1081 – отвечают гранит-порфиру, относящемуся к вулкано-плутонической ассоциации Ардон-Ногкауского комплекса, предположительно J₂. Проба № 918 – характеризует вулканиты осетинской свиты (J₁), а проба № 1076 соответствует андезито-дацитовой дайке (~J₂). Полиметаллические руды представлены 27 пробами, характеризующими 12 сечений рудных жил.

Суммарное содержание РЗЭ в полиметаллических жилах меньше, чем во вмещающих породах, и изменяется от 2 до 52 г/т. В породах района содержание РЗЭ достигает 213 г/т, но имеются значительные вариации.

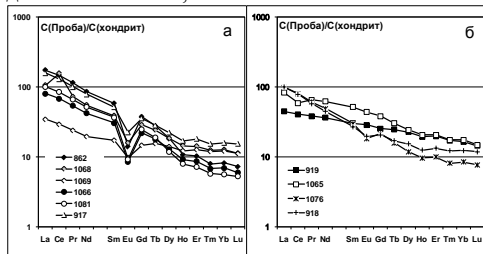


Рис. 5. Нормированные на хондрит (Palme, Jones, 2003) содержания РЗЭ во вмещающих породах месторождения Джими
а – спектры пород с максимальным проявлением европейского минимума;
б – спектры пород со слабым проявлением европейского минимума или его отсутствием.

В палеозойских гранитах сумма РЗЭ изменяется в различных пробах от 54 до 213 г/т, в породах буронской свиты максимальное суммарное содержание РЗЭ зафиксировано в слюдяном сланце – 198 г/т (№917), а в кварц-хлорит-эпидотовом (№919) и кварц-хлорит-альбитовом (№1065) сланцах только 127 и 83 г/т, соответственно. Для двух проб гранит-порфира суммы РЗЭ близки: 104 и 127 г/т, также как и для юрских вулканогенных пород и даек основного состава – 120 и 121 г/т (рис. 5).

Концентрация РЗЭ в рудах определяется содержанием минералов-носителей. Вероятно, одним из основных минералов-носителей РЗЭ в сульфидных рудах могут являться карбонаты, о присутствии которых в исследованных рудных пробах можно судить по данным рудной микроскопии и по содержанию кальция, которое изменяется от 0.01 до 6.5 и 8.7 мас.%. Положительная корреляция суммы РЗЭ от содержаний кальция установлена для 16 рудных проб (сечения II, III, IV, V, XI и XII), где,

возможно, основными минералами-носителями РЗЭ являются карбонаты (для всех 27 рудных проб такой зависимости не выявлено). С другой стороны, карбонаты могут содержать только часть РЗЭ рудной пробы и имеются другие минералы-носители, которые могут концентрировать большую часть РЗЭ. В гидротермальном процессе могут образовываться и такие Са-содержащие минералы как эпидот и актинолит, которые также могут содержать редкоземельные элементы.

По значению Eu/Eu^* рудные пробы можно разделить на три группы (рис. 6 и 7): первая - значения Eu/Eu^* менее 0.65, т.е отчетливо проявлен европиевый минимум (13 проб); вторая – значения Eu/Eu^* от 0.7 до 0.94, где европиевый минимум проявлен слабо или практически отсутствует (11 проб); третья - значения Eu/Eu^* более 1, т.е. присутствует европиевый максимум (3 пробы).

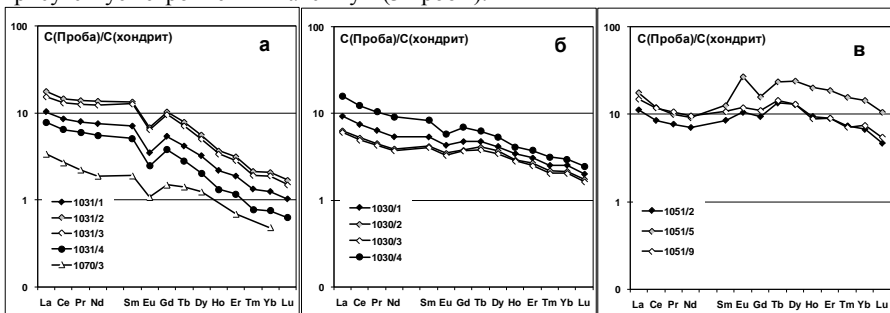


Рис. 6. Примеры трех групп спектров РЗЭ в рудных пробах месторождения Джими.

а - с максимальным проявлением европиевого минимума; спектры проб сечения IV (1031/1-1031/4), XII (1070/3); **б** - с минимальным проявлением европиевого минимума; спектры проб сечения III (1030/1 – 1030/4); **в** - с отчетливым проявлением европиевого максимума и минимальным отношением La_N/Yb_N (сечение X (1051/2, 1051/5, 1051/9))

В пределах одного разреза (сечения) перехода спектра отдельных проб из группы в группу не происходит (рис. 7), т.е. выявленное разделение является достаточно устойчивым. Пробы вмещающих пород также можно разделить на группы по значению Eu/Eu^* (рис. 6 и 8). Минимум по Eu отчетливо проявлен в трех пробах садонских гранитов ($Eu/Eu^*=0.29-0.61$), в двух пробах гранит-порфира ($Eu/Eu^*=0.3-0.32$) и в слюдяном сланце ($Eu/Eu^*=0.51$) буронской свиты (1 проба). Эти породы можно отнести к первой группе. Ко второй группе, где европиевый минимум проявлен слабо или почти отсутствует, относятся кристаллические сланцы буронской свиты и вулканогенные породы.

Наибольшее сходство с гранитом (проба №862) и гранит-порфиром (проба №1081) имеет рудная проба №1042 (сечение VII) по апофизе Западная-2. При нормировании на гранит (аналогично получается и для гранит-порфира) спектр данной пробы выполаживается, спектры практически идентичны. Для них же установлены и близкие значения La_N/Yb_N отношения: для гранитов – 17.9 и 21.2, в рудной пробе – 19.2. Вероятно, эти данные могут свидетельствовать о тесной генетической связи палеозойских гранитов, гранит-порфиров и сульфидных руд, что полностью согласуется с данными по исследованию изотопного состава свинца в галенитах руд и калиевом полевом шпате гранита (Тугаринов и др., 1975). Все исследованные рудные тела, в том числе и апофиза Западная-2, расположены на горизонтах штолен 47 и 49 только в пределах метаморфических пород буронской свиты, а палеозойские граниты

и полиметаллические жилы рудной зоны Бозанг в них отмечены только в штольне 44 (абс. высота 1230 м), т.е. более чем на 300 м ниже штольни 47 (Давыдов и др., 1988), где была отобрана проба №1042. Выходы же в подземных выработках гранит-порфиров отмечаются не менее, чем в 400-500 м южнее от штрека Северного (Давыдов и др., 1988). Таким образом, достаточно трудно допустить, что вещество гранитов могло попасть в рудную пробу.

Для спектров РЗЭ остальных рудных сечений корреляция с гранитами значительно хуже, поскольку по своим характеристикам (Eu/Eu^* и La_N/Yb_N) точки рудных проб достаточно удалены от гранитов (проб №862 и 1081).

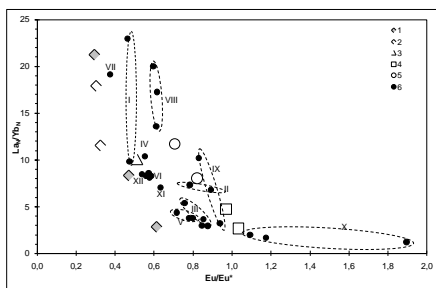


Рис. 7. Характеристики спектров РЗЭ для 27 рудных проб по 12 сечениям по жилам рудных зон Бозанг и Цагарсар (выделены пунктирными овалами с номерами от I до XII) и вмещающих пород ($Eu/Eu^* = Eu_N/\sqrt{(Sm_N \cdot Gd_N)}$). Обозначения: 1 – гранит садонского типа (пробы № 862, 1068, 1069, PZ₃); 2 – гранит-порфир (пробы № 1066, 1081, J₂); 3 – слюдяной сланец (проба № 917, PR₃-PZ₁); 4 – кристаллический сланец (пробы № 919, 1065, PR₃-PZ₁); 5 – андезито-дацитовая дайка (№ 1076, J₂) и вулканит андезитового состава (проба № 918, J₁); 6 – рудные пробы буронской свиты.

Спектры РЗЭ остальных проб, вероятно, указывают на комбинированный источник вещества, где могли принимать участие метаморфические породы буронской свиты, палеозойские и юрские граниты и, возможно, вулканогенные породы осетинской свиты.

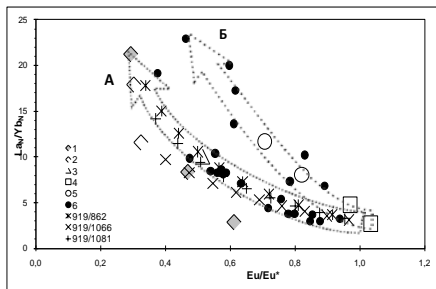


Рис. 8. Характеристики спектров РЗЭ для 24 рудных проб (без сечения X), вмещающих пород и спектров «смешения» гранит – кристаллический сланец. Обозначения: 1 – гранит садонского типа; 2 – гранит-порфир; 3 – слюдяной сланец; 4 – кристаллический сланец; 5 – андезито-дацитовая дайка и кристаллокластический туф; 6 – рудные пробы; спектры смешения: №919/№862 – «смешение» палеозойского гранита и кристаллического сланца (тренд обозначен пунктирной стрелкой А); №919/№1066 и №919/№1081 – «смешение» гранит-порфира и кристаллического сланца. Пунктирная стрелка Б – предполагаемое изменение характеристик спектров рудных проб за счет дополнительного влияния юрских вулканогенных пород.

Внести некоторую ясность в комбинированную природу части этих спектров позволяют данные представленные на рис. 8, где показаны характеристики спектров «смешения» между кристаллическим сланцем (№919) и гранитами (№862, 1066, 1081). «Смешение» устроено с шагом 10% и для каждой такой смеси рассчитаны Eu/Eu^* и La_N/Yb_N , которые нанесены на диаграмму. Видно, что 17 рудных проб, отнесенных к первой и второй группам, в этих координатах хорошо соответствуют общему тренду от кристаллического сланца к палеозойскому граниту или юрскому гранит-порфиру (стрелка А).

Можно считать, что при формировании интервалов рудных жил, описанных 17 рудными пробами, участвовали гидротермальные растворы, прошедшие через взаимодействие в разных пропорциях с палеозойскими гранитами и метаморфитами буронской свиты, которые, вероятно, и являются основными источниками РЗЭ и рудного вещества в исследуемых полиметаллических жилах. Спектры 7 рудных проб сдвинуты от тренда А в сторону более высоких отношений La_N/Yb_N или Eu/Eu^* . Можно предположить, что таким образом проявляется влияние на спектры РЗЭ рудных проб дополнительного источника компонентов, к которым относятся юрские вулканогенные породы. Возможный вариант такого влияния обозначен на рис. 8 пунктирной стрелкой Б.

Максимум по Eu ($Eu/Eu^*=1.1-1.9$) проявлен только в трех пробах одного из разрезов по рудному телу Цагарсар. Характерной чертой данного разреза является присутствие в центральной части большого количества карбонатов (до 38 мас.%) при практическом отсутствии сфалерита и галенита. Все рудное вещество в данном разрезе сосредоточено в приконтактных частях жилы. Можно предположить, что в данном случае мы имеем дело с проявлением пострудной карбонатизации и сменой режима питания, т.е. гидротермальные растворы становились более щелочными и менее восстановительными, а преобладающей формой миграции РЗЭ становились карбонатные комплексы. Подобные спектры РЗЭ, с максимумом по европию и высокой долей тяжелых РЗЭ, описаны для месторождений углекислых минеральных вод Приморья (Харитонов, 2013). Кроме того, для ряда гидротермальных месторождений установлена тенденция уменьшения содержания легких РЗЭ в поздних карбонатах по сравнению с ранними (Бортников и др., 2007).

Для подтверждения данных об источнике рудного вещества месторождения Джими, полученных при изучении распределения РЗЭ, проведено исследование изотопного состава стронция в рудных сфалеритах и во вмещающих породах. Геологические наблюдения позволяют предполагать, что процесс рудообразования происходил в средней-верхней юре (байос-оксфорд). Полученные данные дают основание считать, что возраст оруденения не древнее 183 ± 0.8 млн. лет. Для расчета начальных изотопных отношений стронция в сфалеритах и изотопных отношений стронция во вмещающих породах на время рудообразования использован возраст 165 млн. лет.

На рис. 9 видно, что начальные изотопные отношения стронция в сфалеритах лежат в интервале 0.7095-0.7152. Высокие значения изотопных отношений стронция свидетельствуют, что источником вещества сфалеритов были породы, сформированные из зрелой континентальной коры. Изотопные отношения стронция в гранитах, рассчитанные на время рудообразования (165 млн. лет), находятся в диапазоне – 0.7096-0.7358. Изотопные отношения стронция в слюдяном и

кристаллическом сланцах, также рассчитанные на время формирования оруденения (165 млн. лет), составляют 0.7542 и 0.7077 соответственно.

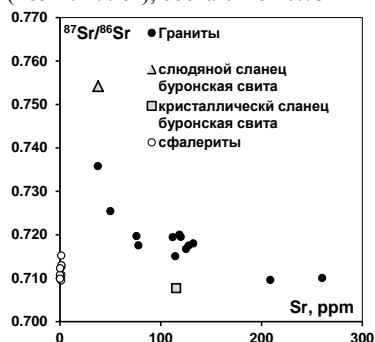


Рис. 9. Зависимость начальных изотопных отношений стронция от концентрации стронция для проб сфалеритов, гранитов садонского типа и метаморфитов буронской свиты.

Начальные изотопные отношения стронция в сфалеритах лежат в диапазоне значений изотопных отношений стронция в гранитах садонского типа. Таким образом, источником рудного вещества при формировании месторождения Джими, вероятно, послужили граниты, хотя вмещающими породами для полиметаллических жил являются кристаллические сланцы, а граниты находятся на удалении 300-500 м от исследованных рудных тел. Изотопное отношение стронция в кристаллическом сланце буронской свиты близко к начальным изотопным отношениям стронция в сфалеритах. Таким образом, кристаллические сланцы также могли принимать участие в формировании вещественного состава руд.

Материалы данного раздела послужили основой для формулировки второго защищаемого положения.

Глава 4. Исследование термодинамических моделей процессов формирования рудоносных растворов и полиметаллических жил

В работах М.В.Борисова (Борисов, 2000; Borisov, 2003; Борисов и др., 2006) на основе критического анализа геолого-геохимических данных была предложена геологическая модель формирования и развития гидротермальной системы (рис. 1). Эта геологическая модель является в настоящей работе **базовой моделью рудообразования**.

В отличие от большинства месторождений района на месторождении Джими главной рудовмещающей средой являются метаморфиты буронской свиты. Палеозойские граниты подстилают породы буронской свиты, контактируя с ними по серии пологих тектонических нарушений. Поэтому можно считать, что основу зоны мобилизации и на этом месторождении составляют также граниты.

Равновесно-динамическое моделирование выполнено для системы H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu (54 минерала, 78 частиц водного раствора (ионы и комплексы); пакет программ HCh). Модели жил - прохождение по проточным реакторам 40 и более порций или волн (W) рудоносного раствора из зоны мобилизации при его охлаждении с шагом 10°C до 100°C. Отложение вещества жил описано словесным механизмом (Борисов, 2000).

Ранее было установлено, что богатые по сфалериту руды могут образоваться из рудоносных растворов, которые формируются в узком диапазоне T-P условий в области мобилизации (рис. 10, область 1), и гранит должен иметь повышенные содержания Zn (до 0.01%). Диаграмма была построена по данным подробного исследования области мобилизации (точки), но по небольшому числу моделей жильного рудообразования (кружки и квадраты). Было установлено также, что при

стартовых условиях, отвечающих области 2, получаются жилы с монопиритовыми слоями, но модель рудообразования для этой области была рассчитана только по одной точке.

В настоящей работе сделаны два дополнительных разреза по этой диаграмме (показано на рис. 10) с построением полных моделей жил для подробного описания закономерностей рудообразования при изменении Т-Р условий. Первый разрез при $T=420^{\circ}\text{C}$ и P от 600 до 1200 бар (шаг 100 бар) – 7 стартовых точек в области мобилизации. Второй разрез при $P=900$ бар и температурах от 440 до 370°C (шаг 10°C) – 8 стартовых точек.

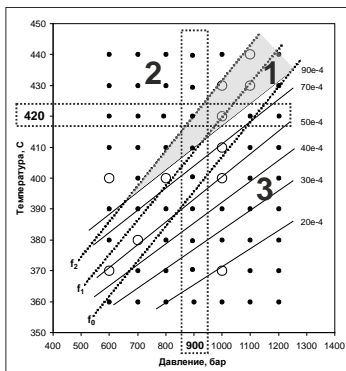


Рис. 10. Поле Т-Р условий в области мобилизации благоприятных для образования рудоносных растворов (область 1), которые формируют богатые руды с максимальными валовыми (30% и более) и узлокализированными в разрезе жилы (60-70% и более) содержаниями сфалерита. Обозначения: сплошные линии - изоконцентраты (m) максимальной растворимости сфалерита в системе “гранит-раствор” (0.5 m H_2CO_3 , 1 m NaCl, 0.1 m HCl); черные точки – расчеты для области мобилизации; линии из точек – граница между областями 1 и 2 при различных содержаниях Zn в граните ($f_0 - 0.004\%$; $f_1 - 0.007\%$; $f_2 - 0.01\%$); полые кружки – модели жил при f_1 ; полые квадраты - модели жил при f_2 . Области 1, 2, 3 характеризуют образование жил с различной последовательностью минеральных ассоциаций или количественными соотношениями минералов.

Результаты моделирования позволяют изучить изменения валовых содержаний минералов по восстанию жил во времени, а также последовательность рудоотложения и соотношения между минералами на каждом урвне по восстанию. Данных получилось много и проводилось свертывание информации.

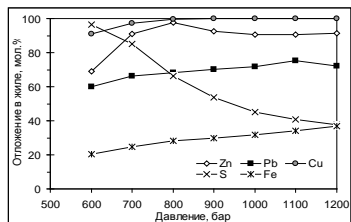


Рис. 11. Общая продуктивность отложения в жиле компонентов (зона мобилизации $T=420^{\circ}\text{C}$ и P от 600 до 1200 бар). Расчет сделан по разнице суммарных (по 40 W) мольных количеств элемента в растворе на входе в область образования рудной жилы и на выходе из неё, т.е. $(m_{\text{моб}} - m_{100})/m_{\text{моб}}$.

Установлено, что продуктивность отложения сфалерита в жилах проходит через максимум при росте давления и при $T=\text{const}$ в зоне мобилизации. Так, при $T=420^{\circ}\text{C}$ продуктивность увеличивается от 69% (600 бар) до 97.5% (800 бар), а дальнейший рост давления приводит к снижению до 91% (рис. 12). Это объясняется значительными различиями в растворимости минералов в зоне мобилизации при росте давления: пирротин (Po) - обеспечивает содержание S(II) в рудоносном растворе на первых 8-10 W, а концентрация Fe поддерживается совместной растворимостью 3-4 железосодержащих минералов ($\pm\text{Po}+\text{Er}+\text{Act}+\text{Chl}$) на всех 40 W. Например, при 600 бар количество S(II) соизмеримо с Fe и Zn (6.6e-2, 6.5e-2 и 3.2e-2 м, соответственно), и этой серы не хватает на отложение всего Fe и Zn в жилах. При таких стартовых условиях пирротина в жилах в 4-5 раз больше, чем пирита. При повышении давления

растворимость всех минералов при мобилизации уменьшается, но в разной степени – концентрация S(II) снижается существенно меньше, чем концентрации Fe и Zn. Серы хватает и на отложение увеличивающегося количества пирита ($Pu > Po$ при 800 бар) и на более полное отложение сфалерита в жилах (97.5% при 800 бар). В разрезе при уменьшении T таких сильных изменений общей продуктивности не отмечается.

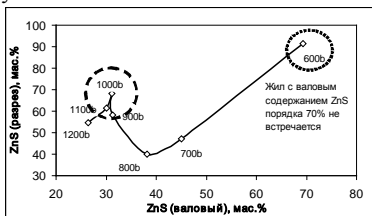


Рис. 12. Соотношение валовых и в разрезе модельных жил содержаний сфалерита (при стартовых условиях в области мобилизации - $T=420^{\circ}\text{C}$ и $P=600-1000$ бар).

сфалерита ниже и часть Zn выщелачивается за пределами поля устойчивости пирротина. Таким условиям отвечает отложение пирит+сфалеритовой ассоциации в приконтактных областях жил (пирит преобладает над сфалеритом), которая сменяется моносфалеритовым слоем.

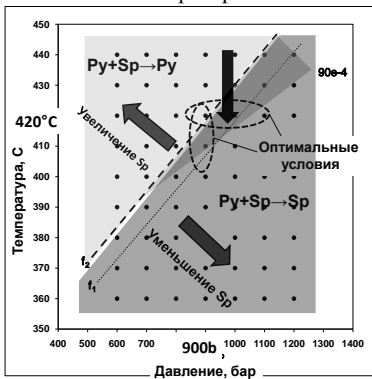


Рис. 13. Область формирования рудоносных растворов, ответственных за смену ассоциаций в модельных жилах: $Pu + Sp \rightarrow Pu$ и $Pu + Sp \rightarrow Sp$.

рудоносных растворов, которые могут обеспечить развитие Pb-Zn жил с необходимой последовательностью отложения минералов в жилах.

Кроме того, было изучено влияние различных фоновых содержаний сульфидной (пиритной) серы в граните на мобилизацию компонентов и процессы жильного рудообразования, было исследовано, как изменение давления в зоне мобилизации и в жиле влияет на процесс рудообразования, а также рассмотрены модели рудообразования при различном фоновом содержании металлов в граните.

Материалы главы 4 послужили основой для формулировки третьего защищаемого положения.

Глава 5. Возраст и модель золото-сульфидного рудообразования Шаухохского рудного поля

При исследовании рассеянной золотой минерализации в пределах Шаухохского рудного поля в Северной Осетии возникла необходимость определить генетическую связь золото-сульфидного оруденения с эндогенными процессами, которые здесь представлены юрским или неогеновым магматизмом. Для этого, очевидно, нужно было определить возраст гидротермально-метасоматического процесса, который привел к образованию золото-сульфидного оруденения. Для решения поставленной задачи был применен нестандартный подход при Rb-Sr датировании метасоматически изменённых пород, сложенных преимущественно карбонатным материалом с высокими концентрациями стронция (350 – 1100 мкг/г) и весьма малым содержанием рубидия (4–9 мкг/г).

Для проведения геохронологических исследований были взяты две пробы: СУ-9 и СУ-10 (участок Ларцидон, правый берег р. Мидаграбиндон). Проба СУ-9 отобрана у истока ручья Фидарком (абс.высота 2400 м), проба СУ-10 на расстоянии 400 м в правом борту ручья Фидарком (2120 м). В шлифах эти пробы представляют собой темно-серые массивные мраморизованные карбонатные породы с проявленной сланцеватостью. По данным электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа в пробе СУ-9 установлены биотит, хлорит, альбит, сфен, пирит и небольшие количества галенита. В пробе СУ-10 отмечены биотит, местами хлоритизированный, альбит, зерна кварца, апатита, рудные минералы (пирит, пирротин, галенит, теллурид серебра). При исследовании других образцов пород участка Ларцидон помимо описанных выше минералов отмечены также силикаты урана и тория, эпидот, кобальтин и мусковит.

Традиционно для построения изохроны берут серию пород в целом или один образец породы делят на минеральные фракции, но ни один из этих подходов для пород Шаухохского рудного поля применить не удалось. Rb-Sr датирование по породам в целом было исключено сразу, поскольку основная масса породы сложена карбонатом, в котором из-за предельно низкого Rb/Sr отношения радиогенная добавка близка к нулю. Размер алюмосиликатных минеральных зерен, слагающих породы, которые могли бы быть пригодны для датирования, оказался слишком мал (~20-70 мкм), чтобы выделить их как отдельные фракции. Поэтому было решено удалить карбонатную составляющую из пород химическими методами, так чтобы остались только силикатные минералы, пригодные для Rb-Sr датирования. Для этого небольшие фрагменты породы, помещенные в пробирку объемом 50 мл, были залиты 15% уксусной кислотой, закрыты крышкой и оставлены на 2 суток. Нерастворившаяся в уксусной кислоте силикатная фракция была отфильтрована, высушена и разделена на 2 составляющие – магнитную и немагнитную. В итоге для каждой пробы были получены по три фракции: исходная порода (WR), магнитная (M) и немагнитная (NM) фракции. Рентгенофазовые исследования показали присутствие во всех фракциях обеих проб карбонатов (доломит, кальцит, анкерит), Mg-Fe хлорита, биотита и мусковита в различных пропорциях.

По результатам Rb-Sr изотопных исследований построены зависимости $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ для обеих проб (рис. 14а). Точки, отвечающие разным пробам, образуют

две практически параллельные изохроны, отвечающие возрасту 156.4 ± 1.9 млн.лет для пробы СУ-9 и 159.7 ± 2.5 млн.лет для пробы СУ-10, но с существенно различными начальными изотопными отношениями стронция 0.70932 ± 4 и 0.70751 ± 4 , соответственно. Статистическая обработка данных методом параллельных изохрон (Titterington, 1979) показала, что обе линии с вероятностью 95% могут считаться параллельными, общее значение возраста для них составляет 157.2 ± 4.1 млн. лет, начальные изотопные отношения 0.70931 ± 10 и 0.70755 ± 11 .

В ходе метасоматоза могло произойти смешение стронция, находившегося в мраморизованном известняке со стронцием из флюида. Тогда в изохронных координатах могла бы возникнуть линия смешения, похожая на изохрону, но не имеющая геохронологического смысла. Для проверки такого предположения построен график (рис. 14б), где показана зависимость отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и величин, обратных концентрации стронция. Если различия в изотопном составе стронция обусловлены двухкомпонентным смешением, то на этом графике тоже должны наблюдаться линейные зависимости, не уступающие по качеству изохронам. Точки на графике 14б образуют некоторый тренд, но строгих линейных зависимостей не наблюдается, разброс точек много больше, чем у изохрон на рис. 14а. Таким образом, полученные зависимости $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ для обеих проб отвечают изохронам, а не линиям двухкомпонентного смешения.

Начальные изотопные отношения в изученных породах оказались различными, что, по всей вероятности, связано с изотопной гетерогенностью толщи вмещающих пород. Полученные для двух образцов изохроны позволяют говорить о том, что в ходе метасоматоза в пределах каждого образца достигалось изотопное равновесие между флюидом и всеми минералами. Таким образом, происходило локальное уравнивание изотопного состава стронция в масштабе штуфа при сохранении общей гетерогенности вмещающей толщи. Можно констатировать, что выбранная тактика датирования оказалась успешной.

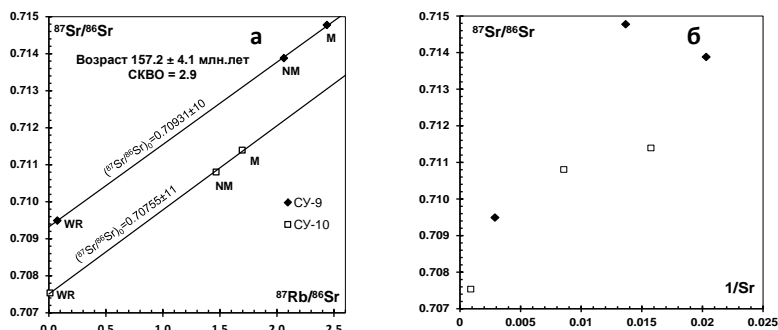
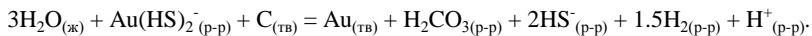


Рис. 14. Rb-Sr диаграмма (а) и зависимость изотопного отношения стронция от его обратной концентрации (б) для двух проб (СУ-9 и СУ-10) углистых мраморизованных известняков гизельдонской свиты с золото-сульфидной минерализацией. Возраст и начальные изотопные отношения стронция рассчитаны методом параллельных изохрон (Titterington, 1979).

Совпадение возраста для двух проб даёт уверенность в том, что при использованном мягком выщелачивании карбонатов происходило полное растворение карбонатного материала без фракционирования рубидия относительно стронция. Таким образом, Rb-Sr система отражает время установления изотопного равновесия

между карбонатной и силикатной составляющими в этих породах, т.е. время формирования рассеянной минерализации.

Для оценки возможных механизмов отложения золота были выполнены термодинамические расчеты (пакет программ HCh, система H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu-Au). В результате расчетов установлено, что отложение золота происходит за счет восстановления его преобладающего гидросульфидного комплекса при реакции рудоносного раствора с породой, содержащей углстое вещество. Основную реакцию можно записать следующим образом:



Отложение золота начинается при реакции рудоносного раствора с 10 г породы, содержащей 10% углстого вещества (рис. 15), т.е. при достижении отношения порода/вода равного 0.01 или большего (при 350°C и 1 кбар). Макросостав породы при этом может быть и не карбонатным. Уменьшение количества углстого вещества в породе, снижение температуры, рост концентрации золота в растворе приводит к изменениям отношения порода/вода, при котором начинается отложение золота, но принципиально картина не изменяется.

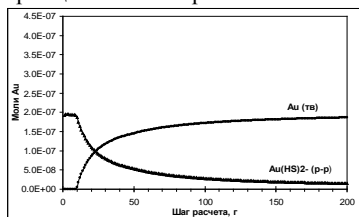


Рис. 15. Отложение золота при взаимодействии рудоносного раствора с карбонатной породой, содержащей углстое вещество (10%С) при 350°C и 1 кбар.

Таким образом, формирование золотого оруденения в породах Шаухохского рудного поля происходило в юрское время и, вероятно, связано с дайковым комплексом, который относится к Казбекской субвулканическо-гипабисальной диабаз–пикритовой формации. Дайки комплекса прослеживаются прерывистой субширотной полосой. По составу различаются дайки диабазов, диабазовых порфиров, микрогаббро и др. По геологическим данным внедрение диабазов Казбекского комплекса происходило в предкелловейское время средней юры. Юрская тектоно-магматическая активизация является характерной чертой развития Дигоро-Осетинской структурно-формационной мегазоны, в состав которой входит Адайхох-Шаухох-Дарьяльская зона. С поздними стадиями развития юрских вулканоплутонических комплексов связано формирование жильных полиметаллических месторождений Садонского района и, как показано в нашем исследовании, золото-сульфидного рудообразования Шаухохского рудного поля.

Материалы главы 5 послужили основой для формулировки четвертого защищаемого положения.

Заключение.

По результатам исследования закономерностей распределения элементов, макро- и микросостава руд, были дополнены предшествующие работы и подтверждена последовательность рудообразования. Установлено, что источником вещества полиметаллических руд месторождения Джими послужили граниты садонского типа и кристаллические сланцы буронской свиты.

Проведенные геохронологические исследования гранитов садонского типа и вулканитов осетинской свиты, которые являются рудовмещающими для

полиметаллических месторождений Садонского рудного района, позволили определить время их формирования. Возраст позднерогенного комплекса гранитов садонского типа составил 281 ± 7 млн. лет, а вулканогенных пород осетинской свиты - 183.1 ± 0.8 млн. лет. Возраст Pb-Zn руд месторождения Джими не древнее 183.1 ± 0.8 млн. лет, так как вулканы осетинской свиты являются наиболее молодыми породами, вмещающими оруденение.

Согласно результатам термодинамического моделирования установлено, что повышение давления или понижение температуры в области мобилизации приводят к смене последовательности отложения минералов в жиле. В узком диапазоне P-T условий в области мобилизации могут формироваться жильные тела, где наряду с высоким валовым содержанием сфалерита (до 30%) наблюдается отложение его мономинеральных слоев (70% и более), что характерно для реальных руд. Уменьшение содержания сульфидной серы в гранитах ниже кларковых (ниже 0.04-0.05%) значений приводит к формированию за счет мобилизации из гранитов более богатых сфалеритовых руд, в которых количество сфалерита преобладает или сопоставимо с суммой пирита и пирротина.

Для определения возраста золоторудно-метасоматических образований в мраморизованных углистых известняках Шаухохского рудного поля была успешно применена методика мягкого выщелачивания. Возраст оруденения составил 157.2 ± 4.1 млн. лет. Формирование золотого оруденения в породах Шаухохского рудного поля, вероятно, связано с юрским дайковым комплексом диабаз-пикритовой формации. Таким образом, процессы рудообразования на исследуемых объектах, полиметаллическом месторождении Джими и Шаухохском рудном поле, расположенных в пределах Дигоро-Осетинской структурно-формационной мегазоны, проходили приблизительно в одно время и связаны с юрской тектоно-магматической активизацией Кавказа.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. *Борисов М.В., Волкова М.М., Бычков Д.А., Бычкова Я.В.* Распределение редкоземельных элементов в рудных телах Джимидонского полиметаллического месторождения и вмещающих породах (Северная Осетия, Россия) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 2011, №4, 48-52 (Moscow University Geology Bulletin, 2011, Vol. 66, No. 4, pp. 269–273).

2. *Волкова М.М., Костицын Ю.А., Бычков Д.А., Борисов М.В.* Определение возраста золото-сульфидного рудообразования Шаухохского рудного поля (Северная Осетия, Россия) в мраморизованных углистых известняках Rb-Sr методом // Геохимия, 2014, №1 (в печати).

3. *Борисов М.В., Волкова М.М.* Исследование термодинамических моделей процессов формирования рудоносных растворов и Pb-Zn жил // Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» №1(26) 2008 URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/hydroterm-7.pdf

4. *Борисов М.В., Коница Е.В., Митоян П.А., Ревяко Н.М., Волкова М.М.* Новые геохимические данные и термодинамические модели жильного полиметаллического рудообразования // Доклады VIII Межд. конф. «Новые идеи в науках о Земле», Москва, 2007, т.3, 48-51.

5. **Волкова М.М.** Сульфидная сера вмещающих пород и Pb-Zn жильное рудообразование (термодинамическое моделирование)// *Материалы российской конференции «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых и студентов»*, М., Изд. МГУ, 2009, Т. 2, 23-26.

6. **Волкова М.М., Борисов М.В.** Влияние сульфидной серы вмещающих пород на эффективность процессов полиметаллического жильного рудообразования// *Тезисы докладов XVI Российского совещания по экспериментальной минералогии*, Черноголовка, 2010, 145-147.

7. **Борисов М.В., Волкова М.М., Бычков Д.А.** Распределение редкоземельных элементов в полиметаллических жилах Джимидонского месторождения и вмещающих породах (Сев.Осетия, Россия// *Материалы Всероссийской конференции «Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования»*, Москва, ИГЕМ РАН, 2010, 400-402.

8. **Волкова М.М.** Редкоземельные элементы в рудах и вмещающих породах Pb-Zn жильного месторождения Джими (Северная Осетия, Россия)// *Тезисы докладов Пятой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле*, Новосибирск, 2010, http://sibconf.igm.nsc.ru/sbornik_2010/03_geochemistry/690.pdf.

9. **Волкова М.М.** Источники рудных компонентов жильного Pb-Zn месторождения Джими (Сев.Осетия) по данным о редкоземельных элементах в рудах и вмещающих породах// *Доклады X Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле»*, М.: Экстра-Принт, РГГРУ, 2011, Т. 1, 109.

10. **Волкова М.М., Borisov M.V., Vyckov D.A.** Sources of ore components and formation models of North Ossetia Pb-Zn vein deposits// *Abstracts 1st Russian-Swiss Seminar «Methods for modelling of geochemical processes: algorithms, data prediction, experimental validation, and relevant applications»*, Moscow, IGEM RAS, 2011, 31.

11. **Волкова М.М., Костицын Ю.А., Бычков Д.А., Борисов М.В., Полковой А.П.** Возраст золото–сульфидного рудообразования Шаухохского рудного поля (Северная Осетия, Россия)// *Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии*, М.:РИС ВИМС, ИГЕМ РАН, 2012, 81-83.

12. **Волкова М.М., Костицын Ю.А., Бычков Д.А., Борисов М.В.** Определение Rb-Sr методом возраста золото–сульфидного рудообразования в мраморизованных углистых известняках Шаухохского рудного поля (Северная Осетия, Россия)// *Доклады XI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле»*, М.: Ваш полиграфический партнер, МГРИ-РГГРУ, 2013, Т. 1, 170-172.

13. **Волкова М.М., Борисов М.В.** Определение источника рудных компонентов по распределению РЗЭ в рудах и вмещающих породах месторождения Джими (Северная Осетия, Россия)// *Материалы I Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Науки о Земле. Современное состояние»*, Новосибирск-Хакасия, РИЦ НГУ, 2013, 37-39.

14. **Волкова М.М., Костицын Ю.А., Бычков Д.А., Борисов М.В.** Определение возраста золото–сульфидного рудообразования в мраморизованных углистых известняках (Шаухохское рудное поле, Северная Осетия, Россия)// *Тезисы докладов IX Международной школы наук о Земле им. Л.Л. Перчука, ОНУ им. Мечникова*, г. Одесса, 2013, 31-37.