

На правах рукописи

САФРАЛИЕВ НОСИР САЙДЖАЛОЛОВИЧ

**МИНЕРАЛОГО-ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ОБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ШОХКАДАМБУЛАК (ЧОКАДАМБУЛАК, СЕВЕРНЫЙ ТАДЖИКИСТАН)**

Специальность 25.00.05 - минералогия, кристаллография

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Казань - 2013

Работа выполнена на кафедре геологии и разведки МПИ Таджикского
национального университета

Научный руководитель **Файзиев Абдулхак Раджабович** академик
ЕАЕН, член-корреспондент АН РТ, доктор
геолого-минералогических наук, профессор

Официальные оппоненты **Лопатин Олег Николаевич** доктор геолого-
минералогических наук, доцент кафедры
минералогии и литологии ИГиНГТ
Казанского федерального университета
Агаханов Атали Акмурадович
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Минералогического музея имени
А.Е. Ферсмана РАН

Ведущая организация **Институт минералогии УрО РАН**

Защита состоится «19» декабря 2013 г в 14.30 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.081.09 в Казанском (Приволжском) федеральном
Университете по адресу: г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5, КФУ, Институт
геологии и нефтегазовых технологий, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью
организации, просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.
18, КФУ, отдел аттестации научно-педагогических кадров. Факс: (843) 233-78-67

Автореферат разослан «01» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.09



А.А. Галеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. К настоящему времени достаточно детально исследованы геологическое строение, литолого-петрографический состав рудовмещающих пород, закономерности размещения оруденения и другие аспекты геологии месторождения Шохкадамбулак - наиболее крупного и важного для экономики Республики Таджикистан железорудного объекта. Однако детальные минералогические, с привлечением новейших методов анализа, и особенно комплексные термобарогеохимические исследования здесь проводятся впервые. Особенно важно это в связи с намечающейся разработкой объекта и созданием на севере Таджикистана промышленного предприятия по добыче железа. Этим и определяется актуальность выполненной работы.

Цель и задачи исследований. Цель настоящей работы заключалась в детальном исследовании минералогии и термобарогеохимии железорудного месторождения Шохкадамбулак и разработке минералого-термобарогеохимических критериев поиска, прогноза и оценки оруденения.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- изучение особенностей минерального состава руд месторождения для выявления их типоморфных признаков;

- определение качественного состава и количественного содержания элементов - примесей в магнетите и некоторых других минералах, которые могли бы представлять интерес не только как типохимические при поисково-оценочных работах, но и для попутного их извлечения из руд в процессе отработки объекта;

- при помощи детальных исследований флюидных включений установление основных параметров минералообразования: температуры, давления, состава, концентрации и их агрегатного состояния;

- выявление вертикального палеотемпературного градиента в минерало- и рудоотложении для определения уровня эрозионного среза и оценки перспективности оруденения на глубину;

- установление стадийности и последовательности образования минералов во времени и в пространстве;

- разработка минералого-термобарогеохимических критериев поисков и прогнозирования оруденения на глубину.

Научная новизна и практическое значение работы. Работа представляет собой первое комплексное исследование флюидных включений в минералах Шохкадамбулакского месторождения. На примере этого объекта выявлены оптимальные термобарогеохимические параметры образования скарново-железорудного оруденения. Установлено, что месторождение формировалось в широком диапазоне температур и давлений из расплавов-растворов различного состава, концентраций и агрегатного состояния. В основных рудных минералах впервые установлено большое количество литофильных, халькофильных, сидерофильных и редкоземельных элементов, некоторые из которых (Ag, Au, Bi) могут представлять практический интерес. Полученные результаты существенно дополняют представления о генезисе скарново-рудных месторождений

Кармазара, а также могут быть использованы в практике поисков и прогнозирования, железистых руд. На месторождении Шохкадамбулак выявлено важное камнесамоцветное сырьё - аметист.

Фактический материал и методы исследований. В основу работы положены результаты полевых (2005-2007) и лабораторных исследований автора, полученные во время учебы в заочной аспирантуре, а также при проведении научно-исследовательских работ на кафедре геологии и разведки МПИ ТНУ и в лаборатории полезных ископаемых Института геологии Академии наук Республики Таджикистан в течение 2003-2007 гг. Пробы для исследования отбирались в канавах №№ 86, 107, 122, 123, 124, 275, 297, 298, 364, 383, 401, 404, 575, 577, 588, штольнях №№ 7, 11, 12, 21, 22, 23, 30, а также в древних горных выработках и кернах скважин. Отбор образцов в поле сопровождался детальным описанием текстурных особенностей руд, взаимоотношений минералов и минеральных парагенезисов в обнажениях и горных выработках. При камеральных исследованиях изучено более 400 образцов, 70 шлифов и аншлифов. Было изготовлено и изучено около 200 двухсторонне - полированных пластинок минералов и минеральных выкопок. Проведено свыше 1000 определений температур гомогенизации включений минералообразующих флюидов в минералах, выполнено более 30 химических анализов тройных водных вытяжек и 45 криометрических анализов флюидных включений, 55 атомно-адсорбционных анализов, 20 ICP-MS спес анализов и 21 микрозондовый анализ. В работе использованы фондовые материалы Главного геологического управления при Правительстве РТ.

Личный вклад. Автором детально изучены минералого-геохимические особенности рудных и нерудных минералов месторождения, минеральный состав руд и их элементов-примесей, последовательность минералообразования для расшифровки условий формирования руд месторождения. Впервые описаны новые минералы: ильваит, ферропиросмалит, пиросмалит, ферроактинолит, выявлена аметистовая минерализация. Самостоятельно проведено изучение двухсторонне полированных пластинок минералов и минеральных выкопок, определение температур гомогенизации включений минералообразующих флюидов в минералах. Предложена физико-химическая модель массопереноса и минералообразования в магматогенно-гидротермальных системах, разработаны минералого-термобарогеохимические критерии поисков и прогнозирования оруденений. Данные других видов исследований автором интерпретированы самостоятельно.

Основные защищаемые положения:

1. Шохкадамбулакское железорудное месторождение характеризуется разнообразием минерального состава (описано более 80 минеральных видов и разновидностей), где особое место занимают рудные минералы. Для последних свойственен большой набор элементов-примесей, среди которых установлены как индикаторные, так и естественные легирующие добавки, а также металлы, представляющие собой предмет комплексной добычи.

2. Оруденение на Шохкадамбулакском месторождении формировалось в диапазоне температур 640-80°C с палеотемпературным градиентом 7°C/100 м глубины и давлений 2000-80 бар из хлоридно-гидрокарбонатных, хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатных растворов Ca, Mg, Na и K с концентрацией 61,0-10,5 вес. %. Аметистовая минерализация кристаллизовалась при температурах 260-160°C и давлениях 100-80 бар и ниже из растворов с концентрацией солей от 10,5 до 27,5 вес. %.

3. Становление скарново-железородного месторождения Шохкадамбулак происходило в результате проявления четырех последовательно образованных стадий минерализации – силикатной, магнетитовой, кварцево-сульфидной и кварцево-карбонатной, охватывающих два этапа минерализации – собственно скарновый и гидротермальный.

Достоверность исследований. Оценка степени обоснованности основных научных результатов строится на представительности и достоверности исходных данных, корректности методик исследования и проведенных расчетов, что в случае рассматриваемой работы подтверждается, прежде всего:

- использованием теоретических положений, методологических подходов и практических материалов при исследованиях, т.е. комплексностью научных исследований с применением геологических, минералого-геохимических и физико-химических методов при максимально возможном учете всех опубликованных данных по геологии, минералогии и оруденению Шохкадамбулакского железородного месторождения;

- детальными полевыми исследованиями с учетом имеющихся опубликованных данных, установлением геолого-структурных особенностей позиционирования, минералого-геохимических и физико-химических условий образования руд Шохкадамбулакского месторождения;

- детальным геолого-минералогическим картированием, изучением последовательности образования парагенетических ассоциаций минералов в рудах, структурно-текстурных особенностей минеральных образований для установления стадийности и последовательности образования минералов во времени и в пространстве;

- оценкой ТРХ-параметров исходных рудогенных флюидов при генерации минералов руд по данным минералого-геохимических исследований для расшифровки условий их формирования и построением геолого-генетической модели месторождения;

- не противоречащими существующим теориям и парадигмам, сформулированными научными положениями, где диссертантом изучены и критически проанализированы известные достижения и теоретические положения других авторов по данной тематике и обоснованно выдвинуты свои тезисы;

- четкой взаимосвязью теоретической, исследовательской и рекомендательной частей диссертации, реализуемой в виде комплексных разработок (критериев и признаков) и рекомендаций по многим вопросам практического аспекта при выполнении геологических работ производственными

организациями (поиски и оценка перспективности оруденения, в том числе на глубину, определение уровня эрозионного среза, критериев рудоносности и т.д.).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы изложены в 17 печатных работах, докладывались на научных конференциях в Институте геологии АН РТ (2006-2009 гг.), научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ТГНУ, посвященной 15-й годовщине Независимости Республики Таджикистан, 2700-летию города Куляба и Году арийской цивилизации (2006); научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ТНУ, посвященной 800-летию поэта, великого мыслителя Мавлоно Джалолиддини Балхи и 16-й годовщине Независимости Республики Таджикистан (2007); научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ТНУ, посвященной 17-й годовщине Республики Таджикистан, 1150-летию основоположника таджикско-персидской литературы А. Рудаки и Году таджикского языка (2008); научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика С.М. Юсуповой (ТНУ, 2010); научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академиков С.М. Юсуповой и С.А. Захарова (ИГАН РТ, 2010); 14-й международной конференции по термобарогеохимии (Новосибирск, 2010); республиканской научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ТНУ, посвященной «Завершению 10-летия грамотности ООН (2003-2012): образование для всех» (2012); XV Всероссийской конференции по термобарогеохимии (Москва, 2012); XVII международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова: «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2013); минералогическом семинаре с международным участием: Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения. Сыктывкар, 2013).

Публикации. По результатам исследований имеется 17 публикаций, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций.

Работа выполнена на кафедре геологии и разведки МПИ, в лаборатории минералофлюидологии Института естественных наук Таджикского национального университета и в лаборатории полезных ископаемых Института геологии Академии наук Республики Таджикистан под научным руководством академика ЕАЕН, члена-корреспондента АН РТ, доктора геолого-минералогических наук, профессора А.Р. Файзиева, которому автор выражает искреннюю признательность. Автор выражает искреннюю благодарность кандидатам геолого-минералогических наук А.А. Агаханову, Б.А. Алидодову, М.Л. Гадоеву, В.Ю. Карпенко, Ф.А. Малахову, В.Е. Минаеву, М.М. Мухаббатову, М.М. Фозилову, И.С. Оймахмадову, Л.А. Паутову, А.А. Сабирову и др. за всестороннюю помощь, консультации и поддержку в выполнении данной работы. Аналитические работы выполнены в химической лаборатории Таджикско-Британского СП «Пакрут», ЦХЛ Главного геологического управления при Правительстве Республики Таджикистан, Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана РАН и в Acme analytical Laboratories LTD в г. Ванкувере (Канада).

Структура и объем диссертации. Работа объемом 213 страниц состоит из введения, 6 глав и заключения. Она сопровождается таблицами (35), схематическими геологическими картами месторождения (4), графиками (11), фотографиями (50). Список использованной литературы состоит из 149 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введение описаны: актуальность, цель и задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, а также приведены сведения об апробации результатов работы на различных научных конференциях и семинарах. Здесь же сформулированы защищаемые положения диссертации, кратко охарактеризована структура работы и выражаются благодарности.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КАРАМАЗАРА И ШОХКАДАМБУЛАКСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

В первой главе приведены сведения о геологическом строении Кармазара, Шохкадамбулакского рудного поля и самого месторождения.

Глава 2. МИНЕРАЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШОХКАДАМБУЛАК

Вопросами минералогии скарново-магнетитового месторождения Шохкадамбулак занимались в разные годы Е.Ф. Багрова (1963-66), И.М. Голованов, М. Мансуров, Б.В. Мамонтов (1965), Б.О. Есимов (1966-68), А.В. Жукова, Д.Н. Жуков (1969-70), Н.Н. Королева, С.Я. Клемперт (1970), М.И. Власова, М.Д. Котенев, В.П. Матяш (1972), Э.А. Дунин-Барковская (1978), В.М. Турлычкин (1982) и другие. Скарново-магнетитовое месторождение Шохкадамбулак находится в юго-западной части Кармазара (Северный Таджикистан). Здесь описано более 80 минеральных видов и разновидностей, среди которых основными рудными минералами являются магнетит, гематит, сфалерит, галенит, халькопирит и пирит. Менее распространены пирротин, марказит, арсенопирит. К числу редких относятся фрейбергит, борнит, ковеллин, аргентит, молибденит, висмутин, кобальтин, козалит, геленобисмутит, кобеллит, датолит и др. Жильные минералы представлены кварцем, кальцитом и баритом. Впервые описаны новые минералы: ильваит, ферропиросмалит, пиросмалит, ферроактинолит, выявлена аметистовая минерализация. Основные минералы месторождения охарактеризованы ниже.

Гематит образует крупнотаблитчатые выделения, собранные в радиально-лучистые сростки, реже мелкотаблитчатые и чешуйчатые агрегаты. В таблитчатых агрегатах отдельные листочки гематита достигают по размеру 5x5 см, а иногда и больше. Выделяется несколько его генераций. К I генерации относится гематит скарновой стадии, близкий по времени образования к магнетиту. Он характерен для глубоких горизонтов описываемого месторождения и относится к наиболее ранним образованиям окисной стадии. Гематит этой генерации образовался в условиях повышенной концентрации кислорода и, как минерал наиболее богатый им, выделился первым. При смене физико-химических

условий по нему развивается мушкетовит. Гематит II образовался в совершенно иных условиях. Минерал выделился из растворов, обогащенных не только кислородом, но и серой, так как почти одновременно с ним, с некоторым опережением, выпадал пирит. Гематит, образовавшийся в таких условиях, в мушкетовит не превращается. К третьей генерации относится гематит, образовавшийся в заключительных периодах становления месторождения. Он встречается в виде тонких (до 2 см мощности) прожилков, сложенных тонкопорошковатым агрегатом, а также образует примазки и налеты на стенках трещин. Гематит этой генерации обнаружен и в кальцитовых прожилках.

Химический состав гематита (вес. %, среднее из 6 анализов): Fe_2O_3 – 97,12, FeO – 0,42, MgO – 0,72, CaO – 0,78, SiO_2 – 1,00. Атомно-абсорбционным методом в гематите определены (г/т, среднее из 12 анализов) Ag (1,2), Cu (20), Zn (10), Pb (10), Co (100), Cd (10), Bi (100), Se (10). Кроме того, ICP-MS спес анализом выявлены примеси и многих других элементов. Особо следует отметить высокую концентрацию в нем Au (1,23 г/т) и Ag (92 г/т). Повышенным содержанием в гематите характеризуются также примеси W (96,0 г/т), Co (99,2 г/т), Mo (4,44 г/т), U (6,0 г/т) и др.

Пирит относится к числу широко распространенных минералов. Он встречается в виде вкрапленников и мелких прожилков. Вкрапленники пирита, размер которых варьирует от нескольких мм до 1-2 см, представлены неправильными зернами, реже – хорошо образованными кристаллами кубической и пентагондодекаэдрической формы. Минерал также наблюдается в виде скоплений, представленных агрегатами мелких, средних и крупных зерен. В магнетитовых скарнах полосчатой текстуры вкрапленность пирита образует полосы. В гранатовых, а также магнетитовых скарнах, лишенных полосчатости, пирит образует гнезда или отдельные кубические и пентагондодекаэдрические кристаллы, а также агрегативные скопления и просечки. Ассоциирует пирит с висмутином (участок Западный), магнетитом, гематитом и мушкетовитом. В шлифах под микроскопом выясняется, что он развивается по пирротину, марказиту, замещая и корродируя их. Минерал находится в тесном срастании с ними, образуя субграфические структуры.

На месторождении выявлены три генерации пирита. Первая образовалась вслед за выпадением основной массы магнетита. Пирит этой генерации пересекает магнетитовые скопления и выполняет межзерновые пространства в нем. Наибольшие скопления пирита I наблюдаются на Центральном и Западном участках. Пирит II ассоциирует с пирротинном, марказитом, мельниковитом, халькопиритом и другими сульфидами. Пирит III предшествует образованию галенита и сфалерита вторых генераций. Он корродируется и замещается ими.

Физические и оптические свойства пирита обычны. Значение удельного веса колеблется в пределах 4,8-5,00 г/см³. В зоне гипергенеза пирит замещается гематитом, гётитом, лимонитом, реже ярозитом. Химический состав пирита, определенный микрозондовым методом, следующий (вес. %): S – 53,13, Fe – 46,87.

Атомно-адсорбционным анализом выявлены примеси (г/т, среднее из 5 анализов): Cu – 60, Ag – 29, Bi – 185, Co – 387, Ni – 66, Se – 14, Cd – 10, As – 386, а также Sb – 2. ICP-MS методом анализа в пирите установлено большое количество элементов-примесей. Особого внимания заслуживают высокие содержания в нем (г/т) Au (2,1), Ag (433) и Bi (95,3). Сравнительно высоки в пирите также примеси As (233,7), W (16,6), Se (13,6), Ni (12,8), Mo (2,49) и др.

Халькопирит встречается в виде отдельных зерен и реликтов в сфалерите и галените. Реликты халькопирита в них, с размером зерен в один микрон и мельче, располагаются неравномерно, образуя участки с густой и бедной вкрапленностью. Под микроскопом видно, что халькопирит корродирует и цементирует раздробленный пирит. Со сфалеритом он находится в тесном срастании, образуя структуры распада твердых растворов. Халькопирит также двух генераций. К первой генерации относится халькопирит, ассоциирующий с пиритом, марказитом, арсенопиритом, галенитом и сфалеритом. Второй генерацией минерала считаются мелкие включения халькопирита в сфалерите II. Халькопирит I встречается не только в виде крупнокристаллической зернистой массы, но и образует колломорфные скопления небольших размеров. В его массе спорадически встречаются реликты пирита. Физические и оптические свойства халькопирита обычны. Удельный вес минерала колеблется в пределах 4,1-4,3 г/см³, по нему развиваются борнит, гетит, ковеллин, малахит и азурит. Химический состав по данным электронно-зондового анализа (вес. %): S – 35,00, Fe – 31,59, Cu – 33,04. В халькопирите установлены следующие примеси (вес. %): As – 0,03, Sb – 0,02, Bi – 0,3, Co и Ni по 0,005, Ag до 300 г/т (Багрова, 1963). Важной особенностью халькопиритов месторождения является присутствие в них примеси (г/т) Ge – от 4,3 до 9,0 (среднее 7).

Таким образом, месторождение Шохкадамбулак характеризуется сложным минеральным составом, где наряду с распространенными присутствуют редкие для региона минералы. На месторождении практический интерес могут представлять висмутовая и аметистовая минерализации. Специфической особенностью рудных минералов является повышенное количество в них серебра и золота, которые могут быть попутно извлечены.

Глава 3. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТИТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШОХКАДАМБУЛАК

Магнетит является основным рудным минералом месторождения, слагающим крупные пластообразные и жилообразные тела мощностью от 5 до 40 м, линзы, гнезда и вкрапления. Текстура руд массивная, реже гнездовая и пятнистая. В рудах Западного участка наблюдаются брекчиевидные текстуры. Структура гипидиоморфнозернистая и аллотриоморфная. Под микроскопом выявляется зернистое строение магнетита. Известны также радиально-лучистые и пластинчатые агрегаты магнетита, которые образуются в результате замещения магнетитом пироксенов, амфиболов и гематита. Среди массивных магнетитовых руд Центрального участка обнаружены необычные колломорфные образования минерала в виде почковидных агрегатов размером до 2-3 см с гладкой блестящей

поверхностью. Внутреннее их строение концентрически-зональное за счет чередования зернистого и радиально-лучистого магнетита. Магнетит в рудном поле встречается и в виде отдельных хорошо образованных кристаллов и их скоплений. Размер кристаллов от 1-2 мм до 0,5 см, в единичных случаях достигает 2-5 см. Форма кристаллов октаэдрическая, реже ромбододекаэдрическая и в виде комбинаций этих форм. Характерно зональное внутреннее строение кристаллов, обусловленное замещением аномального граната. Фактически это псевдоморфоза магнетита по гранату. Кроме граната магнетит интенсивно замещает пироксены и амфиболы. Образуется он и за счет мушкетовитизации гематита. При этом одновременно с магнетитом происходит выпадение из растворов пирита.

Магнетит относится к числу ранних рудных минералов. Сульфиды (пирротин, арсенопирит, халькопирит, сфалерит, галенит, висмутин) замещают его и обычно локализируются в интерстициях между зернами магнетита. На контакте зерен магнетита и висмутина иногда отмечаются скопления теллуридов золота. В зонах окисления отмечается мартитизация с образованием вторичных гематитовых (мартитовых) руд. Удельный вес магнетита колеблется от 4,75 до 5,03. Пониженный вес минерала обусловлен микропримесями нерудных минералов. Микротвердость равна 524-585 кг/мм². Химический состав магнетитов Шохкадамбулакского рудного поля (вес. %, среднее из 11 анализов) в целом близок к теоретическому: Fe₂O₃ – 66,17, FeO – 29,52, MgO – 1,17, MnO – 0,23, CaO – 0,40, SiO₂ – 1,28, TiO₂ – 0,13, Al₂O₃ – 0,10, V₂O₅ – 0,003, P₂O₅ – 0,01. Несколько повышенное количество Fe₂O₃ против теоретического состава минерала, связано, по-видимому, с мартитизацией магнетита. Кроме того, химическими анализами в магнетитах обнаружены примеси Ga в количестве 0,0002 % (среднее из 26 анализов), Ge – 0,0010 %, Co – 0,002 %, а также Cu – 0,03 %, Cr – 0,03 %. Из других примесей отмечаются Bi, Pb и Zn (по 0,001 %). Атомно-адсорбционным методом в магнетите определены (г/т, среднее из 23 анализов) Au (0,015), Ag (1,74), Cu (64), Ni (43), Zn (206), Pb (111), Co (700), Cd (10), Bi (140), Se (10).

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в магнетите Шохкадамбулакского скарново-железорудного месторождения выявлен большой набор литофильных, халькофильных, сидерофильных и редкоземельных элементов. Из литофильных элементов в составе минерала в повышенных количествах присутствуют Ca, Mg, Mn и Al (десятые доли процента). Содержание других примесей (Sr, Ba, Rb, Cs, Li, Be, Zr, U, Th) нижекларковое. Характерной примесью магнетита является бор. Среднее его содержание 23 г/т. Особенно повышенным количеством бора характеризуется минерал из Восточного участка месторождения – 40 г/т.

Халькофильные элементы распределены неравномерно. Содержание некоторых из них (Hg, Bi, Sb, Cd, Se, Te) выше кларка, а других (Ga, Ge, Zn, Hf, Nb, Ta, Pd) – ниже. Ртуть выступает в качестве типохимического элемента магнетитов. Среднее ее количество равно 7,5 г/т, что почти на два порядка выше кларка этого элемента. Еще одним характерным элементом магнетитов является висмут. Среднее его содержание 3,2 г/т.

Особо отметим содержание легирующих металлов в составе магнетитов, присутствие которых влияет на твердость, механическую стойкость, тугоплавкость, упругость, кислотоупорность, антикоррозионные и другие свойства сплавов из железа. В магнетите среднее содержание Ti равно (г/т) 183, V – 32, Cr – 8,6, Ni – 12,2, Co – 11,3, W – 2,0, Mo – 0,85.

Однако из элементов-примесей магнетитов Шохкадамбулакского месторождения наибольшее значение имеют повышенные количества благородных металлов - Ag и Au, которые могут стать предметом комплексной обработки, наряду с железом. Среднее их содержание в магнетите (г/т) 61 и 0,65 соответственно.

Сера, фосфор, а также Zn, Cu, и As относятся к вредным примесям железной руды. Содержание S в доменных рудах железа не должно превышать 0,3-0,5 % (Яковлев, 1986). В магнетите из Шохкадамбулакского месторождения среднее содержание серы 0,107 %. Допустимое количество фосфора в таких рудах 0,2 %, а в магнетите месторождения концентрация элемента соответственно равна 0,009 %. При допустимом содержании в железных рудах As до 0,07 % концентрация этого элемента в магнетите равна 0,003 %. В магнетите месторождения содержатся 0,012 % Zn и 0,006 % Cu, что намного ниже допустимого количества в рудах Zn (до 0,1 %) и Cu (0,2 %).

Среднее содержание суммы редкоземельных элементов (РЗЭ) в магнетите равно 8,52 г/т, что более чем на порядок ниже их кларка в земной коре по А.П. Виноградову (1962). Это согласуется с представлением, согласно которому скарновые минералы в целом характеризуются низкими концентрациями РЗЭ. В составе лантаноидов магнетита главная роль принадлежит лантановой подгруппе (78,3 %). На долю иттриевой и скандиевой подгрупп приходятся соответственно 13,7 и 8,0 % от общей суммы РЗЭ. Относительное содержание цериевой группы к иттриевой высокое ($\Sigma Ce : \Sigma Y = 19,1$). Еще выше в магнетитах значение La:Yb - отношения (15,0). Для минерала характерна отрицательная европиевая аномалия (0,49). Такое поведение РЗЭ в магнетите месторождения является свидетельством того, что оруденение, вероятно, связано с постмагматическими продуктами расплавов подкорового (мантийного) происхождения.

Таким образом, магнетит месторождения характеризуется большой набором литофильных, халькофильных, сидерофильных и редкоземельных элементов, а также повышенным количеством естественных легирующих добавок (Cr, Ni, Co, W и др.).

Глава 4. ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШОХКАДАМБУЛАК

При термобарогеохимических исследованиях температура минералообразования оценивалась методом гомогенизации газовой-жидких включений. Включения флюидных растворов изучались на двухсторонне - полированных пластинках, реже кристаллических выколках. При оценке давления использован в основном метод, предложенный П.В. Клевцовым и Г.Г. Леммлейном (1950). Давление в

двухфазовых газо-жидких включениях оценивалось по методике Ю.А. Долгова, Л.Ш. Базарова и И.Т. Бакуменко (1968), с помощью совместного применения гомогенизации и криометрии. Химический состав растворов жидкой фазы включений оценивался методом тройной водной вытяжки по методикам Д.Н. Хитарова (1968, 1978), Н.И. Мязь и др. (1975), А.А. Москалюк (1971), Ж.А. Симкива (1988) и др. Для оценки концентрации и состава растворов индивидуальных включений были проведены криометрические исследования по методике А. С. Борисенко (1977).

Исследование флюидных включений проводилось в различных генерациях кварца, кальцита и барита. Они в минералах, главным образом, двухфазовые газовой-жидкие, реже однофазовые жидкие или газовые. В кварце и кальците обнаружены также двухфазовые, преимущественно газовые (жидко-газовые), трехфазовые (жидкий раствор солей+газовый пузырек+дочерний кристаллик галита) и многофазовые (жидкий раствор солей+несколько дочерних кристалликов+газовый пузырек). В изученных минералах, наряду с включениями минералообразующих сред, были обнаружены вакуоли с законсервированными в них битумами. По агрегативному состоянию углеводородные консерваты однофазовые (жидкие, твердые и газовые), двухфазовые (газово-жидкие, жидко-твердые) и многофазовые (газ+жидкость+твердый и жидкий битум). Размер их 0,02-0,05, реже 0,07 мм и более. При нагревании включений битумов они, не достигнув гомогенного состояния, взрываются.

Кварц на месторождении имеет широкое распространение. По морфологическим признакам выделяются тонкозернистый (роговикоподобный), мелко-, средне- и крупнозернистый, радиально-лучистый, шестоватый и друзовидный кварц. Атомно-абсорбционным анализом в кварцах обнаружены (г/т, среднее из 15 анализов): Zn (10), Cu (40), Pb (50), Ag (1,8), Au (0,02), Ni (00), Co (10), Cd (00), Bi (10), Se (10). На месторождении выделены пять генераций кварца. Кварц I предшествует образованию основной массы магнетитовой руды и находится в тесной парагенетической ассоциации с железной слюдкой (гематитом). Встречается он, главным образом, в виде хорошо оформленных кристаллов размером до 15 см по длинной оси. Первичные флюидные включения в кристаллах кварца I по фазовому составу подразделяются на двухфазовые газовой-жидкие (жидкий водный раствор солей+газовый пузырек), трехфазовые (жидкий водный раствор солей+газовый пузырек+изотропный дочерний кристалл), многофазовые (жидкий водный раствор солей+газовый пузырек+несколько твердых дочерних минералов), существенно газовые (двухфазовые жидко-газовые, содержащие газовую фазу и водный раствор солей), углекислотно-водные (жидкий водный раствор+газообразная и жидкая углекислота) (рис. 1). Наличие среди консерватов двух- и многофазовых флюидных включений невыдержанного наполнения и сингенетичных им газовых или существенно газовых вакуолей свидетельствует о гетерогенизации (кипении) флюидной системы. По форме включения разнообразны, иногда в виде отрицательных кристаллов или их отдельных фрагментов. Размер вакуолей колеблется от 0,01 до 0,09 мм и менее. Гомогенизация первичных включений в

кварце I происходит, главным образом, в жидкую фазу в широком диапазоне температур 640-480°C. Температура гомогенизации отдельных включений, происходящей в газовую фазу, также попадает в этот интервал. Для выявления палеотемпературного градиента были исследованы образцы кварца I в интервале более 200 м по вертикали. Полученные результаты позволили установить вертикальный палеотемпературный градиент, равный в среднем 7°C на 100 м глубины. При криометрических анализах начало оттаивания криогидрата минералообразующего флюида происходит в диапазоне температур от -40,0 до -57,5°C, что соответствует температурам эвтектических растворов хлоридов Ca, Na, Mg и K (Борисенко, 1972).

Лед плавится при температурах от -20,0 до -26,0°C. Концентрация солей во флюидах из кристаллов соответствует значениям от 18,0-26,5 до 52,5-61,0 мас. %. Изучение валового химического состава флюидных включений методом тройной водной вытяжки показывает, что среди катионов в вытяжках преобладают Ca^{2+} (58,25 экв. %) и Mg^{2+} (24,27 экв. %), а содержание Na^+ (12,62 экв. %) и K^+ (4,85 экв. %) незначительное. В анионной части вытяжки ведущим является HCO_3^- (47,62 экв. %). Менее развиты Cl^- (28,57 экв. %), SO_4^{2-} (20,95 экв. %), CO_3^{2-} (1,9 экв. %) и NO_3^- (1,0 экв. %). В период образования кварца I интервал рассчитанных давлений оказался равным 2000-1100 бар.

Кварц II ассоциирует с магнетитом и встречается в виде мелкозернистых агрегатов. Он ассоциирует также с полевым шпатом. В препаратах кварца II одни включения двухфазовые газовой-жидкие, другие - трехфазовые. Последние содержат газ, раствор и кристаллик-узник (галит). Наряду с двух- и трехфазовыми встречаются и сингенетичные им существенно газовые включения. Это свидетельствует о гетерогенном состоянии минералообразующего флюида. Форма включений эллипсоидальная, овальная, каплевидная, прямоугольная. Редко первичные включения имеют форму негативных кристалликов. Размеры - 0,01-0,02 мм. *Температура гомогенизации первичных включений в кварце II колеблется в пределах от 520 до 475°C. Включения характеризуются температурами эвтектики от -34,5 до -43,0, что указывает на преобладание в растворах хлоридов Fe и Mg. Концентрация солей в двухфазовых включениях, оцениваемая по температуре плавления льда, равна 20,5-22,5 вес. %. В трехфазовых включениях концентрация солей, рассчитанная по методу

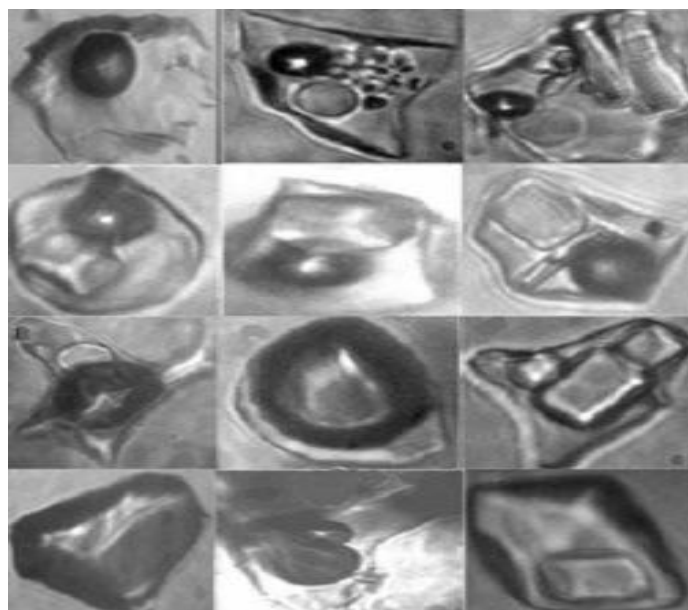


Рис. 1. Характерные типы флюидных включений в кварце I

* Температура приведена без учета поправок на давление и концентрацию.

М.А. Стыриковича и Х.А. Хайбуллина (1956), более высокая – 35,0-60,5 вес. %. Давление в момент кристаллизации кварца II оценивается в 1450-1000 бар.

Кварц III находится в виде жил мощностью 8-10 м и прожилков. Агрегаты тонко-среднезернистые. В зонах развития кварца III находится основная масса сульфидной минерализации. В пластинках, изготовленных из кварца III, обнаружены первичные флюидные включения, нередко имеющие форму отрицательного кристалла. Реже они ромбовидные, трубчатые, изометрические и неправильные. По фазовому составу включения в большинстве своем двухфазовые газовой-жидкие. Встречаются также однофазовые жидкие и битумоидные включения. Размеры включений 0,02-0,09 мм. Гомогенизация включений в кварце III происходит в широком диапазоне температур 450-260°C. Криометрические исследования первичных вакуолей кварца III показали, что первое заметное плавление льда замороженного раствора включений происходит при температурах -68,0...-21,5°C, что близко к температурам плавления эвтектик водно-солевых систем $MgCl_2-KCl-H_2O$, $CaCl_2-H_2O$, $CaCl_2-NaCl-H_2O$, $NaCl-Na_2CO_3-KCl-H_2O$, $LiCl-H_2O$, $FeCl_2-H_2O$ (Борисенко, 1982). Общая концентрация солей во включениях варьирует от 11,0 до 27,5 вес. %. Кристаллизация кварца III происходила в интервале давлений 335-85 бар. Анализы жидкой фазы включений показывают, что общая минерализация водных вытяжек из кварца III невысокая – 0,45 мг/экв. В анионной части растворов главная роль принадлежит Cl^- и HCO_3^- , меньшее значение имеет SO_4^{2-} . Главными катионами являются Ca^{2+} и Na^+ , находящиеся в равных количествах - по 37,21 экв. %, а содержания K^+ - 13,95 и Mg^{2+} - 11,63 экв. % относительно невысокие.

Кварц IV также широко распространен. Образует жилы мощностью до 4 м, прожилки и гнездовые выделения. Агрегаты средне-крупнокристаллические, шестоватые и друзовидные. Нередко кварцевые жилы несут сульфидную минерализацию (сфалерит, галенит, блеклая руда, аргентит и др.). Кварц IV содержит включения разнообразной формы. По фазовому составу это, главным образом, двухфазовые газовой-жидкие включения, а также однофазовые жидкие и газовые. Размер включений 0,02-0,06 мм. Гомогенизация первичных включений происходит в жидкую фазу в диапазоне температур 390-225°C. Криометрические анализы показывают, что кристаллизация кварца IV происходила из гомогенных хлоридно-бикарбонатных гидротермальных флюидов с переменным соотношением таких катионов, как Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} и Na. Данные криометрии в целом подтверждаются анализом водной вытяжки из кварца IV. Среди анионов ведущим является HCO_3^- (40,0 экв. %). Анионы Cl^- , SO_4^{2-} и NO_3^- содержатся в одинаковых количествах - по 20,0 экв. %. Основными катионами являются Ca^{2+} и Na^+ , содержащиеся, соответственно, в количестве 38,46 и 30,77 экв. %. На долю Mg^{2+} приходится 19,23, а K^+ - 11,54 экв. %. Концентрации солей в растворе 17,5 – 27,7 вес. %. Кварц IV формировался в интервале давлений, равном 165-40 бар.

Кварц V представлен в виде аметистизированных жил и кристаллов аметиста. Мощность жил колеблется от 0,8 до 1,5 м. Прослеживаются они с перерывами на расстоянии до 1 км. Сложены жилы крупнокристаллическим

агрегатом кварца массивного сложения и шестоватыми агрегатами. Кристаллы аметиста окрашены в фиолетовый цвет бледных и густых тонов.

Флюидные включения в аметистизированном кварце, главным образом, двухфазовые газовой-жидкие, реже - однофазовые жидкие. Первичные включения размером от 0,01 до 0,05 мм по форме овальные, треугольные, удлинённые, неправильные и изометричные. Встречаются также консерваты в виде отрицательных кристаллов. Общий интервал температур гомогенизации первичных включений в агрегатах аметистизированного кварца составляет 335-160°C. Гомогенизация включений происходит в жидкую фазу. Состав и концентрация минералообразующих растворов в аметистизированном жильном кварце изучались методом криометрии. Результаты этих исследований показали, что для них характерны водно-солевые системы $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$. Температуры эвтектики равны интервалу от -55,5 до -48,5°C, что соответствует концентрации солей в растворах от 22,5 до 27,5 вес. %. Аметистизированный кварц формировался в интервале давлений, равном 390-200 бар.

В кристаллах аметиста первичные включения также двухфазовые газовой-жидкие. Размер включений изменяется от 0,01 до 0,06 мм. Температура гомогенизации первичных включений в корневых и внутренних частях кристаллов аметиста составляет 260-220°C, а в их прозрачных головках – 180-160°C. Водно-солевая система по температурам эвтектики во включениях кристаллов аметиста более разнообразная: $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{MgCl}_2\text{-KCl-H}_2\text{O}$. Анализами тройной водной вытяжки установлено, что для кристаллов аметиста характерно присутствие таких компонентов, как Cl^- (20 экв. %), HCO_3^- (40 экв. %), SO_4^{2-} (20 экв. %), NO_3^- (20 экв. %), Ca^{2+} (38,4 экв. %), Mg^{2+} (19,2 экв. %), K^+ (11,6 экв. %), Na^+ (30,7 экв. %). Однако концентрация растворов во включениях кристаллов аметиста оказалась более низкой – 24,0-10,5 вес. %. Оцененные значения давлений в период кристаллизации аметиста оказались невысокими – 100-80 бар и ниже.

Кальцит является широко распространённым минералом месторождения. Выделяются три генерации этого минерала. В кальцитах всех генераций атомно-адсорбционным методом определены (г/т, среднее из 10 анализов): Au – 0,025, Ag – 1,8, Ni – 40, Zn – 275, Pb – 65, Co – 80, Cd – 20, Bi – 200, Se – 10. Удельный вес кальцита колеблется от 2,55 до 2,72 г/см³. Кальцит I связан с магнетитовыми скарнами. Он крупнокристаллический и образован в заключительных периодах становления скарновородного оруденения. Кальцит I образует мелкие жилы мощностью до 6-8 см и гнездообразование выделения. Первичные включения в кальците I преимущественно плоские ромбовидные, прямоугольные, квадратные, вытянутые и неправильные, реже объёмные в форме отрицательных кристаллов. Размер их колеблется от 0,01 до 0,05 мм. Включения в кальците I по фазовому составу разнообразны: однофазовые газовые, двухфазовые существенно газовые (газовая фаза+жидкий водный раствор), двухфазовые газовой-жидкие (жидкий раствор солей+газовый пузырек), трехфазовые (водный раствор солей+газовый пузырек+дочерний изотропный кристаллик кубической формы, идентифицированный как галит), четырехфазовые (водный раствор солей+газовая фаза и два дочерних

кристалла - галит, сильвин) и единичные многофазовые (водный раствор солей+газовая фаза+галит, сильвин и чешуйки гематита) (рис. 2). Суммарный объем твердых фаз во включениях кальцита I достигает 30-35 %. Гомогенизация первичных включений происходит по первому и второму типам в диапазоне температур 535-420°C. Геотермический градиент равен 6-8°C на 100 м глубины. По данным анализа водной вытяжки в анионной части минералообразующих флюидов из кальцита I доминирует HCO_3^- (78,43 экв. %). Из других анионов обнаружены Cl^- и SO_4^{2-} (по 9,8 экв. %), а также CO_3^{2-} и NO_3^- (по 1,0 экв. %). Среди катионов ведущим является Ca^{2+} (51,5 экв. %). Меньшее значение имеют Mg^{2+} (25,77 экв. %), Na^+ (17,53 экв. %) и K^+ (5,15 экв. %). Концентрация минералообразующих растворов, оцененных по методу М.А. Стыриковича и Х.А. Хайбуллина (1956) равна интервалу 35,0-54,5 вес. %. Давление в период образования кальцита I, по рассчитанным данным, оценивается в 800-550 бар.

Кальцит II более распространен, чем кальцит I, и образует прожилки и небольшие жилы мощностью до 10-12 см, гнезда и вкрапленность. В тесной ассоциации с ним находится основная масса сульфидной минерализации. Агрегаты мелко-, средне- и крупнокристаллические. В кальците II обнаружены только двухфазовые газожидкие флюидные включения различной формы. Гомогенизация первичных включений происходит в диапазоне температур

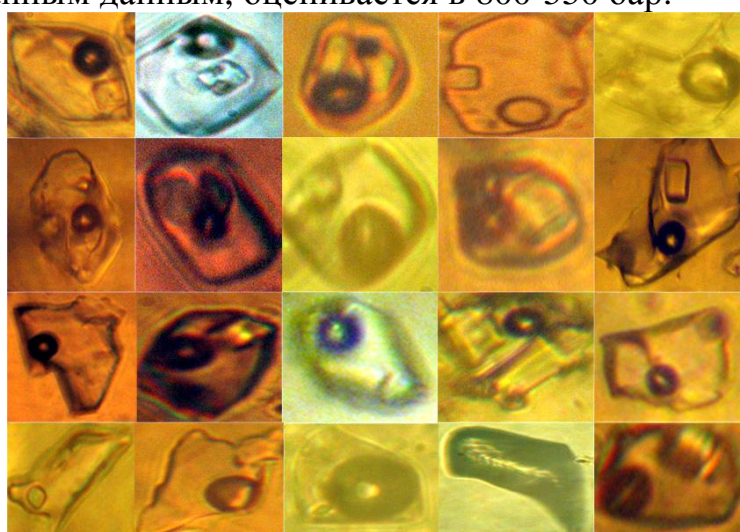


Рис. 2. Характерные типы флюидных включений в кальците I

375-270°C. В солевом составе растворов включений кальцита II преобладает также HCO_3^- (60,0 экв. %). Меньшие значения имеют SO_4^{2-} (20,0 экв. %) и Cl^- (13,33 экв. %). Содержание CO_3^{2-} ничтожно (5,75 экв. %). Основным катионом, так же как и в кальците I, является Ca^{2+} (56,25 экв. %). Содержание Mg^{2+} (31,25 экв. %) также сравнительно высокое. Другие катионы присутствуют в незначительных количествах: K^+ и Na^+ по 6,25 экв. %.

Кальцит III встречается в виде прожилков, мощностью до 2,5-3,0 см. Сложены они мелко-среднезернистым агрегатом. Кальцит III ассоциирует с поздним кварцем, тонкочешуйчатым гематитом и баритом. Иногда в кальцитовых прожилках обнаруживается и флюорит. В кальците III обнаружены включения различной формы, размером 0,01-0,02 мм. Включения однофазовые жидкие и двухфазовые газожидкие. Гомогенизация двухфазовых консерватов происходит по первому типу в интервале температур 180-120°C. Методом водной вытяжки в кальците III определен состав минералообразующего раствора. Он сульфатно-хлоридно-бикарбонатный: HCO_3^- - 41,67 экв. %, Cl^- и SO_4^{2-} - по 27,78

экв. %. Главным катионом является Ca^{2+} (53,84 экв. %). Остальные имеют подчиненное значение: Mg^{2+} - 23,08 экв. %, Na^+ - 15,38 экв. %, K^+ - 7,69 экв. %.

Барит на месторождении Шохкадамбулак обнаружен на Восточном и Центральном участках. Образует он прожилки мощностью от 0,5 до 6-10 см, сложенные мелко-среднезернистым агрегатом. В баритовых прожилках, встречаются кварц, кальцит и галенит. Это барит I. Первичные включения в барите I главным образом плоские и имеют ограниченную (ромбовидную, прямоугольную, треугольную, топовидную) форму. По агрегатному состоянию они двухфазовые газовой-жидкие. Размер включений колеблется от 0,01 до 0,05 мм. Гомогенизация первичных включений в барите I происходит в диапазоне температур 280-195°C.

Барит II совместно с кварцем и кальцитом образует сложные маломощные (2-3 см) прожилки, в которых иногда присутствует и тонкозернистый гематит. Включения в барите II очень мелкие (0,01 мм и менее). Форма их разнообразная - округлая, неправильная, изометричная и в виде негативных кристаллов. Гомогенизация включений в барите II происходит в интервале температур 110-80°C.

Таким образом, минерализация на месторождении Шохкадамбулак сформировалась в диапазоне температур 640-80°C и давлений 2000-80 бар из хлоридно-гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатных флюидов с концентрацией 61,0-10,5 вес. %.

Глава 5. СТАДИЙНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ПОСТМАГМАТИЧЕСКОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Скарново-магнетитовое месторождение Шохкадамбулак было сформировано в ходе сложных многостадийных процессов минералообразования (Сафонов, 1968; Власова, Котенев, Матяш, Мясников, 1972; Жукова, Жуков, 1970 и др.). За основу нами принята более упрощенная схема последовательности образования минералов в скарново-железородных месторождениях Чаткало-Курамы, куда входит и скарново-магнетитовое месторождение Шохкадамбулак. Данная схема составлена и уточнена с учетом существующих и полученных нами данных и коррелирована методами термобарогеохимии. Здесь выделяется четыре стадии минерализации: силикатная, магнетитовая, кварцево-сульфидная и кварцево-карбонатная (таблица). В первых двух стадиях формируется собственно скарновая минерализация, а в двух последующих – наложенные на скарны продукты гидротермального процесса.

В силикатную стадию образуются основные скарновые минералы (воластонит, пироксены, гранаты и др.), а также гребенчатый кварц I, розетковидный гематит и крупнокристаллический кальцит I. Выполненные многочисленные определения температур гомогенизации флюидных включений в кварце и кальците показали, что формирование скарновых тел Шохкадамбулакского месторождения происходило в интервале температур 640-480°C, что в целом согласуется с данными В.А. Жарикова (1968). Давление в период становления силикатной стадии было 2000-1100 бар.

Магнетитовая стадия непосредственно следует за силикатной и завершает скарновый процесс минералообразования. Основным минералом этой стадии является магнетит. В ассоциации с ним встречаются ильваит, ферропиромалит, амфибол (ферроактинолит, актинолит и тремолит), полевой шпат и зернистый кварц II. Магнетитовая стадия завершается выделением небольшого количества пирита. Для определения верхней границы температур образования магнетитовой стадии мы использовали зернистый кварц II, находящийся во взаимном прорастании с магнетитом. Гомогенизация первичных включений в этом кварце происходит в диапазоне температур 520-475°C, а давление в момент его кристаллизации оценивается в 1450-1000 бар.

Кварцево-сульфидная стадия на месторождении фиксируется образованием кварца III, кальцита II, барита I и сопутствующих им пирротина, марказита, пирита, арсенопирита, молибденита, висмутина, козалита, галено-бисмутита, кобальтина, кобеллита, гессита, а также самородных висмута и золота. Температуры образования ассоциации минералов кварцево-сульфидной стадии определялись по результатам термометрического исследования кварца (450-260°C), кальцита (375-270°C) и барита (280-195°C), отобранных из всех трех участков месторождения. Следовательно, минералы кварцево-сульфидной стадии образовались в диапазоне температур 450-195°C. Давление, при котором происходила кристаллизация минералов кварцево-сульфидной стадии, равнялось интервалу 390-80 бар.

Кварцево-карбонатная стадия завершает формирование месторождения. Ее проявлению предшествовали интенсивные тектонические подвижки, приведшие к образованию трещин и полостей. В них происходило отложение минералов этой стадии в виде жил, прожилков и гнезд, при практически ничтожной роли процессов замещения. В кварц-карбонатной стадии, наряду с кварцем IV, кальцитом III, баритом II, флюоритом, в небольших количествах образовались галенит, сфалерит, пирит, халькопирит, блеклая руда, аргентит, гематит и другие минералы. Температурные параметры кристаллизации минералов этой стадии на месторождении установлены по данным изучения консерватов минералообразующих растворов в кварце IV, кальците III и барите II. Температура гомогенизации газовой-жидких включений в кварце равна 390-225°C, а в кальците - 180-120°C. Нижняя граница температур становления минералов стадии определена по бариту, который считается наиболее поздним минералом. Он кристаллизовался в интервале температур 110-80°C. Таким образом, кристаллизация продуктов кварцево-карбонатной стадии происходила в интервале температур 390-80°C и давлений 165-40 бар.

Таким образом, становление скарново-магнетитового месторождения Шохкадамбулак происходило в ходе сложных физико-химических процессов в течении силикатной, магнетитовой, кварцево-сульфидной и кварцево-карбонатной стадий минерализации.

Таблица №1. СХЕМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ШОХКАДАМБУЛАК

(с использованием термометрии и криометрии минералов месторождения)

Этапы	Стадия	Минералы	Температура, °С	Давление, бар	Главные компоненты растворов	Концентрация, вес. %
Скарновый	Силикатная	Волластонит, пироксены, гранаты, кварц I, кальцит I, гематит	640-480	2000-1100	Na, K, Cl, Mg, Si, Al, Ca, Fe	61-42
	Магнетитовая	Магнетит, андрадит, геденбергит, полевой шпат, актинолит, тремолит, эпидот, кварц II, пирит I и др.	520-475	1450-1000	Na, K, Cl, Ca, Si, Al, Fe	54,5-35
Гидротермальный	Кварцево-сульфидная	Кварц III, кальцит II, железный блеск, пирит II, пирротин, марказит, арсенопирит, сфалерит, молибденит, пирит-мельниковит, барит I, висмутин, козалит, кобальтин, кобеллит, гессит, самородный висмут и золото	450-195	390-80	Fe, S, Si, As, Zn, Pb, Mo, Bi, Au	27,5-11
	Кварцево-карбонатная	Кварц, галенит II, пирит III, сфалерит, халькопирит, блеклая руда, аргентит, клейофан, гематит, кальцит, флюорит, барит II	390-80	165-40	Si, Ca, Fe, Cu, Zn, S, F, Ba	22,5-10,5

Глава 6. КРИТЕРИИ ПОИСКОВ И ОЦЕНКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

В качестве минералого-термобарогеохимических критериев поисков гематит-магнетитовой минерализации можно рекомендовать морфологию, степень заполнения, температуру гомогенизации, состав и концентрацию флюидных включений в жильных минералах, находящихся в тесной парагенетической ассоциации с рудными. На месторождении установлена прямая вертикальная температурная зональность с палеотемпературным градиентом, равным 7 – 8°С на 100 м глубины. Зная общий вертикальный диапазон температур продуктивного рудоотложения и температуру гомогенизации флюидных включений в минералах на современном эрозионном срезе, можно прогнозировать и оценить перспективность рудной минерализации.

Кроме того, надежным оценочным критерием служат и минералогические признаки. Например, нахождение позднего кальцита и, особенно, барита в верхних горизонтах месторождения служат критерием перспективности рудной минерализации на глубину.

Наряду с этим, выявлены некоторые типохимические особенности минералов месторождения. Например, стабильно высокие содержания висмута как в рудных, так и нерудных минералах позволяет рассматривать этот элемент как индикатор железорудного и, наложенного на него свинцово-цинково-висмутового оруденений с повышенным содержанием благородных (Au, Ag) и легирующих (Ni, Co, W и др.) элементов.

Поиски новых объектов с железорудным оруденением следует вести на участках с останцами известковисто-осадочных пород с околоскарновыми и близскарновыми метасоматитами пироксен-поливошпатового, гранат-пироксенового, пироксенового и пироксен-амфиболого составов. В качестве первоочередной площади для опоскования можно рекомендовать проведение разведочных работ в блоке известняков к северу и северо-западу от центрального и западного участков месторождения.

Нами рекомендуется также производить при эксплуатационных работах попутное извлечение таких элементов, как золото, серебро, свинец, цинк и висмут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скарново-магнетитовое месторождение Шохкадамбулак сформировано в ходе сложных многостадийных процессов минералообразования с развитием последовательно образованных скарново-магнетитовых (с золотом), полиметаллических и висмутовых оруденений.

1. На месторождении установлено более 80 минеральных видов и разновидностей, где наряду с основными рудными минералами: магнетитом, гематитом и сульфидами (пиритом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом и др.) – обнаружены такие редкие минералы, как самородный висмут,

кобальтин, козалин, галенобисмутит, кобеллит, фрейбергит, гессит и др. На месторождении поздний кальцит и, особенно, барит, локализуются в наиболее верхних частях. В связи с этим проявления их прожилковой минерализации в участках развития скарнов указывают на слабо развитый эрозионный срез и перспективность оруденения на глубину. В верхних горизонтах месторождения размещается также аметистовая минерализация, указывая на незначительный эрозионный срез участка.

2. В магнетите и некоторых других минералах месторождения установлены количественные содержания примесей литофильных, халькофильных, сидерофильных и редкоземельных элементов (всего 65 наименований). Некоторые из них (Bi, Hg) являются типохимическими, другие (Ti, Ni, Co, W) естественными легирующими добавками, а Ag и Au – металлами попутного извлечения.

3. Образование скарново-магнетитового месторождения происходило в два этапа (скарновый и гидротермальный) и четыре стадии (силикатная, магнетитовая, кварцево-сульфидная и кварцево-карбонатная). В первых двух стадиях происходит кристаллизация собственно скарновых минералов, а в двух последующих – наложенных на скарны продуктов гидротермального процесса.

4. Становление железорудного месторождения Шохкадамбулак происходило в диапазоне температур 640-80°C и давлений 2000-80 бар из разноконцентрированных (11,0-61,0 вес. %) хлоридно-гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатных растворов Ca, Mg, Na и K. При этом минералообразование начиналось при участии расплавов-растворов в течение развития скарнового процесса и закончилось кристаллизацией минералов из низкотемпературных гидротермальных растворов.

5. Флюидные включения могут быть использованы в качестве критериев поисков и прогнозирования. Признаком гематит-магнетитового оруденения может служить присутствие в кварце или кальците многофазовых включений и одновременно с ними газовых или существенно газовых вакуолей, гомогенизирующихся по I и II типам при сравнительно высоких температурах 640-420°C. Зная общий вертикальный диапазон температур продуктивного оруденения и вертикальный геотермический градиент, можно также прогнозировать перспективность минерализации на глубину. В качестве дополнительного критерия оценки уровня эрозионного среза и перспективности оруденения на глубину можно использовать также состав жидкой фазы включений.

6. Анализ полученных данных позволяет в качестве первоочередных площадей для выявления новых рудных тел рекомендовать постановку поисково-разведочных работ в ассимилированном гранитоидами и монзонитами блоке известняков к северу и северо-западу от Центрального и Западного участков месторождения.

7. На месторождении выявлена также аметистовая минерализация, которая может представлять практический интерес.

В целом, в работе сформулированы, обоснованы и доказаны основные защищаемые положения, которые в совокупности представляют собой решение проблемы создания физико-химической модели скарнообразования в целом и развития магматогенно-гидротермальных систем в частности. Разработаны также минералого-термобарогеохимические критерии поисков и прогнозирования оруденений.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. **Сафаралиев, Н.С.** Минералы зоны окисления железорудного месторождения Чокадамбулак (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев // Доклады АН РТ. – Т. 51, №2. – 2008. – С. 137-140 (перечень ВАК РФ).

2. **Сафаралиев, Н.С.** Поведение редкоземельных элементов в некоторых минералах Шохкадамбулакского железорудного месторождения (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев, А.Р. Файзиев // Доклады АН РТ. – Т. 54, №11. – 2012. – С. 926-931 (перечень ВАК РФ).

3. **Сафаралиев, Н.С.** Халькофильные элементы в некоторых минералах Шохкадамбулакского месторождения (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев, А.Р. Файзиев // Доклады АН РТ. – Т. 55, №5. – 2012. – С. 412-417 (перечень ВАК РФ).

4. Файзиев, А.Р. Термобарогеохимические условия образования минеральной ассоциации, предшествующей оруденению на Шохкадамбулакском железорудном месторождении (Чокадамбулак, западный Карамазар) / А.Р. Файзиев, **Н.С. Сафаралиев** // Доклады АН РТ. – Т. 52, №7. – 2009. – С. 544-550 (перечень ВАК РФ).

5. Файзиев, А.Р. Содержание литофильных элементов в минералах Шохкадамбулакского месторождения (Карамазар) / А.Р. Файзиев, **Н.С. Сафаралиев** // Известия АН РТ. – №1 (146). – 2012. – С. 100-106 (перечень ВАК РФ).

6. Файзиев, А.Р. Легирующие и благородные металлы в магнетите и некоторых других минералах месторождения Шохкадамбулак (Северный Таджикистан) / А.Р. Файзиев, **Н.С. Сафаралиев**, Ф.А. Малахов // Доклады АН РТ. – Т. 55, №4. – 2012. – С. 332-338 (перечень ВАК РФ).

Материалы конференций:

1. **Сафаралиев, Н.С.** Пириты из Чокадамбулакского месторождения (Северный Таджикистан) / С.Н. Сафаралиев // Материалы научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов, посвященной «15-й годовщине Независимости Республики Таджикистан», «2700-летию города Куляба» и «Году арийской цивилизации». ТГНУ «День науки». Часть I. – Душанбе: ООО «Эр-граф», 2006. – С. 146.

2. **Сафаралиев, Н.С.** Магнетит Чокадамбулакского рудного поля (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев // Труды Института геологии АН РТ. Выпуск 5. – Душанбе: Дониш, 2006. – С. 154-158.

3. **Сафаралиев, Н.С.** К истории изученности железорудного месторождения Чокадамбулак (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев // Материалы научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов, посвященной «800-летию поэта, великого мыслителя Мавлоно Джалолуддина Балхи» и «16-й годовщине Независимости Республики Таджикистан». ТГНУ «День науки». Часть I. – Душанбе: ООО «Эр-граф», 2007. – С. 204-205.

4. **Сафаралиев, Н.С.** Об аметисте железорудного месторождения Чокадамбулак (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев // Материалы научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов. Часть I. – Душанбе: ТНУ, 2008 – С. 266.

5. **Сафаралиев, Н.С.** К минералогии зоны окисления железорудного месторождения Чокадамбулак (Северный Таджикистан) / Н.С. Сафаралиев // Материалы научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов. Часть I. – Душанбе: ТНУ, 2008. – С. 161-162.

6. **Сафаралиев, Н.С.** Минералогия и термобарогеохимические условия становления аметистовой минерализации Чокадамбулакского железорудного месторождения (Западный Карамазар) / Н.С. Сафаралиев, И.С. Оймахмадов // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: материалы XV Геологического Съезда Республики Коми. Т I. – Сыктывкар: Геопринт, 2009. – С. 420-423.

7. **Сафаралиев, Н.С.** Минералого-геохимические особенности образования магнетитовых руд скарново-железорудного месторождения Шохкадамбулак / Н.С. Сафаралиев, А.Р. Файзиев // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. Т. I; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 142-144.

8. **Сафаралиев, Н.С.** Термобарогеохимические условия образования друзовидного кварца железорудного месторождения Шохкадамбулак / Н.С. Сафаралиев, А.Р. Файзиев // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. Т. I; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 144-146.

9. **Сафаралиев, Н.С.** Магнетит Шохкадамбулакского железорудного месторождения (Северный Таджикистан) и особенности его состава / Н.С.

Сафаралиев, А.Р. Файзиев // Минералогический семинар: современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения-2013). – Сыктывкар: Геопринт, 2013. – С. 118-119.

10. Файзиев, А.Р. Термобарогеохимические параметры становления Шохкадамбулакского скарново-железорудного месторождения (Северный Таджикистан) / А.Р. Файзиев, **Н.С. Сафаралиев** // Материалы XV Всероссийской конференции по термобарогеохимии. – Москва: ИГЕМ РАН, 2012. – С. 84-85.

11. Файзиев, А.Р. Микровключения флюидов в минералах - надежный источник для определения термобарогеохимических параметров минералообразования (на примере аметистовой минерализации в Шохкадамбулакском железорудном месторождении, Таджикистан) /А.Р. Файзиев, **Н.С. Сафаралиев**, И.С. Оймамадов // Минералогическая интервенция в микро - и наномир: материалы Международного минералогического семинара. – Сыктывкар: Геопринт, 2009. – С. 338-339.