

На правах рукописи

ПОДНЕБЕСНЫХ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЫДИНСКОГО
ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(ВОСТОЧНЫЙ САЯН)**

25.00.11 – геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в Томском государственном университете

Научный руководитель

кандидат геолого-минералогических наук, доцент ***Князев Георгий Борисович***

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор ***Мазуров Михаил Петрович***

кандидат геолого-минералогических наук, доцент ***Ершов Василий Владимирович***

Ведущая организация: ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «25» декабря 2008 г. в 14 ⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.07 при Томском политехническом университете (634050, г. Томск, ул. Советская, 73)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского политехнического университета (634034, г. Томск, ул. Белинского, 55)

Автореферат разослан «___» _____ 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

С.И. Арбузов

Введение

Актуальность работы. В складчатых областях юга Западной и Центральной Сибири концентрации железистых кварцитов установлены на нескольких стратиграфических уровнях: архейском, протерозойском, рифейском, венд-нижекембрийском и девонском. Изначально недооцененным и плохо изученным оказался рифейский уровень кремнисто-железистого оруденения, установленный и описанный впервые в составе Джебашской серии Западного Саяна. Вместе с тем общий цикл накопления кремнисто-железистых руд в позднем докембрии и последующим преобразованием их уже в фанерозое напоминает раннекембрийский цикл, который значительно уступает ему по масштабам.

Железоносная джебашская серия и выявленная в структурах Восточного Саяна кувайская серия оказались близки по составу, внутреннему строению и наличию в них железооруденения, оцененных как непромышленные на фоне богатых скарново-рудных концентраций старых железорудных районов (Анзаский, Абаканский и Ирбинско-Краснокаменский районы). В составе и джебашской и кувайской серий пласты серицит-хлорит-кварц-гематит-магнетитовых руд залегают среди хлорит-кварц-серицитовых сланцев и характеризуются в целом зеленосланцевым уровнем метаморфизма. В 50-е и 60-е годы прошлого столетия проявления кремнисто-железистых руд были вскрыты поверхностными горными выработками и лишь в начале текущего столетия на Сыдинском месторождении были проведены глубокие поиски. Сыдинское железорудное месторождение железистых кварцитов является первым, наиболее разведанным и описанным объектом рифейского возраста в Алтае-Саянской складчатой области. Месторождение осталось недоразведанным, но полученный материал позволяет на его примере рассмотреть некоторые общие вопросы накопления и преобразования кремнисто-железистых руд в рифейских отложениях Алтае-Саянской складчатой области.

Результаты поисковых и разведочных работ позволяют рассматривать железорудные месторождения типа Сыдинского как реальную сырьевую базу металлургических заводов Сибири для восполнения выбывающих из эксплуатации рудников юга Красноярского края и Горной Шории. Накопленный фактический материал требует обобщения и научного осмысления для расшифровки условий минералообразования, закономерностей пространственного распределения рудных масс на месторождении и, в связи с этим, выявления структурно-вещественных кри-

териев перспективности неразведанных месторождений и рудопроявлений района.

Цель работы. Выявить общие закономерности распределения оруденения на Сыдинском железорудном месторождении, дать минералого-геохимическую характеристику вмещающих пород, руд и метасоматитов. Сравнить руды Сыдинского месторождения с известными докембрийскими месторождениями железистых кварцитов и смоделировать возможный механизм образования Сыдинского железорудного месторождения.

Научная новизна работы. Впервые по результатам глубинных поисков и предварительной оценки установлено строение рудовмещающих отложений и особенности пространственного распределения рудных масс на Сыдинском железорудном месторождении, дано сводное петрографическое описание и геохимическая характеристика вмещающих пород, руд и метасоматитов, уточнена последовательность их образования. Впервые предложена термодинамическая модель формирования докембрийских месторождений железистых кварцитов фации зеленых сланцев в Алтае-Саянской складчатой области, включающая в себя все этапы формирования и преобразования месторождения.

Практическая ценность работы. Полученные данные значительно расширяют и углубляют знания о строении, геохимической зональности и формировании железистых кварцитов рифейского возраста. Их можно применить к анализу геологии и оценке перспективности месторождений и рудопроявлений железистых кварцитов рифейского возраста на территории Алтае-Саянской складчатой области.

Установлены ведущие факторы, определяющие масштаб оруденения на Сыдинском месторождении, уточнены основные закономерности распределения рудных масс различных минералогических типов руд. Для Сыдинского железорудного месторождения выделены основные этапы формирования, которые отражены в термодинамической модели формирования месторождения.

Апробация работы и публикации. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на различных мероприятиях регионального, общероссийского и международного уровней: на VII международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2002); на VIII научной студенческой школе «Металлогения древних и современных океанов» (Миасс, 2002); на XIII молодежной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца «Геология и геоэкология, исследования молодых» (Апатиты, 2002); на XI и XII между-

народных научно-практических конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Барнаул, 2005; Тюмень, 2006). По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, из которых 2 в центральной печати.

Основные защищаемые положения:

1. В рифее на территории Восточного и Западного Саяна существовал единый бассейн осадконакопления, в котором шло образование железоносных осадков кувайской и джебашской серий.
2. Для Сыдинского железорудного месторождения выделены три природных типа руд и три основных этапа минералообразования (седиментогенеза, метаморфический и гидротермальный).
3. Железистые кварциты Сыдинского месторождения относятся к типичным железистым кварцитам, характерным для докембрийских формаций мира. Показано, что железистые кварциты Сыдинского месторождения близки железистым кварцитам Саксаганского блока Кривбасса.
4. Создана термодинамическая модель формирования Сыдинского железорудного месторождения, объединяющая особенности состава руд и механизм формирования месторождения.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 142 страницах машинописного текста и состоит из введения, характеристики геологического строения Казыр-Кизирского синклинория и сопредельных территорий, описания особенностей состава железистых кварцитов, вмещающих пород и метасоматитов Сыдинского месторождения, исследования особенностей поведения порообразующих компонентов и элементов-примесей, описании термодинамической модели формирования Сыдинского месторождения, заключения, списка использованной литературы, включающего 140 отечественных и 3 зарубежных источника. Работа иллюстрирована 44 рисунками и 21 таблицей.

Основное содержание работы

Во вводной части работы дано обоснование её постановки, приведены методы и объемы исследований, обозначена научная новизна и практическая значимость выполненных автором исследований.

В первой главе на основании данных ряда исследователей (И.К. Баженов, Л.Д. Староверов, Г.Б. Князев, В.Л. Хомичев, В.В. Хоментовский, В.М. Ярошевич, А.А. Предтеченский и др.) и личных наблюдений автора дана характеристика геологического строения кувайской серии в пределах Сыдинского выступа. Определено место в геологической истории района

процессов формирования рудовмещающих отложений и развития оруденения.

Во второй главе рассмотрена геологическая позиция Сыдинского железорудного месторождения, основанная на детальном изучении вмещающих пород и руд. Дана литолого-петрографическая характеристика рудовмещающих сланцев, интрузивных и измененных пород, описаны структура, текстура и общие особенности состава руд, выделены основные типы железистых кварцитов.

В третьей главе работы рассмотрен вещественно-геохимический состав и выделены этапы, стадии процессов минералообразования на Сыдинском железорудном месторождении. Описаны особенности распределения основных химических элементов и элементов-примесей в породах и рудах Сыдинского месторождения, которые были сопоставлены с данными по месторождениям Стойленского участка КМА и Саксаганского блока Кривбасса. На основе этих данных показаны особенности накопления и распределения соединений железа в докембрии.

В заключительной главе приведено описание термодинамической модели формирования Сыдинского железорудного месторождения. Рассмотрены этапы хемогенно-осадочного накопления кремнисто-железистых осадков, их метаморфизма и гидротермального преобразования.

Обоснование защищаемых положений

Первое защищаемое положение: В рифее на территории Восточного и Западного Саяна существовал единый бассейн осадконакопления, в котором шло образование железоносных осадков кувайской и джебашской серий.

Сопоставляя разрезы кувайской и джебашской серий, можно однозначно говорить об их принадлежности к одним структурно-формационным этапам – рифейскому и венд-нижнекембрийскому (рис. 1). Разрезы кувайской и джебашской серий делятся на три части: нижняя, сложена преимущественно кварц-хлорит-серицитовыми и эпидот-актинолитовыми сланцами с прослоями железистых кварцитов, средняя представлена альбит-эпидот-хлоритовыми и кварц-хлорит-серицитовыми сланцами, с вулканитами основного состава, известняками и верхняя, сложенная, в основном, хлорит-мусковит-кварцевыми сланцами, с вулканитами основного состава и известняками, в которых также отмечены железные руды.

На рисунке 1 видно, что изербельская, нижеамыльская и вышеамыльская свиты джебашской серии Западного Саяна со-

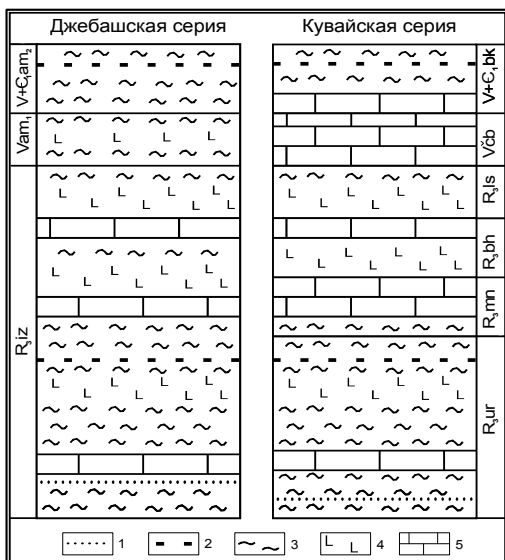


Рис. 1. Схема сопоставления разрезов джебашской и кувайской серий

Примечание: 1 - песчаники, 2 - железистые кварциты, 3 - сланцы различного состава, 4 - вулканиты основного состава, 5 - известняки.

ответствуют урманской, манской и бахтинской свитам кувайской серии, а также вышележащим лысанской, чибижевской и белокитатской свитам Восточного Саяна. Вместе они образуют комплекс пород, сфор-

Таблица 1. Химический состав метаморфических сланцев джебашской и кувайской серий

	Джебашская серия		Кувайская серия	
	среднее	стандарт	среднее	стандарт
SiO ₂	48,63	2,12	49,73	2,53
TiO ₂	1,99	0,71	1,60	0,66
Al ₂ O ₃	15,04	1,24	12,13	1,43
Fe ₂ O ₃	4,52	1,24	5,09	1,52
FeO	7,02	1,42	7,63	2,38
MnO	0,17	0,05	0,42	0,27
MgO	6,03	0,94	3,75	0,64
CaO	10,33	2,02	12,92	2,08
Na ₂ O	2,74	0,66	2,70	0,85
K ₂ O	0,67	0,69	0,68	0,77
P ₂ O ₅	0,17	0,04	0,64	0,70

Примечание: Среднее для пород джебашской серии рассчитывалось по данным Кумеева С.С., Кулакова К.К. и др. (1970), Чудина А.В., Вареника В.Г., Габеева В.А. и др. (1976), Попова В.А., Митуса А.И. и др. (1999). Среднее для пород кувайской серии рассчитывались по химическим анализам, выполненным в Западно-Сибирском испытательном центре г. Новокузнецк (2002).

работки вмещающих пород и руд Сыдинского месторождения гидротермальными растворами, однако в случае с марганцем

мировавшийся в рифее-венде, где железооруденение соответствует двум стратиграфическим уровням: рифейскому и венд-нижнекембрийскому. Эти отложения являются основанием для формирования на территории Восточного и Западного Саяна кембрийской складчатой системы.

По химическому составу рудовмещающих сланцев породы джебашской и кувайской серий также довольно близки (таблица 1). Небольшие отличия наблюдаются только в содержании MnO и P₂O₅. Преобладание оксидов марганца фосфора в сланцах кувайской серии объясняется привнесом этих элементов во время про-

это не привело к формированию самостоятельной минерализации, а фосфор концентрируется в виде апатита.

Сходство кувайской и джебашской серий предполагает формирование в схожих геологических условиях. Идентичность, близкий возраст и геологическая позиция серий позволяет говорить о существовании бассейна осадконакопления рифейского возраста. Выделяется две полосы распространения рифейских отложений: первая – область Сисимо-Казырской складчатой системы Восточного Саяна, а вторая – область Центрально-Западно-Саянской складчатой системы.

Железистые кварциты кувайской и джебашской серий типично протерозойские образования, которые соответствуют криворожскому формационному типу. Для таких формаций характерна большая фациальная устойчивость слоев кварцитов, высокая устойчивость осадконакопления, в связи, с чем вмещающие породы и руды весьма выдержаны по простиранию. Такая устойчивость осадконакопления может объясниться лишь тем, что в данных условиях оно не подавляется интенсивным подводным вулканизмом.

Этот формационный тип железистых кварцитов характерен для протерозойского этапа развития земной коры, когда терригенное осадконакопление преобладало над вулканогенным. Для месторождений этого формационного типа характерен зеленосланцевый и эпидот-актинолитовый уровень метаморфизма. Железистые кварциты представлены чередованием горизонтов железистых кварцитов, рудных сланцев и вмещающих безрудных сланцев, причем в железистых кварцитах наблюдаются переходы от существенно гематитовых, до существенно магнетитовых. Переходы железистых кварцитов в сланцы, наиболее ярко выраженные по вертикали, указывают на подавление хемогенного рудного образования терригенным.

Второе защищаемое положение: Для Сыдинского железорудного месторождения выделены три природных типа руд и три основных этапа минералообразования (седиментогенеза, метаморфический и гидротермальный).

На основе проведенных полевых исследований, описаний кернa скважин, химических анализов пород Сыдинского месторождения по составу и соотношению рудных и нерудных минералов на месторождении можно выделить силикатно-гематит-магнетитовые кварциты и собственно гематит-магнетитовые кварциты. На месторождении присутствует переходная разность между вмещающими сланцами и чисто рудными прослоями – рудные сланцы. Эта классификация в целом соответствует принятой для докембрийских железистых кварцитов западной части России (В.Н. Гусельников, 1979).

Силикатно-гематит-магнетитовые кварциты. Этот тип железистых кварцитов состоит из магнетита и гематита, выступающих в качестве рудных минералов. В качестве нерудных минералов здесь выступают хлорит и в меньшей степени серицит. В основном для этого типа кварцитов по составу характерны кварц-хлорит-гематит-магнетитовые, хлорит-кварцевые, кварц-хлоритовые, хлоритовые и кварц-серицит-хлоритовые прослои. Структура слоев сильно зависит от состава самих прослоев и в основном представлена лепидогранобластовой и гранобластовой разновидностями. Текстура рудных и рудосодержащих прослоев может быть тонковкрапленной и прерывисто-полосчатой с соответствующим распределением рудных минералов.

Гематит-магнетитовые кварциты. Этот тип железистых кварцитов состоит из магнетита, гематита, кварца, апатита, хлорита и серицита. От силикатно-магнетит-гематитового типа железистых кварцитов он отличается значительно меньшим содержанием хлорита и большим содержанием серицита. Среди рудных прослоев преобладают хлорит-магнетит-гематит-кварцевые, серицит-гематит-кварцевые, кварц-магнетит-хлоритовые, гематит-apatит-кварцевые, апатит-магнетит-гематит-кварцевые, кварц-гематит-магнетитовые. Среди нерудных прослоев можно выделить кварц-серицитовые, кварцевые, хлорит-кварцевые, апатит-кварцевые, кварц-пирит-хлоритовые прослои.

Гидротермально изменённые пирит- и карбонатсодержащие железистые кварциты. Гидротермальные изменения железистых кварцитов выражаются в появлении и развитии среди них поздних кварцевых и кварц-хлоритовых жил. Одним из наиболее характерных изменений является карбонатизация. При этом процессе кальцит вместе с хлоритом развивается вдоль полосчатости железистых кварцитов, образуя самостоятельные полосы или замеща первичные силикатно-гематит-магнетитовые прослои.

Сыдинское железорудное месторождение прошло три основных этапа своего формирования: седиментогенеза, метаморфический и гидротермальный, который разделяется на две стадии: кварц-кальцит-хлоритовую и кварц-анкерит-серицит-сульфидную.

В процессе седиментогенеза шло формирование кварц-карбонат-глинистых, железисто-силикатных и железисто-кремнистых осадков. Возможно, что уже на этой стадии формирования месторождения наметились основные типы парагенезисов.

В процессе метаморфического преобразования и изменения пород, в процессе складчатости, обезвоживания и раскристаллизации осадка; при заметной подвижности железа, кремния, магния и кальция вместе с метаморфическими растворами, из кварцево-глинистых и карбонатных осадков сформировались хлорит-мусковитовые сланцы, из железисто-силикатных осадков – гематит-магнетит-хлорит-мусковит-кварцевые сланцы, из железисто-кремнистых осадков – силикатно-гематит-магнетитовые кварциты и собственно гематит-магнетитовые кварциты.

Для гидротермального этапа формирования месторождения отмечается две стадии: кварц-кальцит-хлоритовая, в которую сформировались пропилиты, и кварц-анкерит-серицит-сульфидная, в которую формировались беризиты и кварц-карбонатные жилы небольшой мощности (таблица 2).

Таблица 2. Этапы образования и изменения вмещающих пород и руд

Продукты минералообразования	Седиментогенез	Метаморфический	Гидротермальный	
			Кварц-кальцит-хлоритовая	Кварц-анкерит-серицит-сульфидная
Гематит		-----	---	
Магнетит		-----		
Мартит				--
Кварц	-----	---	---	----
Апатит	---	---		
Серицит		-----		--
Хлорит	----- (1)	--- (2)	-- (3)	-- (4)
Анкерит				--
Кальцит	---		-----	
Доломит			--	
Пирит	---			-----
Галенит				--
Сфалерит				--

Примечание: 1 – шамозит, 2 – тюрингит, 3 – прохлорит, рипидолит, 4 – клинохлор, пеннин.

Третье защищаемое положение: Железистые кварциты Сыдинского месторождения относятся к типичным железистым кварцитам, характерным для докембрийских формаций мира. Показано, что железистые кварциты Сыдинского месторождения близки железистым кварцитам Саксаганского блока Кривбасса.

Руды Сыдинского месторождения представлены железистыми кварцитами и рудными гематит (магнетит) –хлорит-серицит-кварцевыми сланцами. Среди руд по соотношению главных рудных минералов можно выделить существенно магнетитовые и

гематит-магнетитовые и существенно гематитовые и магнетит-гематитовые руды.

Как показывают проведенные исследования, их деление на разные фации и типы довольно условно, все породы месторождения образуют единую серию пород, сложенную небольшим количеством минералов (таблица 3).

Таблица 3. Средние содержания минералов в рудах Сыдинского месторождения (об. %)

Магнетит	Гематит	Кварц	Хлорит	Мусковит	Апатит	Кальцит и доломит	Пирит
15	17	30	20	2,4	2	3	2,4

Все руды обладают полосчатой и плейчатой-полосчатой текстурой типичной для железистых кварцитов. Иногда в рудах встречаются брекчиевые текстуры и руды, проработанные гидротермальными растворами с прожилками гидротермальных минералов: кварца, хлорита, карбонатов и сульфидов.

В целом для руд Сыдинского месторождения характерны гранобластовые, гранолепидобластовые, лепидогранобластовые, лепидобластовые структуры. Количественным соотношением четырех минералов: хлорита, кварца, магнетита и гематита определяется характер минерализации прослоев, по количественному соотношению они могут быть мономинеральными, биминеральными, трехминеральными, реже встречается большее количество минералов.

Обработка выборки химических анализов вмещающих пород и руд Сыдинского железорудного месторождения и железорудных месторождений Саксаганского блока Кривбасса выявила в ней некоторую структуру, связанную с предполагаемыми факторами формирования и изменения железистых кварцитов (рисунок 2). Главный (первый) фактор поляризовал с одной стороны алюминий и кремний, а с другой железо и обеспечил треть изменчивости состава кремнисто-железистых руд. Этот фактор легче всего интерпретировать как фактор осадконакопления, вызывавший изменение соотношения кремнезема и глинистой (нерудной) компоненты железистого осадка в разной фациальной обстановке.

На рисунке 2 основная масса кремнисто-железистых руд располагается в достаточно узкой области, характеризуя близость составов кремнисто-железистых пород и руд Сыдинского месторождения Восточного Саяна и месторождений Саксаганского блока Кривбасса, что объективно выражается в сохранении облика и состава этих пород на разных континентах и в разные геологические эпохи. Вместе с тем, на фак-

торной диаграмме в поле первого и второго факторов выявляется достаточно отчетливый тренд изменчивости составов руд. Это направление объективно соответствует обстановке без заметного участия основных вулканитов.

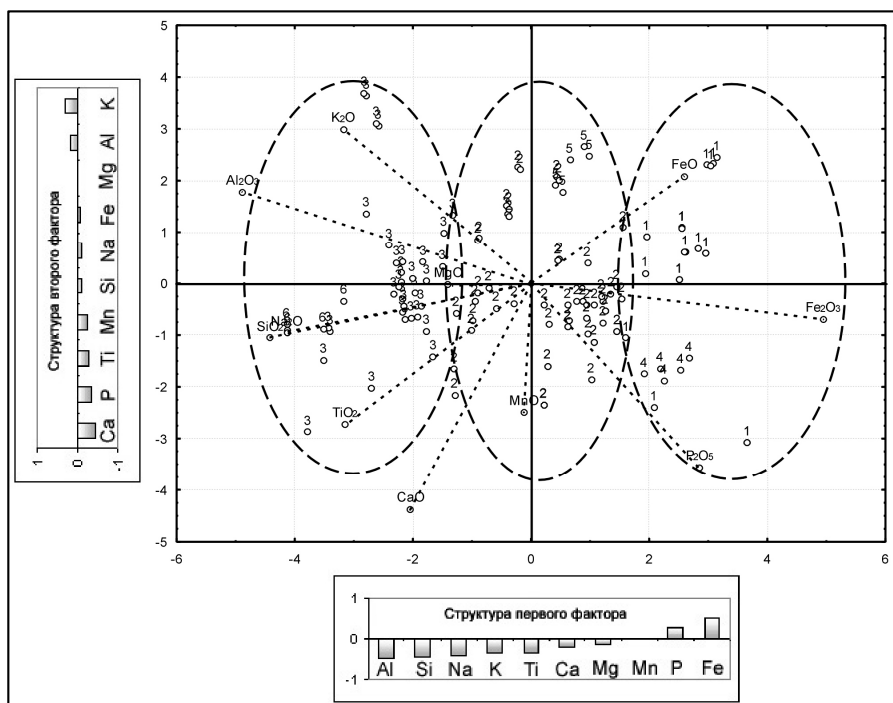


Рис. 2. Факторная диаграмма изменчивости составов вмещающих пород и руд

Примечание: Восточный Саян (Сыдинское месторождение): 1 – железистые кварциты, 2 – рудные сланцы, 3 – безрудные сланцы; Кривбасс (Саксаганский блок): 4 – железистые кварциты, 5 – рудные сланцы, 6 – безрудные сланцы.

Второй фактор изменчивости может быть представлен как метаморфический. По-видимому, метаморфизм является одной из причин, вызывающий появление глинозёмистого тренда изменчивости, обуславливая частичную перегруппировку (метаморфическую дифференциацию) компонентов кремнисто-железистых руд и вмещающих пород.

Все факторы изменчивости, отвечающие определенным этапам формирования месторождений, четко фиксируются на Сыдинском месторождении и на месторождениях Саксаганского блоке Кривбасса. На факторной диаграмме для этих месторож-

дений четко обособляются три типа пород: вмещающие безрудные сланцы, рудные сланцы и железистые кварциты.

Одноименные типы пород Сыдинского месторождения Восточного Саяна и Саксаганского блока Кривбасса несколько отличаются друг от друга. Руды Саксаганского блока обогащены фосфором, рудные сланцы – калием и алюминием, а безрудные сланцы тяготеют к кварц-натриевой области. Руды Сыдинского месторождения смещены в область калия и алюминия, т.е. хлоритизированы, рудные сланцы кальцию и марганцу (на месторождении отмечены повышенные содержания марганца в составе карбонатов), а безрудные сланцы обогащены титаном и кальцием. Такое распределение, прежде всего, определяется разными химическими составами вмещающих пород и руд, а также щелочным метасоматозом, характерным для Саксаганского блока Кривбасса. Однако, как показывает распределение компонентов, формирование систем Сыдинского месторождения и месторождений Саксаганского блока похожи. Это подтверждается и данными в таблице 4, в которой приведены данные по среднему химическому составу вмещающих пород и руд Сыдинского месторождения Восточного Саяна и месторождениям Саксаганского блока Кривбасса.

Таблица 4. Средний химический состав вмещающих пород и руд по результатам силикатного анализа в массовых долях (массовые проценты)

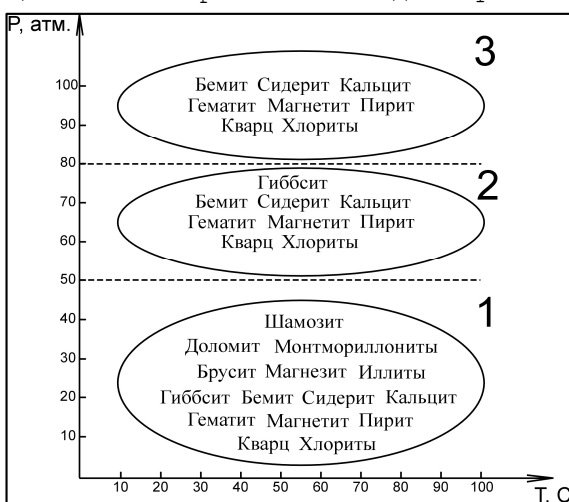
	Вмещающие сланцы		Рудные сланцы		Железистые кварциты	
	Кривбасс	Сыда	Кривбасс	Сыда	Кривбасс	Сыда
SiO ₂	58,26	58,52	43,54	42,14	39,01	25,02
TiO ₂	0,49	0,75	0,43	0,35	0,07	0,11
Al ₂ O ₃	19,77	20,33	14,61	12,10	0,35	2,42
Fe ₂ O ₃	3,06	4,43	5,10	14,71	42,18	46,55
FeO	6,66	8,27	21,84	10,76	13,32	5,89
MnO	0,05	0,33	0,10	0,16	0,09	0,12
S	–	2,42	–	0,91	–	0,54
MgO	1,40	4,73	4,83	3,13	1,37	0,80
CaO	0,38	4,88	0,24	2,09	0,77	0,16
P ₂ O ₅	–	–	0,10	1,11	0,18	0,19

Сыдинское железорудное месторождение является типичным представителем позднедокембрийского цикла железонакпления, где четко обособляется два уровня: рифей-вендский и венд-нижнекембрийский (А.М. Дымкин, В.М. Чайка, 1992).

Четвертое защищаемое положение: Создана термодинамическая модель формирования Сыдинского железорудного месторождения, объединяющая особенности состава руд и механизм формирования месторождения. Для Сыдинского железорудного месторождения устанавливается три этапа формирования, ко-

торые соответствуют известным представлениям о формировании докембрийских месторождений железистых кварцитов. В соответствии с принятыми представлениями о хемогенно-осадочном механизме накопления кремнисто-железистых осадков, было предпринято физико-химическое моделирование возможного образования вмещающих пород и руд Сыдинского месторождения с использованием программного комплекса «Селектор» (И.К. Карпов, К.В. Чудненко, 1997). Состав системы в первом приближении принят как реальный состав изученных руд Сыдинского месторождения по данным полного силикатного химического анализа.

При моделировании изменения давления системы допускались от 1 до 100 атмосфер, температуры от 0 до 100°C и существенное превышение жидкой фазы над твердой. Во всех мо-



дельных экспериментах получено восемнадцать минеральных фаз, которые разделились на три поля, отвечающих трем разным условиям давления: 1-60 атм., 60-80 атм., 80-100 атм. (рис. 3).

Рис. 3. Состав минеральных парагенезисов в зависимости от давления при температуре до 100°C (для этапа формирования осадка).

В ходе хемогенно-осадочного процесса накопления кремнисто-железистых осадков рН среды меняется от 4 до 8, со слабо окислительной до слабо восстановительной, а Eh от 30 до -7, что соответствует данным Ю.П. Мельника, М.Ф. Сташук и др. При повышении в системе значения рН идет увеличение содержания магнетита, гематита, сидерита, пирита и уменьшение содержания гетита и шамозита (рис. 4).

Изменение температуры не приводит к существенной дифференциации осадков, однако сказывается на изменении содержаний некоторых алюмосиликатных компонентов и карбонатов. От температуры в системе сильно зависит железистость хлоритов: при увеличении температуры в системе падает не только его содержание, но и железистость. Образующиеся при

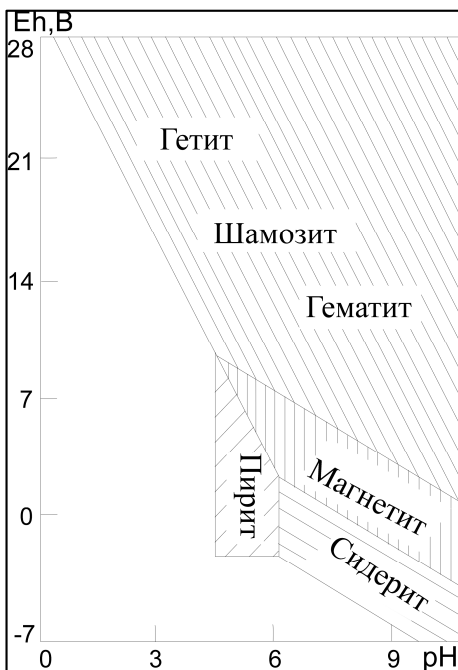


Рис. 4. Поля устойчивости минералов железа на диаграмме pH-Eh (при $T=50^{\circ}\text{C}$, $P=50$ атм.).

температурах выше 50°C хлориты более магнезиальны, чем хлориты, образующиеся при более низких температурах.

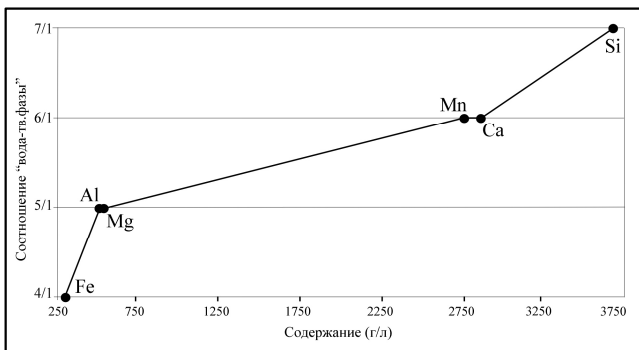
При понижении в системе соотношения «вода – твердые фазы» нами учитывается кинетическая составляющая процесса. В этом случае первыми в растворе предела насыщения достигают соединения железа при соотношении жидкой и твердой фазы 7/1, потом соединения алюминия и магния при 6/1, кальция и марганца при 5/1, последними – соединения кремния

при соотношении 4/1 (рис. 5). Очевидно, что существуют предпосылки дифференциации кремния и железа уже на стадии выпадения из раствора. Между соединениями этих двух компонентов в растворе при данных термодинамических условиях достигают предела растворимости соединения алюминия, магния и кальция.

Рис. 5. Пределы растворимости важнейших компонентов системы.

Как видно на рисунке 6, при уменьшении в системе количества воды идет

значительное обеднение парагенезиса. Если при соотношении «вода – твердые фазы» как 7/1 имеется полный набор глинистых, гидроокисных и карбонатных минеральных фаз, то уже при соотношении 4/1 – такие минеральные фазы как бемит,



гипс, доломит, гетит, монтмориллонит, каолинит отсутствуют.

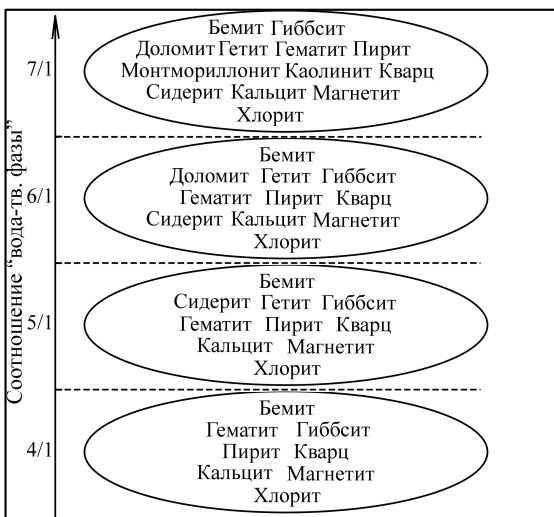


Рис. 6. Модельный состав парагенезисов при изменении количества воды в системе «вода - твердые фазы».

Сохраняются только оксидные формы, сульфиды, некоторые карбонаты и хлориты. Хлоритов в системе становится значительно меньше, а оксидных форм больше. С постепенным уплотнением осадка увеличивается концентрация рудных компонентов, уменьшается

концентрация хлоритов, перестают присутствовать глинистые компоненты (таблица 5).

Таблица 5. Модельный состав парагенезисов при изменении количества воды в системе «вода - твердые фазы»

«вода - тв. фазы» (7/1)	«вода - тв. фазы» (6/1)	«вода - тв. фазы» (5/1)	«вода - тв. фазы» (4/1)
Бемит	Бемит	Бемит	Бемит
Гипс	Гипс	Гипс	Гематит
Доломит	Доломит	Гетит	Пирит
Гетит	Гетит	Гематит	Магнетит
Гематит	Гематит	Пирит	Кальцит
Монтмориллонит	Пирит	Сидерит	Хлорит
Пирит	Кварц	Кальцит	Сидерит
Каолинит	Сидерит	Магнетит	Кварц
Кварц	Кальцит	Хлорит	
Сидерит	Магнетит	Кварц	
Кальцит	Хлорит		
Магнетит			
Хлорит			

При моделировании процесса наложенного метаморфизма, изменения давления системы допускались от 1 до 700 атмосфер, температуры от 1 до 500°C. Во всех модельных экспериментах получено четырнадцать минеральных фаз (рис. 7). Все полученные минеральные ассоциации разделились на четы-

ре поля, отвечающих четырем разным условиям давления: 100-200 атм., 200-350 атм., 350-550 атм., 500-700 атм.

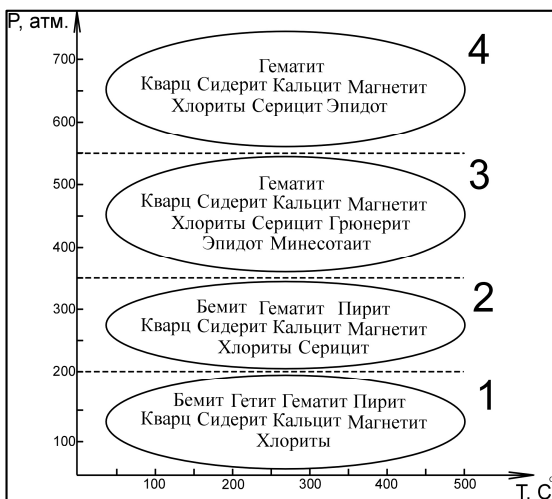


Рис. 7. Состав минеральных парагенезисов в зависимости от давления при температуре до 500°C.

Первый и второй уровни характеризует стадию окончательного преобразования осадка в породу, третий и четвертый в целом отвечают уровню зеленосланцевой фации метаморфизма или условиям близким к ней. При постепенном повышении

давления в системе полностью исчезают гидроксиды: гетит переходит в гематит – гетит → гематит ($2\text{FeOOH} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$), а алюминий из бемита переходит в хлориты и серицит – бемит → хлориты + серицит, т.е. идет процесс дегидратации системы.

При моделировании процесса наложенного метаморфизма массовый переход гетита в гематит осуществляется в условиях эпигенеза при температуре до 150°C еще до начала регионального метаморфизма, что подтверждается и экспериментальными данными Р. Беккера (1976) и Р. Клейна (1973). Следует отметить, что магнетит и гематит при изменении

давления в системе ведут себя стабильно: изменение их содержания идет плавно, без резких скачков (рис. 8).

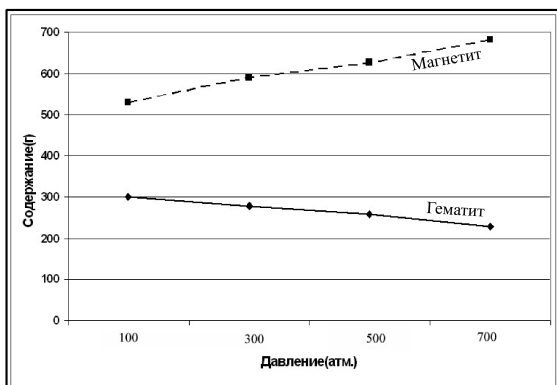


Рис. 8. Изменение содержания гематита и магнетита в системе при изменении давления.

С добавлением в систему газообразного оксида углерода при температурах до 500°С гематит может переходить в магнетит через сидерит: гематит → сидерит → магнетит. При давлениях более 400 атм. сидерит, по-видимому, полностью переходит в магнетит, т.к. в системе становится больше магнетита и почти исчезает сидерит. При давлении более 400 атм. появляется эпидот, содержание которого незначительно.

На этапе моделирования процесса гидротермального преобразования кремнисто-железистых осадков состав исходного раствора, поступающего в систему месторождения, задан исходя из существующих представлений о химическом составе низко- и среднетемпературных гидротермальных растворов в целом. Можно представить себе три миграционных цикла компонентов системы, каждый из которых начинается насыщением исходных растворов кварц-карбонатными компонентами, затем насыщенные растворы перемещаются в пределы вмещающих сланцев и руд, а затем по мере движения этих растворов и их окончательного насыщения идет отложение кварц-карбонатных компонентов за счет реакций друг с другом поровых и трещинных составляющих единого потока гидротерм.

При изменении в системе температуры, все парагенезисы разделились на три поля, которые отвечают трем разным температурным условиям: 50-150°С, 150-200°С и 200-300°С. Их можно охарактеризовать как разные стадии гидротермального процесса – низкотемпературный и среднетемпературный и высокотемпературный (рис. 9).

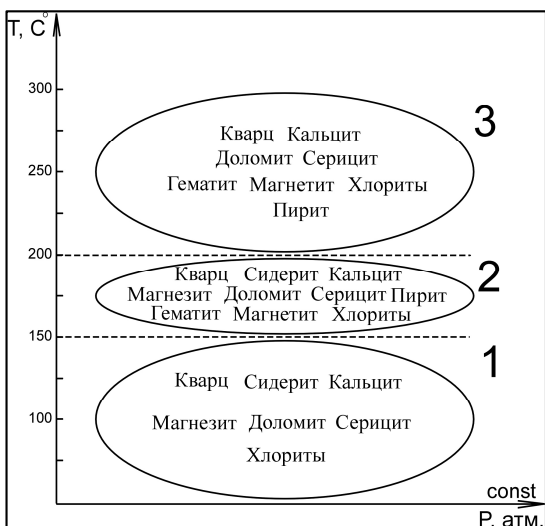


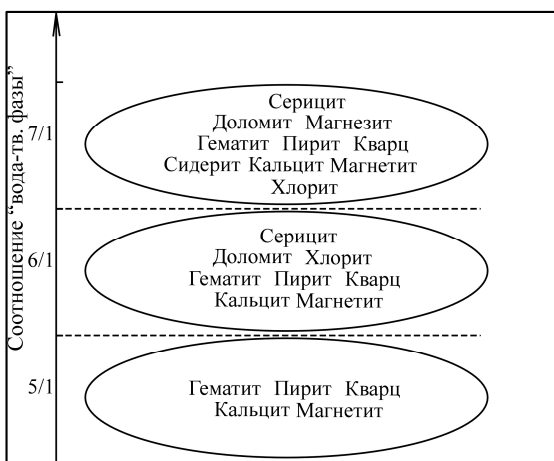
Рис. 9. Состав минеральных парагенезисов в зависимости от температуры при давлении до 1 атм.

Первый уровень характеризуется преобладанием карбонатной составляющей, на втором наблюдается примерное равенство всех компонентов, и третий – увеличением в системе доли кварца, гематита, магнетита, хлоритов и пирита.

При температурах около 150°C и выше концентрация в системе кварца и кальцита больше, чем при более низких температурах. Если на начальных стадиях формирования раствора до его поступления в систему месторождения в системе преобладали такие элементы как Si и Ca, то при поступлении растворов в систему месторождения и понижением температуры идет насыщение системы Mg и Fe, которые, очевидно, заимствуются из вмещающих и рудных сланцев. На месторождении имеет место четко выраженная фация сульфидов в виде пирита, отложение которого может идти при достаточно высокой концентрации в системе H_2CO_3 и серы при температурах выше 150°C . Повышенные концентрации железа могут вызывать образование мартита. В некоторых частях разреза наблюдаются березиты. Они формировались в тот момент, когда состав растворов был существенно кислым.

Для выяснения предела насыщения термодинамической системы, при котором идет выпадение компонентов из раствора, постепенно понижаем соотношение жидкой и твердой фаз. Первым из раствора выпадают соединения железа и магния при соотношении водной и твердой фазы 7/1, потом соединения кальция и алюминия при 6/1, кремния при 5/1.

При увеличении концентрации раствора идет обеднение начального парагенезиса. Если при соотношении «вода – твердые фазы» 7/1 наблюдается постоянство парагенезисов, то при соотношении 6/1 исчезают магнезит и сидерит, а при соотношении 5/1 остаются



только кварц, кальцит, гематит и магнетит (рис. 10, таблица 6). При этом температура и давление в системе остаются постоянными ($T=150^{\circ}\text{C}$, $P=1$ атм.).

Рис. 10. Модельный состав парагенезисов при изменении количества воды в системе «вода – твердые фазы».

Таблица 6. Модельный состав парагенезисов при изменении количества воды в системе «вода – твердые фазы»

«вода – тв. фазы» (7/1)	«вода – тв. фазы» (6/1)	«вода – тв. фазы» (5/1)
Кварц	Кварц	Кварц
Сидерит	Кальцит	Кальцит
Кальцит	Доломит	Гематит
Магнезит	Серицит	Магнетит
Доломит	Гематит	
Серицит	Магнетит	
Гематит	Хлорит	
Магнетит	Пирит	
Хлорит		
Пирит		

Содержания модельных парагенезисов довольно хорошо увязываются с реальными содержаниями минералов, которые приведены в таблице 7. Вполне естественно, что полного совпадения значений содержания тех или иных минеральных компонентов не будет. Это связано с тем, что во всем объеме модели температура, давление, pH и Eh постоянные, а в реальных условиях этого не наблюдается. Содержание минералов по данным химических анализов будет сильно зависеть и от места взятия проб. В данной таблице приведены средние содержания минералов из всех типов вмещающих пород и руд Сыдинского месторождения.

По модельным и реальным содержаниям очень близки такие минералы как кальцит, хлориты, гематит и пирит. Несколько отличаются магнетит и кварц. Причина таких различий заключается в том, что взятые за основу модели данные по среднему химическому составу вмещающих пород и руд Сыдинского месторождения имеют точечный, а не интервальный характер.

Таблица 7. Сопоставление содержания основных минералов в физико-химической модели и реально наблюдаемых составов руд (в %)

Минералы	Изменение пределов содержания	Модель	Реальный состав
Кальцит	0,52–3,15	1,18	1,65
Магнетит	12,26–28,17	23,72	16,68
Хлориты	5,87–18,48	17,24	15,25
Гематит	17,23–38,81	34,15	33,72
Кварц	3,12–32,75	4,90	15,74
Пирит	0,69–2,45	1,87	1,36

Выводы

1. Сыдинское железорудное месторождение характеризует ранний этап устанавливаемого для Алтае-Саянской складчатой области позднедокембрийского цикла накопления железистых кварцитов.
2. Железистые кварциты Сыдинского месторождения по всем признакам являются типичными железистыми кварцитами. Они во многом идентичны железистым кварцитам фации зеленых сланцев Саксаганского блока Кривбасса, а также имеют общие черты практически со всеми докембрийскими месторождениями железистых кварцитов вследствие близкого механизма формирования месторождений этого типа для всех формаций докембрия.
3. Породы кувайской серии в районе Сыдинского железорудного месторождения относятся к формации железистых кварцитов в осадочных комплексах с подчиненным количеством продуктов вулканизма. Это подтверждается типичным для такого типа строением разреза, где наряду с железистыми кварцитами присутствуют безрудные сланцы и как переходная разность между ними – рудные сланцы.
4. Для железистых кварцитов Сыдинского месторождения предполагается хемогенно-осадочный механизм формирования, который был смоделирован с помощью программного продукта «Селектор». Смоделированы все основные стадии формирования и преобразования вмещающих пород и руд Сыдинского месторождения., для каждой стадии получен набор парагенезисов, отвечающих разным уровням температур и давлений, изучено поведение рудных минералов при изменении термодинамических условий в системе, исследовано поведение показателей pH и Eh, показаны изменения состава раствора при изменении соотношения «вода-твердые фазы». Много факторов, которые могли оказывать влияние на эти процессы, не рассматривались и не вносились в условия, учитываемые при моделировании. Однако, представленные модели не протеворечат общепринятым представлениям о формировании докембрийских формаций железистых кварцитов.
5. Для Сыдинского железорудного месторождения выделены три этапа формирования, которые соответствуют этапам формирования большинства известных месторождений железистых кварцитов мира.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Поднебесных А.В. Особенности состава руд Сыдинского железорудного месторождения (Восточный Саян) – Томск: Изд-во НТЛ, 2002 – С. 225-226.
2. Поднебесных А.В. Сыдинское железорудное месторождение Восточного Саяна – Миасс: Изд-во ИМин УрО РАН, 2002 – С. 136-139.
3. Поднебесных А.В. Особенности состава Сыдинского железорудного месторождения Восточного Саяна // Минералогия, кристаллография, полезные ископаемые и геофизика, петрофизика.- Апатиты: ООО «Апатит-Медиа», 2002.- Т.2.- С.70-72.
4. Князев Г.Б., Гуков С.В., Поднебесных А.В. Железистые кварциты Сыдинского месторождения (Восточный Саян) // Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия. – Томск: Изд-во ТГУ, 2003.- Вып.3.- С. 59-66.
5. Поднебесных А.В. Типы железистых руд Сыдинского железорудного месторождения Восточного Саяна // Доклады 11-й Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – Томск: Том. гос. ун-т, 2005. – С. 30-34.
6. Поднебесных А.В. Физико-химическое моделирование процесса накопления кремнисто-железистых осадков на примере Сыдинского железорудного месторождения восточного Саяна // Доклады 12-й Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – Томск: САН ВШ; Изд-во «В-Спектр», 2006. – С. 164-168.
7. Поднебесных А.В. Особенности химического состава руд Сыдинского месторождения железистых кварцитов (Восточный Саян) // Вестник ТГУ.- Томск: Изд-во ТГУ, 2008.- Вып.307.- С. 175-179
8. Князев Г.Б., Поднебесных А.В. Верхнедокембрийские железистые кварциты складчатых областей юга Сибири // Отечественная геология – 2008. – №4. – С. 44-49