

На правах рукописи

**Азарнова Людмила Александровна**

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ  
НА ПРИМЕРЕ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗА И ХРОМА ПОЛЯРНОГО УРАЛА**

Специальность 25.00.05 – минералогия, кристаллография

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
геолого-минералогических наук

Москва, 2008

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГУП «ВИМС»)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук  
Ожогина Елена Германовна

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор Пирогов Борис Иванович

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор Коровушкин Владимир Васильевич

Ведущая организация: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН

Защита состоится 12 декабря 2008 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д.216.005.01 во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГУП «ВИМС») по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВИМС».

Автореферат разослан                      ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Шурига Т.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Укреплению и восполнению существующей в России минерально-сырьевой базы черных металлов должны способствовать проводимые на Полярном Урале поисковые работы на железные и хромовые руды в рамках проекта «Урал промышленный – Урал Полярный» [Машковцев, Кустов, 2007]. Особый интерес к этим объектам обусловлен как возрастающей потребностью уральских металлургических комбинатов в местном железорудном сырье, так и существующим общероссийским дефицитом хромовых руд. Среди минерально-сырьевых объектов Полярного Урала особое место принадлежит Юнь-Ягинскому месторождению железа, являющемуся типовым объектом магнетитового оруденения региона, и хромовым рудам Хойлинской поисковой площади, перспективной на выявление промышленных месторождений.

Широкомасштабное развертывание поисковых работ на руды железа и хрома требует проведения их опережающей экспрессной и малозатратной минералогическо-технологической оценки, основой которой являются минералогические критерии.

Определению минералогических критериев технологических свойств руд посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей. Наиболее детально разработаны вопросы взаимосвязи вещественного состава и обогатимости на примере никелевых, железных, оловянных, вольфрамовых, редкометальных и марганцевых руд [Борискин и др., 1987, Иванов и др., 1989, Изоитко, 1997, Ожогина, 2002, Пирогов и др., 1988, Сидоренко и др., 1992]. Однако проблема обоснованности применения минералогических критериев для технологической оценки руд при проведении геологоразведочных работ (ГРР) остается недостаточно изученной. До настоящего момента не выявлены критерии, позволяющие достоверно оценивать технологические свойства железных и хромовых руд на раннем этапе их геологического изучения.

**Цель исследований** – выявление минералогических критериев, характеризующих поведение в процессах обогащения железной магнетитовой руды Юнь-Ягинского месторождения и высокохромистых хромовых руд Хойлинской поисковой площади и обоснование их применения как основы прогнозной технологической оценки руд на ранних стадиях ГРР. Для достижения поставленной цели решались следующие главные задачи:

1. Изучить особенности состава и строения железных руд Юнь-Ягинского месторождения и хромовых руд Хойлинской площади и их влияние на эффективность применяемых технологических методов.
2. Дать прогноз показателей обогащения руд минералогическими методами и сравнить их с полученными экспериментально при проведении технологических испытаний.
3. Разработать на основании проведенных исследований минералогические критерии оценки технологических свойств магнетитовых и высокохромистых хромовых руд.
4. Обосновать возможность оценки технологических свойств руд комплексом современных методов технологической минералогии.

**Фактический материал.** Объектом диссертационного исследования являлись руды разведанного Юнь-Ягинского месторождения на этапе его современной

технологической и геолого-экономической переоценки и проявлений Хойлинской площади, находящихся на поисковой стадии ГРР. Непосредственный предмет исследования – керн технологических скважин и технологическая проба железной руды Юнь-Ягинского месторождения, минералого-технологические пробы высокохромистых хромовых руд Хойлинской площади, а также продукты их обогащения.

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГУП «ВИМС»). Материал для исследований отобран соискателем при полевых работах на рудопроявлениях Хойлинской площади и при документации керна скважин Юнь-Ягинского месторождения, а также получен от обогатителей ФГУП «ВИМС» в виде минералогических проб и продуктов технологических испытаний. В работе использованы результаты нескольких сотен оптико-минералогических, петрографических и минераграфических анализов, более 200 рентгенографических (к.г.-м.н. Г.К. Кривоконева, И.С. Наумова) и микрорентгеноспектральных анализов (к.г.-м.н. Н.И. Чистякова, к.г.-м.н. Л.О. Магазина, ИГЕМ РАН), более 200 химических анализов (аналитический отдел ФГУП «ВИМС»). При проведении исследований определены физические свойства минералов руд: плотность, микротвердость и микрохрупкость. Значения удельной магнитной восприимчивости минералов получены д.г.-м.н. Л.Т. Раковым. Гранулометрический состав рудных минералов определен Н.Н. Кривошековым методом оптико-геометрического анализа с помощью систем анализа изображения на материале более 50 прозрачных и полированных шлифов, в подсчете использованы сотни тысяч зерен. Электронно-микроскопические исследования 8-ми препаратов со сколов сульфидов выполнены д.г.-м.-н. В.Т. Дубинчуком. Мессбауэровские спектры трех образцов магнетитовой руды и магнетита получены в МИСиСе.

**Методы исследований.** Основной объем минералогических исследований выполнен в ФГУП «ВИМС» в соответствии с нормативно-методическими документами Научного Совета по методам минералогических исследований (НСОММИ).

Использованы следующие методы исследований:

- *оптической микроскопии* для изучения структурных особенностей и минерального состава руд и продуктов их обогащения (оптические микроскопы Nikon Optiphot-Pol и Leica DM RX, стереоскопический микроскоп МБС-10; оптико-геометрический анализ минералов проводился с помощью систем анализа изображения Leica QWin Standard и TomAnalysis);
- *рентгенографического фазового анализа (РФА)*, в том числе количественного, для определения минерального состава пород и руд, а также продуктов технологических испытаний (рентгеновский дифрактометр X'Pert PRO MPD);
- *рентгеноспектрального микроанализа* для изучения элементного состава минералов с помощью сканирующего электронного микроскопа, совмещенного с энергодисперсионной приставкой (JXA-8100, JSM-5610LV);
- *растровой электронной микроскопии* для выявления форм нахождения золота в сульфидных минералах (электронный микроскоп Tesla BS 310);

➤ *мёссбауэровской спектроскопии* для установления распределение железа в виде двух- и трехвалентной форм в магнетитовой руде, а также для изучения особенностей конституции магнетита (спектрометр электродинамического типа с источником  $\text{Co}^{57}$  в матрице хрома);

➤ *определения физических свойств минералов* -

- объемметрическим методом в барометрической трубке на установке М.М. Василевского определена плотность;

- капнометрическим методом на установке Kappabridge KLI-2 с напряженностью поля 300 А/м измерена удельная магнитная восприимчивость;

- методом микровдавливания на полуавтоматическом микротвердометре ПМТ-3М на полированной поверхности минералов измерены микротвердость (измерения проведены при различной нагрузке и стандартном времени экспозиции 10 с) и микрохрупкость.

#### **Научная новизна работы.**

1. Дополнены и усовершенствованы минералогические критерии оценки технологических свойств магнетитовых и хромовых руд, необходимые для решения задачи экспрессной оценки их обогатимости, в том числе опережающей.

2. Впервые для хромовых руд дано обоснование проведения прогнозной оценки гравитационных свойств на основе определения параметров раскрытия хромшпинелида.

3. Существенно дополнены данные по минералогии Юнь-Ягинского железорудного месторождения: установлена гетерогенность и близость к стехиометрии рудообразующего магнетита, выявлены две генерации минерала, проведено количественное описание структуры руды, определены формы нахождения попутных потенциально ценных компонентов – кобальта и золота.

4. Впервые получены данные по конституции хромшпинелидов высокохромистых руд Хойлинской поисковой площади и прослежено влияние на нее процессов метаморфизма.

#### **Практическая значимость.**

1. Выявленные минералогические критерии позволяют экспрессно и достаточно надежно прогнозировать технологические свойства магнетитовых и высокохромистых хромовых руд на ранних стадиях ГРП, что делает их одним из основных параметров оценки такого типа оруденения.

2. Новые данные по минеральному составу и строению руды Юнь-Ягинского железорудного месторождения и результаты минералогического изучения продуктов обогащения позволили обосновать схему ее технологического передела – выбрать способ рудоподготовки и оптимальную крупность измельчения перед глубоким обогащением, что внесло свой положительный вклад в результаты технологической и геолого-экономической переоценки месторождения.

3. Результаты исследования минералого-технологических свойств хромовых руд Хойлинской площади использованы при определении дальнейшего направления поисковых работ в районе, в том числе при выборе наиболее перспективных объектов. Методика изучения гравитационных свойств руд площади на основании определения параметров раскрытия хромшпинелида апробирована и успешно использована для расчета прогнозных показателей их глубокого обогащения.

4. Характеристика вещественного состава изученных руд и прогноз их обогатимости минералогическими методами вошли в виде самостоятельных разделов в производственные отчеты.

**Личный вклад** автора заключается в выборе методики и методов проведения исследований и в отборе значительной части исследовательского материала. Большой объем анализов выполнен соискателем самостоятельно с помощью методов оптической микроскопии и изучения физических свойств минералов, в выполнении и интерпретации остальных им принималось активное участие. Автор обеспечивал минералогическое сопровождение разработки технологических схем и изучения технологических свойств руд Юнь-Ягинского месторождения и Хойлинской площади в рамках работ института по реализации госзаказа: «Технологическая и геолого-экономическая переоценка месторождений металлургических видов минерального сырья с целью повышения их инвестиционной привлекательности» (2005-2006 гг., заказчик – Федеральное агентство по недропользованию), «Технологическая и геолого-экономическая переоценка Юнь-Ягинского скарново-метасоматического магнетитового месторождения (ЯНАО)» (2006-2007 гг., Управление по недропользованию по Ямало-Ненецкому АО), «Минералого-технологическая оценка хромовых руд перспективных проявлений Хойлинской площади» (2007-2008 гг., Управление по недропользованию по Республике Коми, ЗАО «МИРЕКО»).

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 3-ей и 4-ой научных молодежных школах «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2006, 2007 гг., отмечены грамотами за лучший доклад), на VI-ом Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2007 г.), на конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2007 г.), на совещании «Плаксинские чтения-2007» (Апатиты, 2007 г., доклад отмечен дипломом), на II-ом Российском семинаре по технологической минералогии (Петрозаводск, 2007 г.), на 9<sup>th</sup> Biennial SGA meeting «Mineral exploration and research: digging deeper» (Ирландия, Дублин, 2007 г.), на III-ей Полярно-Уральской научно-практической конференции (Салехард, 2007 г.), на конференции «Минерально-сырьевая база черных, легирующих и цветных металлов России и стран СНГ: проблемы и пути развития» (Москва, 2007 г.), на «Неделе горняка» (Москва, 2008 г.), на школе молодых ученых «Актуальные проблемы геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых» (Москва, 2008 г.), на Уральской минералогической школе (Екатеринбург, 2008 г.).

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе одна статья в реферируемом журнале.

**Структура, объем и содержание работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы (101 наименование). Общий объем работы составляет 139 страниц, в том числе 36 рисунков и 38 таблиц. Во **введении** обоснована актуальность работы, определены цели, задачи, а также показана практическая значимость исследований, сформулированы защищаемые положения. В **первой главе** проведен анализ исследований в области технологической минералогии хромовых и железных руд и достижений в области их прогнозной минералого-технологической оценки, а также охарактеризовано геологическое строение Юнь-Ягинского месторождения и Хойлинской поисковой

площади, состояние изученности вещественного состава их руд. **Вторая глава** посвящена подробному описанию минералогических факторов, определяющих технологические свойства скарново-магнетитовой руды Юнь-Ягинского месторождения. В **третьей главе** рассмотрен минеральный состав и строение хромовых руд Хойлинской площади и их влияние на обогатимость, уделяется внимание особенностям определения количественного минерального состава руд. В **четвертой главе** определены минералогические критерии, влияющие на эффективность технологических процессов и качество продуктов обогащения изученных руд, а также приведены данные, обосновывающие эффективность использования метода оптико-минералогического анализа для прогнозирования гравитационных свойств хромовых руд. В **заключении** обобщены основные научные и практические результаты работы.

*За постоянное внимание, помощь в проведении исследований и решении организационных вопросов автор благодарит научного руководителя доктора геолого-минералогических наук Е.Г. Ожогину. Большую роль в развитии автора как исследователя сыграли также его учителя: кандидат геолого-минералогических наук В.И. Кузьмин, доктора геолого-минералогических наук Э.М. Спиридонов и В.Т. Дубинчук. Автор глубоко признателен сотрудникам минералогического, технологического отделов и отдела черных металлов ФГУП «ВИМС» за помощь при выполнении работы и за участие в обсуждении ее результатов: кандидату геолого-минералогических наук Г.К. Кривоконовой, И.С. Наумовой, Н.Н. Кривошекову, кандидату геолого-минералогических наук А.А. Каздыму, кандидату технических наук В.В. Звереву, доктору технических наук Ю.С. Кушпаренко, кандидату геолого-минералогических наук В.И. Николаеву. Большая помощь в полевой экспедиции на проявления Хойлинской площади оказана автору главным геологом ЗАО «МИРЕКО» В.М. Маковым и начальником Западно-Войкарской ГПП В.Г. Котельниковым. Кандидату физико-математических наук А.А. Рогожину и доктору геолого-минералогических наук И.Г. Печенкину автор благодарен за постоянное внимание и предоставленную возможность посетить ряд научных конференций в России и за рубежом. В заключение хочется с особым чувством поблагодарить кандидата геолого-минералогических наук А.В. Темнова, всемерно поддерживавшего автора на протяжении всей работы над диссертацией.*

Вопросам прогнозной минералого-технологической оценки минерального сырья при проведении ГРР посвящены работы широкого круга исследователей – минералогов и технологов. На сегодня изданы монографии, подробно освещающие принципиальные подходы к такой оценке, а также многочисленные труды, раскрывающие на конкретных объектах установленные общие закономерности. Так, уже в 1950-х годах В.А. Глазковским были предложены геолого-минералогические критерии оценки технологических свойств руд железа различных геолого-промышленных типов, усовершенствованные в 1980-х годах Б.И. Пироговым с соавторами. Однако использование предложенных этими авторами критериев предполагает детальное и всестороннее изучение вещественного состава, что далеко не всегда в полной мере осуществимо на ранних стадиях ГРР.

Технологическая минералогия хромовых руд не является таким же сложившимся самостоятельным направлением исследований, как железных, поэтому геолого-минералогические критерии оценки их технологических свойств до сих пор не были разработаны. В работе Г.В. Остроумова с соавторами, 2000 г. предложена принципиальная методика прогноза обогатимости этого вида минерального сырья, однако изложенные в ней рекомендации общего характера требуют проведения дальнейших исследований на конкретных геолого-промышленных типах хромовых руд.

## **КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЮНЬ-ЯГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ХОЙЛИНСКОЙ ПОИСКОВОЙ ПЛОЩАДИ.**

**Юнь-Ягинское месторождение** – наиболее крупный и единственный на сегодня разведанный железорудный объект Полярного Урала с учтенными Госбалансом забалансовыми запасами руд в количестве 66 млн.т по категориям  $C_1+C_2$  при среднем содержании Fe в руде 30,17 %. Оно находится на восточном склоне Полярного Урала на территории Ямало-Ненецкого автономного округа в непосредственной близости от ж/д Обская-Бованенково и относится к нераспределенному фонду недр.

В геологическом отношении месторождение расположено на южной границе Щучьинской структурно-формационной зоны, приуроченной к северному замыканию Тагило-Магнитогорской мегазоны, и расположено вблизи контакта эффузивно-осадочных пород с интрузиями Юнь-Ягинского среднепалеозойского габбро-тоналит-гранодиоритового комплекса. Оно сложено довольно мощной и сложной зоной скарнов, скарнированных пород и руд.

Для Юнь-Ягинского месторождения, как и для большинства контактово-метасоматических месторождений, характерна невыдержанность основных параметров рудной зоны, в первую очередь, таких как мощность по падению и простирацию и содержание магнетита. В целом, по условиям образования, характеру распределения рудной минерализации, составу руд, морфологии рудной залежи и другим признакам оно относится к тагильскому геолого-промышленному типу, месторождения которого широко проявлены и издавна эксплуатируются на Урале (Гороблагодатское, Лебяжинское, Песчанское и др.).

**Хойлинская поисковая площадь** находится на западном склоне Полярного Урала на территории Республики Коми. Западнее района (в 50-60 км) проходит Северная ж/д, севернее – ж/д ветка Сейда–Лабытнанги; в непосредственной близости отрабатывается Хойлинское месторождение баритовых руд.

В геологическом отношении характеризуемый район представляет северную часть Войкаро-Сыньинского гипербазитового массива и находится в пределах развития пород дунит-гарцбургитового комплекса, весьма перспективного на выявление промышленных объектов хромовых руд [Перевозчиков, 2000]. В настоящее время на площади силами ЗАО «МИРЕКО» проводятся поисковые работы, результатом которых должна стать оценка прогнозных ресурсов хромовых руд по категориям  $P_1$  – 5 млн. т. и  $P_2$  – 20 млн. т.

На Хойлинской площади известны проявления как глиноземистых, так и высокохромистых хромовых руд. Наибольший практический интерес



представляют высокохромистые руды, локализованные в кровле крупных дунитовых тел (>300-400 м). Среди проявлений руд этого типа в качестве объектов исследований выбраны наиболее перспективные на выявление промышленно значимых объектов: Юнь-Ягинское 2 и 4, Кечпельское II и Хойлинское (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика перспективных проявлений высокохромистых руд Хойлинской поисковой площади (составлено по данным В.Г. Котельникова, 2000)

Проявление	Морфология рудных тел	Размер рудного тела, м		Тип руды	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в руде, % от-до среднее	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в Csp, %
		m	l			
Юнь-Ягинское	2	1,4-9,0	>90	Редковкрапленная мелкозернистая	$\frac{9-24}{17}$	64
	4	Рудный горизонт. Тела уплощенно-линзовидной формы.	>4,0	>20	Нодулярная в подошве, средневкрапленная мелкозернистая до среднезернистой, убоговкрапленная в кровле	12-37
Кечпельское II	3,0		>2000	Полосчатая убого-, редковкрапленная мелкозернистая, средне-, густовкрапленная среднезернистая	$\frac{5-45}{19}$	55-57
Хойлинское	Рудная зона. Тела неправильной и уплощенно-линзовидной формы	2-15	10-43	Сплошная и густовкрапленная среднезернистая, шпиры средне-, густовкрапленной средне-, крупнозернистой	9,9-44,4	51-57

Примечания: m - мощность, l - простирание, Csp – хромшпинелид.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

**На скарновом месторождении Юнь-Ягинское впервые выявлены сложное строение и состав руд, обусловленные тонко-, мелкозернистой структурой и гетерогенностью магнетита, его тесной ассоциацией с твердыми алюмосиликатами и сульфидами железа – пиритом, моноклинным пирротинном.**

Руда Юнь-Ягинского месторождения железа представлена апоандезитобазальтовыми гранат-пироксеновыми и эпидот-гранатовыми скарнами со средним содержанием магнетита 30,8 %.

Для руд характерно сложное строение, обусловленное формированием магнетита совместно с основной массой силикатных минералов, образованием сульфидов на завершающей стадии рудообразования и интенсивным развитием пострудных тектонических процессов. В результате сформировалась катакластическая тонко-, мелкозернистая (доля фрагментов минерала размером менее 1 мм составляет 84 %, менее 0,1 мм – 32 %) структура магнетитовой руды с тесными срастаниями магнетита и пирита (рис. 1, рис. 2)

Единственный промышленный минерал железа на месторождении - магнетит, **FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>**, концентрирующий 67 % отн. металла. В состав силикатов (андрадита, эпидота, салита, ферропаргасита) входит 29 % железа и около 4 % - в состав сульфидов: пирита, пирротина и халькопирита.

Установлено, что магнетит на месторождении представлен двумя генерациями, различающимися по морфологии: более ранний магнетит (Mgt I)

образует вкрапленные руды, более поздний (Mgt II) – формирует редкие секущие прожилки. По составу магнетиты двух генераций близки к стехиометрии, содержание в них изоморфных примесей составляет менее 0,1 % оксида металла. Показано, что магнетит обеих генераций обладает одинаковым составом и слабо различается по физическим свойствам (табл. 2), что не сказывается на эффективности методов глубокого обогащения.

Таблица 2

Особенности состава и строения магнетита двух генераций Юнь-Ягинского месторождения.

Гене-рация Mgt	Морфология выделений	a, Å	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	H, кгс/мм <sup>2</sup>	Kxp	$\chi \cdot 10^{-8}$ м <sup>3</sup> /кг	Содержание, %		$\frac{Fe^{2+}}{Fe^{2+} + Fe^{3+}}$
							Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	
I	Мелкая, тонкая вкрапленность, часто в виде агрегатов	8,399±0,003	4,72	578±35	1,4	67000	23,2	49,2	0,68
II	Прожилки в виде катаклазированного средне-, крупнозернистого агрегата	8,402±0,003	5,08	600±21	2,2	72000	23,4	49,0	0,68

Типоморфной особенностью магнетита месторождения в целом является его тесная ассоциация с силикатами скарнов: гранат и пироксен образуют постоянную примесь в магнетите в виде микронных включений (рис. 3), снижающих содержание железа в минерале до 70,4 % и обуславливающих следующий его состав (%): 68,5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 28,9 FeO, 0,2 MgO, 0,4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,5 SiO<sub>2</sub>, 0,5 CaO.

Главный сульфидный минерал руды – пирит (содержание в руде 2,1 %), Fe<sub>0,976</sub>Co<sub>0,004</sub>S<sub>2</sub>, концентрирующий 90 отн. % серы (содержание серы в руде составляет 1,3 %). В незначительном количестве присутствует пирротин (0,3 %, концентрирует 8,5 отн. % серы руды), представленный ферримагнитной моноклинной разновидностью 4C с формулой Fe<sub>6,96</sub>S<sub>8</sub>, и халькопирит (0,06 %, 1,5 отн. % S руды). Сульфиды являются не только минералами-носителями единственной лимитируемой примеси руды – серы (содержание фосфора не превышает 0,01 п %), но и концентрируют попутные потенциально ценные компоненты – кобальт и золото.

Основным минералом-носителем кобальта в руде является пирит (0,0036 % из 0,0047 % Co в руде). Характерно, что его зерна минерала обогащены Co неравномерно, в краевых частях, в которых содержание металла достигает 0,327 %, тогда как в центральных частях оно ниже 0,02 %. Среднее содержание Co в пирите – 0,17 %. Кобальт содержится также в виде изоморфной примеси в пирротине (0,02 % в минерале) и магнетите (0,003 % в минерале). Следовательно, из руды теоретически извлекаемо 77 отн. % содержащегося в ней Co в виде сульфидного концентрата при содержании Co в продукте на уровне минимального перерабатываемого промышленностью (0,13 %).

Сульфиды содержат микронные включения золота (рис. 4), чаще всего приуроченного к зернам халькопирита, что показывают и результаты химических анализов сульфидных концентратов, в которых прослеживается увеличение содержания благородного металла при возрастании содержания меди. Между тем, в руде присутствует весьма незначительное количество халькопирита, что не

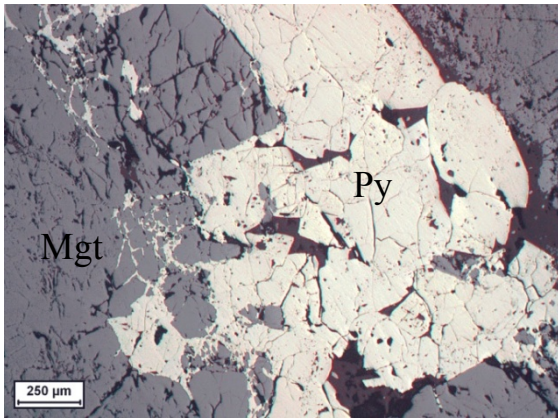


Рис. 1. Сложная структура железной руды, обусловленная катаклазом магнетита (Mgt) и его тесной ассоциацией с пиритом (Py).

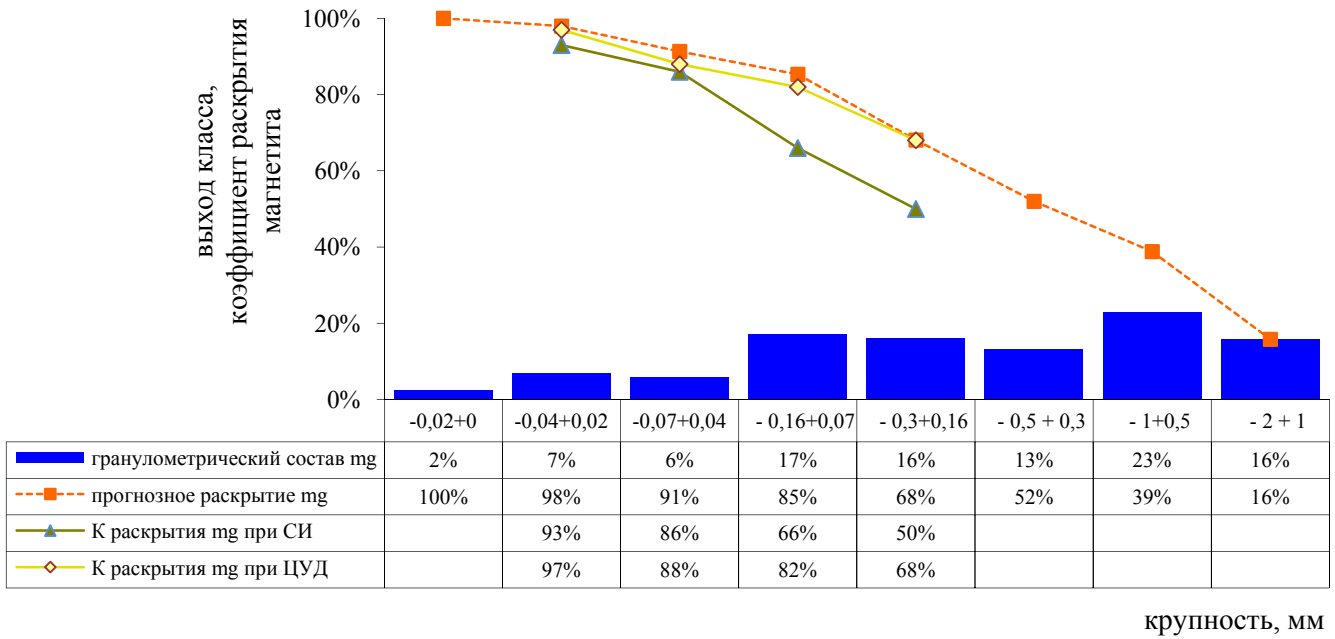


Рис. 2. Гранулометрический состав магнетита; прогнозное и экспериментальное (при дезинтеграции способами ЦУД и СИ) раскрытие магнетита.

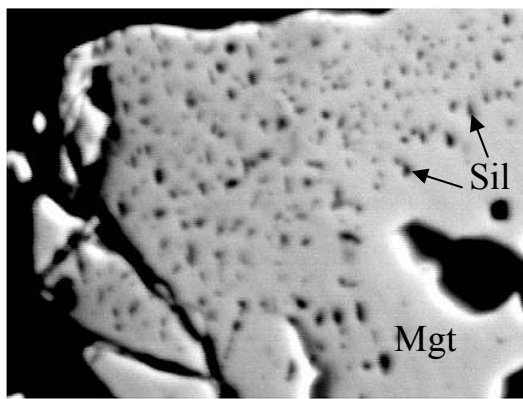


Рис. 3. Микровключения силикатных минералов (Sil) в магнетите Юнь-Ягинского месторождения; изображение в обратно рассеянных электронах.

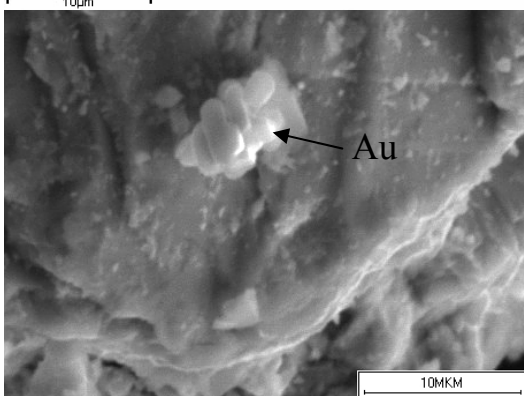


Рис. 4. Обособление самородного золота (Au) на сколе зерна пирита из руды Юнь-Ягинского месторождения; изображение во вторичных электронах.

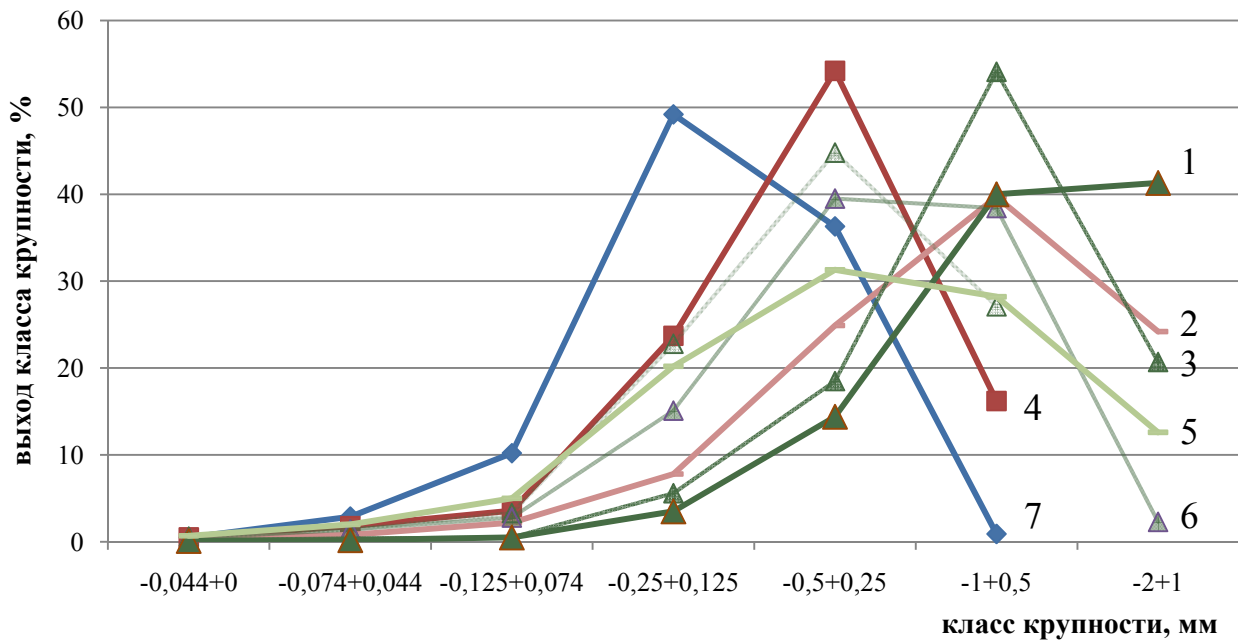


Рис. 5. Гранулометрический состав хромшпинелида из руд различных текстурных типов проявлений Хойлинской площади: Кечпельское II (1 – густовкрапленная, 3 – средневкрапленная, 6 – убого- и бедновкрапленная), Юнь-Ягинское 4 (2 – нодулярная, 4 – убого- и бедновкрапленная), Хойлинское (5 – густовкрапленная), Юнь-Ягинское 2 (7 – средневкрапленная).

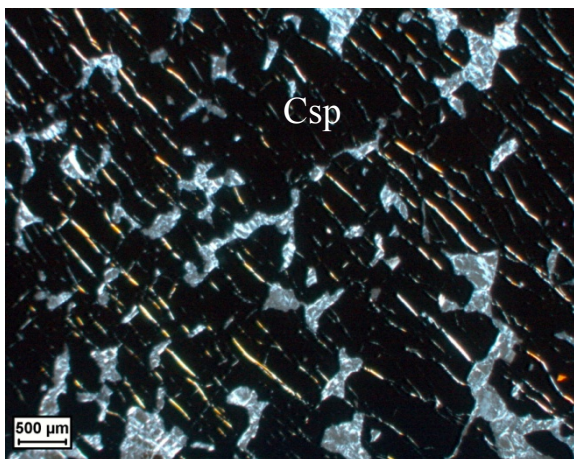


Рис. 6. Катакластическая структура агрегата хромшпинелидов (Csp) густовкрапленной руды Хойлинского проявления; проходящий свет, николи скрещены

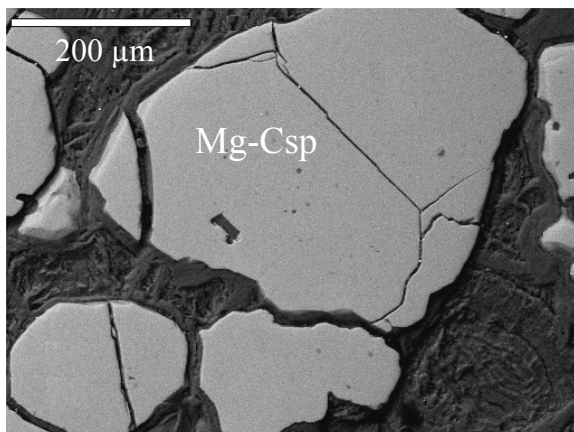


Рис. 7. Неметаморфизованный магниохромит, Mg-Csp; изображение в обратно рассеянных электронах (проявление Юнь-Ягинское 2).

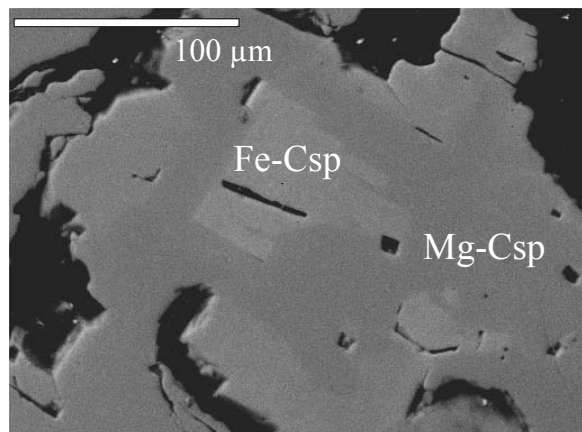


Рис. 8. Магниохромит, Mg-Csp, локально замещенный ферромагниохромитом, Fe-Csp; изображение в обратно рассеянных электронах (Хойлинское проявление).

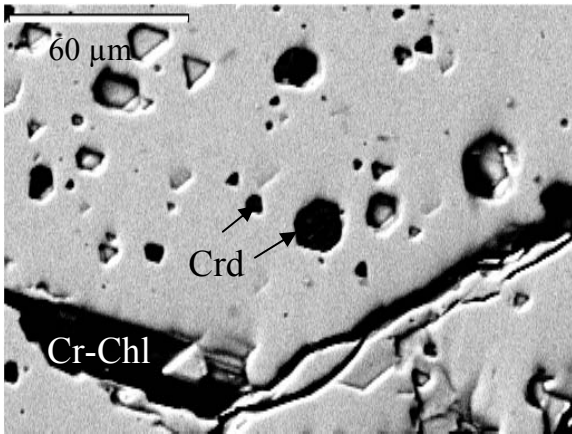


Рис. 9. Гетерогенное строение зерна ферромагнезиохромита со структурами распада фазы состава  $Al_2O_3$  (корунд?, Crd). По трещинам в минерале развивается хромсодержащий хлорит (Cr-Chl). Изображение в обратно рассеянных электронах; образец из нодулярной руды проявления Юнь-Ягинское 4.

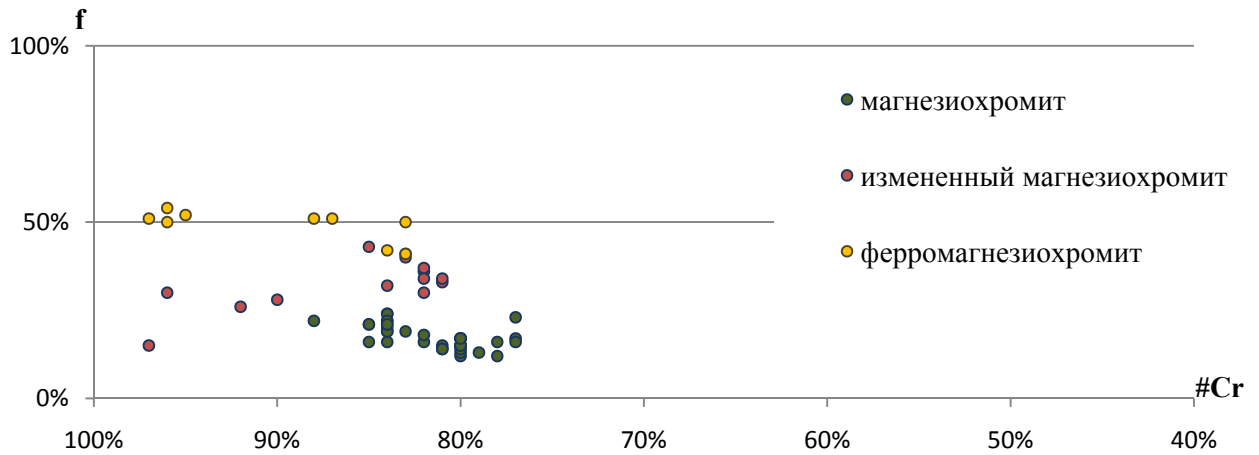


Рис. 10. Изменение хромистости (#Cr) и железистости (f) магнетита высокохромистых хромовых руд при воздействии среднетемпературных метаморфических процессов.

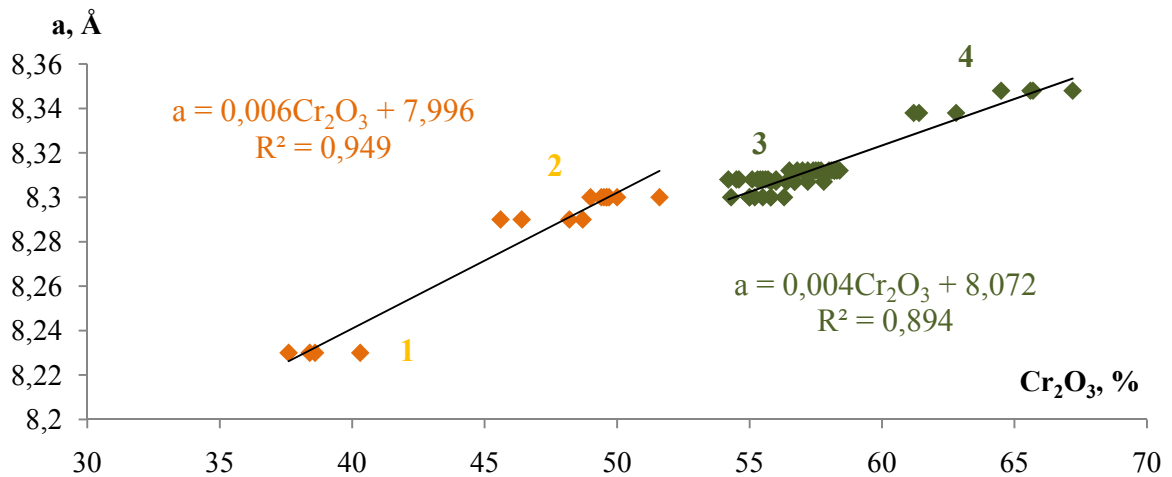


Рис. 11. Зависимость значения параметра элементарной ячейки  $a$  от содержания  $Cr_2O_3$  для хромшпинелидов руд Хойлинской площади: высокохромистых (зеленое) и глиноземистых (оранжевое). Цифрами обозначены группы точек составов: 1 – первичного магнетитохромита, 2 – метаморфогенного алюмомагнетитохромита; 3 – магнетитохромита, 4 – метаморфогенного ферромагнетитохромита.

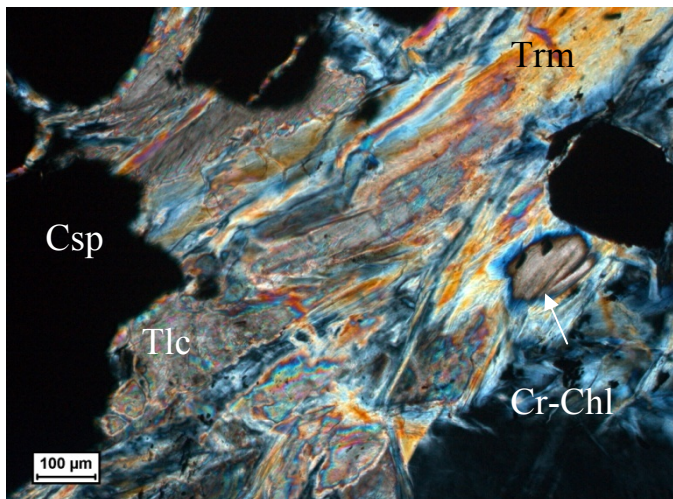


Рис. 12. Тальк(Тlc)-тремолитовая(Trm) ассоциация в нодулярной руде проявления Юнь-Ягинское 4; проходящий свет, николи скрещены.

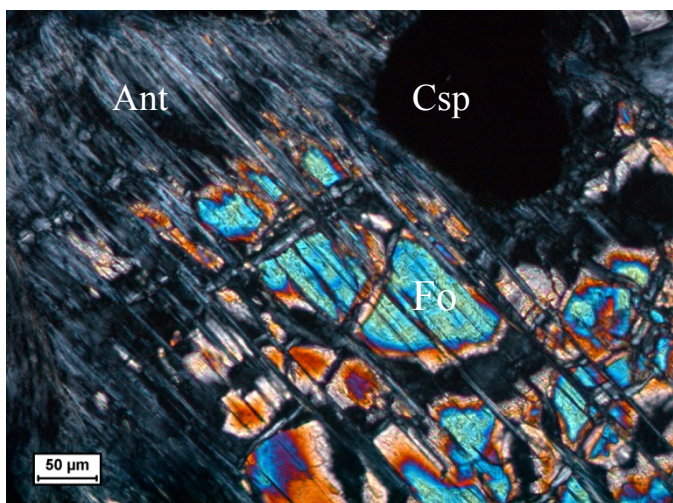


Рис. 13. Антигорит (Ant) развивается по форстериту (Fo) во вкрапленной руде проявления Кечпельское II; проходящий свет, николи скрещены.

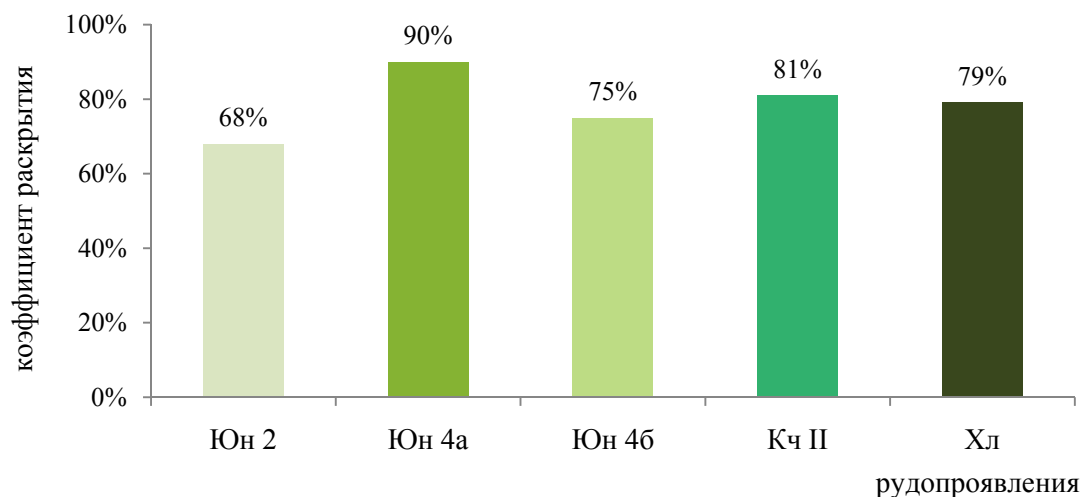


Рис. 14. Коэффициенты раскрытия хромшпинелидов в руде крупностью -1 мм (Юн 2 – Юнь-Ягинское 2, Юн 4а, б – Юнь-Ягинское 4, нодулярная и вкрапленная руда соответственно, Кч II – Кечпельское II, Хл – Хойлинское).

позволяет высоко оценивать потенциал месторождения на золотоносность.

Изучение технологических свойств минералов руды Юнь-Ягинского месторождения показало, что они характеризуются высокой контрастностью гравитационных свойств и низкой магнитных (табл. 3), что препятствует актуальному сегодня при обогащении магнетитовых руд комбинированию магнитных и гравитационных методов обогащения. Механические свойства силикатных минералов, отличающихся по сравнению с магнетитом высокой твердостью (Н) и низкой хрупкостью (Кхр), наряду с катаклизмом рудного минерала негативно отражаются на энергозатратности и селективности процессов рудоподготовки.

Таблица 3

Технологические свойства главных рудообразующих минералов Юнь-Ягинского месторождения

Процесс	Технологические свойства		Минералы				
			Mgt	Po	Py	Grn	Ep
дезинтеграция	прочностные	Н, кгс/мм <sup>2</sup>	578±35	361±22	1349±236	1220±138	1077±88
		Кхр	1,8	1,8	8,2	3,5	2,8
гравитационное	гравитационные	ρ, г/см <sup>3</sup>	4,7	4,9*	5,2*	3,9*	3,4*
магнитная сепарация	магнитные		сильно-магнитный	средне-магнитный*	слабо-магнитный*	слабо-магнитный*	немагнитный*

\* по литературным данным; Po – пирротин, Py – пирит, Grn – гранат, Ep – эпидот.

**На Хойлинской поисковой площади впервые для высокохромистых хромовых руд установлена принадлежность хромшпинелида к ряду магнезиохромит-ферромагнезиохромит и высокая контрастность рудообразующих минералов по гравитационным и механическим свойствам.**

Высокохромистые руды перспективных проявлений Хойлинской поисковой площади существенно различаются по строению и минеральному составу. Они представлены вкрапленными, реже нодулярными текстурными разновидностями. В рудах наблюдается характерная зависимость размера зерен хромшпинелида от текстуры: мелкозернистый хромшпинелид (размер зерен не превышает 1 мм, доля зерен с размером от 0,5 до 1 мм составляет 0,9-27,1 %) формирует бедновкрапленные руды, богатовкрапленные и нодулярные руды содержат значительное количество среднезернистого хромшпинелида (до 40 % зерен размером от 1 до 2 мм) (рис. 5). Для тектонизированных богатых руд (Хойлинское проявление) наблюдается интенсивный катаклизм рудного минерала, формирующий вторичную мелкозернистую структуру руды (рис. 5, 6).

Хромшпинелид высокохромистых руд различается не только по размеру, но и по составу и физическим свойствам, что обусловлено преимущественно влиянием метаморфических процессов. Для выявления особенностей воздействия метаморфических процессов на состав и свойства хромшпинелида, в значительной мере определяющие качество хромовой руды, автором использована схема метаморфизма изученных руд (табл. 4), при составлении которой учитывалась как геологическая позиция рудных тел, так и выявленные в рудах минеральные ассоциации, проинтерпретированные с помощью работ Н.И. Брянчаниновой, 2004 и Б.В. Перевозчикова, 2000.

## Особенности метаморфизма высокохромистых руд Хойлинской площади

Рудо-проявление	Геологическая позиция	Тип руды по содержанию Csp	Минералы-индикаторы в рудах	Содержание FeO в Csp (%) и степень метаморфизма руд *	Фашия метаморфизма**
Юнь-Ягинское 2	в крупном дунитовом теле	средне-вкрапленная	Mg-Chl, Liz, неизменный Csp	15,3 неметаморфизованы	зеленосланцевая (t<400°C)
Кечпельское II		убого- до средневкрапленной	Cr-Chl, Ant, измененный Csp	21,0 средняя	эпидот-роговиковая (войкаритовая, t=450-500°C)
		массивная, густовкрапленная	Cr-Chl, Hzl, слабо измененный Csp	17,1 слабая	
Хойлинское	зона войкаритизации	густовкрапленная	Cr-Chl, Hzl, измененный Csp	16,1 слабая	
Юнь-Ягинское 4	контакт с телом альбитов, в зоне оталькования	нодулярная вкрапленная	тремолит, тальк, сильно измененный Csp	17,5, 18,3-22,2 слабая до средней	амфибол-роговиковая (тремолитовая, t=680-700°C)

Примечания: \* классификация Б.В. Перевозчикова, 2000; \*\* классификация Н.И. Брянчаниновой, 2004; Mg-Chl и Cr-Chl – магнезиальный и хромсодержащий хлорит, Ant – антигорит, Hzl – хризотил, Liz – лизардит, Csp – хромшпинелид.

Первичный хромшпинелид неметаморфизованных и слабо метаморфизованных высокохромистых руд представлен магнезиохромитом (табл. 5, рис. 7), типоморфными особенностями которого являются: совершенная структура, #Cr=80-81 %, f=17 % и отсутствие в его составе минала феррохромита. При среднетемпературном метаморфизме возрастает f и #Cr минерала в первую очередь в краевых частях зерен (до 36 % и 88 % соответственно), содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> возрастает до 57,7 %.

Интенсивный вынос из магнезиохромита магния, в меньшей степени алюминия, приводит к его замещению ферромагнезиохромитом: при метаморфизме войкаритовой фашии в краевых частях зерен (рис. 8), тремолитовой – во всем их объеме (рис. 9), поэтому от магнезиохромита метаморфогенный ферромагнезиохромит отличается слабо несовершенной мелкоблочной структурой и присутствием структур распада, высокой железистостью и повышенной хромистостью (f=41-54 %, #Cr=83-97 %), более высоким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 58-67 %) (табл. 5). В целом, среднетемпературный метаморфизм обуславливает следующий тренд состава магнезиохромита: Mg<sup>2+</sup> → Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> → Cr<sup>3+</sup> (рис. 10), при этом разрушается структура минерала и появляется неоднородность, увеличивается параметр элементарной ячейки и возрастает удельная магнитная восприимчивость (табл. 5). Увеличение параметра элементарной ячейки (a) хромшпинелидов в ряду магнезиохромит-ферромагнезиохромит, как показывает регрессионный анализ, обусловлено возрастанием содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 11) и снижением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержания железа и магния прямо на его значение не влияют. Установленная зависимость между значением a и содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a=0,004Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+8,072; R<sup>2</sup>= 0,894) имеет важное диагностическое значение и позволяет экспрессно определять качество рудных хромшпинелидов Хойлинской площади. Из нашего опыта следует, что при такой оценке требуется различать



Таблица 5

Типоморфные особенности магнезиохромита и ферромагнезиохромита высокохромистых руд Хойлинской площади

проявление	минерал, морфология выделений	содержание в руде, %	а, Å	структура	элементный состав, %						содержание минерала, %						петрологические параметры			физические свойства		
					Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO <sup>общ</sup>	MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	#Cr	f	ρ, г/см <sup>3</sup>	Н, кгс/мм <sup>2</sup>	Кхр	γ, 10 <sup>-8</sup> м <sup>3</sup> /кг
Юн-Линское	Магнезиохромит	57	8,308±0,001	совершенная	55,9	9,2	11,1	5,4	18,3	3,7	70±1	0	16±2	0	2±2	13±1	0,80	0,17	4,41-4,43	1373±80	3,0	54
					(Mg <sub>0,83</sub> Fe <sub>0,17</sub> )(Cr <sub>1,41</sub> Al <sub>0,35</sub> Fe <sub>0,24</sub> )O <sub>4</sub> среднеокрапленный	57,7	7,2	11,0	7,6	16,6	3,3	73±1	0	6±3	7±3	0	0,83-0,88	0,16-0,24	4,42-4,67	1460±128	2,4	78
	Кечельское II	57	8,300±0,001	совершенная	55,4	8,9	11,9	6,4	17,6	3,2	69±1	0	14±3	3±1	0	14±1	0,81	0,17	4,41-4,62	1321±94	2,7	52
					(Mg <sub>0,83</sub> Fe <sub>0,17</sub> )(Cr <sub>1,39</sub> Al <sub>0,33</sub> Fe <sub>0,28</sub> )O <sub>4</sub> густоокрапленный до сплошных агрегатов	56,7	8,4	8,3	13,5	13,2	3,2	64±3	9±4	0	16±1	0	0,82	0,36	1425±70	1,9	58	
Хойлинское	(Mg <sub>0,64</sub> Fe <sub>0,36</sub> )(Cr <sub>1,46</sub> Al <sub>0,33</sub> Fe <sub>0,21</sub> )O <sub>4</sub> убого- до среднеокрапленного агрегатов	78	8,301±0,003	слабо несовершенная	54,1	10,6	11,0	6,4	17,8	3,3	67±0	0	16±3	4±4	0	13±0	0,77	0,17	4,46-4,64	1490±47	2,9	58
Юн-Линское 4	Ферромагнезиохромит	16	8,345±0,005	слабо несовершенная	61-67	2-8	1-7	15-19	9-12	3,0-3,1	46-59	21-46	0	3-17	0	1-9	0,83-0,97	0,41-0,54	4,46-4,55	1390±92	2,2	126
					(Mg <sub>0,51</sub> Fe <sub>0,49</sub> )(Cr <sub>1,72</sub> Al <sub>0,18</sub> Fe <sub>0,10</sub> )O <sub>4</sub> нодули	53-58	6	10-14	18	10	1,8-2,2	50	21-29	0	11	0	12-20	0,88	0,51	-	-	-
Хойлинское	(Mg <sub>0,50</sub> Fe <sub>0,50</sub> )(Cr <sub>1,50</sub> Al <sub>0,21</sub> Fe <sub>0,30</sub> )O <sub>4</sub> вдоль трещин, в краевых частях зерен магнезиохромита	3	8,34-8,35	слабо несовершенная	53-58	6	10-14	18	10	1,8-2,2	50	21-29	0	11	0	12-20	0,88	0,51	-	-	-	-

магнезиохромит и метаморфогенный алюмомагнезиохромит, характеризующиеся схожим значением параметра элементарной ячейки (8,300 Å), но разным содержанием ценного компонента (рис. 11). Различие между этими видами устанавливается при РФА как по ассоциации алюмомагнезиохромита с реликтами глиноземистых хромшпинелидов, так и по его несовершенной или слабо несовершенной структуре в отличие от совершенной структуры магнезиохромита.

Минеральный состав силикатной составляющей изученных руд в значительной мере определяется степенью их метаморфизма (табл. 4): для зеленосланцевой фации характерны лизардит и магнезиальный хлорит, для войкаритовой – антигорит и хромсодержащий хлорит (в массивных рудах – хризотил) (рис. 12), для тремолитовой – тремолит, тальк, антигорит (рис. 13). Во всех рудах сохраняется реликтовый форстерит, Fo 98-99 % (до 7 % в руде проявления Кечпельское II).

Как показывает изучение технологических свойств рудных и нерудных минералов высокохромистых руд, они контрастны по механическим и гравитационным свойствам (табл. 6), что положительно влияет на эффективность традиционно используемых при обогащении этих руд гравитационных методов, а также будет способствовать селективности процесса дезинтеграции. По магнитным свойствам сравнительно контрастны только хромшпинелиды и силикаты проявления Юнь-Ягинское 4, что обусловлено повышенными значениями удельной магнитной восприимчивости метаморфогенного ферромагнезиохромита ( $78-126 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ) и позволяет предположить эффективность применения при обогащении этих руд магнитных методов. Однако главным рудным минералом проявления является магнезиохромит с низкими значениями удельной магнитной восприимчивости (около  $52-54 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , содержание минерала в руде 21-48 %, ферромагнезиохромита – 14-16 %), поэтому для наиболее эффективного обогащения руд целесообразно комплексирование гравитационных и магнитных методов.

Таблица 6

Технологические свойства главных минералов высокохромистых руд Хойлинской площади

Процесс	Технологические свойства		Минералы			
			Csp	Fo	Srp	Chl
дезинтеграция	механические	H, кгс/мм <sup>2</sup>	1393±96	1212±85	147±10	131±35
		Kxp	1,9-3,0	4,9	-	-
гравитационный	гравитационные	ρ, г/см <sup>3</sup>	4,4-4,7	3,22	2,3-2,7	2,65-2,72
магнитная сепарация	магнитные	χ, 10 <sup>-8</sup> м <sup>3</sup> /кг	52-126	12-33		

Примечание: Fo – форстерит, Srp – серпентин, Chl – хлорит.

**3. Минералогическими критериями экспрессной прогнозной оценки технологических свойств являются: а) для магнетитовых руд - гетерогенность и гранулометрический состав магнетита, особенности пространственного распределения пирита и содержание пирротина, микротвердость рудообразующих силикатов; б) для высокохромистых хромовых руд – текстурная неоднородность, видовое разнообразие хромшпинелида, его гранулометрический состав и степень раскрытия, а также характер замещения форстерита вторичными слоистыми силикатами.**

Основным методом обогащения магнетитовых руд является мокрая магнитная сепарация (ММС), необходимым условием эффективности которой является высокая степень раскрытия магнетита (не ниже 90 %, Голибкин, 1997) на этапе

рудоподготовки. При создании технологии обогащения руд Юнь-Ягинского месторождения ЦХЛ Уральского геологического управления в 50-х гг. прошлого столетия выбранная крупность обогащения -0,16 мм обусловила низкую степень раскрытия магнетита и получение низкокачественных по содержанию железа концентратов. Между тем, проведенное изучение гранулометрического состава магнетита показывает, что степень раскрытия минерала более 90 % может быть достигнута только в классе крупности -0,07+0,04 мм (91 %), тогда как в классе -0,16+0,07 мм она составит 85 % при условии высокой селективности процесса дезинтеграции (рис. 2). Таким образом, оптимальной крупностью обогащения руды месторождения является -0,07 мм.

Одним из современных способов, позволяющих повысить селективность процесса рудоподготовки, является способ центробежно-ударного дробления и измельчения (ЦУД), обеспечивающий разрушение руды по межзерновым границам. Этот способ, наряду с традиционным стержневым измельчением (СИ), был впервые исследован для железных руд при установлении оптимальных параметров дезинтеграции руды Юнь-Ягинского месторождения. Сравнение степени раскрытия магнетита в продуктах ЦУД и СИ показало более высокую селективность способа ЦУД (рис. 2). Но и его применение не позволяет повысить глубину обогащения руды с -0,07 до -0,16 мм, так как степень раскрытия магнетита в классе -0,16+0,07 мм составила всего 82 %. В классах -0,07+0,04 и -0,04+0,02 мм раскрытие магнетита при обоих способах рудоподготовки сопоставимо и достаточно для получения качественного концентрата (86-88 и 93-97 % соответственно), поэтому был выбран более экономичный способ СИ до крупности -0,07 мм. Таким образом, результаты изучения гранулометрического состава магнетита позволили надежно спрогнозировать наиболее приемлемую крупность материала для глубокого обогащения.

Изучение прогнозного раскрытия магнетита позволяет не только рекомендовать оптимальную степень измельчения обогащаемой руды, но и в комплексе с данными о неоднородности минерала и содержании в нем железа рассчитывать качество концентрата ММС (при условии полного извлечения магнетита, на практике составляющего не более 98-99 %). Пример такого расчета для руды Юнь-Ягинского месторождения и его сравнение с экспериментальными данными приводится в табл. 7.

Таблица 7

Прогнозные и экспериментальные показатели обогащения руды Юнь-Ягинского месторождения

Крупность обогащаемого материала	Показатели обогащения, %		
	наименование	прогнозные	экспериментальные
-0,07+0,02 мм	раскрытие магнетита	91	91
	содержание Fe магнетита в концентрате	64	65
	содержание S в концентрате	> 0,4	1,07
-0,04+0,02 мм	раскрытие магнетита	98	97
	содержание Fe магнетита в концентрате	68	67
	содержание S в концентрате	0,4	0,7

Сернистость концентратов можно прогнозировать с помощью критерия пространственного распределения пирита и содержания моноклинного пирротина в магнетитовой руде. Пирит в руде находится в тесном сростании с магнетитом, при этом значительная доля (12 %) зерен минерала имеет размер менее 0,07 мм, поэтому концентраты ММС будут засоряться серой сростков сульфида с магнетитом. Результаты минералогического анализа концентратов крупностью - 0,07 и -0,04 мм показали, что снижение в них содержания серы с 1,07 до 0,7 % обусловлено более полным раскрытием сростков магнетита с пиритом, содержание которых снизилось в продуктах с 1,5 до 0,2 % соответственно. Также сера будет поступать с ферримагнитным моноклинным пирротинном, который, по данным минералогических исследований, полностью извлекается в магнитную фракцию ММС. Учитывая, что содержание пирротина в руде месторождения составляет 0,3 %, то в концентрате его содержание составит около 1 % (пропорционально выходу концентрата), что соответствует содержанию серы 0,4 % (содержание серы в пирротине месторождения составляет 39,7 %).

Минералогические критерии оценки технологических свойств магнетитовой руды обобщены в табл. 8.

Таблица 8

Минералогические критерии оценки технологических свойств  
руды Юнь-Ягинского месторождения

Минералогический критерий	Операция	Оценка эффективности операции
механические свойства рудных и нерудных минералов	дезинтеграция	весьма твердые слабохрупкие нерудные минералы (1077-1220 кгс/мм <sup>2</sup> , Кхр 2,8-3,5) в ассоциации с твердым слабохрупким магнетитом (578 кгс/мм <sup>2</sup> , Кхр 1,4) влияют негативно на энергозатратность и селективность
гранулометрический состав магнетита	выбор оптимальной крупности обогащения	доля магнетита с размером зерен менее 0,07 мм составляет 15 %, то есть степень его раскрытия не ниже 90 % будет достигнута только в классе - 0,07+0,04 мм
содержание моноклинного пирротина, взаимоотношения пирита и магнетита	ММС	содержание серы в концентрате
содержание магнетита		выход концентрата
раскрытие магнетита		содержание железа в концентрате
неоднородность магнетита		

В отличие от магнетитовых, хромовые руды обогащаются преимущественно гравитационными методами, поэтому при их ранней технологической оценке необходимо уделять особое внимание изучению гравитационных свойств. Традиционно эти свойства изучаются с помощью гравитационного анализа, включающего расслаивание в тяжелых жидкостях дробленого и классифицированного материала и последующий оптико-минералогический и химический анализ полученных фракций. Альтернативой этому сравнительно затратному и трудоемкому способу может послужить использование параметров

раскрытия рудного минерала – хромшпинелида, определяемых оптико-минералогическим методом. Следует отметить, что Ю.Г. Гершойгом (1968 г.) подобный способ был использован для прогноза обогатимости магнетитовых руд железистых кварцитов. В случае хромовых руд обоснованность применения параметров раскрытия хромшпинелида для оценки гравитационных свойств основана на следующих предпосылках:

1) концентрат хромовой руды представляет смесь раскрытого хромшпинелида (доля хромшпинелида составляет более 95 %) и богатых сростков (доля минерала более 70 % соответственно), что позволяет рассчитать его теоретический выход;

2) хромшпинелид концентрирует как правило не менее 99 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  руды и является легко диагностируемым оптическими методами минералом, что позволяет с высокой степенью достоверности переходить от содержания в продукте минерала к содержанию  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (при условии, что известно содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в хромшпинелиде);

3) теоретические выходы продуктов и содержание в них ценного компонента используются для расчета извлечения  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Сравнение показателей разделения руды (выходы концентратов, содержание в них  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) проводилось по результатам гравитационного анализа и расчета параметров раскрытия в измельченном до крупности -1 мм<sup>1</sup> материале хромовых руд Хойлинской площади (проявления Юнь-Ягинское 2, 4, Кечпельское II, Хойлинское). Показано, что расхождение показателей не превышает  $2,3 \pm 1,7$  и  $3,6 \pm 2,8$  отн.% (по выходам концентратов и содержанию в них  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  соответственно).

Важным минералогическим критерием оценки технологических свойств, кроме традиционной плотности минералов в руде, является также видовой состав хромшпинелида, которым определяется содержание в минерале, а следовательно и в концентрате обогащения, ценного компонента. От видového состава хромшпинелида зависит и его удельная магнитная восприимчивость (табл. 5), обуславливающая целесообразность использования магнитных методов обогащения.

Определение природного гранулометрического состава хромшпинелида и его раскрытия в комплексе с выявлением текстурных особенностей хромовой руды позволяет прогнозировать оптимальную конечную крупность ее обогащения. Этот критерий особенно важен для бедных руд, требующих обеспечения высокой эффективности применения методов глубокого обогащения.

Природный гранулометрический состав хромшпинелида проявлений Хойлинской площади показывает (рис. 5), что обогащение бедных мелкозернистых руд проявлений Юнь-Ягинское 2, 4 будет эффективно проходить в крупности - 0,5 мм, а при дезинтеграции остальных руд высокая степень раскрытия рудного минерала будет достигнута при крупности -1 мм, что было подтверждено на измельченном материале. Из данных рис. 14 следует, что наиболее полное раскрытие хромшпинелида достигнуто при дезинтеграции нодулярной руды проявления Юнь-Ягинское 4 (коэффициент раскрытия,  $K=90$  %), отличающейся

<sup>1</sup> В сравнении не участвовал материал крупностью -0,074+0 мм, так как с одной стороны, эффективность гравитационных процессов в такой крупности снижается, а с другой стороны, проведение его оптико-минералогического анализа представляет определенные трудности.

наибольшей долей зерен среднезернистого хромшпинелида (более 40 %, рис. 5), а самым низким (68 %) оно оказалось в наиболее мелкозернистой вкрапленной руде проявления Юнь-Ягинское 2.

Степень раскрытия хромшпинелида 80-90 % позволяет сочетать высокое извлечение минерала (более 90 %) с удовлетворительным содержанием хрома в концентрате (не менее 45 %  $Cr_2O_3$ ), поэтому для руд проявлений Хойлинское, Кечпельское II и нодулярных руд Юнь-Ягинского 4 снижение крупности обогащения менее 1 мм нецелесообразно.

Коэффициент раскрытия хромшпинелида 68-75% во вкрапленных рудах проявлений Юнь-Ягинское 2, 4 при близком к полному извлечении минерала обусловит получение концентрата некондиционного по содержанию хрома, поэтому для них, как и прогнозировалось, оптимальной будет крупность обогащения -0,5 мм.

Таблица 9

Минералогические критерии оценки технологических свойств руд Хойлинской площади

Минералогический критерий	Операция	Оценка эффективности операции
неоднородная текстура с содержанием хромшпинелида от 1-п до 90 %	предварительное обогащение	выделение кускового концентрата и удаление хвостов
механические свойства рудных и нерудных минералов, характер границ срастания	дезинтеграция	весьма твердый слабохрупкий хромшпинелид ( $H=1321-1490$ кгс/мм <sup>2</sup> , $K_{хр}=1,9-3,0$ ) образует срастания по ровным прямолинейным границам с мягкими вторичными силикатами ( $H=131-147$ кгс/мм <sup>2</sup> ), обуславливая селективность
гранулометрический состав хромшпинелида	выбор оптимальной крупности обогащения	более 99 % зерен хромшпинелида бедной руды проявления Юнь-Ягинское 2 имеет размер менее 0,5 мм, поэтому крупность ее глубокого обогащения не должна превышать 0,5 мм
степень раскрытия хромшпинелида	гравитационное обогащение	содержание и извлечение хрома в концентрат, выход концентрата
видовой состав хромшпинелида		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований установлено, что руды Юнь-Ягинского месторождения сложные по составу и строению. При их обогащении наибольшую трудность представляют такие природные особенности, как катаклаз магнетита на тонко-, мелкозернистые фрагменты, его неоднородность и

ассоциация с более твердыми и слабохрупкими рудообразующими силикатами, тесные сростания с пиритом, присутствие в рудах ферримагнитного моноклинного пирротина. Изучение вещественного состава магнетитовой руды современными методами технологической минералогии позволило с высокой степенью достоверности прогнозировать показатели ее глубокого обогащения, что подтверждено при проведении технологических испытаний. Показана высокая эффективность опережающей экспрессной оценки обогатимости магнетитовых руд комплексом современных минералогических методов оптико-геометрического анализа, мессбауэровской спектроскопии и микрорентгеноспектрального анализа.

Изучение хромшпинелидов высокохромистых хромовых руд перспективных проявлений Хойлинской поисковой площади позволило проследить влияние метаморфических процессов на его состав и свойства, в значительной степени определяющие обогатимость руд. Установлено, что при среднетемпературном метаморфизме происходит существенное возрастание содержания в минерале хрома и увеличивается его удельная магнитная восприимчивость. Показано, что достоверное определение видового состава рудообразующих хромшпинелидов и выявление их количественных соотношений требует применения комплекса методов оптической микроскопии, рентгенографического и микрорентгеноспектрального анализов. Предложена альтернатива традиционному дорогостоящему исследованию гравитационных свойств хромовых руд методом гравитационного анализа в виде метода оптико-минералогического анализа, с помощью которого определяются параметры раскрытия хромшпинелида и на этой основе в дальнейшем рассчитываются прогнозные показатели глубокого обогащения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Азарнова Л.А., Анашкина Н.А. Минералогические методы в прогнозной технологической оценке руд черных металлов // Материалы 3-ей Международной научной школы молодых ученых и специалистов. М.: ИПКОН РАН. 2006. С. 195-197.
2. Азарнова Л.А., Анашкина Н.А., Чистякова Н.И. К вопросу о платинометальной минерализации хромовых руд Хойлинского месторождения (Пол. Урал) // VIII Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Доклады. т. 3. Москва. 2007. С. 3-6.
3. Азарнова Л.А. К вопросу о метаморфизме хромшпинелидов Хойлинского рудопроявления // Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения), ч. 1. Апатиты: изд-во КНЦ РАН. 2007. С. 180-182.
4. Азарнова Л.А. Микростроение хромшпинелидов Хойлинского рудопроявления Полярного Урала // VI Конгресс обогатителей стран СНГ. Материалы Конгресса. том II. М.: Альтекс. 2007. С. 87-89.
5. Азарнова Л.А. Некоторые аспекты технологической минералогии скарновых железных руд Юнь-Ягинского месторождения // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. Петрозаводск: КНЦ РАН. 2007. С. 73-75.
6. Азарнова Л.А., Ожогина Е.Г. Прогнозная минералого-технологическая оценка железных скарновых руд // Проблемы освоения минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых на Полярном Урале. Труды III Полярно-Уральской научно-практической конференции. Салехард. 2007. С. 244-247.

7. Азарнова Л.А. Строение магнетита Юнь-Ягинского месторождения и его влияние на обогатимость. Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых // Материалы 4 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. М: ИПКОН РАН. 2007. С. 303-306.
8. Азарнова Л.А. Особенности химического состава хромшпинелидов некоторых хромитовых проявлений северо-запада Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) // Актуальные проблемы геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых (тезисы докладов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов). М.: ВИМС. 2008. С. 16-17.
9. Прогнозная оценка раскрытия магнетита на ранних этапах изучения вещественного состава скарново-магнетитовых руд / Азарнова Л.А., Темнов А.В., Ожогина Е.Г. и др. // Разведка и охрана недр. № 3. 2008. С. 54-58.
10. Азарнова Л.А., Кривоконова Г.К., Магазина Л.О. Типоморфизм хромшпинелидов хромовых руд металлургического типа северо-западной части Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) // Уральская минералогическая школа – 2008. Минералогия ультрабазитовых комплексов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2008. С. 3-5.
11. Азарнова Л.А., Темнов А.В., Ожогина Е.Г. Типоморфные особенности магнетита железных руд известковоскарновой формации и их значение для оценки качества сырья на примере Юнь-Ягинского месторождения (Полярный Урал) // Типоморфные минералы и минеральные ассоциации – индикаторы масштабности природных и техногенных месторождений и качества руд. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2008. С. 3-6.

Заказ №50 Тираж 100  
РИС (ВИМС)