

На правах рукописи

Быстров Иван Георгиевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ТИТАНОМАГНЕТИТА
НА ОБОГАТИМОСТЬ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД
МАГМАТИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА**

Специальность 25.00.05 – Минералогия, кристаллография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского» (ФГУП «ВИМС»)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
профессор Пирогов Борис Иванович

Официальные оппоненты: Гаранин Виктор Константинович
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, Минералогический музей
им. А.Е.Ферсмана РАН, директор

Коровушкин Владимир Васильевич
доктор геолого-минералогических наук,
НИТУ «МИСиС», ведущий эксперт
кафедры ЭиРЧМ

Ведущая организация: Институт геологии Карельского НЦ РАН

Защита диссертации состоится 24 октября 2014 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 216.005.01 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского» (ФГУП «ВИМС») по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (по адресу: г. Москва, Старомонетный пер., д. 31) и на сайте Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского» (ФГУП «ВИМС») <http://vims-geo.ru>.

Автореферат разослан «_____» сентября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Луговская И.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значение титаномагнетитовых руд в структуре общих подтвержденных запасов железа, титана и ванадия чрезвычайно велико, в РФ и в мире (без РФ): железные руды (Fe), соответственно – 13,5% и 6,5%, TiO_2 – 48% и 60%, V_2O_5 – 92% и 90% [Пахомов и др., 2010]. Кроме того, важными попутными компонентами руд отдельных месторождений являются золото, металлы платиновой группы, медь, никель, цинк, и др. Несмотря на это, на территории РФ сегодня разрабатываются только титаномагнетитовые месторождения Урала – Гусевогорское, Первоуральское и Волковское, хотя комплексное изучение титаносодержащих железных руд ведется с 1928 года [Мальшев, 1957]. Это обусловлено тем, что, несмотря на пространственную и генетическую связь магматических титаномагнетитовых месторождений с производными базитовой магмы [Железорудная, 2007; Пахомов и др., 2010], они могут быть приурочены к различным породам от пироксенитов и перидотитов до анортозитов. Специфические особенности онтогении титаномагнетита различных типов руд, определяемые геолого-структурной позицией месторождений с учетом пространства и времени, существенно влияют на особенности состава и свойств минерала, в т.ч. технологических [Пирогов и др., 1988; Павлишин и др., 1988]. Изучение титаномагнетита проводится с начала XX века, но вопросы, касающиеся его технологических особенностей, не перестают быть актуальными. Применение и совершенствование существующих теоретических и практических достижений минералогии, а также внедрение новых методик, приобретают определяющее значение. При этом работ, посвященных изучению состава и строения титаномагнетита, определяющих его поведение в технологических процессах крайне мало. В то же время, как подчеркивали А.И.Гинзбург [1976, 1981], Б.И.Пирогов [1977, 1982], В.И.Ревнивцев [1982, 1983], Е.Г.Ожогина [2007, 2008] – без глубокого и всестороннего исследования и учета генетических особенностей минералов и руд, невозможно получить объективные представления об их реальных технологических свойствах.

Цель работы – Выявление морфоструктурных, конституционных, физических и физико-химических особенностей титаномагнетита железных руд, определяющих их обогатимость.

Основные задачи:

- Изучить особенности неоднородности титаномагнетита основных минеральных ассоциаций железных руд различных формационных типов месторождений.
- Проследить изменение морфологии, состава, строения и свойств титаномагнетита.
- Установить генетическую природу сростаний рудных и нерудных минералов и их пространственное распределение в рудном теле.
- Определить типоморфные признаки титаномагнетита и нерудных минералов, определяющие поведение руд в технологических процессах.

Фактический материал. Объектом диссертационного исследования являлись титаномагнетитовые руды первоочередных к освоению месторождений: Собственно-Качканарского, Чинейского («участок Магнитный») и Пудожгорского. Использовался каменный материал технологических проб. Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского» (ФГУП «ВИМС»).

В работе использованы результаты порядка 250 петрографических и минераграфических анализов руд и продуктов обогащения (д.г.-м.н., профессор Б.И.Пирогов, к.г.-м.н. Ю.М.Астахова при участии автора), более 20 оптико-геометрических (Н.Н.Кривошеков), 12 рентгенографических (Ю.Н.Шувалова, И.С.Наумова) и 18 микротомографических анализов (д.т.н. О.А.Якушина при участии автора). Также проанализирована 21 технологическая проба химическими методами (аналитический отдел ФГУП «ВИМС») анализов. Электронно-микроскопические исследования титаномагнетита выполнены к.г.-м.н. В.В.Ружицким, некоторых технологических продуктов – А.Макавецкас (НИТУ «МИСиС») при участии д.г.-м.н., профессора Б.И.Пирогова и автора. Изучение образцов титаномагнетитовых руд и магнетита методами мессбауэровской спектроскопии, а также их термическое исследование проведено сотрудниками НИТУ «МИСиС». Автором совместно с к.г.-м.н. Н.И.Чистяковой электронно-зондовым методом выполнено более 700 анализов, в том числе, около 100 растровых.

При анализе в сравнении генетических и минералого-технологических особенностей руд изучаемых месторождений с учетом методического подхода, принятого в диссертации, использован значительный фактический материал известных исследований [Фоминых и др., 1967] – по Качканарской группе; [Чернышева и др., 1977] – по типоморфизму магнетитов; [Гонгальский и др., 1985-2008] – по Чинейскому плутону, [Трофимов, Голубев, 2008] – по Пудожгорскому месторождению; отчеты ФГУП «ВИМС» и др. Это позволило обеспечить высокий уровень представительности полученных материалов и достоверность выводов.

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

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),

рентгеноспектрального микроанализа для изучения элементного состава и взаимоотношений минералов (Микроанализатор Jeol JXA-8100, оснащенный 3-я кристалл-дифракционными и энергодисперсионным спектрометрами),

рентгенографического фазового анализа, в том числе, количественного, для определения минерального состава пород и руд (рентгеновский дифрактометр X`Pert PRO MPD),

рентгеновской микротомографии для исследования взаимосвязи между элементами структуры минеральных образований и морфоструктурных особенностей в их естественном состоянии (рентгеновский микротомограф BT-50-1 «Геотом»),

аналитической электронной микроскопии для выявления особенностей микростроения тонкодисперсных минеральных систем, идентификации микрофаз, определения реального состава и строения минералов. Аппаратура: растровый электронный микроскоп Tesla-301B (Словения), оснащенный рентгеновским спектрометром с дисперсией по энергии, растровый электронный микроскоп PhenomX-Pro (Голландия), растровый электронный микроскоп MLA-650 (США), просвечивающий электронный микроскоп Теспаі 12В (Голландия). Диагностика минеральных фаз осуществлялась микродифракционным методом.

Измерения ЯГР – спектров проводились на спектрометре MS-1104 Em с источником Co^{57} в матрице родия с обработкой спектров по программе UnivemMS. Изомерный сдвиг определялся относительно α -Fe. Основным измеряемым параметром являлось соотношение площадей от ионов Fe^{3+} тетраэдрических позиций (А) в структуре магнетита и октаэдрических (В) от ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} (S_A/S_B) (теоретическое $\approx 0,5$).

Температура Кюри магнетита (для чистого магнетита – $580^\circ C$) измерялась термогравиметрически на приборе STA 449 C с магнитной приставкой.

Научная новизна работы

- Количественно оценена неоднородность элементного и фазового состава титаномагнетита, обусловленная генезисом руд, позволившая разработать конкретные методические рекомендации.

- Впервые проведена оценка влияния генетических особенностей титаномагнетита на его неоднородность методами математической статистики.

- На основании экспериментальных и литературных данных установлено влияние самоорганизации системы «минерал-среда» на технологические параметры рудных минералов.

- Впервые в рудах Пудожгорского месторождения идентифицированы пироксены диопсид-геденбергитового ряда и уточнена видовая принадлежность амфиболов.

Практическая значимость

- Количественные показатели неоднородности титаномагнетита, определенные методом микрорентгеноспектрального анализа, позволили установить типоморфные признаки минерала, влияющие на процессы обогащения. На их основе разработана и внедрена в практику методика по оценке неоднородности состава титаномагнетита железных руд, влияющей на их переработку.

- Выявлены физические и физико-химические свойства титаномагнетита в материале различной крупности.

▪ Результаты проведенного исследования использованы при создании технологий переработки железных руд Собственно-Качканарского, Чинейского и Пудожгорского месторождений.

Личный вклад автора. Участие в минералого-технологическом изучении и обработке данных, полученных с применением комплекса традиционных и прецизионных методов исследований конкретных минералов, продуктов обогащения и руд в целом. Автор принимал непосредственное участие в минералогических работах в рамках госбюджетных тем института.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: IX и X Международной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2012, 2013); II Всероссийской конференции «Практическая микротомография» (Москва, 2013); XIV международной научной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Москва, 2013); III Российской молодежной Школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2013); V научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2013); XXII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2014); Международном молодежном научном форуме «Ломоносов» (Москва, 2014); VII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле» (Москва, 2014); IX Всероссийском семинаре по технологической минералогии (Магнитогорск, 2014). По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 2 статьи в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура, объем и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 115 наименований. Объем работы составляет 113 страниц, в том числе 36 иллюстраций и 27 таблиц. Во **введении** обоснована актуальность, обозначены цели и задачи работы, показана новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы защищаемые положения. В **первой главе** проведен анализ существующей информации по минералогическим и технологическим особенностям титаномагнетита и титаномагнетитовых руд. В **второй главе** приведен в сравнении краткий геологический очерк Собственно-Качканарского, Чинейского и Пудожгорского месторождений. **Третья глава** посвящена комплексной оценке степени неоднородности титаномагнетита и разработанной методике ее количественной оценки методом микрорентгеноспектрального анализа. В **четвертой главе** рассмотрены минеральные ассоциации, слагающие титаномагнетитовые руды и их взаимосвязь со степенью неоднородности титаномагнетита. В **пятой главе** дается описание типоморфных особенностей титаномагнетита и сосуществующего с ним ильменита и их значение при обогащении титаномагнетитовых руд. В **заключении** обобщены основные научные и практические результаты работы.

За помощь и обучение в процессе совместной работы автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.г.-м.н. профессору Б.И.Пирогову. За постоянную поддержку и содержательные консультации диссертант искренне благодарен д.г.-м.н. Е.Г.Ожогоиной. Особую признательность автор выражает своим учителям к.г.-м.н Н.И.Чистяковой и к.г.-м.н. Г.Н.Нечелюстову, которые способствовали становлению соискателя как исследователя. За внимание, помощь и поддержку диссертант сердечно благодарит д.т.н. О.А.Якушину, к.г.-м.н. В.М.Тюленеву, к.т.н. Е.Г.Лихникевич и к.г.-м.н. Ю.М.Астахову. Автор выражает глубокую благодарность к.г.-м.н. Г.К.Кривоконовой и к.г.-м.н. С.В.Соколову за конструктивные замечания и профессиональные советы при обсуждении ключевых вопросов по теме диссертации. Автор признателен к.г.-м.н. В.В.Ружицкому, к.г.-м.н. В.А.Рассулову, к.г.-м.н. Н.А.Гребенкину, к.б.н. А.В.Гулынину, Ю.Н.Шуваловой, А.И.Федотову, Н.Н.Кривощечкову, Ф.И.Отрубянникову, А.В.Петрину, Д.А.Селиванову и Е.М.Сорокину за дружеское участие в обсуждении аспектов проблемы. Также диссертант считает своим долгом выразить признательность своим коллегам – сотрудникам минералогического отдела ФГУП «ВИМС». За помощь в оформлении диссертации автор благодарен сотрудникам РИЦа и отдела ИТИ и их руководителям к.г.-м.н. Н.Г.Беляевской и М.В.Абрамову.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рассматриваемые месторождения относятся к магматогенной генетической группе, рудогенерирующей кристаллизационной формации [Старостин, Игнатов, 2004; Барский, Данильченко, 1977], но при этом различным формациям по породному составу [Кузнецов 1989, Цейслер, 1992,] и геолого-генетическим типам [Борисенко и др., 1997].

Собственно–Качканарское месторождение (Средний Урал, Свердловская область), приурочено к габбро-пироксенитовому интрузивному массиву, имеющем близкую к изометрической форму, расположенному в западном крыле Тагильского мегасинклинория, входящему в состав платиноносного пояса Урала. Массив относится к габбровой формации, в состав которой входит ряд субформаций, формировавшихся в следующей последовательности: дунитовая, пироксенитовая, габбровая, диоритовая, плагиогранитовая.

Участок «Магнитный» Чинейского месторождения (Забайкальский край), приурочен к расслоенному габброидному интрузиву, локализованному в юго-западной части Кодаро-Удоканского прогиба среди терригенно-карбонатных отложений.

Пудожгорское месторождение (Республика Карелия) приурочено к пологопадающей интрузии габбро-диабазов, внедрившихся в гранитоидный массив. Геологические особенности, рассматриваемых месторождений приведены в табл. 1, особенности химического и минерального составов по данным представительных технологических проб в табл. 2, 3.

Таблица 1

Геологические особенности месторождений титаномагнетитовых руд

Месторождение	Собственно-Качканарское	Чинейское(участок «Магнитный»)	Пудожгорское
Особенности проявления рудных тел	Приурочено к		
	пироксенитовому пологопадающему (В-СВ – 20-50°) массиву. Размер массива по простиранию – 5,5 км, средняя ширина – 3,3 км. Рудные минералы размещены в виде вкрапленности, реже образуют шлирово-полосчатые скопления. Мощность оруденения более 600 м	габброидному массиву. Рудные минералы связаны с пологопадающими (В – 2-40°), кулисообразно залегающими плитообразными залежами мощностью от 4,6 м до 35,6 м при преобладающей мощности от 15 до 20 м	дифференцированному пологопадающему (ЮЗ – 10-15°) пластовому интрузиву кварцевых долеритов мощностью около 120 м. Титаномагнетит, занимая около 20% мощности интрузива, образует вкрапленные структуры
Возраст интрузива	нижнепалеозойский	палеопротерозойский	палеопротерозойский
Содержание основных компонентов, %	Fe _{вал} – 16,64; V ₂ O ₅ – 0,14; TiO ₂ – 1,30	Fe _{вал} – 35,0; V ₂ O ₅ – 0,55; TiO ₂ – 6,5	Fe _{вал} – 28,9; V ₂ O ₅ – 0,43; TiO ₂ – 8,14
Сопутствующие ценные компоненты	Cr, Ni, Co, Sc, Au, Pt, Pd	Co, Pt, Pd, Au, Ag	Cu, Pt, Pd, Au
Запасы Fe по C ₂ , млн. т	2385,5	0,4724	68

Таблица 2

Содержания основных и промышленно-ценных компонентов и их отношение к кларку (Виноградов, 1962) представительных технологических проб руд месторождений

Месторождение (характеристика руд)	Содержание компонента, масс. %																	
	Отношение к кларку																	
	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	Ti	TiO ₂	V	V ₂ O ₅	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	P	S _{общ}	Mn	Pt	Au
<i>Пудожгорское (богатые руды)</i>	31,8	18,0	25,4	5	8,3	0,3	0,6	15,4	5,0	1,0	0,6	3,6	1,9	0,1	0,1	0,2	5*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁵
	3,7			5,5		15,5		0,6	0,6	0,5	0,7	0,5	0,4	0,8	3,3	1,0	5,0	250,0
<i>Пудожгорское (бедные руды)</i>	27,9	16,2	21,9	4,5	7,4	0,3	0,5	15,9	0,4	2,2	4,4	0,2	6,6	0,1	1,8	0,2	5*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁵
	3,3			5,0		14,0		0,7	0,1	1,1	5,3	0,1	1,5	0,7	58,3	1,0	5,0	250,0
<i>Чинейское (рядовые руды)</i>	20,7	9,3	19,3	2,4	4	0,2	0,4	16,6	7,1	1,6	0,3	6,8	2,6	0,0	0,2	0,1	4*10 ⁻⁷	1*10 ⁻⁷
	2,4			2,7		10,0		0,7	0,8	0,8	0,4	1,0	0,6	0,0	6,7	0,7	0,4	2,5
<i>Собственно-Качканарское (рядовые руды)</i>	17,3	7,8	16,1	0,8	1,3	0,1	0,2	18	3,2	0,1	0,1	11,6	7,9	0,1	0,1	0,2	8*10 ⁻⁷	1*10 ⁻⁶
	2,0			0,9		5,0		0,7	0,4	0,1	0,1	1,7	1,8	0,2	1,7	0,9	0,8	25,0
Кларк																		
<i>Ультраосновные</i>	9,9			3·10 ⁻²		4·10 ⁻³		19,0	0,5	0,6	3·10 ⁻²	0,7	25,9	2·10 ⁻²	1·10 ⁻²	0,2	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁷
<i>Основные</i>	8,6			0,9		2·10 ⁻²		24,0	8,8	1,9	0,8	6,7	4,5	0,1	3*10 ⁻²	0,2	1·10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁷

Примечание: Содержание элемента в рудах в таблице отображено в числителе, отношение к кларку в знаменателе.

Минеральный состав представительных технологических проб руд месторождений

Месторождение	С – К	Ч	П	
	рядовые	рядовые	богатые	бедные
Минерал	Массовая доля, %			
<i>Рудные минералы:</i>	17,4	25,5	40,0	35,5
Титаномагнетит	16,9	23,0	36,5	30,0
Ильменит	0,5	2,5	2,5	4,0
<i>Нерудные минералы:</i>	82,1	74,5	60,0	64,5
Пироксены	66,0	12,0	5,0	4,0
Амфиболы	4,1	6,5	13,0	12,0
Плагиоклазы	0,5	35,0	24,0	30,0
Хлориты и серпентины	7,9	13,8	3,0	2,0
Слюды и гидрослюды	н.о.	следы	6,0	8,0
Эпидот-цоизит	н.о.	3,5	5,0	4,0
Кварц	следы	следы	2,0	2,0
Оливины	2,6	н.о.	н.о.	н.о.
Гранаты	0,4	н.о.	н.о.	н.о.
<i>Сульфиды</i>	следы	0,4	1,0	1,5
<i>Прочие</i>	1,1	1,1	2,0	2,5

Примечание: Минеральный состав определен пересчетом данных РКФ и химического анализов. В таблице С – К – Собственно – Качканарское, Ч – Чинейское, П – Пудожгорское месторождения.

Руды всех трех месторождений относятся к комплексным. По содержанию Ti руды Собственно-Качканарского месторождения – малотитанистые, Чинейского – среднетитанистые, а Пудожгорского – высокотитанистые. Типоморфной особенностью их состава является ванадиеносность. Вредные примеси фосфор и сера присутствуют в небольших количествах.

Сравнивая химический состав руд, следует подчеркнуть, что Fe входит в состав нескольких рудных минералов (титаномагнетит, ильменит), сульфиды (пирит, халькопирит и др.) и железосодержащие силикаты (табл. 3).

Разнообразие элементов-примесей связано как с широким диапазоном изоморфных замещений в силикатных минералах, титаномагнетите и сульфидах, так и с проявлением на микроуровне титанита и других минералов. С позиций оценки минерального состава и принятия технологических решений при обогащении руд крайне важно сопоставить эволюцию химизма, и, соответственно, свойств сосуществующих минералов, увязав их с определенной минеральной разновидностью.

Геохимическая направленность в изменении поведения отдельных элементов позволяет увязывать соотношение кларков с формированием определенных минеральных ассоциаций руд на месторождениях и дополняет выдвинутые А.А. Маракушевым [Маракушев, 1979] соображения о их генетической природе. Расплав, в значительной степени обогащенный Fe, Ti и летучими, является нестабильным и расщепляется при охлаждении на кислую и основную составляющие [Маракушев, 1988]. Эти материалы также

позволили нам более четко интерпретировать приведенные ниже данные, полученные методами математической статистики.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Первое защищаемое положение. Разработана методика оценки неоднородности состава титаномагнетита железных руд методом микрорентгеноспектрального анализа, позволяющая прогнозировать раскрываемость минерала в продуктах обогащения.

Степень неоднородности титаномагнетита руд при высоких температурах 400 – 1300 С° обусловлена образованием в системе FeO-Fe₂O₃-TiO₂ [Кудрявцева и др. 1982; Haggerty, 1991 и др.] близких к идеальным рядам продуктов распада твердого раствора в виде тонких включений вторичных минералов. В состав включений в титаномагнетит могут входить ильменит, ульвошпинель, шпинели типа плеонаста и др., а также нерудные минералы, захваченные при росте кристаллов, в том числе, высокотитанистый силикат – титанит. Поэтому титаномагнетит за счет проявления в нем тонких микровключений является полиминеральным микроагрегатом, как это подчеркивал П.Рамдор [Рамдор, 1962]. При измельчении и сепарации эти включения в значительной степени не могут быть отделены от матрицы основного рудного минерала. Многостадийность распада и преобразования исходного титаномагнетита, описанная исследователями [Рамдор, 1962; Чернышева и др., 1981] в пространственно-временных рамках с постепенным «самоочищением» его через стадии образования зонального – секторального – блокового строения (рис. 1) за счет различной природы постмагматического этапа минералообразования и более поздних метасоматических изменений существенно зависит от геолого-структурных и минералогических особенностей вмещающих пород, определяющих следующие характерные для каждого из выделенных по содержанию Ti типы руд закономерности.

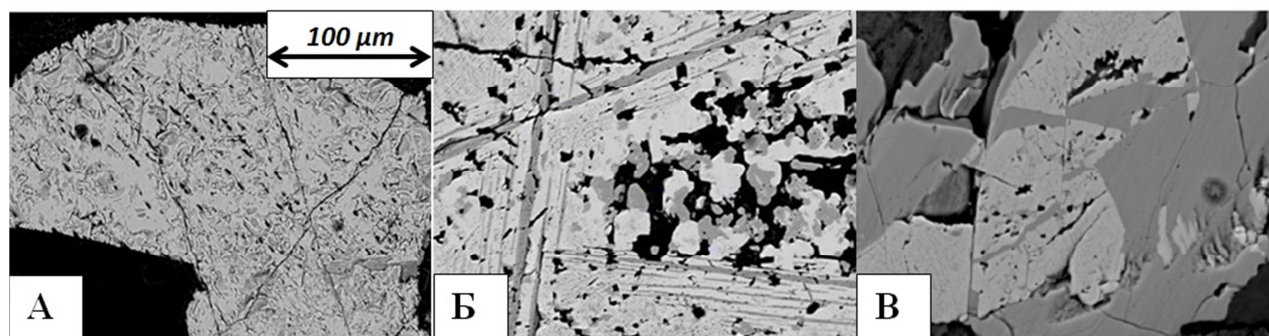


Рис. 1. Сложное строение титаномагнетита, МРСА: А – субмикронные включения ильменита и плеонаста в образцах руд Собственно-Качканарского месторождения, Б – пластины и ламели ильменита в образцах руд Чинейского месторождения, В – блоки ильменита в образцах руд Пудожгорского месторождения

В низкотитанистых рудах титаномагнетит характеризуется весьма тонкими проявлениями продуктов РТР (распад твердого раствора) зонального и

секториального, частично блокового строения в анатомии зерен. Рудный минерал в среднетитанистых рудах уже отличается проявлением более четкого зонального, блокового и скелетного строения. В высокотитанистых рудах анатомия его зерен преобразуется весьма существенно в связи с формированием сложных блоковых и скелетных структур при существенной роли нерудных включений. Резко усложняется анатомия зерен на фоне интенсивного влияния наложенных процессов с участием микротектонических преобразований.

При этом также необходимо учитывать эволюцию габитусных форм минерала от октаэдра {111} к комбинациям октаэдра с кубом {100} и ромбододекаэдром {110} [Пирогов и др., 1988].

Степень неоднородности титаномагнетита системно нетождественно проявляется в различных геолого-генетических формациях магматических железных руд, предопределяя особенности их поведения в технологии переработки. На этой основе формируются характеристики качества руд, как с позиций возможных способов рудоподготовки, так и последующего обогащения. Сложный химический и фазовый составы титаномагнетита и их влияние на магнитные свойства минерала – одного из определяющих параметров при обогащении железных руд, вынуждают исследователей искать способы количественной оценки степени его неоднородности.

Достоинством метода РСМА является возможность проведения экспрессного локального неразрушающего анализа с количественным определением основных элементов, входящих в состав [Электронно-зондовый..., 1974; Гаранин, Кудрявцева, 1983; Рид, 2008 и др.]. Однако при изучении титаномагнетита чрезвычайно важна возможность проведения не только точечного, но и корректного растрового микрозондового анализа [Пирогов и др., 2013; Быстров, 2013]. Анализ характерных зерен на анатомическом срезе расфокусированным пучком позволяет определить средний состав продуктов распада твердого раствора раскристаллизованного расплава, при этом применение ЭД спектрометра делает возможным проведение исследования в растре, ограниченном лишь увеличением прибора. Отклонение взвешенной суммы матричных эффектов в индивидуальных фазах, естественно, будет отличаться от той же самой в случае гомогенных образцов, ввиду изменения поправочных коэффициентов ZAF. В то же время, близость элементов, слагающих титаномагнетит и присутствующих в нем минеральных фаз, минимизирует погрешность, обусловленную матричными эффектами [Биркс, 1966; Практическая растровая..., 1978].

Несмотря на сложность структуры и состава зерен титаномагнетита, с соответствующим проявлением изоморфных замещений Fe на Ti и V, усредненный элементный состав минерала, полученный точечным анализом методом РСМА довольно близок, хотя и не отвечает чистому магнетиту (Fe – 72,4 мас.%) (табл. 4), а является именно титаномагнетитом. Следует особо подчеркнуть, что титаномагнетит, как объект технологической минералогии, характеризуется совершенно иным элементным составом, что наглядно демонстрируется на рис. 2 (на примере титаномагнетита руд Пудожгорского месторождения).

Таблица 4

Средний состав титаномагнетита месторождений, мас. %. РСМА, анализ в точке

Месторождение	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Собственно-Качканарское	0,89	1,12	0,10	0,02	1,51	0,35	0,06	0,26	69,90
Чинейское	0,40	0,31	0,10	0,04	1,87	0,65	0,04	0,35	68,52
Пудожгорское	0,03	0,11	0,09	0,04	2,54	0,89	0,05	0,06	67,16

Описанные выше на примере Пудожгорских руд особенности, определяющие степень влияния неоднородности на элементный и фазовый состав титаномагнетита, а, следовательно, и на его технологические свойства прослеживаются также и в других геолого-генетических типах титаномагнетитовых месторождений. Наряду с определением абсолютных содержаний наиболее значимых элементов (Fe, Ti, V), также важно учитывать предложенные [Пирогов и др., 2013] коэффициенты титанистости (kTi) $[(TiO_2/Fe) \cdot 10^2]$ и ванадистости (kV) $[(V_2O_3/Fe) \cdot 10^2]$. Это позволяет более корректно оценивать степень изменчивости состава минерала, зерен и обломочных малых частиц при обогащении руд.

Площадная количественная оценка содержаний и распределения в зерне минерала Fe-Ti-V с учетом коэффициентов титанистости и ванадистости показывает, что степень неоднородности определяется в нем особенностями проявления различных по морфологии и размерам включений как в виде продуктов распада твердого раствора (ильменит, ульвит, титанит), так и других, в том числе, нерудных составляющих (продукты лейкоксенизации). При определении среднего содержания элементов с учетом коэффициентов по Ti и V в пределах площадей титаномагнетиты подразделены на 3 категории по степени неоднородности: высокотитанистые (В-Tmt, Tmt 1) при содержании Ti более 10 %, среднетитанистые (С-Tmt, Tmt 2) соответственно – Ti = 6 – 10 % и низкотитанистые (Н-Tmt, Tmt 3) – Ti менее 6 %. Причем методом ЯГРС установлено, что Ti может входить в структуру минерала в качестве изоморфной примеси только до 3 %, а остальной Ti представлен в основном продуктами распада твердого раствора и вторичными нерудными минералами.

Степень неоднородности титаномагнетита руд подрудного и надрудного горизонтов по-разному будет зависеть от соотношения выявленных типов неоднородности в минерале. По мере снижения степени неоднородности в минерале будет убывать доля зерен с блоками типа анатомических срезов А и Б на рисунке 2.

Наиболее четко различия в степени неоднородности титаномагнетита по составу выявляются при точечном анализе, но они не дают достаточно полной информации о качестве получения возможных технологических показателей (в связи с оценкой степени раскрытия рудной и нерудной фаз в различных классах крупности). Так как значительная часть включений продуктов распада твердого раствора и нерудных минералов при тонком измельчении, особенно в высокотитанистых рудах, не извлекается при обогащении, то реальную картину в оценке степени неоднородности представляют именно площадные измерения (при средней площади в 50 мкм).

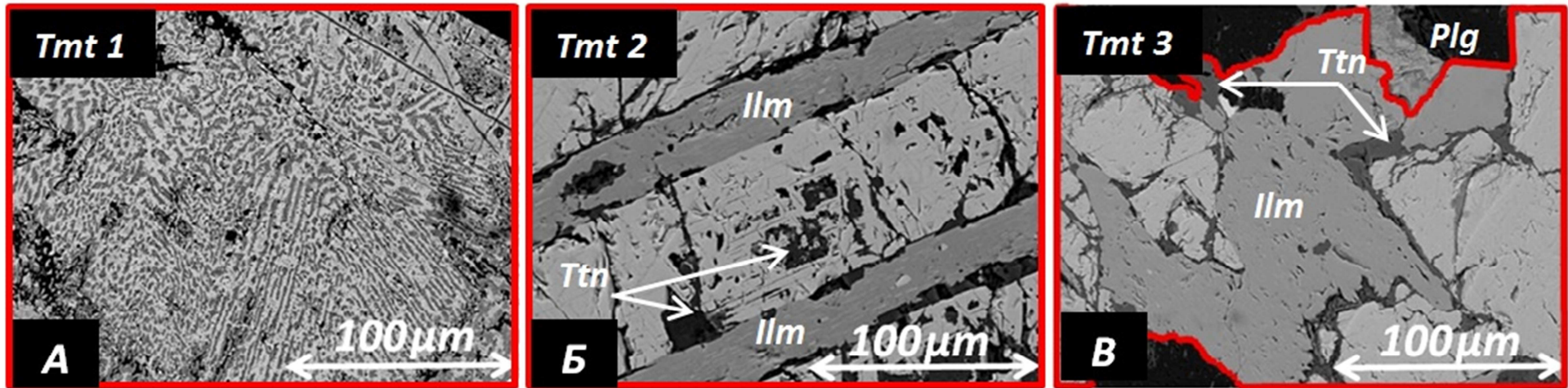


Рисунок и вид анализа	Fe _{общ} ,%	Fe ^(II) ,%	Fe ^(III) ,%	Ti,%	V,%	FeO,%	Fe ₂ O ₃ ,%	Fe ₃ O ₄ ,%	TiO ₂ ,%	V ₂ O ₃ ,%	kTi	kV	
Площадь А	58,75	24,33	34,42	10,51	1,07	31,32	49,23	80,55	17,54	1,57	29,85	2,68	
Площадь Б	58,67	23,63	35,04	10,72	0,88	30,41	50,13	80,54	17,88	1,29	30,48	2,21	
Площадь В	53,26	23,47	29,79	15,53	0,71	30,20	42,62	72,83	25,90	1,04	48,62	1,96	
Средние по точечным измерениям в тех же площадях:	Tmt 1 (А)	57,55	24,34	33,22	10,44	0,99	31,32	47,52	79,54	17,54	1,46	30,48	2,53
	Tmt 2 (Б)	62,84	23,95	38,89	6,67	1,28	30,83	55,63	86,84	11,21	1,88	17,84	3,00
	Tmt 3 (В)	68,86	24,53	44,33	1,70	1,46	31,57	63,42	95,16	2,86	2,15	4,15	3,12

Рис. 2. Особенности эволюции состава титаномagnetита (по данным РСМА) с учетом количественного распределения элементов, коэффициентов титанистости и ванадистости. Пудожгорское месторождение, рудный горизонт

В процессе дробления и измельчения руды за счет сбрасывания при раскрытии в гранулярном спектре (особенно в классах крупности менее 0,1 мм) происходит частичное очищение титаномагнетита от нерудных включений и части минералов – продуктов распада твердого раствора вплоть до получения частиц собственно магнетита. Таким образом, исследования фракций исходных руд и продуктов сепарации (с учетом их выхода) позволяют дать оценку эффективности разделения рудных и нерудных частиц минералов. Как показывают исследования, чем выше степень неоднородности титаномагнетита руд, тем сложнее технологические решения. Наряду с механическими методами обогащения, здесь существенную роль начинают играть металлургические процессы передела руд.

Особенности степени неоднородности титаномагнетита в ряду низко-, средне- и высокотитанистых руд, обусловленные различными условиями кристаллизации и эволюции минерала, удастся проследить в сравнении, если вынести нормированные содержания основных компонентов его состава, полученные растровой съемкой участков и целых анатомических срезов зерен титаномагнетита методом РСМА, на экспериментальную [Frost, Lindsley, 1991] тройную диаграмму (рис. 3).

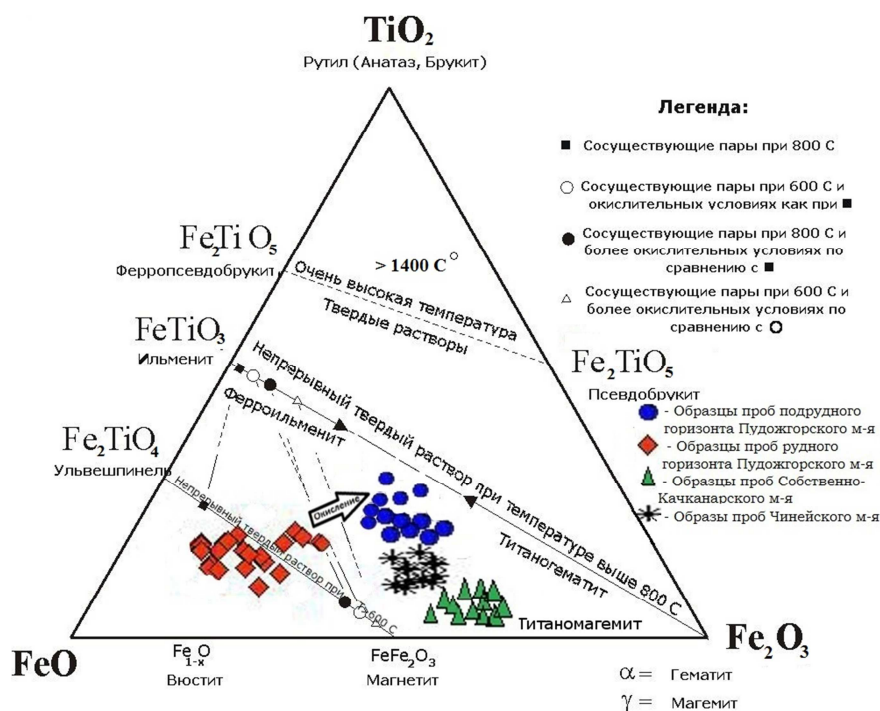


Рис. 3. Распределение нормированных составов титаномагнетита на диаграмме Фроста и Линдсли [Frost, Lindsley, 1991], с дополнениями Б.И.Пирогова и И.Г.Быстрова

На рисунке 3 определенно прослеживается, влияние условий кристаллизации на распределение продуктов РТР в титаномагнетите:

Титаномагнетитовые руды Собственно-Качканарского месторождения характеризуются низкой титанистостью. Руды Пудожгорского месторождения, напротив, высокотитанистые в обоих технологических горизонтах. Для них характерно влияние нераскристаллизовавшихся в крупные агрегаты ильменита для подрудного горизонта и ульвешпинели для рудного. По степени неоднородности титаномагнетиты Чинейского месторождения занимают промежуточное положение.

Рисунок 3 также показывает снижение степени неоднородности титаномагнетита от высокотитанистых руд к низкотитанистым. Титаномагнетиты Собственно-Качканарского месторождения – это природно-легированное железорудное сырье, содержание титана в котором не будет оказывать негативное воздействие при обогащении, что подтверждается примером эксплуатации руд Гусевгорского месторождения КГОКом. Введение же средне- и высокотитанистых руд Чинейского и Пудожгорского месторождений в промышленное освоение требует проведения геолого-технологического картирования, с целью выявления участков и залежей с различной степенью неоднородности титаномагнетита.

Таким образом, растровый рентгеноспектральный анализ позволяет определять реальный состав титаномагнетита в различном гранулярном спектре зерен, в связи с оценкой обогатимости руд. Точечные же анализы в этом случае используются для уточнения содержания основных и примесных элементов в минерале и слагающих его продуктов распада твердого раствора.

Второе защищаемое положение. Многостадийное развитие первичных магматогенных и вторичных метасоматических процессов минералообразования обуславливает различную степень неоднородности элементного и фазового составов титаномагнетита разных геолого-промышленных типов руд.

В работах [Akimoto S., 1953, Basta E.Z., 1960 и др.] однозначно показано, что высокотемпературный магнетит при образовании отличается сложным составом и содержит в виде твердого раствора множество элементов (Ti, Mg, Mn, Al, V, Cr и др.). Однако при понижении температуры минерал стремится «очиститься» от элементов-примесей [Рамдор, 1962; Чернышева и др., 1981]. При этом тенденция эволюции процесса очищения просматривается в двух основных направлениях:

- формирование на базе матрицы гомогенного минерала-хозяина отдельных фаз минералов и изменения морфоструктурных, химических и физических параметров образовавшегося рудного микроагрегата под воздействием внешних факторов (микротектоника, ОВП, метаморфизм, метасоматоз, и др.),

- перераспределение промышленно-ценных компонентов в системе ассоциаций рудный агрегат – нерудные минералы вмещающей породы под действием внутренних факторов (диффузия, ионный обмен и др.).

Взаимодействие механизмов очищения определяет минералоготехнологические особенности титаномагнетитовых руд.

Указанное выше влияние в виду наиболее полного развития процесса изменения первичного титаномагнетита при наличии всех стадий преобразования минерала в работе рассмотрено на примере высокотитанистых руд Пудожгорского месторождения.

Выделение собственных минеральных фаз Ti-содержащих минералов из «протораствора» проходило в соответствии с описанными в работах [Григорьев, Жабин, 1975; Кудрявцева и др., 1982] механизмами роста и

укрупнения образующихся кристаллитов по наиболее ослабленным участкам титаномагнетита.

При этом на текстурно-структурные и минералого-технологические особенности титаномагнетита существенное действие оказывало взаимовлияние образующегося рудного микроагрегата и сопутствующих нерудных ассоциаций. В результате проведенного комплекса исследований выявлена четкая взаимосвязь в рудах месторождения между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости (рис. 4, 5). Согласно работам А.А. Маракушева [Маракушев, 1980, 1988] охлаждение нестабильного расплава, обогащенного Fe, Ti, летучими и др. вызывает мобилизацию этих элементов в габброидную (основную) фазу. При этом по мере остывания подвижность элементов постепенно снижается. Таким образом, для низкотитанистого титаномагнетита характерны ассоциации с более высокотемпературными нерудными минералами, в случае Пудожгорского месторождения – с анортитом и геденбергитом. Для среднетитанистого минерала характерна ассоциация лабрадор – авгит, для низкотитанистого – альбит – актинолит – антофилит. Характерные ассоциации нерудных минералов, их связь с уровнем титанистости титаномагнетита и влияние на них вторичных процессов минералообразования отражены на рисунках 4 и 5.

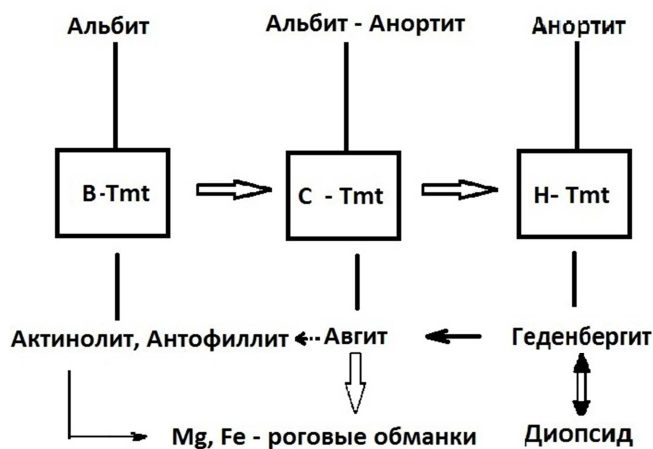


Рис. 4. Взаимосвязь между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитом различного уровня титанистости в рудах месторождения

Наиболее принципиально, как отмечено в работе [Пирогов и др., 1988], оценить влияние первичных и вторичных процессов минералообразования на элементный состав титаномагнетита возможно, используя факторный анализ.

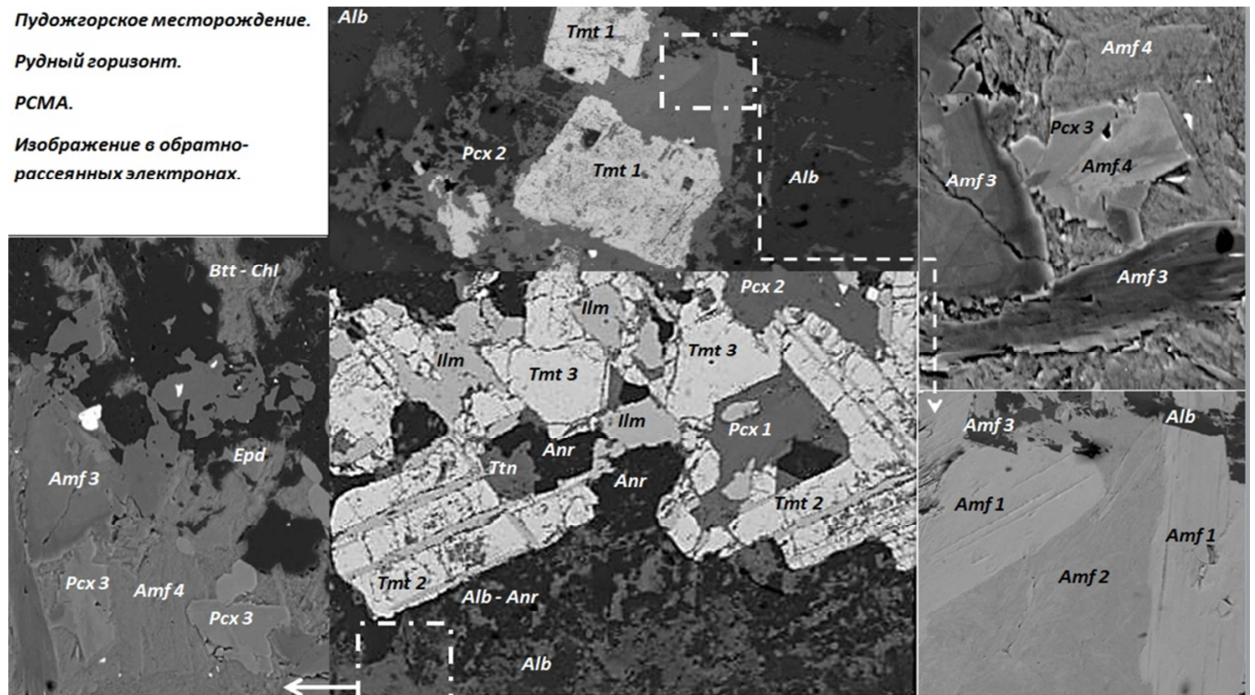
Факторный анализ, проведенный по данным химического состава титаномагнетита, отобранного с разных глубин рудной залежи [Трофимов, Голубев, 2008], дополненный материалами полученными автором, позволил проследить изменения, происходившие с рудным минералом по всей глубине интрузива. При рассмотрении веса факторов (рис. 6, табл. 5) видно, что в процессе формирования элементного состава титаномагнетита участвуют 3 фактора, несущие более 82% общей дисперсии. Величины собственных значений и веса факторов показывают, что значения исследуемых характеристик

Пудожгорское месторождение.

Рудный горизонт.

РСМА.

Изображение в обратно-
рассеянных электронах.



Индекс	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₃	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Минерал
Anr	45,6	35,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	18,2	1,1	0,0	Анортит
	$\text{Na}_{0,10}\text{Ca}_{0,90}\text{Al}_{1,90}\text{Si}_{2,10}\text{O}_8$										
Alb-Anr	69,7	29,4	0,2	1,1	0,1	0,0	0,0	12,0	4,7	0,2	Альбит – Анортит (Лабрадор)
	$\text{Ca}_{0,58}\text{Na}_{0,42}\text{Al}_{1,58}\text{Si}_{2,4}\text{O}_8$										
Alb	69,7	21,5	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,4	12,7	0,0	Альбит
	$\text{Na}_{1,00}\text{Al}_{1,05}\text{Si}_{2,95}\text{O}_8$										
Pcx1	54,0	0,8	16,6	2,9	0,0	0,0	0,1	24,5	0,6	0,0	Геденбергит – Диопсид
	$(\text{Ca}_{0,96}\text{Na}_{0,04})(\text{Mg}_{0,90}\text{Fe}_{0,09}\text{Mn}_{0,02}\text{Al}_{0,02})_{1,03}(\text{Si}_{1,98}\text{Al}_{0,02})_{2,00}\text{O}_6$										
Pcx2	51,3	1,9	7,2	16,1	0,0	0,0	0,0	22,3	1,1	0,0	Диопсид – Геденбергит
	$(\text{Ca}_{0,92}\text{Na}_{0,08})(\text{Mg}_{0,41}\text{Fe}_{0,52}\text{Al}_{0,07})_{1,00}(\text{Si}_{1,98}\text{Al}_{0,02})_{2,00}\text{O}_6$										
Pcx3	49,3	5,0	7,4	16,2	0,3	0,1	0,0	16,9	3,9	0,0	Авгит
	$(\text{Ca}_{0,70}\text{Na}_{0,28}\text{K}_{0,01})_{0,99}(\text{Mg}_{0,48}\text{Fe}_{0,51}\text{Mn}_{0,005}\text{Al}_{0,095})(\text{Si}_{1,86}\text{Al}_{0,13}\text{Ti}_{0,01})\text{O}_6$										
Amf 1	36,2	11,7	9,3	38,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,4	0,0	Актинолит
	$(\text{Fe})_2(\text{Mg}_{2,15}\text{Fe}_{0,81}\text{Mn}_{0,04})(\text{Fe}^{3+}_{1,96}\text{Ti}_{0,04})(\text{Si}_{5,7}\text{Al}_{2,2}\text{Fe}^{3+}_{0,1})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$										
Amf 2	49,7	2,5	6,7	28,7	0,1	0,0	0,1	12,0	0,3	0,0	Антофиллит – Жедрит
	$(\text{Ca}_{1,9}\text{Na}_{0,1})(\text{Mg}_{1,50}\text{Fe}_{3,48}\text{Mn}_{0,015})(\text{Si}_{7,5}\text{Al}_{0,50})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$										
Amf 3	46,0	5,9	6,7	25,7	0,0	0,0	0,3	11,5	1,0	0,0	Железистая роговая обманка
	$(\text{Ca}_{1,88}\text{Na}_{0,12})(\text{Mg}_{1,54}\text{Fe}_{2,43}\text{Mn}_{0,03})(\text{Fe}^{3+}_{0,87}\text{Ti}_{0,13})(\text{Si}_{7,0}\text{Al}_{1,0})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$										
Amf 4	39,3	11,8	3,1	29,6	0,2	0,0	0,2	10,5	0,6	0,3	Магнезиальная роговая обманка
	$(\text{Ca}_{1,70}\text{Na}_{0,24}\text{K}_{0,06})(\text{Mg}_{0,73}\text{Fe}_{2,24}\text{Mn}_{0,03})(\text{Fe}^{3+}_{1,98}\text{Ti}_{0,02})(\text{Si}_{6,16}\text{Al}_{1,84})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$										
Epd	38,1	24,9	0,0	11,3	0,3	0,0	0,1	23,7	0,1	0,0	Эпидот (ближе к клиноцоизиту)
	$(\text{Ca}_{1,98}\text{Na}_{0,02})(\text{Al}_{2,26}\text{Fe}^{3+}_{0,74}\text{Ti}_{0,02})_{3,02}(\text{Si}_{2,00}\text{O}_{7,00})(\text{Si}_{0,97}\text{Al}_{0,03})_{1,00}\text{O}_4(\text{OH})$										
Btt-Chl	33,2	15,9	8,3	29,6	3,3	0,0	0,1	0,1	0,3	9,2	Биотит – Хлорит

Рис. 5. Характер взаимоотношения нерудных минералов и их состав (мас. %) с титаномagnetитом различного уровня титанистости.
Tmt 3 – низкотитанистый титаномagnetит, Tmt 2 – среднетитанистый титаномagnetит, Tmt 1 – высокотитанистый титаномagnetит, Ilm – ильменит, Ttn – титанит

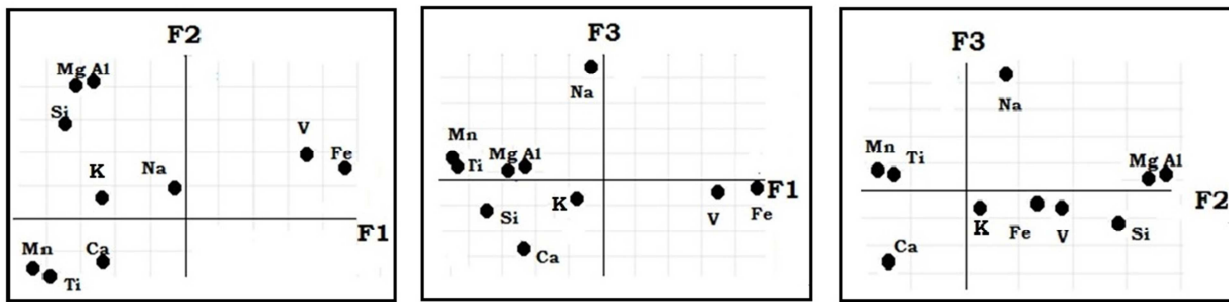


Рис. 6. Диаграммы распределения по факторам факторных нагрузок содержаний основных компонентов в рудах и породах Пудожгорского месторождения

Таблица 5

Факторные нагрузки, собственные значения и веса факторов

Признаки	Факторные нагрузки		
	F1	F2	F3
K	0,189	-0,095	-0,234
Na	0,119	0,062	-0,839
Mg	0,086	0,919	-0,122
Al	0,072	0,942	-0,097
Si	0,286	0,872	-0,241
Ca	0,440	0,041	0,658
Ti	0,940	0,131	0,035
V	-0,807	-0,022	-0,008
Mn	0,936	0,123	0,017
Fe	-0,947	-0,218	-0,051
Собственные значения	3,609	2,577	1,223
Вес фактора, %	40,099	28,638	13,587

титаномагнетитов определяются преимущественно на 40,1% действием одного фактора F1. Анализ признаковой структуры фактора F1 показывает, что нагрузка этого фактора заключается в значительном понижении содержания Fe и V в минерале под влиянием Mn и Ti и в меньшей степени Ca и Si. Такой набор признаков и характер их действия позволяет предполагать, что фактор F1 отражает процесс выделения собственных фаз из прототитаномагнетита, содержащего магнетит с примесями ильменита, титанита, ульвита и др.

Фактор F2 несет в себе 28,6% информации о рассматриваемом минерале. Анализ признаковых нагрузок этого фактора показывает, значимую положительную связь с Si, Al и Mg и слабые отрицательные связи с Fe. Такая признаковая структура фактора F2 позволяет предполагать, что он отражает влияние на состав титаномагнетита включений первичного Mg-алюмосиликата, захваченного магмой в процессе кристаллизации, а также влиянием на минерал более позднего Mg-алюмосиликата, с частичным замещением Fe на Mg в процессе аутометасоматоза, и, вероятно, диффузионной миграцией Fe.

Интерпретация F3 позволяет предположить, что он отражает роль взаимосвязанного метасоматического процесса изменения состава

титаномагнетита и сопутствующих ему Са- и Na- плагиоклазов вмещающей породы, влияние развивающихся по захваченным в процессе кристаллизации амфиболам и алюмосиликатам К – слюд.

Установленные с помощью статистической обработки механизмы перераспределения рудообразующих компонентов с учетом данных полученных методом РСМА позволяют сделать следующие выводы:

Не меньшее влияние на перераспределение основных компонентов руд (Fe, Ti, V), совместно поступающих во вмещающую породу в результате магматогенной стадии, оказывают вторичные процессы минералообразования. Метасоматические изменения приводят к выделению Ti в виде собственных минералов на базе титаномагнетитовой матрицы. При этом из минерала-хозяина выносятся элементы – примеси Mg и Mn; V и Fe при наложенных процессах не теряют прямой взаимосвязи.

В рудах между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости присутствует четкая взаимосвязь. Приведенная схема (см. рис. 4) свидетельствует о закономерностях появления различных ассоциаций силикатов в связи с эволюцией состава титаномагнетита. Эти же представления подтверждаются характером взаимоотношений силикатов и ильменита с титаномагнетитом различного уровня титанистости в рудах, предопределяя в целом изменчивость качества рудных и нерудных минералов.

Полученные материалы в целом в сочетании с данными по элементному составу и кристаллохимии силикатов (см. рис. 5) не только дополняют генетическую картину процессов рудообразования, позволяя проследить глубину метаморфических изменений, но также и судить об особенностях поведения минералов при обогащении руд. В первую очередь, это определяет существенные потери Fe (по сравнению с валовым содержанием) и в меньшей степени Ti и V в минералах магматической стадии, перешедших в результате метаморфизма и автометасоматоза в более позднюю нерудную минерализацию (титанит, амфиболы, слюды, хлориты др.). Во-вторых, это позволяет определить состав силикатов, ассоциирующих с рудными минералами, что важно учитывать при оценке различных продуктов обогащения.

Полученная информация при системном подходе может обеспечить прогноз технологических свойств железных руд минералогическими методами на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Третье защищаемое положение. Типоморфные признаки титаномагнетита – сопутствующая ассоциация, морфология и гранулометрия зерен и агрегатов, неоднородность состава, физические и физико-химические свойства минерала, определяют параметры и условия обогащения железных руд магматического генезиса.

Особенности процессов минералообразования обуславливают типоморфные признаки и ассоциации минералов [Чернышева и др., 1981], существенно влияющие на обогащение руд различных генетических типов. В качестве наиболее значимых типоморфных признаков титаномагнетита, определяющих обогатимость руд следует выделить морфоструктурные и

гранулометрические особенности минерала, его элементный и фазовый составы, а также физические и физико-химические свойства минерала-хозяина и продуктов РТР. Каждый из установленных признаков в отдельности имеет ограниченную сферу приложения, однако их совокупность отражает не только генетические и физико-химические особенности оруденения, но и имеет также важное прикладное значение при проведении технологических работ [Чернышева и др., 1981]. Типоморфизм титаномагнетита отображен в таблице 6.

Немаловажное значение имеют типоморфные особенности сосуществующего с титаномагнетитом ильменита [Гаранин и др., 1984]. Даже в пределах одного месторождения выделения минерала могут иметь различный состав (табл. 7).

Таблица 6

Типоморфные особенности титаномагнетита руд месторождений

Признак	Месторождение		
	Собственно – Качканарское	Чинейское	Пудожгорское
Морфоструктурные особенности	титаномагнетит		
	выполняет интерстиции между нерудными минералами	выполняет интерстиции между нерудными минералами, образует субидиоморфные кристаллы	образует субидиоморфные и идиоморфные кристаллы
Средний размер выделений, мм	0,163-0,284	0,325-0,412	0,522-0,531
Микротвердость, кгс/мм ²	695	588	563
Содержание Fe, %	64,4-71,9	56,4-63,8	49,1-61,7
Содержание Ti, %			
Изоморфный	<1,0	1,0-1,5	<2,0
Подукты РТР	1,0-2,0	5,0-7,0	10,0-12,0
kTi ((TiO ₂ /Fe)*10 ²)	7,8	18,6	28,2
Содержание V, %	0,0-1,0	0,5-1,5	0,5-2,0
Содержание других элементов – примесей, %			
Mg	0,5-2,5	0,1-1,5	0,0-0,5
Mn	0,0-0,3	0,0-0,5	0,0-0,5
Al	0,0-3,7	0,0-2,2	0,0-1,1

Таблица 7

Средний состав морфологических форм ильменита руд Пудожгорского месторождения

Форма выделения	Рисунок	Элемент, мас. %						
		Mg	Al	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
Ламели	А	0,0	0,1	0,0	33,2	0,0	0,9	31,6
Пластины	А-Б	0,0	0,0	0,0	30,3	0,0	1,1	36,6
Блоки	В	0,1	0,1	0,0	26,7	0,0	1,0	40,4
Теоретический состав		0,0	0,0	0,0	31,6	0,0	0,0	36,8

Увеличение размера ильменита приводит к понижению в нем содержания Ti и повышению содержания Fe (относительно теоретического состава минерала) (табл. 7).

Рассматриваемые взаимоотношения титаномагнетита и ильменита прослеживаются и в рудах других месторождений (рис. 7). Важно отметить, что в рудах с низким содержанием ильменита (1-3%), минерал нередко образует крупные (до 5 мм) блоки, а в более богатых ильменитом рудах, как показывают исследования, он может быть равномерно распределен в магнетитовой матрице.

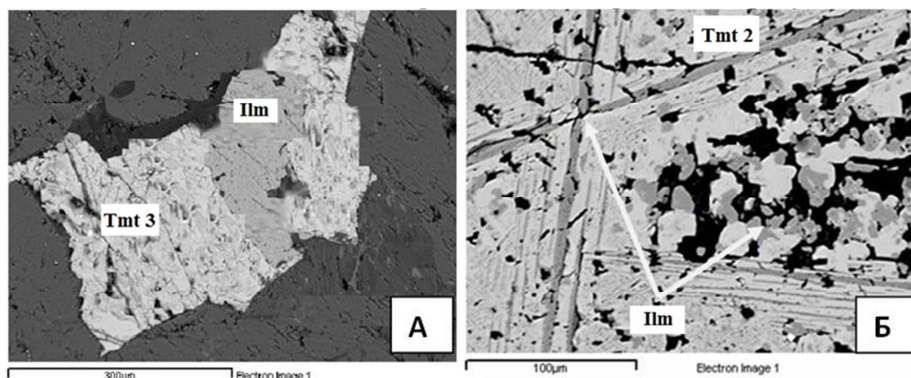


Рис. 7. А – Блоки ильменита в рудах Собственно-Качканарского месторождения, Б – пластины и ламели ильменита в рудах Чинейского месторождения, РСМА

Кроме того, выделения ильменита, представленные одной и той же морфологической разновидностью, но из разных месторождений имеют разный элементный состав, что, согласно работам [Юшко, 1971; Евдокимов, Багдасаров, 1982], является функцией времени и термодинамических условий их образования. При этом выявленная для ильменитов руд Пудожгорского месторождения тенденция повышения содержания Fe при укрупнении выделений минерала сохраняется и для руд других месторождений. Особенности изменения химического состава ильменита отмеченных форм месторождений отображены на рисунке 8 и в таблице 8.

Термодинамические параметры, влияющие на элементный состав ильменита руд месторождений, выражаются в наличие изменений состава минерала в связи с проявлением изоморфных Fe примесей Mg и Mn, причем наиболее четко это влияние ввиду отсутствия взаимодействия с нерудной составляющей руд прослеживается в выделениях типа ламелей. Состав более крупных выделений титаномагнетита нередко изменен наложенными процессами аутометасоматоза. Так для ламелей ильменита, приуроченных к Собственно-Качканарскому месторождению характерно наименьшее (в среднем 31%) содержание Fe, что обусловлено вхождением в состав минерала Mn (до 4,5%) и Mg (до 1,0%). Ламели ильменита руд Пудожгорского месторождения, напротив, по элементному составу наиболее богаты железом и титаном и практически не содержат примесных элементов (Mg+Mn не более 1,5%). Ламели ильменита Чинейского месторождения занимают промежуточное положение по содержанию как Fe и Ti, так и элементов-примесей. Как указывалось ранее, укрупнение морфологических разновидностей ильменита приводит к увеличению в них содержания Fe. Это объясняется развитием в блоковых, реже пластинчатых

формах процесса лейкоксенитизации, с образованием псевдобрукита (Fe_2TiO_5). Типоморфные признаки ильменита, с учетом лейкоксенитизации и титанитизации последнего согласно данным [Игнатьев, 2006] существенно влияют на его физические свойства и, соответственно, минералого-технологические особенности ильменита и руд в целом.

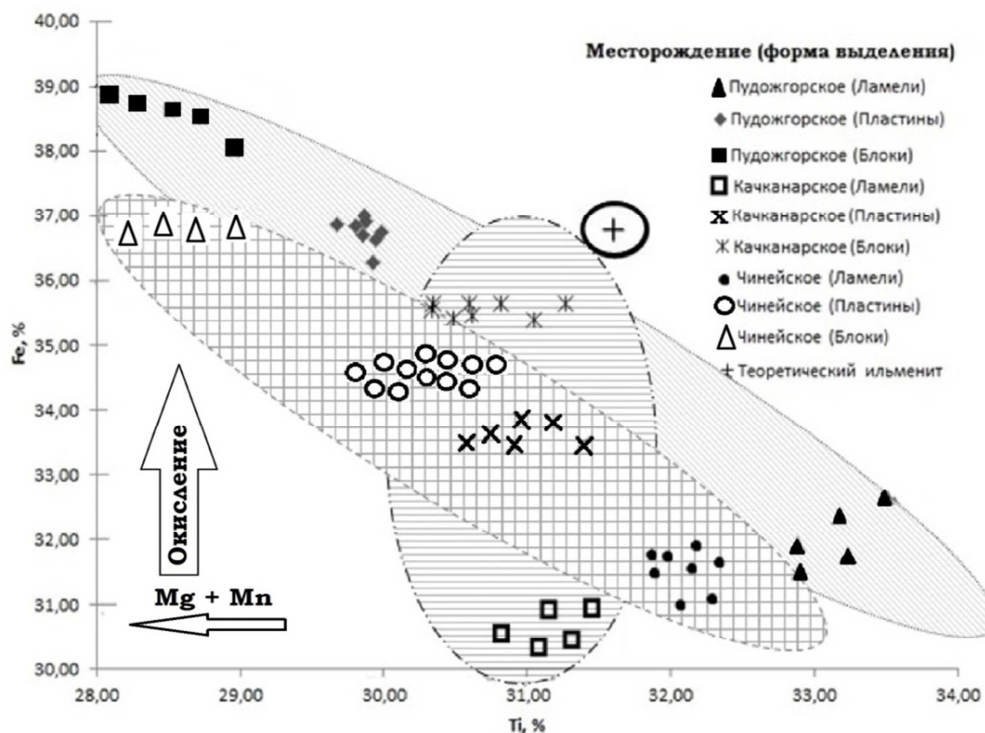


Рис. 8. Влияние морфологии выделений ильменита на содержание в них железа и титана

Таблица 8

Элементный состав морфологических разновидностей ильменита руд месторождений

Месторождение	Форма выделения	Элемент, %						
		Mg	Al	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
Собственно – Качканарское	Ламели	1,2	0,0	0,0	31,2	0,0	2,6	31,2
	Пластины	0,7	0,0	0,0	31,1	0,0	3,6	33,5
	Блоки	0,2	0,0	0,0	30,7	0,0	4,5	35,8
Чинейское	Ламели	0,2	0,0	0,0	32,2	0,0	0,2	31,7
	Пластины	0,8	0,0	0,0	30,3	0,0	0,5	34,5
	Блоки	1,5	0,0	0,0	28,5	0,0	1,0	36,6
Пудожгорское	Ламели	0,0	0,1	0,0	33,2	0,0	0,9	31,6
	Пластины	0,0	0,0	0,0	30,3	0,0	1,1	36,6
	Блоки	0,1	0,1	0,0	26,7	0,0	1,0	40,4
Теоретический состав		0,0	0,0	0,0	31,6	0,0	0,0	36,8

Оценивая типоморфные признаки титаномагнетита и их влияние на проведение технологических работ, необходимо подчеркнуть следующее:

Магнетиты магматических месторождений всегда микронеоднородны и представляют гетерогенные многофазные образования (микроагрегаты). Широкое развитие процессов распада твердого раствора в титаномагнетите

руд обуславливает необходимость изучения не только типоморфных признаков главного рудного минерала, но и сопутствующих ему, в первую очередь, ильменита. Различия в содержании и составе элементов-примесей в титаномагнетите и ильмените определяют их физические (плотность, микротвердость, удельную намагниченность и др.) и, соответственно, технологические свойства.

Таким образом, при обогащении железных руд магматического генезиса необходимо оценивать степень неоднородности титаномагнетита и выделять его разновидности при геолого-технологическом картировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время, несмотря на значительные запасы титаномагнетитовых руд, Россия испытывает острый дефицит в титановом сырье. Расширение минерально-сырьевой базы титана возможно лишь при создании эффективных технологий передела титаномагнетитовых руд, базирующихся на достоверной информации об их составе, строении и технологических свойствах.

Минералогические особенности титаномагнетита, в частности, и титаномагнетитовых руд, в целом, выявленные комплексом минералого-аналитических методов с доминирующей ролью рентгеноспектрального микроанализа, позволили получить информацию об их технологических свойствах и прогнозировать поведение руд в процессах обогащения. Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что неоднородность титаномагнетита, связанная с многостадийным распадом твердого раствора и последующей эволюцией его продуктов, а также проявлением вторичных наложенных процессов, является для руд каждого месторождения индивидуальной, несмотря на наличие определенных закономерностей.

2. Доказано, что титаномагнетит руд изученных месторождений является уникальным объектом. Это связано с его сложной генетической природой, существенную роль в развитии которой играет самоорганизация системы «минерал-среда». Определяющее влияние на минералогические особенности руд оказывают взаимоотношения титаномагнетита и нерудных минералов в различных ассоциациях.

3. Определены типоморфные признаки (морфоструктурные и гранулометрические особенности, элементный и фазовый составы и др.) титаномагнетита и сосуществующего с ним ильменита месторождений разных геолого-структурных позиций и их значение в процессах обогащения руд.

4. Разработана методика количественной оценки степени неоднородности химического состава титаномагнетита, применение которой позволило установить различия в уровне титанистости минерала и его зависимость от взаимоотношения с сосуществующими ассоциациями силикатных минералов.

5. Установлено уменьшение содержания титана в титаномагнетите в ряду руд месторождений: Пудожгорское – Чинейское – Собственно –

Качканарское. При этом наличие титаномагнетита различного уровня титанистости характерно для руд всех рассмотренных месторождений, что необходимо учитывать при их обогащении.

6. Впервые проведена статистическая (с учетом факторного анализа) обработка литературных и экспериментальных данных по составам титаномагнетитовых руд изученных геолого-генетических типов на различном иерархическом уровне – от индивида до месторождения, позволившая дополнить генетическую картину процессов рудообразования.

Список опубликованных работ автора по теме диссертации

1. **Быстров И.Г.** Возможности метода рентгеноспектрального электронного микроанализа для решения вопросов технологической минералогии // Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых. Сборник материалов IX международной молодежной научной школы. М.: ИПКОН РАН. 2012. С. 290-292.

2. **Быстров И.Г., Якушина О.А. Пирогов Б.И.** Комплексование методов рентгеновской микротомографии и рентгеноспектрального микроанализа при оценке минералого-технологических особенностей титаномагнетитов Пудожгорского месторождения // «Практическая микротомография». Материалы II Всероссийской конференции. М.: Почвенный Институт РАН. 2013. С.53-59.

3. **Быстров И.Г., Якушина О.А., Пирогов Б.И., Хозяинов М.С.** Оценка минералого-технологических особенностей титаномагнетитов Пудожгорского месторождения методами рентгеновской микротомографии и рентгеноспектрального микроанализа // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы XIV международной научной конференции. М.: ИИЦ ИФЗ РАН. 2013. С. 67-70.

4. **Быстров И.Г.** Титаномагнетит как объект технологической минералогии // Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых. Сборник материалов IX международной молодежной научной школы. М.: ИПКОН РАН. 2013. С. 251-254.

5. **Быстров И.Г.** Особенности изучения неоднородности титаномагнетитовых руд магматического генезиса для определения их минералого-технологических параметров // Новое в познании процессов рудообразования Материалы III Российской молодежной Школы с международным участием. М: ИГЕМ РАН. 2013. С. 70-73.

6. **Быстров И.Г.** Возможности метода электронного рентгеноспектрального микроанализа по выявлению неоднородности титаномагнетитов в связи с особенностями обогащения Fe-Ti-V руд. // Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых. Тезисы докладов V научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. М.: ФГУП «ВИМС». 2013. С.27-28.

7. **Быстров И.Г., Пирогов Б.И., Якушина О.А., Хозяинов М.С.** Принципы минералого-технологической оценки титаномагнетитовых руд (на

примере Пудожгорского месторождения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №3. С. 296-299.

8. **Быстров И.Г.** Эволюция твердого раствора в титаномагнетитах, как определяющий фактор минералого-технологических особенностей Fe-Ti-V руд // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2014» [Электронный ресурс]. М.: МАКС Пресс, 2014.

9. **Быстров И.Г.** Минералогические особенности руд как индикатор их технологических характеристик (Пудожгорское месторождение титаномагнетитовых руд) // Молодые – наукам о Земле. Материалы Международной научной конференции. Т.1. М.: РГГРУ. 2014. С. 40-43.

10. Пирогов Б.И., **Быстров И.Г.** Минералого-технологические особенности неоднородности титаномагнетитов РФ и методы их оценки // Рациональное недропользование. Сб. науч. трудов. IX Всероссийский семинар по технологической минералогии. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос.Техн.Ун-та им. Г.И.Носова. 2014. С. 180-187.

11. Тюленева В.М., **Быстров И.Г.**, Каминов Б.Ю., Рассулова С.Д. Особенности комплексных органогенно-фосфатных руд в Ергенинском районе Калмыкии // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 6-12.

Подписано в печать 15.08.2014 г.

Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,0

Отпечатано на ризографе.

Тираж 100. Заказ № 22

РИС «ВИМС»

119017, г. Москва, Старомонетный пер. дом 31