На правах рукописи

КОЛКОВА МАРИЯ СЕРГЕЕВНА

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ РУД МЕДВЕДЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Специальность 25.00.05
Минералогия, кристаллография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск, 2020

Работа выполнена в организациях: Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова» и Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского».

Научный руководитель:

Горбатова Елена Александровна, доктор геолого-минералогических наук, заместитель заведующего минералогическим отделом Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» (г. Москва)

Официальные оппоненты:
Попов Владимир Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института минералогии Уральского отделения Российской Академии наук (г. Миасс)

Газалева Галина Ивановна, доктор технических наук, заведующая отделом рудоподготовки и специальных методов исследования ОАО «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург)

Ведущая организация:
Институт геологии — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Защита состоится 2 декабря 2020 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д003.067.02, созданного на базе ИГМ СО РАН, в конференц-зале. Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3; факс: (383) 333-21-30; e-mail: gaskova@igm.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН. Адрес сайта: http://www.igm.nsc.ru, раздел «Образование».

Автореферат разослан «28» октября 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геолого-минералогических наук О.Л. Гаськова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Запасы титаномагнетитовых руд, характеризующиеся низким содержанием диоксида титана (до 3%), согласно данным государственного доклада о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ, учитываются как запасы месторождений железных руд. Из них на долю ванадиево-титаномагнетитовых руд приходится 12,3% запасов РФ. Добыча и переработка титаномагнетитовых руд с содержанием TiO_2 менее 3% осуществляется только на Гусевогорском месторождении с получением железного концентрата (Государственный доклад, 2018; Ляпунов, Макушев, 2019).

Титаномагнетитовые, ильменит-титаномагнетитовые и существенно ильменитовые руды (TiO_2 более 3%), заключенные в габброидах, составляют 25,3% запасов месторождений титана РФ. Добыча таких железо-титановых руд, ассоциирующих с габброидами, не ведется в связи с отсутствием возможности получения кондиционного железного концентрата, удовлетворяющего требованиям доменного производства, и выделения ильменитового продукта заданного качества (Быховский, Тигунов, 2003). Поэтому для обеспечения химической титановой промышленности применяется импортируемое титановое сырье - в основном ильменитовые (200 тыс. т) и в небольшом количестве рутиловые концентраты (12 тыс. т) (Государственный доклад, 2018).

Анализ существующих технологий обогащения титаномагнетитовых руд показал, что основная причина получения некондиционного железного концентрата связана со сложностью реализации физического разделения рудных минералов микроагрегатов титаномагнетита (Байков, Бардин, Брицке, 1939; Гасик, 1969; Болотова, Несговорова, Сысолятин, 1975; Елохин, 1982; Резниченко, 1986; Смирнов, 1996; Чижевский, 2005; Иванков, Быховский и др., 2011; Гончаров, 2015; Газалеева, 2015; Лютоев, Макеев, 2017, 2019 и др.). Вовлечение титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетовых руд с высоким содержанием TiO_2 в промышленное освоение напрямую зависит от: особенностей морфологии рудных минералов; их гранулярного состава – наличия тонких выделений; структурной и фазовой неоднородности микроагрегатов титаномагнетита – степени перекристаллизации структур распада твердого раствора ряда магнетит-ильменит; гетерогенности химического состава магнетита – присутствия примесных элементов; относительной интенсивности преобразования – амфиболизации, хлоритизации и мартитизации минералов руд (Малышев, Пантелеев, Пэк, 1934; Малышев, 1957; Фоминых, 1980; Штейнберг, 1959; Пирогов, 1988, 2013, 2014; Щипцов, 2009, 2012; Холоднов, 2012, 2016; Макеев 2015, 2016; Ферштатер, 2005; Попов, 1984; Карпова, 1970; Цветков, Мясников, Щепочкина, 1965; Юдин, 1987).

Кристаллохимические и морфоструктурные характеристики минералов титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетовых руд определяют их технологические свойства, такие как микротвердость (Герасимов, 1983; Ожогина, 2007; Быстров, Пирогов, 2013) и удельная магнитная восприимчивость (Смит, 1962; Зайцева, Чернышева, 1979; Тикадзуми, 1983), лежащие в основе принципиального выбора способов переработки железо-титановых руд. Поэтому изучение минералого-технологических особенностей руд Медведевского

месторождения, осложненных постмагматическими процессами и отличающихся гетерогенностью морфоструктурных характеристик и состава минералов, с позиции прогнозной оценки их переработки является весьма актуальным.

Объектом исследований являются вкрапленные титаномагнетитовые и ильменит-титаномагнетитовые руды Медведевского месторождения Кусинско-Копанского габбрового массива Южного Урала.

Цель исследований является выявление минералого-технологических особенностей – морфоструктурных характеристик и состава, физических свойств минералов, вкрапленных ильменит-титаномагнетитовых и титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения для обоснования способов их переработки.

Для достижения поставленной цели были реализованы следующие задачи:

1. Проанализировать геологическую ситуацию Медведевского месторождения железо-титановых руд – условия локализации рудных тел, их ассоциации с магматическими горными породами геологического разреза месторождения, «скрытую слоистость» массива, выраженную в изменении строения и сложения горных пород и элементного состава минералов.
2. Установить влияние особенностей вещественного состава и строения вкрапленных титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд, а также относительной интенсивности их изменения в постмагматические процессы минералообразования на степень раскрытия срастаний рудных и нерудных минералов при рудоподготовке.
3. Исследовать поведение минералов титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд в магнитном поле при разных значениях его напряженности.
4. Оценить структурную и фазовую неоднородности рудных микроагрегатов, проявившиеся в результате твердофазных превращений при окислительном обжиге дробленого материала руд разных классов крупности при температуре 1100°С во временном интервале, равном 24 ч., 48 ч. и 72 ч.

Фактический материал и личный вклад автора. Работа основана на минералогических исследованиях титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд, отобранных в горных выработках при участии д.г.-м.н. Е.А. Горбатовой, д.т.н. С.Е. Гавришева (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), д.г.-м.н. В.А. Попова (ФГБУН ИМ РАН) и к.г.-м.н. С.С. Потапова (ФГБУН ИМ РАН), а также каменного материала малых технологических проб, предоставленных сотрудниками предприятия ООО «Медведевский ГОК», и коллекционного материала д.г.-м.н. В.А. Попова (ФГБУН ИМ РАН). Изыскания проводились в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС») и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»).

В работе использованы результаты порядка 180 петрографических и минераграфических анализов руд и продуктов обогащения (д.г-м.н. Горбатова Е.А., д.г.-м.н. Пирогова Б.И., к.г.-м.н. Астахова Ю.М., к.г.-м.н. Кривощеков Н.Н.

при участии автора). Проанализировано 8 рентгенографических (А.В. Иоспа (ФГБУ «ВИМС»), П.В. Хворов (ФГБУН ИМ РАН)) и 80 химических (ПАО «ММК», ООО «Челябгеосъемка») анализов.

Рентгеноспектральный микроанализ в количестве 350 замеров осуществлялся к.т.н. Ю.Ю. Ефимовой (ФГБОУ «МГТУ им. Г.И. Носова»), м.н.с. А.А. Киселевым (ФГБУ «ВИМС») и экспертом Трифановым А.С. (ООО «Карл Цейсс») при участии автора и д.г.-м.н. Б.И. Пирогова. Электронно-микроскопические исследования титаномагнетита и ильменита выполнены к.т.н. Ю.Ю. Ефимовой (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») при участии д.г.м-н. Е.А. Горбатовой и автора.

Изучение образцов титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд методом мессбауэровской спектроскопии проведено д.г.-м.н. В.В. Коровушкиным (НИТУ «МИСиС»). Определения микротвердости минералов (порядка 600 замеров выполнено автором) и удельной магнитной восприимчивости продуктов магнитного анализа (в количестве 72 шт., выполненных д.г.-м.н. Л.Т. Раковым (ФГБУН ИГЕМ РАН) при участии автора). Экспериментальная часть работы – магнитный анализ и окислительный обжиг реализована автором при участии д.г.-м.н. Е.А. Горбатовой, д.т.н. В.А. Бигеева (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») и магистранта В.И. Сысоева (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»).

Защищаемые положения.

1. Многостадийность процессов минералообразования в габброидах и, прежде всего, явления постмагматического характера предопределили минералого-технологические особенности вкрапленных руд – минеральный состав, типы срастания, морфоструктурный состав рудных минералов и их физические свойства, которые обусловили основные показатели раскрытия зерен минералов (микроагрегатов) и в целом особенности обогатимости руд.

2. Выявлена зависимость значений удельной магнитной восприимчивости титаномагнетита и ильменита от их кристаллохимических (строения магнитной структуры магнетита и ильменита, присутствия изоморфных элементов-примесей и т. д.) и морфоструктурных (морфологии минерального индивида, фазового состава и гетерогенности микроагрегатов) характеристик, позволяющих прогнозировать уровень селективного разделения минеральных агрегатов в процессе магнитной сепарации.

3. Установлено, что окислительный обжиг минеральных индивидов и агрегатов ильменита и титаномагнетита приводит к уменьшению степени неоднородности минерального (фазового) и химического составов, что позволяет прогнозировать повышение раскрываемости вновь образованных железо- и титансодержащих минералов в технологических продуктах и в целом повышение извлечения титана в продукты различного типа. Определены параметры процессов техногенеза для создания перспективной технологической схемы переработки руд.

Научная новизна. Прослежена эволюция продуктов распада твердого раствора ряда магнетит-ильменит на примере руд Медведевского месторождения, выраженная в изменении строения и состава микроагрегатов титаномагнетита в процессе их собирательной перекристаллизации. Установлено влияние элементов-

примесей на значение спинового магнитного момента магнетита и ильменита титаномагнетита руд Медведевского месторождения. Определено поведение микроагрегатов титаномагнетита разной степени перекристаллизации и мартитизации во внешнем магнитном поле. Экспериментально доказана возможность направленного изменения технологических свойств рудных минералов при окислительном обжиге как продолжение природных процессов минералообразования. Установлена зависимость структурной и химической неоднородности рудных минералов (микроагрегатов) в рамках гранулометрического спектра от временного интервала окислительного обжига.

Практическая значимость. Полученные экспериментальные данные о характере раскрытия минеральных агрегатов вкрапленных железо-титановых руд могут быть использованы для обоснования крупности измельчения в процессе рудоподготовки. Анализ распределения рудных микроагрегатов в продуктах магнитной (электромагнитной) сепарации, полученных при разных значениях напряженности магнитного поля, позволил определить оптимальные параметры селективной магнитной сепарации для выделения титаномагнетитового и ильменитового продуктов. Разработаны методические указания «Определение раскрытия рудных минералов в продуктах магнитной сепарации железо-титановых руд» для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Магнитные методы обогащения» студентами специализации «Обогащение полезных ископаемых». Результаты окислительного обжига на воздухе дробленого материала мартитизированных титаномагнетитовых и ильменитовых микроагрегатов подтверждают, что оптимальными условиями получения продуктов псевдобрукит-гематитового и рутил-псевдобрукитового составов являются время обжига 72 часа при крупности материала -0,25+0,125 мм.

Соответствие результатов работы научным специальностям. Результаты работы соответствуют пунктам: 9 (технологическая минералогия, минералого-технологическое картирование и обоснование эффективной технологии переработки минерального сырья, утилизация промышленных и других отходов) 11 (экспериментальная минералогия) паспорта специальности 25.00.05.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований были представлены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях: XIII Международная научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ММК» (Магнитогорск, 20-24 мая 2013 г.); V Всероссийская молодежная научная конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 14-17 октября 2013 г.); XXII Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2014» (Москва, 27-31 января 2014 г.); IX Российский семинар по технологической минералогии (Магнитогорск, 22-24 апреля 2014 г.); XXIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2015» (Москва, 26-30 января 2015 г.); II Международная научно-практическая конференция «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (Магнитогорск, 17-19 февраля 2015 г.); Международное совещание «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Иркутск, 21-25 сентября 2015 г.);

Восьмая научно-практическая школа-конференция молодых ученых и специалистов с международным участием, посвященная 140-летию со дня рождения В. В. Аршинова «Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 14-15 мая 2019 г.); X Международная конференция «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (Магнитогорск, 27-31 мая 2019 г.); Международное совещание «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья» (Иркутск, 9-14 сентября 2019 г.); XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2020» (Москва, 27-31 января 2020 г.); XXI международный научный семинар «Минералогия техногенеза-2020» (Миасс, 18-21 июня 2020 г.).

Результаты также были отмечены наградами: Диплом II степени в аналитической секции XIII Международной научно-технической конференции молодых специалистов ПАО «ММК»; Диплом II степени Российского Минералогического Общества за доклад «Минералогические особенности титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения»; Диплом за активное участие и содержательный доклад на международном совещании «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья».

Основные положения диссертации опубликованы в 13 научных работах, из них: 3 статьи в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК РФ, 9 – в прочих изданиях, 1 методические указания.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (141 наименование). Общий объём работы составляет 120 страниц, включая 49 рисунков и 33 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность прогнозной минералого-технологической оценки высокотитанистых руд, определены объект, цели и задачи исследования, описан фактический материал работы и личный вклад соискателя, сформулированы практическая и научная значимость работы, а также защищаемые положения. **В первой главе** освещено состояние минерально-сырьевой базы железо-титановых руд магматогенного происхождения, представлены существующий опыт и перспективы переработки титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд, а также приведена характеристика основных технологических свойств рудных минералов. **Во второй главе** рассмотрены геология Медведевского месторождения железо-титановых руд и существующие технологии их переработки. **В третьей главе** описаны минералого-технологические характеристики железо-титановых руд, а именно их текстурно-структурные особенности, вещественный состав, морфоструктурный состав рудных минералов и их технологические свойства с позиции обогатимости. **В четвертой и пятой главах** изложены результаты исследования: поведение микроагрегатов титаномагнетита и ильменита во внешнем магнитном поле и изменения структурной и фазовой неоднородности микроагрегатов

титаномагнетита в процессе окислительного обжига. **В заключении** кратко освещены основные выводы по материалам диссертационной работы.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. *Многостадийность процессов минералообразования в габброидах и, прежде всего, явления постмагматического характера предопределили минералого-технологические особенности вкрапленных руд – минеральный состав, типы срастания, морфоструктурный состав рудных минералов и их физические свойства, которые обусловили основные показатели раскрытия зерен минералов (микроагрегатов) и в целом особенности обогатимости руд.*

Вкрапленная титаномагнетитовая руда Медведевского месторождения ассоциирует с меланократовыми габбро-норитами, а ильменит-титаномагнетитовая руда – с их мезо- и лейкократовыми разновидностями. Руды были подвержены вторичным изменениям – амфиболизации, хлоритизации, соссюритизации, альбитизации и мартитизации, что непосредственно оказало влияние на изменение минерального состава руды и технологических свойств минералов. Для титаномагнетитовых руд характерна средняя относительная интенсивность изменения, а для ильменит-титаномагнетитовых – более высокая.

Этапы магматического формирования и преобразования руд в постмагматические процессы ярко отражаются в существующих природных минеральных ассоциациях. Для вкрапленных руд доминирующими являются рудно-силикатные и силикатно-рудные ассоциации, обладающие первичным сидеронитовым и (или) интерстиционным строением и вторичными структурами – растворения и замещения.

Сидеронитовая и интерстиционная структуры характеризуются межзерновым расположением рудных минералов, ровной поверхностью границ срастаний с частичным проникновением друг в друга, что положительно влияет на разделение минеральных агрегатов титаномагнетита и ильменита с силикатной составляющей для последующего получения грубого железо-титанового концентрата.

Структура растворения (облочковая) прослеживается в рудах с частичным или полным замещением магнетитовой основы сине-зеленой роговой обманкой в титаномагнетите, что приводит к увеличению количества свободного ильменита (Новикова, Левченко, 1970).

Строение рудных микроагрегатов – распад твердых растворов (I – ильменит-магнетит, II – гематит-ильменит) (рис. 1). Продукты окислительного распада твердого раствора ряда ильменит-магнетит отличаются морфологией и размерами выделений ильменита, а также его пространственным расположением в минерале-хозяине – магнетите. Различают паркетную (рис. 1, а), тонкорешетчатую (рис. 1, б) структуры и структуру сегрегационного обособления (рис. 1, в), отражающие разные этапы эволюционного развития титаномагнетита (Юдин, 1980).

Особенности морфологии выделений ильменита и сложные структуры срастания рудных минералов предопределяют низкую степень их раскрытия в процессе дезинтеграции. Поэтому микроагрегаты паркетного и тонкорешетчатого строения сохраняются в железных концентратах и повышают содержание титана, что не позволяет их применять как сырье на железо при современном состоянии металлургического производства, в то время как сегрегационные обособления ильменита с укрупненными выделениями способствует раскрытию минералов.

Структура распада твердых растворов ряда гематит-ильменит прослеживается в свободных зернах ильменита (рис. 1, г, д). Обилие и мощность пластинок гематита способствуют разубоживанию ильменитового продукта Fe_2O_3.

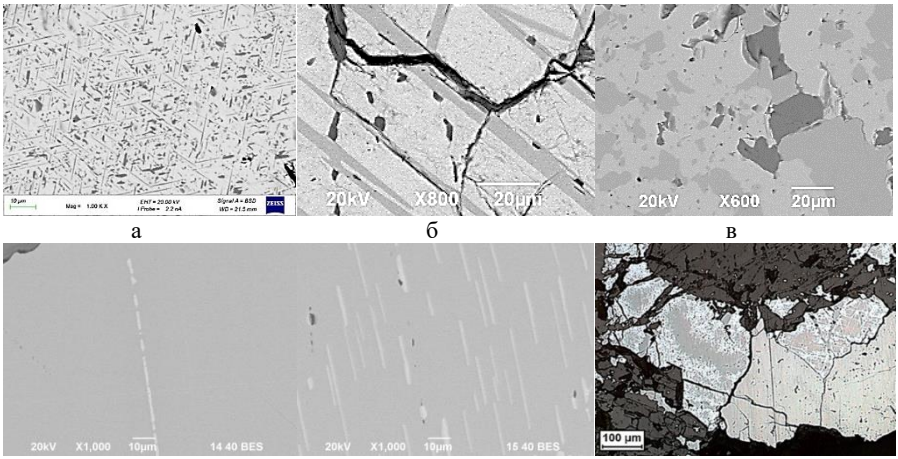


Рис. 1. Структуры рудных агрегатов. Продукты распада твердого раствора ряда магнетит-ильменит с формированием паркетного (а) и решетчатого (б) строения, сегрегационных обособлений (в). Продукты распада твердого раствора ряда гематит-ильменит с образованием отдельных пластин гематита в ильмените (г) и гемоильменита (д). Структура замещения магнетита гематитом (е). Изображение в обратно-рассеянных электронах (а-д). Отраженный свет, николи параллельны (е)

В процессе постмагматических преобразований по-разному проявляются изменения в силикатной и рудной составляющих. Преобразования в силикатной части отмечаются проявлением структур изменения – ситовидных и замещения. Микроагрегаты титаномагнетита подвержены мартитизации, выраженной в частичном или полном замещении магнетита гематитом (рис. 1, е), что приводит к снижению значений удельной магнитной восприимчивости и изменению поведения мартитизированного титаномагнетита во внешнем магнитном поле.

Структура руды по размеру зерен варьирует в широких пределах от тонко- до среднезернистой, что подтверждается распределением ильменита и титаномагнетита в рамках гранулометрического спектра (рис. 2).

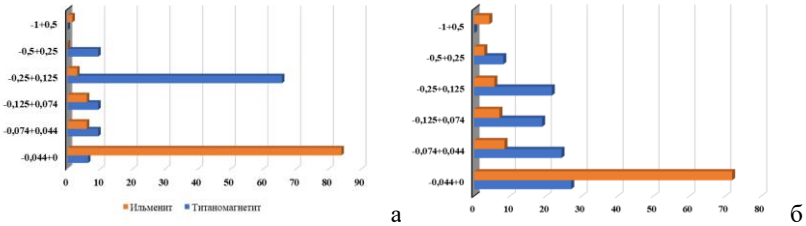


Рис. 2. Гранулярный состав ильменита и микроагрегатов титаномагнетита титаномагнетитовой (а) и ильменит-титаномагнетитовой (б) руд

Минеральный состав изучаемых вкрапленных титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд представлен нерудными минералами, в основном, амфиболом (60; 43), хлоритом (6; 2), плагиоклазом (5; 27), кварцем (2; 1), эпидотом (5; 9), и рудными (22; 18) – ильменитом, магнетитом, титаномагнетитом, гематитом, пиритом и гидроксидами железа. В подчиненном количестве встречаются апатит, биотит, титанит.

Ильменит в титаномагнетитовых рудах преимущественно встречается как продукт распада твердого раствора ряда ильменит-магнетит, свободный ильменит имеет подчиненное значение. Ильменит-титаномагнетитовые руды сложены как индивидуализированными зернами ильменита, так и продуктами распада твердого раствора.

В рудах ильменит представлен тремя основными морфологическими разновидностями: свободными аллотриоморфными зернами, иногда в срастаниях с титаномагнетитом; продуктами распада твердого раствора ряда ильменит-магнетит; идиоморфными и аллотриоморфными выделениями, образовавшимися в результате замещения матрицы магнетита в титаномагнетите.

Аллотриоморфные зерна характеризуются бухтообразными очертаниями и глубокими заливами, облекающими нерудные минералы. Внутреннее строение ильменита осложнено наличием продуктов распада твердого раствора – тонких пластин гематита. Мощность пластин гематита составляет менее 3 мкм при максимальных размерах ильменита 0,8-1,2 мм.

Морфология ильменита в продуктах распада твердого раствора ряда ильменит-магнетит изменяется от пластинчатой и ламелей до сегрегационных обособлений. Длина пластинок достигает 10-12 мкм при ширине 1-2 мкм, а ширина ламелей составляет 4-10 мкм при длине более 100 мкм, что подтверждает отсутствие возможности механического разделения ильменита и магнетита.

Сегрегационные обособления ильменита представлены: аллотриоморфными зернистыми агрегатами, выполняющими полости трещин мощностью более 40 мкм с четко выраженными границами (рис. 3, а); аллотриоморфными обособлениями с неровными контурами, расположенными внутри или по периферии зерен магнетита, размер которых варьирует в широких пределах от 5 до 50 мкм; идиоморфными зернами от тонко- до толстотаблитчатого

габитуса, локализующимися вдоль трещин и по контурам зерен титаномагнетита с размерами кристаллов от 4 до 20 мкм (рис. 3, б).

Морфология и размеры выделений ильменита облочковых структур определяются исходной его формой – пластинчатой, ламелей (идиоморфной) и сегрегационного обособления (аллотриоморфной), как продукта распада твердого раствора.

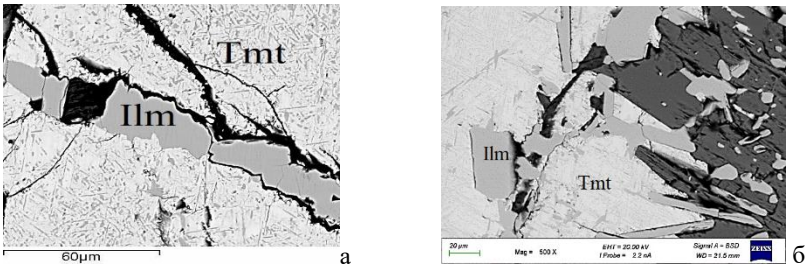


Рис. 3. Морфологические типы ильменита структур сегрегационного обособления: а – аллотриоморфные образования, выполняющие полости трещин, б – идиоморфные обособления. Изображение в обратно-рассеянных электронах

Содержание диоксида титана в свободном ильмените варьирует от 50,15 до 52,16%, при этом количество оксида железа (II) составляет 43,57-44,05%, оксида магния – 0,24-0,37%, а оксида марганца – 0,84-1,10%. Для ильменита паркетной структуры характерно самое низкое содержание TiO_2 – 47,68-50,14% при FeO и Fe_2O_3, равных 45,10-47,47% и 1,47-3,85% соответственно. С увеличением степени перекристаллизации количество TiO_2 увеличивается до 48,96-50,07% для микроагрегатов тонкорешетчатой структуры и до 51,02-52,50% для ильменита сегрегационного обособления, а содержание FeO – 42,05-43,78% и 43,44-45,91% соответственно. Примесные компоненты при этом составляют: Fe_2O_3 – 5,24-5,68% и 0,2-2,97%; MnO – 0,45-1,24% и 0,70-1,14% соответственно для микроагрегатов тонкорешетчатой структуры и сегрегационного обособления.

Значения микротвердости ильменита центральной части зерен титаномагнетитовой руды составляют 794-860 кгс/мм^3, а ильменит-титаномагнетитовой – 572-683 кгс/мм^3. На границе зерен микротвердость равна 764-824 кгс/мм^3 и 433-593 кгс/мм^3 соответственно.

Титаномагнетит является характерным микроагрегатом вкрапленных руд. Обычно он образует ксеноморфные зерна, подчиняясь контурам силикатных минералов. Границы зерен микроагрегатов с силикатами – неровные, с частичным проникновением друг в друга, а в местах соприкосновения с идиоморфными зернами плагиоклаза фиксируется прямолинейный контур. Размер зерен титаномагнетита колеблется от 0,01 до 0,4 мм с преобладанием 0,1-0,2 мм.

Микроагрегаты титаномагнетита характеризуются структурной и фазовой неоднородностью, обусловленной наличием продуктов распада твердого раствора ряда ильменит-магнетит и осложненной процессами мартитизации и замещением вторичными силикатами. В результате собирательной перекристаллизации

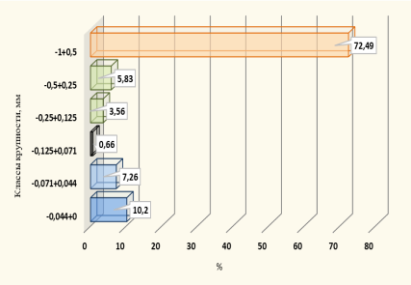
структуры распада твердого раствора претерпевают изменения от паркетной до сегрегационного обособления. Такие преобразования сопровождаются очищением магнетитовой матрицы титаномагнетита от элементов-примесей, в первую очередь, от титана.

Для титаномагнетита паркетной структуры характерно самое низкое содержание Fe_2O_3 – 64,63-66,89% при TiO_2 и V_2O_3, равных 0,77-1,93% и 0,89-1,09% соответственно. С увеличением степени перекристаллизации количество Fe_2O_3 увеличивается до 65,89-67,68% для микроагрегатов тонкорешетчатой структуры и 66,43-67,31% для магнетита сегрегационного обособления, примесные компоненты при этом составляют TiO_2 – 0,43-1,05% и 0,53-0,88%; V_2O_3 – 0,72-1,22% и 0,83-1,11% соответственно.

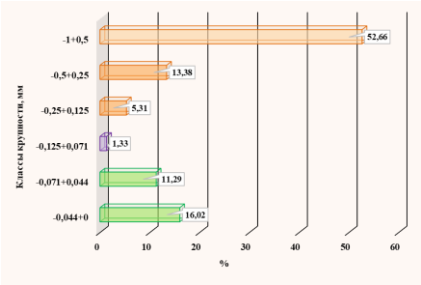
Морфология и внутреннее строение титаномагнетита претерпели сильное изменение в процессе амфиболизиции габбро-норитов. Интенсивность замещения магнетитовой основы сине-зеленой роговой обманкой различная, но в большей степени высокая. Минеральные агрегаты титаномагнетита подвержены гипергенному процессу мартитизации – образованию псевдоморфоз гематита. В рудах фиксируются разные стадии мартитизации от начальной до конечной, при этом изменения ильменита менее заметны.

Микротвердость титаномагнетита центральной части зерен титаномагнетитовых руд составляет 724-813 кгс/мм^3, а для ильменит-титаномагнетитовой – 683-707 кгс/мм^3. На границе зерен микротвердость равна 614-707 кгс/мм^3 и 489-683 кгс/мм^3 соответственно.

Характер распределения дробленого материала руд подчеркивает более высокую интенсивность изменения ильменит-титаномагнетитовой руды относительно титаномагнетитовой, что четко прослеживается в различии количества выделенного крупного и шламующего материала при их селективной дезинтеграции. Количественное соотношение дробленого материала титаномагнетитовой руды классов крупности -1+0,5 мм и -0,5+0 мм составляет 2,6, а ильменит-титаномагнетитовой – 1,1, при этом выход тонкого класса крупности – 10,20% и 16,02% соответственно (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Распределение зерен и микроагрегатов дробленой руды по классам крупности: а – титаномагнетитовой; б – ильменит-титаномагнетитовой

Характер направленности выделения рудных и нерудных микроагрегатов в процессе дробления продемонстрирован на диаграмме, где отражено, что в классе крупности -1+0,5 мм уже фиксируется наличие как нерудных микроагрегатов, так и рудных (рис. 5). В классах крупности -0,25+0,1 мм, -0,1+0,071 мм и - 0,071+0,044 мм суммарное количество силикатно-рудных сростков составляет менее 15%, поэтому процесс раскрытия рудных и нерудных микроагрегатов в этих классах крупности можно отнести к весьма эффективному (η = 75%).

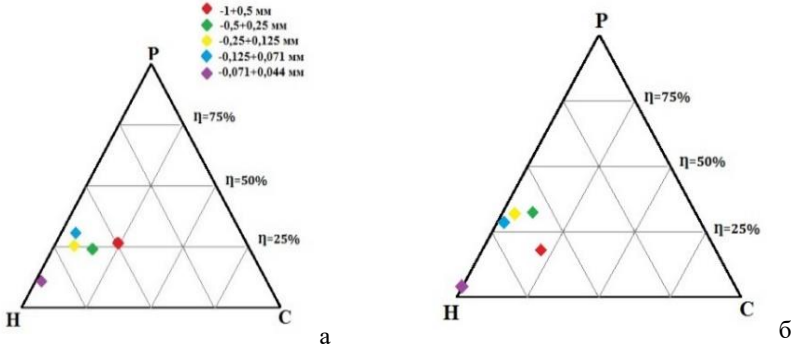


Рис. 5. Схема раскрытия рудных и нерудных минералов титаномагнетитовых (а) и ильменит-титаномагнетитовых (б) руд с учетом эффективности обогащения (η): С – минеральные сростки, Н – нерудные микроагрегаты, Р – рудные микроагрегаты

В основных операциях обогащения, учитывая сложное строение микроагрегатов титаномагнетита, физическими методами возможно выделить титаномагнетитовый, сложенный непосредственно микроагрегатами титаномагнетита, и ильменитовый продукты. Поэтому дальнейшая переработка титаномагнетитового продукта требует целенаправленного изменения фазовой и структурной неоднородности микроагрегатов с учетом уже запущенного природного процесса окисления магнетита (мартитизации).

Второе защищаемое положение. *Выявлена зависимость значений удельной магнитной восприимчивости титаномагнетита и ильменита от их кристаллохимических (строения магнитной структуры магнетита и ильменита, присутствия изоморфных элементов-примесей и т. д.) и морфоструктурных (морфологии минерального индивида, фазового состава и гетерогенности микроагрегатов) характеристик, позволяющих прогнозировать уровень селективного разделения минеральных агрегатов в процессе магнитной сепарации.*

Магнитное состояние рудного минерального агрегата определяется его намагниченностью, а магнитные свойства минерала – удельной магнитной восприимчивостью, относящейся к первичным магнитным характеристикам и

являющейся чувствительной к вариациям химического состава минерала и к изменениям положения различных ионов металлов в узлах кристаллической структуры.

Магнетит, слагающий микроагрегаты титаномагнетита, характеризуется вариациями примесного состава – Mn, Ni, Co, Ti, V, Cr. Изоморфные примеси занимают в кристаллической структуре позиции в шестерной координации, замещая в зависимости от заряда или двухвалентное, или трехвалентное железо, что непосредственно влияет на значение спинового магнитного момента (μ_S).

Магнитная структура в случае обращенной шпинели (магнетита) характеризуется расположением ионов Fe^{3+} в узлах A, а в узлах B – Fe^{3+} и Fe^{2+}. Спины этих ионов, имеющих четверную и шестерную координации, ориентируются антипараллельно друг к другу вследствие отрицательного обменного взаимодействия:

$$\left(\overrightarrow{Fe^{3+}}\right) O \left(\overleftarrow{Fe^{3+}} \cdot \overleftarrow{Fe^{2+}}\right) O_3 \qquad (1)$$

Значение магнитного момента для смешанных ферритов-шпинелей в пропорции *n : m : y : x : (1-n-m-y-x)* подчиняется следующей формуле (2):

$$\frac{\begin{gathered} n \cdot (Fe^{2+})O \cdot (V^{3+} \cdot V^{3+})O_3 \\ m \cdot (Fe^{3+})O \cdot (Fe^{3+} \cdot Mn^{2+})O_3 \\ y \cdot (Fe^{2+})O \cdot (Cr^{3+} \cdot Cr^{3+})O_3 \\ x \cdot (Fe^{2+})O \cdot (Fe^{2+} \cdot Ti^{4+})O_3 \\ (1-n-m-y-x) \cdot (Fe^{3+})O \cdot (Fe^{3+} \cdot Fe^{2+})O_3 \end{gathered}}{\left(Fe^{2+}_{n+y+x} \cdot Fe^{3+}_{1-n-y-x}\right)O \cdot \left(Fe^{2+}_{1-n-m-y} \cdot Fe^{3+}_{1-n-y-x} \cdot V^{3+}_{2n} \cdot Mn^{2+}_{m} \cdot Cr^{3+}_{2y} \cdot Ti^{4+}_{x}\right)O_3} \qquad (2)$$

Анализ примесного ряда магнетита микроагрегатов структур распада твердых растворов показал, что магнетит микроагрегатов со структурой сегрегационного обособления характеризуется наличием примеси TiO_2 (0,67%) и V_2O_3 (0,97%), $\mu_S = 3{,}93\ \mu_B$; для магнетита микроагрегатов паркетной структуры характерны примеси MnO (0,10%), V_2O_3 (0,99%), Cr_2O_3 (0,50%) и TiO_2 (1,17%), $\mu_S = 4{,}04\ \mu_B$; в магнетите агрегатов тонкорешетчатой структуры фиксируются примеси TiO_2 (1,06%) и V_2O_3 (0,97%), $\mu_S = 3{,}88\ \mu_B$.

Чистый ильменит является антиферромагнетиком благодаря наличию ионов Fe^{2+}. Ионы титана Ti^{4+} диамагнитны, поскольку обладают электронной конфигурацией $3d^0$. В структуре идеального ильменита слабые магнитные взаимодействия между различными слоями осуществляются через анион и немагнитный катион Fe^{2+} – O – Ti^{4+} – O – Fe^{2+}, поэтому ильменит характеризуется слабыми ферромагнитными свойствами (Тикадзуми, 1983; Кудрявцева, 1982; Кудрявцева, 1988).

Особый интерес представляют твердые растворы $MgTiO_3$ - $FeTiO_3$ - Fe_2O_3 (Белоконева, 1978; Гаранин, 1979). Вероятное катионное распределение для ильменита приведено в таблице 1, где четко прослеживается зависимость значений

спинового магнитного момента от содержания гематитового минала в ильмените (табл. 1).

Табл. 1. Модель катионного распределения ильменита и величины магнитных моментов

№	Состав, катионное распределение	Магнитный момент, μ_S
1	0,01*$MgTiO_3$·0,98*$FeTiO_3$·0,01*Fe_2O_3 $(Mg_{0,005}Fe^{2+}_{0,49}Fe^{3+}_{0,02}Ti_{0,485})\ (Mg_{0,005}Fe^{2+}_{0,49}Ti_{0,505})O_3$	0,10
2	0,01*$MgTiO_3$·0,96*$FeTiO_3$·0,03*Fe_2O_3 $(Mg_{0,005}Fe^{2+}_{0,48}Fe^{3+}_{0,06}Ti_{0,455})\ (Mg_{0,005}Fe^{2+}_{0,48}Ti_{0,515})O_3$	0,30

Влияние морфоструктурных особенностей рудных минералов – их гранулярный состав, определяющий характер доменной структуры, и фазовая неоднородность (структуры распада твердого раствора, замещения и окисления), четко прослеживается по изменению вторичных магнитных характеристик. Количество и размер включений ильменита в магнетите и интенсивность процесса мартитизации оказывают непосредственное влияние на повышение значения коэффициента магнитной вязкости, в связи с чем ферримагнитные агрегаты труднее намагничиваются во внешнем магнитном поле.

Учитывая кристаллохимические и морфоструктурные особенности ильменита и магнетита, можно прогнозировать, что в процессе сепарации под воздействием внешнего магнитного поля при низких значениях напряженности будут выделяться микроагрегаты титаномагнетита паркетной структуры с относительно низкой и средней интенсивностью мартитизации. С ростом значения напряженности магнитного поля в микроагрегатах титаномагнетита будет увеличиваться ильменитовая составляющая (тонкорешетчатая структура и структура собирательной перекристаллизации) и относительная интенсивность их мартитизации.

Поведение рудных минералов (микроагрегатов) во внешнем магнитном поле изучалось на продуктах магнитной (электромагнитной) сепарации классифицированных титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд. Магнитный анализ осуществлялся на сепараторе при напряженности магнитного поля, равной 10, 85, 140, 250 и 400 мТл.

Значения удельной магнитной восприимчивости (χ) продуктов сепарации руд в рамках гранулометрического спектра определяются степенью раскрытия рудных и нерудных минеральных агрегатов разных классов крупности, неоднородностью строения микроагрегатов – эволюцией продуктов распада твердых растворов ряда ильменит-магнетит и интенсивностью процесса мартитизации магнетита (табл. 2).

Значения удельной магнитной восприимчивости продуктов сепарации титаномагнетитовых руд, выделенных при H = 10 мТл, варьируют в пределах от $13000 \cdot 10^{-8}$ до $16000 \cdot 10^{-8}$ м^3/кг. Максимальные χ обусловлены высоким содержанием магнетита ($Fe_{маг}$ = 20,99% и 24,30%), средней степенью мартитизации и однородным строением микроагрегатов титаномагнетита (рис. 6, а). Продукты

сепарации, полученные при H = 140 мТл, характеризуются χ, равной $505 \cdot 10^{-8}$ – $1010 \cdot 10^{-8}$ м^3/кг.

Табл. 2. Значение удельной магнитной восприимчивости продуктов магнитной сепарации, χ 10^{-8} м^3/кг

Классы крупности, мм	Магнитная фракция (10 мТл)	Частицы, полученные при разных значениях напряженности магнитного поля, мТл				Немагнитная фракция
		85	140	250	400	
титаномагнетитовая руда						
-1,0+0,5	15300	1750	505	222	74	40
-0,5+0,25	16000	2250	520	249	78	39
-0,25+0,125	14800	2960	653	256	102	42
-0,125+0,07	15600	3420	1010	614	138	48
-0,07+0,04	12900	2880	430	162	107	54
ильменит-титаномагнетитовая руда						
-1,0+0,5	13000	2220	472	276	85	47
-0,5+0,25	13800	1830	483	227	75	41
-0,25+0,125	17300	2820	570	245	82	45
-0,125+0,07	15500	4100	678	488	143	49
-0,07+0,04	18000	7040	872	188	238	52

Высокое значение удельной магнитной восприимчивости связано с присутствием в подчиненном количестве магнетита ($Fe_{маг}$ = 2,10%) и повышенным содержанием ильменита (TiO_2 = 22,36%) (рис. 6, б).

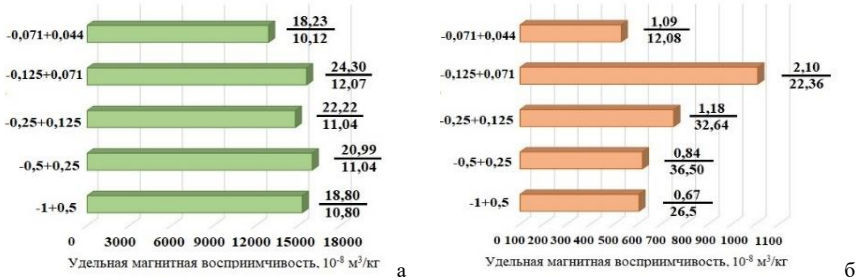


Рис. 6. Эволюция магнитных свойств микроагрегатов титаномагнетитовых руд в рамках гранулометрического спектра (**содержание магнитного железа *(числитель)* и содержание диоксида титана *(знаменатель)*** при напряженности магнитного поля 10 мТл (а) и 140 мТл (б)

Результаты химического анализа продуктов сепарации титаномагнетитовых руд показали, что высокие содержания $Fe_{магн}$ характерны для фракций разных классов крупности, полученных при напряженности магнитного

поля 10 мТл. С понижением класса крупности выделенных фракций $Fe_{магн}$ увеличивается с 18,80 до 24,30%, максимум достигается в классе крупности -0,125+0,071 мм. А с увеличением напряженности магнитного поля содержание $Fe_{магн}$ в продуктах сепарации уменьшается и составляет менее 1%, что подтверждает возможность выделения материала, содержащего микроагрегаты титаномагнетита. Максимальное количество TiO_2, равное 36,50%, фиксируется в классе крупности -0,5+0,25 мм при значении напряженности магнитного поля 140 мТл.

Распределение компонентов в продуктах сепарации хорошо согласуется с их минеральным составом. Магнитная фракция, содержащая зерна титаномагнетита разной степени мартитизации (рис. 7, а), в среднем на 64% представлена рудными микроагрегатами, при этом в тонких классах фиксируется 86%. Минимальное количество свободных нерудных зерен достигает 10% в классе крупности -0,5+0,25 мм.

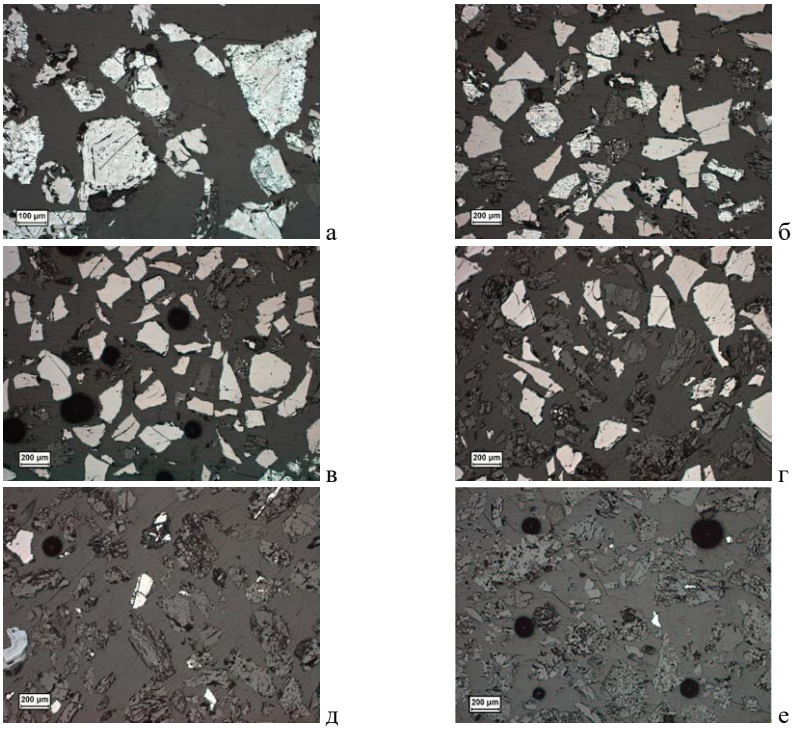


Рис. 7. Распределение рудных минералов (микроагрегатов) в магнитных (электромагнитных) фракциях класса крупности -0,5+0,25 мм, полученных при напряжённости магнитного поля мТл: а – 10; б – 85; в – 140; г – 250; д – 400; е – более 400. Отраженный свет, николи параллельны

Продукт, выделенный при напряженности магнитного поля, равной 85 мТл (рис. 7, б), характеризуется смешанным ильменит-титаномагнетитовым составом.

Рудная составляющая сконцентрирована большей частью в классах крупности - 0,25+0,125 мм и -0,125+0,071 мм и составляет 61% и 59% соответственно. Богатые титансодержащие продукты сепарации, сложенные в основном ильменитом с подчиненным значением мартитизированных зерен титаномагнетита (рис. 7, в), получены при Н = 140 мТл. Высокое содержание свободных рудных зерен наблюдается в классе крупности -0,125+0,071 мм и составляет 64%, при этом количество сростков рудных и нерудных минералов достигает 17%.

Раскрытие рудных и нерудных минералов (агрегатов) в продуктах сепарации, полученных при Н = 250 мТл, характеризуется неравномерным распределением в рамках гранулометрического спектра. Содержание нерудных агрегатов варьирует в широких пределах от 44% (-0,5+0,25 мм) до 86% (- 0,071+0,044 мм) при количестве рудных – от 36% до 13% соответственно. Отметим, что для класса крупности -0,125+0,071 мм фиксируется повышенное количество рудных микроагрегатов (76%), представленных зернами мартитизированного титаномагнетита и ильменита (рис. 7, г).

Электромагнитные фракции, выделенные при напряженности магнитного поля 400 мТл, сложены в основном нерудными агрегатами с подчиненным количеством зерен ильменита, пирита и гидроксидов железа (рис. 7, д). С понижением тонины помола нерудная составляющая увеличивается с 80% (класс крупности -0,5+0,25 мм) до 95% (-0,071+0,044 мм). Немагнитные продукты на 98% представлены нерудными минералами с единичными зернами ильменита и пирита (рис. 7, е), что объясняется погрешностями фракционирования дробленой руды, состоящей из обломков минеральных агрегатов разной магнитной восприимчивости. Такое соотношение четко прослеживается во всех классах крупности.

Аналогичное распределение рудных и нерудных микроагрегатов (минералов) в продуктах сепарации в рамках гранулометрического спектра также характерно и для ильменит-титаномагнетитовой руды.

Третье защищаемое положение. *Установлено, что окислительный обжиг минеральных индивидов и агрегатов ильменита и титаномагнетита приводит к уменьшению степени неоднородности минерального (фазового) и химического составов, что позволяет прогнозировать повышение раскрываемости вновь образованных железо- и титансодержащих минералов в технологических продуктах и в целом повышение извлечения титана в продукты различного типа. Определены параметры процессов техногенеза для создания перспективной технологической схемы переработки руд.*

Окислительный обжиг вкрапленной титаномагнетитовой руды осуществлялся в лабораторной печи ПЛ/12,5 при температуре 1100°С (Цветков, Мясников, 1965; Zhang, 2011; Parirenyatwa, 2015). Предварительно подготовленные пробы разных классов крупности (-1+0,5 мм; -0,5+0,25 мм; - 0,25+0,125 мм; -0,125+0,071 мм; 1,0х0,1х0,5 мм) помещались в графитовые тигли и загружались в рабочую зону печи. Материал каждого класса крупности

нагревался в течение 24, 48 и 72 часов. По истечении заданного времени для исключения перепадов температур образцы охлаждались до комнатной температуры в камере печи.

По данным минералого-аналитических методов исследования, в период нагрева образцов протекали процессы гетерогенного окисления минералов, сопровождающиеся их твердофазным превращением с перераспределением химических элементов между отдельными минеральными фазами и образованием более устойчивых соединений – гематита (Fe_2O_3), псевдобрукита (Fe_2TiO_5) и рутила (TiO_2). Максимальные твердофазные превращения достигались при наиболее длительном нагреве.

Неоднородность строения титаноманетитовых микроагрегатов, выраженная в наличии участков мартитизированного титаномагнетита и зерен ильменита, обуславливает особенности протекания процессов гетерогенного окисления в микроагрегатах разных минеральных ассоциаций (рис. 8).

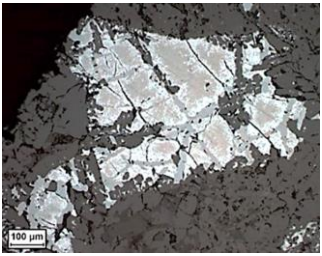
В результате твердофазных превращений мартитизированный титаномагнетит (с ламелями ильменита) полностью претерпел изменения с формированием микроагрегатов псевдобрукит-гематитового состава:

$$2Fe_3O_4 + 2FeTiO_3 + 2Fe_2O_3 + O_2 = 2Fe_2TiO_5 + 4Fe_2O_3. \quad (3)$$

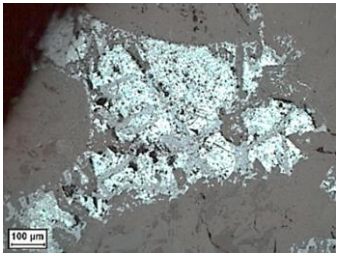
Ильменит на контакте с гематитом (4) и в индивидуализированных зернах (5) преобразовался в сложные мелкозернистые агрегаты рутил-псевдобрукитового состава:

$$8FeTiO_3 + 2Fe_2O_3 + 2O_2 = 6Fe_2TiO_5 + 2TiO_2\,; \quad (4)$$

$$2FeTiO_3 + \frac{1}{2}O_2 = Fe_2TiO_5 + TiO_2\,. \quad (5)$$



а



б

Рис. 8. Мартитизированный титаномагнетитовый агрегат до (а) и после (б) эксперимента. Отраженный свет, николи параллельны

Неоднородность микроагрегатов псевдобрукит-гематитового и рутил-псевдобрукитового составов прослеживается на разных уровнях организации минерального вещества в рамках гранулометрического спектра продуктов обжига, полученных во временных интервалах, равных 24, 48 и 72 ч. На структурном уровне твердофазные превращения заключаются в образовании продуктов распада твердых растворов ряда псевдобрукит-гематит и рутил-псевдобрукит и, как следствие, центров нуклеации псевдобрукита и рутила. Эволюция продуктов распада твердых растворов проявляется в изменении строения микроагрегатов от

тонкой до грубой микроструктуры с частичным сохранением первичного строения протомикроагрегатов. Анализ показал, что с уменьшением крупности материала интенсивность процесса твердофазного превращения увеличивается и является наиболее оптимальной для классов - 0,25+0,125 мм и -0,125+0,071 мм. На уровне минерального индивида в результате диффузионных процессов фиксируется изменение химического состава вновь образованных минеральных фаз.

Для псевдобрукит-гематитовых микроагрегатов изменение проявляется в постепенной гомогенезации основного минерала – гематита, выраженной в перераспределении химических элементов в пространстве с последующим очищением гематита от титана и укрупнением выделений псевдобрукита. При окислительном обжиге в течение 24 часов фиксируется густая сеть мелких выделений центров нуклеации псевдобрукита в гематите (Патнис, 1983; Хисина, 1987), содержание TiO_2 в гематите составляет 3,59-5,77%. С увеличением временного интервала термической обработки до 48 часов происходят диффузионные процессы, количество диоксида титана достигает 12-13%.

В течение временного интервала, равного 72 часам, перераспределение химических элементов в микроагрегатах сопровождается образованием более грубой микроструктуры – крупных выделений псевдобрукита. Это свидетельствует о том, что длительный обжиг при температуре 1100ºС удерживает ощутимую диффузию атомов и способствует укрупнению частиц за счет перераспределения компонентов от меньших частиц к большим. Гематит характеризуется содержанием оксида железа (III) 87,80-95,20% и диоксида титана 3,19-5,82%, вероятно являющимися изоморфной примесью.

Псевдобрукит, формирующий микровростки в гематите, характеризуется повышенным количеством Fe_2O_3.Так, при обжиге в течение 24 часов содержание Fe_2O_3 в псевдобруките составляет 62,87% (ламели) и 71,48% (микровростки), а TiO_2 – 30,76% и 21,05% соответственно. Самое высокое количество оксида железа (III) – 76,04-78,12% присуще всем минералам псевдобрукит-гематитовых микроагрегатов, подверженным термической обработке при 48 часах, что подчеркивает отсутствие конечных членов непрерывных твердых растворов Fe_2O_3 – Fe_2TiO_5.

Fe_2TiO_5, встречающийся в виде мелкозернистого агрегата с рутилом, обладает повышенным содержанием TiO_2. В микроагрегатах, полученных при обжиге в течение 24 часов, количество диоксида титана составляет около 40%, а оксида железа (III) – от 54,20% до 56,65%. В продуктах обжига при t = 48 часов содержание TiO_2 увеличивается до 50%, что указывает на присутствие псевдобрукита не как отдельной минеральной фазы, а как твердого раствора рутил-псевдобрукитового состава. Следовательно, псевдобрукит в пробах встречается как крайний член или как фаза промежуточного состава продуктов распада твердых растворов ряда псевдобрукит-рутил и псевдобрукит-гематит.

Анализ компонентного состава рутила демонстрирует присутствие Fe_2O_3. Наблюдается положительная динамика уменьшения содержания оксида железа (III) с течением времени обжига (рис. 9).

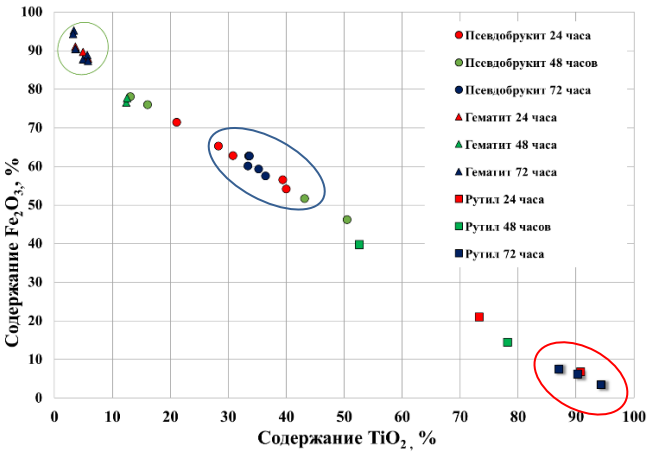


Рис. 9. Химический состав гематита, псевдобрукита, рутила и промежуточных фаз, по данным рентгеноспектрального микроанализа.
Теоретический состав минералов: гематита ; псевдобрукита ; рутила

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерес к средне- и высокотитанистым рудам, ассоциирующим с габброидами, сохраняется на протяжении долгого времени. Руды месторождения, являясь ценнейшим источником железа, титана и ванадия и имея большие запасы на территории РФ, в переработку не вовлекаются. Основной причиной получения некондиционного железного концентрата является отсутствие возможности физического разделения рудных микроагрегатов титаномагнетита.

Вкрапленные титаномагнетитовые и ильменит-титаномагнетитовые руды Медведевского месторождения локализуются в одноименном габбровом массиве Кусинско-Копанского комплекса габбровых интрузий Южного Урала. Титаномагнетитовая руда ассоциирует с меланократовыми амфиболизированными габбро-норитами, а ильменит-титаномагнетитовая – с их мезо- и лейкократовыми разновидностями. Руды подвержены вторичным изменениям – амфиболизации, хлоритизации, соссюритизации, альбитизации, что непосредственно оказывает влияние на преобразование их текстурно-структурного рисунка, минерального состава и технологических свойств минералов, в частности, микротвердости.

Для титаномагнетитовой руды характерна средняя относительная интенсивность изменения, для ильменит-титаномагнетитовой – высокая. Такая разница проявляется в образовании шламующего материала при дроблении руд. Так, выход тонкого класса крупности дробленой титаномагнитовой руды составляет 10,2%, а выход тонкого класса крупности дробленой ильменит-титаномагнетитовой руды – 16,02%.

В рудах четко прослеживается тенденция снижения значений

микротвердости главных минералов (роговой обманки, плагиоклаза, ильменита и титаномагнетита) ильменит-титаномагнетитовых руд. Микротвердость плагиоклаза титаномагнетитовой руды равна 774 – 976 кгс/мм3, а ильменит-титаномагнетитовой – 707 – 860 кгс/мм3. Значения микротвердости ильменита титаномагнетитовой руды составляют 764 – 860 кгс/мм3, а ильменит-титаномагнетитовой – 433 – 683 кгс/мм3.

Главные рудные минералы – ильменит и титаномагнетит характеризуются фазовой и структурной неоднородностью, определенной эволюцией продуктов распада твердого раствора ряда ильменит-магнетит и ильменит-гематит, осложненной процессами мартитизации и замещением роговой обманкой и хлоритом. Эволюционный характер развития строения рудных микроагрегатов прослеживается в изменении морфологии минералов и их химического состава.

В ильмените содержание диоксида титана варьирует от 47,68 до 52,50%, при этом количество оксида железа (II) составляет 42,05-47,47%, оксида магния – до 0,37%, а оксида марганца – 0,45-1,24%. Для титаномагнетита характерно содержание Fe_2O_3 – 64,63-67,68% при TiO_2 и V_2O_3, равных 0,43-1,93% и 0,87-1,22% соответственно. Постоянное присутствие химических и механических примесей в разных количествах непосредственно оказывает влияние на магнитные свойства рудных минералов (значение спинового магнитного момента) и их поведение во внешнем магнитном поле.

Рудные микроагрегаты дробленых вкрапленных титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд во внешнем магнитном поле ведут себя практически одинаково. При H = 10 мТл выделяется магнитная фракция, сложенная микроагрегатами титаномагнетита различной степени мартитизации с единичными зернами ильменита. С увеличением напряженности магнитного поля до 140 мТл фракция представлена ильменитом, с понижением класса крупности фиксируются мартитизированные микроагрегаты титаномагнетита. Такое распределение рудных минералов подтверждается содержанием $Fe_{маг}$ и TiO_2. Продукты, полученные при 10 мТл, характеризуются содержанием $Fe_{маг}$ от 18,80 до 24,30% (титаномагнетитовые руды) и от 16,76 до 20,20% (ильменит-титаномагнетитовые руды), а материал, выделенный при 140 мТл, количеством TiO_2 – от 12,08 до 36,5% и от 25,2 до 41,37% соответственно.

Окислительный обжиг микроагрегатов титаномагнетита позволяет уменьшить степень неоднородности их минерального и химического состава благодаря перераспределению элементов в процессе диффузии и образованию более устойчивых минеральных фаз – гематита, псевдобрукита и рутила. Установлено, что с уменьшением крупности материала интенсивность процесса твердофазного превращения увеличивается, поэтому оптимальными классами являются -0,25+0,125 мм и -0,125+0,071 мм.

Необходимым временным интервалом обжига является 72 часа, в течение которых происходит практически полное твердофазное превращение первичных минералов в более устойчивые фазы, являющиеся большей частью твердыми растворами ряда псевдобрукит-гематит и рутил-псевдобрукит.

Благодарности. Глубокая благодарность, признательность и уважение своему научному руководителю Елене Александровне Горбатовой за помощь и обучение, терпение, благожелательность и ценнейшие советы, за интереснейшую и разнообразную работу. За внимание, поддержку, критический анализ рукописи и важные замечания автор сердечно признателен д.г.-м.н. Елене Германовне Ожогиной. За содержательные консультации, обсуждение результатов исследования и ценные советы диссертант искренне благодарен д.г.-м.н., профессору Борису Ивановичу Пирогову. Особую признательность автор выражает д.г.-м.н. Попову Владимиру Анатольевичу (ФГБУН ИМ УрО РАН, г. Миасс), д.г.-м.н. Холоднову Владимиру Васильевичу (ФГБУН ИГиГ УрО РАН, г. Екатеринбург) и д.т.н. Газалеевой Галине Ивановне (ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург) за содержательные консультации. Выражает особую благодарность д.т.н., профессору Бигееву Вахиту Абдрашитовичу за ценные советы и консультации по постановке эксперимента по окислительному обжигу руд. За помощь в проведении экспериментальных работ автор благодарит коллективы обогатительной лаборатории и лаборатории металлургии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Автор считает своим долгом выразить благодарность сотрудникам минералогического отдела ФГБУ «ВИМС» и лично Кривощекову Николаю Николаевичу, Иоспе Анастасии Владимировне, Киселеву Александру Александровичу, а также сотруднику ФГБУН ИГЕМ РАН д.г.-м.н. Ракову Леониду Тихоновичу. Автор благодарит сотрудников кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» за поддержку и помощь, особенно к.т.н. Гришина Игоря Анатольевича, к.т.н. Романько Елену Александровну, к.т.н. Шавакулеву Ольгу Петровну. За плодотворное сотрудничество диссертант признателен к.г.-м.н. Быстрову Ивану Георгиевичу, к.т.н. Галямову Виктору Шамилиевичу, Чернову Данилу Валентиновичу.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ (статей и тезисов докладов), в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и/или индексируемых в системе Web of Science.

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. Горбатова, Е. А. Анализ раскрываемости минералов ильменитовых руд Медведевского месторождения в процессе их дезинтеграции / Е. А. Горбатова, О. П. Шавакулева, **М. С. Колкова**, Д. В. Чернов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S 2-4. – С. 43-51.

2. Горбатова, Е. А. Определение возможности разделения титаномагнетита и ильменита при селективной сепарации титаномагнетитовых руд / Е. А. Горбатова, Б. И. Пирогов, **М. С. Колкова**, О. С. Колесатова // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Вып. 1. – С. 90-97

3. Горбатова, Е. А. Однородность микроагрегатов псевдобрукит-гематитового состава, проявляющаяся при окислительном обжиге

титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения / Е. А. Горбатова, Б. И. Пирогов, **М. С. Колкова**, В. И. Сысоев, А. В. Иоспа // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 6. – С. 47-52.

Методические указания

1. Колкова, М. С. Методические указания «Определение раскрытия рудных минералов в продуктах магнитной сепарации железо-титановых руд» для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Магнитные методы обогащения» студентами специализации «Обогащение полезных ископаемых» / М. С. Колкова. – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2020. – 9 с.

Остальные работы, включая сборники и материалы конференций

1. Колкова, М. С. Методические основы минералого-технологической оценки отходов обогатительного передела колчеданных руд Южного Урала / М. С. Колкова, Е. А. Горбатова // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ : сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции. - Магнитогорск, 2013 – С. 150-155.

2. Колкова, М. С. Исследование хвостов обогащения железорудных месторождений в свете перспектив их переработки / М. С. Колкова, А. М. Цыгалов, Е. А. Горбатова, Д. В. Чернов // Рациональное природопользование : сборник научных трудов / под ред. С. Е. Гавришева. - Магнитогорск, 2014. – С. 88-96.

3. Колкова, М. С. Минералогические особенности титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения / М. С. Колкова, Е. А. Горбатова // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ : сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции. - Магнитогорск, 2015 – С. 27-37.

4. Колкова, М. С. Технологические свойства титаномагнетитовой руды Медведевского месторождения / М. С. Колкова, О. П. Шавакулева, Е. А. Горбатова, Т. А. Васильева // Минералы : строение, свойства, методы исследования : Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Л. Н. Овчинникова. - Екатеринбург, 2013. – № 5. – С. 211-213.

5. Колкова, М. С. Перспективы переработки титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения / М. С. Колкова, Е. А. Горбатова // Актуальные проблемы горного дела. - Магнитогорск, 2016. – № 1. – С. 48-55.

6. Колкова, М. С. Особенности оценки магнитных свойств титаномагнетитов вкрапленных руд Медведевского месторождения / Е. А. Горбатова, Б. И. Пирогов, М. С. Колкова, Л. Т. Раков // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке : материалы Международного совещания (Плаксинские чтения – 2019). - Иркутск, 2019. – С. 64-67.

7. Колкова, М. С. Фазовая и структурная неоднородность титаномагнетита, проявляющаяся при термической обработке железо-титановых руд Медведевского месторождения / М. С. Колкова, А. А. Киселев // Геология,

поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых : тезисы докладов восьмой научно-практической школы-конференции молодых ученых и специалистов с международным участием.- Москва, 2019. – С. 55-57.

8. Колкова, М. С. Минералого-технологическая оценка титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения / М. С. Колкова // Минералогия техногенеза-2020. Миасс: ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2020. С. 133-138.

9. Колкова, М. С. Твердофазное превращения минералов в процессе окислительного обжига титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения / М. С. Колкова, Е. А. Горбатова, Б. И. Пирогов, А. В. Иоспа Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2020): Материалы российской конференции с международным участием. Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2020 – С. 279-280.