

УДК 553.494'311:622.7 (470.21)

Изучение особенностей вещественного состава ильменит-титаномагнетитовых руд месторождения Юго-Восточная Гремяха (ЮВГ) и выбор рациональной схемы обогащения

А.И. Ракаев, С.А. Алексеева, Т.А. Морозова, Е.В. Черноусенко

Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. На основе изучения вещественного состава, текстурно-структурных особенностей, физических свойств ильменит-титаномагнетитовых руд ЮВГ, особенностей измельчения руды и раскрытия основных минералов выявлены природные разновидности руд, отличающиеся минеральным и химическим составом, типом сульфидной вкрапленности. Предложена схема обогащения руды с получением ильменитового и титаномагнетитового концентратов.

Abstract. Natural varieties of ores different in their mineral and chemical composition and in the type of sulphide dissemination have been identified while studying the material composition, texture-structure peculiarities, physical properties of ilmenite-titanium magnetite ores of the Southeast part of Gremyakh, peculiarities of ore grinding and release of basic minerals. Ore concentration flow sheet to produce ilmenite and titanium-magnetite concentrates has been proposed.

Ключевые слова: руда, ильменит, титаномагнетит, структура, вкрапленность, измельчение, магнитная сепарация, гравитация, электрическая сепарация

Key words: ore, ilmenite, titaniferous magnetite, structure, dissemination, grinding, magnetic separation, gravitation, electric separation

1. Введение

Титан является одним из наиболее распространенных химических элементов как по содержанию в земной коре, так и по наличию минералов этого металла в разнообразных горных породах. Благодаря хорошему сочетанию механических, технологических свойств и высокой коррозионной стойкости титан находит широкое применение в самых различных отраслях промышленности: авиакосмической, химической, в нефтяном машиностроении, черной и цветной металлургии и др. Применение титана является показателем уровня экономического развития, степени использования высоких технологий и обеспечения на высоком уровне обороноспособности страны (Короленко, 2001).

В настоящее время все эксплуатируемые ранее месторождения остались в ближнем зарубежье – на Украине, поэтому создание и развитие горнодобывающей титановой промышленности позволит обеспечить экономическую самостоятельность страны. В России запасы титана сосредоточены в 20 месторождениях, объединенных в двух основных генетических типах: россыпных (53.1 %) и магматогенных (коренных – 46.9 %). Однако многие месторождения недостаточно изучены как в геологическом, так и технологическом аспектах. Они уступают зарубежным как по содержанию полезного компонента, так и по сложности технологического передела. Преобладающая часть прогнозных ресурсов (более 50 %) находится на Дальнем Востоке в малоосвоенных регионах.

Небольшое количество титана в настоящее время извлекается попутно из лопаритовых концентратов, содержащих 38-44 % TiO_2 . Кроме того, титан в составе титаномагнетита и сфена добывается при эксплуатации апатит-нефелиновых руд, но промышленностью практически не используется (Блинов, Короленко, 1998).

Наибольший интерес по качеству руд и перспективам освоения представляют собой коренные месторождения, к которым относится и Юго-Восточная Гремяха. Руды коренных месторождений являются комплексными, при их разработке возможно получение кроме ильменитового, других концентратов, хотя для их добычи и переработки требуются более значительные капитальные вложения, чем при освоении россыпных месторождений.

Исследования проводились с целью изучения особенностей этих руд, выбора и обоснования рациональной технологии обогащения.

2. Общая характеристика месторождения Юго-Восточная Гремяха

Ильменит-титаномагнетитовое оруденение рудопроявления Юго-Восточная Гремяха массива Гремяха-Вырмес приурочено к расслоенному комплексу ультраосновных-основных пород. Характерной особенностью является ритмическое чередование оруденелых слоев со слоями безрудных или слабо оруденелых габбро и габбро-норитов. Широко распространены также штокверковые жильные

обособления руд в практически безрудных габбро и габбро-норитах. Все многообразие пород и руд месторождения обусловлено количественными соотношениями плагиоклаза, пироксенов, амфиболов, оливина, титаномагнетита и ильменита. В незначительных количествах в отдельных зонах присутствуют сульфиды, биотит, гранат, титанит, апатит, кальцит и другие минералы. Главными рудными минералами являются ильменит и титаномагнетит (*Металлогенетические...*, 1971; *Осокин*, 1986; 1987; *Массив...*, 1967).

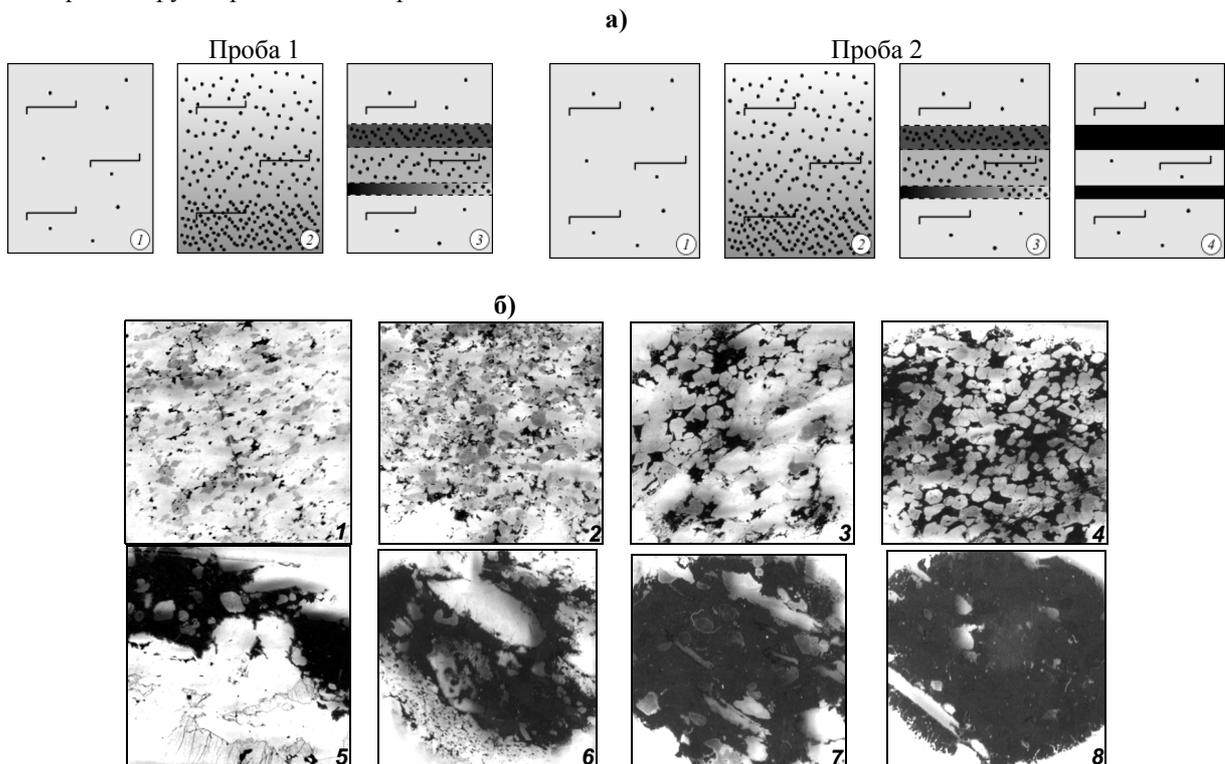
Породы преимущественно средне-, крупно-, реже мелкозернистые и пегматоидные. Рудные слои, как правило, мелко- и среднезернистые. Макротекстурное строение пород и руд, в основном, такситово-полосчатое. Мощность оруденелых пород и жильных рудных образований колеблется от первых сантиметров до первых дециметров. В пределах отдельных слоев текстуры чаще всего однородные, равномерно вкрапленные и массивные. На месторождении распространены следующие текстурные (природные) разновидности руд: вкрапленные, полосчатые, жильные (прожилковые и сплошные).

По степени насыщенности рудными минералами вкрапленные руды условно подразделяются на убоговкрапленные, редковкрапленные, средневкрапленные и густовкрапленные. Полосчатые руды следует рассматривать как своеобразную ритмически расслоенную разность вкрапленных руд. Жильная разновидность руд характеризуется наличием прожилков богатых сплошных руд различной мощности в практически безрудных габбро-норитах.

3. Минералого-технологические исследования

Исследования проведены на материале двух технологических проб, характеризующих основные природные типы руд. Масса каждой пробы составляла более 500 кг. Проба 1 содержит 11.2 % TiO_2 , 24.3 % $Fe_{общ}$ и 0.16 % V_2O_5 ; в пробе 2 – 8.9 % TiO_2 , 21.4 % $Fe_{общ}$ и 0.18 % V_2O_5 .

В первой пробе преобладают вкрапленные и полосчатые титаномагнетит-ильменитовые руды, залегающие в расслоенной толще габбро-плагиоперидотитов. Проба характеризуется равным соотношением ильменита и титаномагнетита. Вторая проба представлена штокверковыми жильными и прожилковыми, массивными ильменит-титаномагнетитовыми рудами в практически безрудных габбро и габбро-норитах, титаномагнетит существенно преобладает над ильменитом. Характер выделения рудных минералов в руде представлен на рис. 1.



1-4 – вкрапленные руды; 5, 6 – полосчатые руды; 7, 8 – жильные руды (черное – титаномагнетит и ильменит, светлое – силикаты)

Рис. 1. Характер выделения рудных минералов в ильменит-титаномагнетитовых рудах месторождения Юго-Восточная Гремяха; а – схематический рисунок; б – фотографии шлифов (увел. 2^x)

Таблица. Минеральный состав руд технологических проб, мас. %

Минералы	Содержание	
	Проба 1	Проба 2
Титаномагнетит	20.6	23.6
Ильменит*	18.9	13.5
Полевой шпат (преимущественно, плагиоклаз)	26.1	29.4
Пироксены (+амфибол, биотит, хлорит)	18.1	28.7
Оливин	14.4	2.9
Сульфиды (преимущественно, пирротин)	0.8	0.9
Прочие (гранат, титанит, шпинель, кальцит, апатит, кварц и др.)	1.1	1.0
Сумма	100	100

Примечание: *) – зернистый ильменит без учета мельчайших (<0,03 мм) экзольюционных выделений ильменита в титаномагнетите

Размеры рудных обособлений определяют оптимальное раскрытие рудной и породной фаз при дроблении и выбор крупности обогащения. Установлено, что в безрудных породах и бедных вкрапленных рудах, содержащих не более 30-40 % титаномагнетита и ильменита, размер обособлений обычно не превышает 0.5-5 мм. В прожилковых и богатых вкрапленно-полосчатых рудах мощность обособлений увеличивается до 5-20 мм, в густовкрапленных и сплошных достигает 100 мм и более. Суммарное количество рудных минералов ильменита и титаномагнетита в обеих пробах практически одинаково – 37-40 % (табл.).

Ильменит – главный и наиболее ценный минерал руд. Он представлен тремя неравнозначными морфологическими разновидностями. Первая разновидность – сравнительно крупные обособленные однородные зерна разнообразной, но преимущественно изометричной формы. Размер их колеблется от 0.01 мм до 3 мм, в среднем 0.3-0.5 мм. Вторая разновидность – мельчайшие экзольюционные пластинчатые и досчатые выделения ильменита в зернах титаномагнетита и, в меньшей степени, в зернах пироксена и амфибола. Размер зерен второй разновидности изменяется от 0.001 мм до 0.03 мм, иногда до 0.1-0.2 мм. По нашей оценке титаномагнетит на 10-20 % состоит из ильменита данной разновидности. Третья разновидность – мелкие (0.01-0.2 мм) зерна ильменита, образующие тонкие каемки и прожилки в титаномагнетите. Указанная разновидность распространена незначительно.

Промышленное значение имеет, в основном, только первая зернистая разновидность ильменита. На ее долю приходится до 95 % всего ильменита, содержащегося в пробах. В процессах дробления и измельчения руд до крупности – 0.3-0.4 мм раскрывается преимущественно данная разновидность ильменита, основная же часть экзольюционного ильменита остается в нераскрытом виде в титаномагнетите. Средневзвешенный размер зерен варьирует в пределах 0.5-0.8 мм, постепенно увеличиваясь от бедных руд к богатым. Зерна ильменита чаще всего находятся в ассоциации либо друг с другом, либо с зернами титаномагнетита, реже с зернами пироксена, оливина, амфибола и полевого шпата. Ильменит содержит в среднем 50 % TiO_2 и 34 % $Fe_{общ.}$. Плотность ильменита – 4.8 г/см³.

Титаномагнетит широко распространен в рудах. Он представлен, в основном, ксеноморфными зернами размером от 0.01 до 3.0 мм, в среднем 0.4-0.6 мм. Средневзвешенный размер зерен варьирует в пределах 0.5-0.8 мм. Зерна титаномагнетита чаще всего ассоциируют либо друг с другом, либо с зернами ильменита, реже – амфибола и других силикатов. Титаномагнетит содержит в среднем 9 % TiO_2 и 60 % $Fe_{общ.}$

Суммарное содержание промышленных минералов (ильменита и титаномагнетита) в руде составляет около 35-40 %. Непромышленные минералы (60-65 %) представлены в основном силикатами – плагиоклазом, пироксенами, оливином и амфиболами. В незначительных количествах (до 5 %) в рудах присутствуют гранат, эпидот, хлорит, биотит, кварц и другие минералы. Содержание сульфидов, главным образом пирротина, составляет 0.5-1.0 %.

Для обоснования рациональной технологии рудоподготовки проведены исследования кинетики измельчения руды в различных мельницах. Результаты изучения кинетики шарового и стержневого измельчения показали, что использование стержневой мельницы в первой стадии для относительно грубого помола предпочтительнее вследствие более высокой удельной производительности (по классу 0.35 мм ~ в 2 раза) и снижения ошламования ценных компонентов. Применительно к исследуемым рудам, где средневзвешенная вкрапленность ильменита составляет 0.2-0.4 мм при максимальном размере одиночных зерен 1-2 мм, использование лишь одной стержневой мельницы не позволяет обеспечить требуемое раскрытие ильменита и титаномагнетита без излишнего переизмельчения. Такой режим измельчения может быть эффективен только при минимальной производительности по руде, чтобы обеспечить работу мельницы в замкнутом цикле с грохотом.

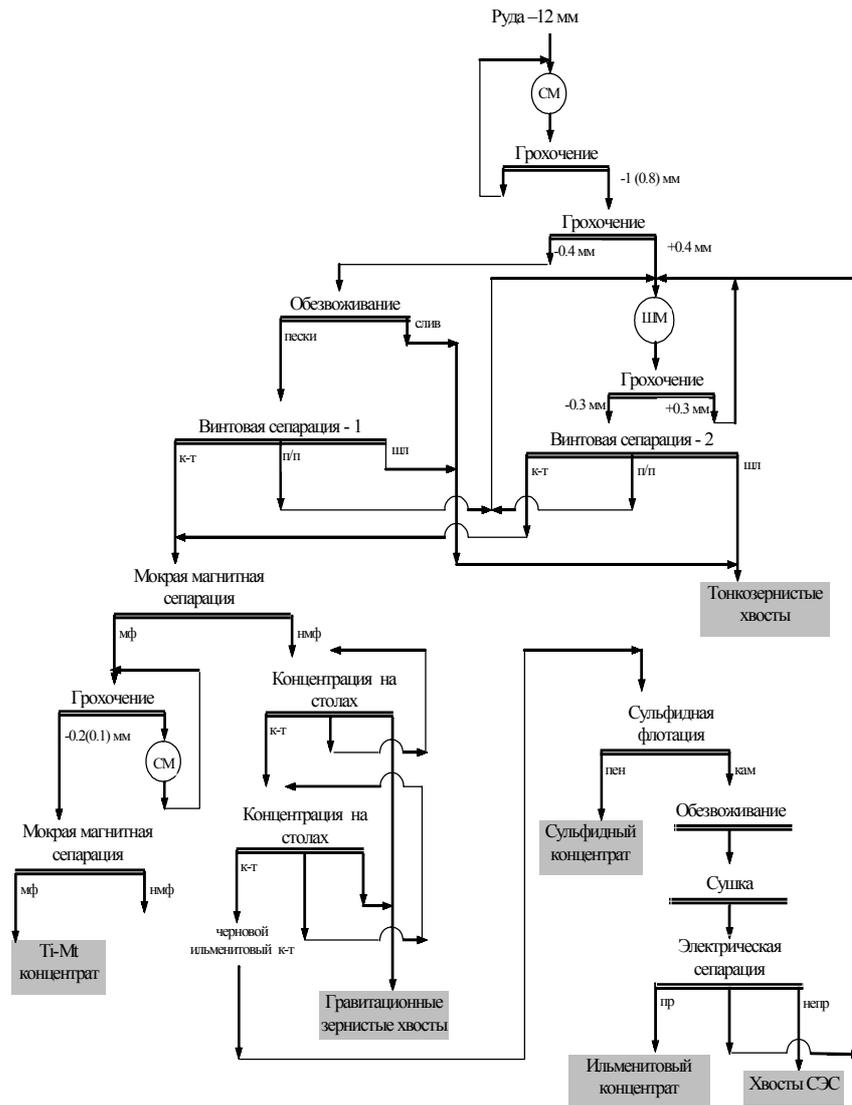


Рис. 2. Принципиальная схема обогащения ильменит-титаномагнетитовой руды

Технология рудоподготовки в две стадии, когда в I стадии при стержневом измельчении (относительно грубый помол) обеспечивается раскрытие крупнозернистого ильменита и титаномагнетита, а окончательное раскрытие оставшихся тонких зерен ильменита и титаномагнетита осуществляется в шаровой мельнице, является наиболее рациональной. В случае изменения характера вкрапленности компонентов технология измельчения позволяет в I стадии регулировать крупность измельчения в относительно широких пределах без изменения установленной оптимальной крупности питания II стадии (-0.4 мм).

Таким образом, для подготовки руды к обогащению рекомендуется двухстадийная схема измельчения с использованием в I стадии стержневой мельницы, работающей в замкнутом цикле с грохотом, крупность измельчения составляет -1(0.8) мм. Измельченный продукт подвергается контрольному грохочению по зерну размером 0.4 мм. Надрешетный продукт крупностью -1(0.8)+0.4 мм (непродуктивная фракция) направляется на II стадию измельчения, где используется шаровая мельница с грохотом, а подрешетный продукт крупностью -0.4 мм поступает на I стадию гравитационного обогащения. В результате этого из питания I стадии обогащения (основной) выводится непродуктивная фракция, содержащая крупные частицы пустой породы и сростки ильменита.

Принципиальная схема обогащения руды с использованием двухстадийного измельчения представлена на рис. 2. Крупность готового продукта II стадии измельчения -0.3 мм обеспечивает рациональную степень раскрытия полезного минерала. Данная схема рудоподготовки является щадящей и полностью отвечает требованиям гравитационного обогащения: полезный компонент по мере его раскрытия должен сразу же выводиться из схемы. Она успешно зарекомендовала себя на Ловозерском ГОКе при обогащении редкометалльных руд (Ракаев, 1989).

Эффективность цикла измельчения оценивалась по различным показателям, в том числе по степени раскрытия ильменита и титаномагнетита. На всех стадиях достигается достаточно высокая степень раскрытия этих минералов.

Готовые продукты I и II стадий измельчения направляются на винтовую сепарацию для предварительной концентрации титаномагнетита и ильменита. Концентраты винтовых сепараторов поступают на дальнейшее обогащение, промпродукты, представленные в основном сростками, – на доизмельчение в шаровую мельницу, на этой стадии также получают тонкозернистые хвосты, которые могут направляться на доизвлечение титана с помощью гравитационных и магнитных методов обогащения.

Далее предусмотрена магнитная сепарация с получением черного титаномагнетитового концентрата, который, при необходимости повышения качества, может быть подвергнут доизмельчению и перечистке. Немагнитная фракция сепарации направляется на концентрационные столы для получения черного ильменитового концентрата, содержащего 35-37 % TiO_2 .

В рудах ЮВГ присутствуют сульфиды, главным образом пирротин, который при гравитационно-магнитном обогащении накапливается в концентрате, загрязняя его серой, являющейся вредной примесью при дальнейшей металлургической переработке. Для снижения содержания сульфидов в гравитационном концентрате используется флотационный метод. Схема сульфидной флотации включает основную и контрольную операции с использованием бутилового ксантогената, бутилового аэрофлота и вспенивателя Т-80. Флотация позволяет снизить содержание серы в ильменитовом концентрате с 0.57 до 0.1 %. Содержание серы в общем сульфидном концентрате основной и контрольной флотаций составило около 11 %, железа – 37 %, диоксида титана 18.7 %. При необходимости повышения содержания серы в сульфидном концентрате и снижения содержания диоксида титана возможно проведение перечисточной операции. Полученный ильменитовый концентрат направляется на сушку и последующую доводку с применением электростатической сепарации (СЭС). При проведении электрической сепарации помимо концентрата всегда получают промпродукты с достаточно высоким содержанием ценного компонента. Как правило, их возвращают в цикл гравитации, преимущественно, в питание мельницы доизмельчения. Выход хвостов СЭС и потери с ними ильменита незначительны, поэтому они выводятся в отвал.

Таким образом, разработанная технология обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд предусматривает: двухстадиальное измельчение руды до крупности 0.3-0.4 мм; магнитную и гравитационную сепарацию мелкозернистого материала с получением титаномагнетитового концентрата и черного ильменитового концентрата; флотационную очистку ильменитового концентрата от серы; электрическую доводку черного ильменитового концентрата с получением кондиционного ильменитового концентрата.

Обогащение по разработанной схеме позволяет получить ильменитовый концентрат с содержанием диоксида титана не менее 47 %, при извлечении 45-55 % и титаномагнетитовый – с содержанием железа не менее 53 %, при извлечении 40-45 %.

4. Выводы

1. На основе комплексных исследований текстурно-структурных, физико-механических и минералого-технологических свойств ильменит-титаномагнетитовых руд установлены оптимальные условия измельчения руды и раскрытия основных минералов, предложена двухстадиальная технология измельчения, исключающая переизмельчение ценных компонентов.

2. Разработана эффективная технология обогащения титаносодержащих руд ЮВГ с получением титаномагнетитового и ильменитового концентратов.

3. В результате обогащения по предлагаемой схеме может быть получен ильменитовый концентрат с содержанием диоксида титана не менее 47 %, при извлечении 45-55 %, и титаномагнетитовый концентрата с содержанием железа не менее 53 %, при извлечении 40-45 %.

Литература

Блинов В.А., Короленко Н.В. Минеральное сырье. Титан. М., ЗАО "Геоинформмарк", 49 с., 1998.

Короленко Н.В. Титан. *Разведка и охрана недр*, № 11-12, с.24-28, 2001.

Массив Гремяха-Вырмес на Кольском полуострове. *Под ред. А.А. Полканова. М., Наука*, 236 с., 1967.

Металлогенические особенности щелочных формаций восточной части Балтийского щита. *Под ред. А.А. Кухаренко. Л., Наука*, 277 с., 1971.

Осокин А.С. Вещественный состав комплексных руд массива Гремяха-Вырмес. Месторождения неметаллического сырья Кольского полуострова. *Апатиты*, с.56-64, 1986.

Осокин А.С. Размещение и вещественный состав апатит-титаномагнетит-ильменитовых руд массива Гремяха-Вырмес. *Апатиты*, 90 с., 1987.

Ракаев А.И. Оптимизация рудоподготовки при гравитационном обогащении. Л., Наука, 184 с., 1989.