

УДК 622.7:621.373

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ИЛЬМЕНИТА

© 2021 г. И. Ж. Бунин^{1, *}, В. А. Чантурия¹, Н. Е. Анашкина¹, Е. В. Копорулина¹, Г. К. Хачатрян²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов”, Москва, Россия

*E-mail: bunin_i@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

С использованием методов инфракрасной фурье-спектроскопии, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, микротвердомерии, определения краевого угла смачивания поверхности и потенциала течения (протекания) изучен механизм воздействия мощных наносекундных электромагнитных импульсов и диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления в воздухе на морфологию, структурное состояние поверхности и физико-химические свойства (микротвердость, краевой угол смачивания, электрокинетический потенциал) ильменита. Показаны преимущества применения кратковременных энергетических воздействий ($t_{\text{обр}} = 10\text{--}30$ с) для структурно-химического модифицирования поверхности и физико-химических свойств ильменита с целью повышения эффективности процессов переработки комплексных титановых руд.

DOI: 10.31857/S0367676521090064

ВВЕДЕНИЕ

Ильменит и рутил являются основными минералами для производства титана и диоксида титана (TiO_2): в рутилах содержание диоксида титана составляет более 91%, в ильменитах – 42–62% [1–3]. В ильменитовом сырье более чем на 82% сосредоточены мировые запасы титана, необходимого для производства синтетического рутила (TiO_2 – 95–98%) и титанового шлака (70–85%) с последующим получением из них пигментного диоксида титана, собственно Ti , и другой продукции [1–3]. Из современных россыпей и коренных руд получают ильменитовые концентраты с содержанием ~55% и 44–49% TiO_2 соответственно [3]. Коренные ильменит-титаномагнетитовые руды обогащают по гравитационно-магнитной схеме с выделением двух концентратов: высококачественного ильменитового с содержанием TiO_2 45–52% и титаномагнетитового ванадийсодержащего концентрата (8–15% TiO_2 , железо 45–63%, пентоксид ванадия 0.6–1.2% V_2O_5) [3]. Использо-

вание флотационного процесса при обогащении труднообогатимых комплексных титановых руд позволяет снизить потери тонковкрапленного ильменита и повысить качество ильменитовых концентратов [4].

Ильменит (титанистый железняк FeTiO_3 ; 42–62% TiO_2), рутил (92–98% TiO_2); анатаз (полиморфная модификация рутила) и лейкоксен ($\text{FeTiO}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{TiO}_2$; 63–90% TiO_2) – главные промышленные минералы титана. Ильменит (минеральный вид переменного состава) относится к наиболее распространенным в земной коре минералам и является сложным (двойным) оксидом типа ABX , где A – Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} ; B – Ti^{4+} [4, 5]. Кристаллическая структура ильменита (ABO_3 ; гексагональная пространственная группа $R\bar{3}c$, параметры элементарной ячейки $a = b = 5.0875 \text{ \AA}$, $c = 14.0827 \text{ \AA}$), основывается на гексагональной плотноупакованной кислородной решетке с атомами металлов, занимающими две трети имеющихся октаэдрических позиций; одна

Таблица 1. Химический состав ильменита из шлиховой пробы (Джуина, Бразилия), мас. %

TiO ₂	FeO	MnO	MgO	V ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
56.18	37.22	1.14	0.06	0.28	0.04	0.04	0.03	н/о

треть позиций вакантна [5–7]. Ильменит включает два различных слоя октаэдров: *A* – с катионами Fe²⁺ и *B* – с катионами Ti⁴⁺, полностью упорядоченными вдоль оси *c*. Каждый октаэдр FeO₆ и TiO₆ связан тремя ребрами с октаэдрами внутри слоя, гранью с октаэдром второго типа атомов соседнего слоя, а противоположной гранью – с вакантной октаэдрической позицией [5]. Ильменит обладает полупроводниковыми свойствами (ширина запрещенной зоны $E_g = 2.5–2.9$ эВ [6, 8]), чистый FeTiO₃ характеризуется высоким удельным сопротивлением [8], электропроводность природного ильменита варьируется в диапазоне от 10⁻⁵ до 10⁻⁴ (Ом · см)⁻¹ [9], магнитная восприимчивость – от 68 до 960 эл. магн. ед. · г⁻¹, плотность – 4.6–5.2 г · см⁻³, твердость по Моосу 5–6 [4]. Собственно ильменит FeTiO₃ является парамагнетиком [10]; при температурах ниже 60 К минерал (Fe²⁺Ti⁴⁺(O²⁻)₃) обладает антиферромагнитным упорядочением, так что чередующиеся слои атомов железа намагничены вдоль оси *c* в противоположных направлениях и разделены немагнитными слоями атомов титана [11].

В России при переработке ильменитовых концентратов используется процесс их восстановительной плавки [1–3]. В качестве подготовительных операций предлагается применение предварительной механоактивации для интенсификации последующего солянокислого разложения титансодержащих концентратов [2], а также СВЧ-обработки руд и продуктов обогащения для повышения эффективности флотации ильменита [12].

Целью настоящей работы является изучение и сравнительный анализ механизмов воздействия неравновесных электрических разрядов двух видов: высоковольтного импульсно-периодического наносекундного (МЭМИ [13]) и диэлектрического барьерного [14, 15] разрядов в воздухе при атмосферном давлении на морфологию, структурное состояние, микротвердость, электрические и физико-химические свойства поверхности ильменита из пород района Джуина (Бразилия).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили с использованием методик [15–20] на образцах ильменита (Fe, Mg)TiO₃ в виде отдельных зерен из шлиховой пробы (Джуина, Бразилия) и специально приготовленных полированных пластин (аншлифов) толщиной ~4.5 мм.

Зерна ильменита непрозрачные, черного цвета с металлическим блеском, среднеокатанные, имели неправильную форму, раковистый излом; размер зерен 1–4 мм. Поверхность зерен ожелезненная, покрыта пленками оксидов и гидроксидов железа, что обусловлено длительным пребыванием минерала в экзогенных условиях [21].

Химический (элементный) состав и содержание основных примесей в пробах ильменита (табл. 1) определяли с использованием методов электронно-зондового микроанализа (микроанализатор Cameca SX 100, данные предоставлены к. г.-м. н. Посуховой Т.В., МГУ), растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа (РЭМ–РСМА). По данным РЭМ–РСМА (полуколичественный анализ, рентгеновские спектры от локального участка поверхности) элементный состав ильменита (мас. %): С – 4.04, Mg – 3.15, Al – 0.20, Ti – 25.94, Cr – 1.06, Mn – 0.32, Fe – 26.71, O – 38.58.

Условия обработки образцов ильменита в условиях воздействия наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ) и излучения низкотемпературной неравновесной плазмы (НТП) диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в воздухе при стандартных условиях, электрофизические параметры генераторов импульсов высокого напряжения подробно приведены в [15–20]; продолжительность обработки образцов изменяли в диапазоне $t_{обр} = 10–150$ с. В случае воздействия МЭМИ длительность высоковольтных наносекундных импульсов находилась в пределах 4–10 нс; $U \sim 25–30$ кВ – амплитуда импульса, $E \sim 10^7$ В · м⁻¹ – напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке длиной 5 мм, $f = 100$ Гц – частота повторения наносекундных импульсов. Напряжение на электродах в ячейке генератора барьерного разряда (ДБР) – 20 кВ, длительность импульса – 8 мкс, длительность переднего фронта импульса ~300 нс, частота повторения импульсов – 16 кГц; длина межэлектродного промежутка ~5 мм [15, 17–19].

ИК-спектры (ИКФС) ильменита регистрировали в диапазоне от 4000 до 400 см⁻¹ (спектральное разрешение 4–6 см⁻¹) с использованием спектрометра Nicolet-380 (USA) и специальной приставки диффузного отражения Smart Diffuse Reflectance. При проведении полуколичественного анализа интенсивности линий поглощения ИК-спектров, оптические плотности соответствующих линий (*D*) в каждом из спектров нор-

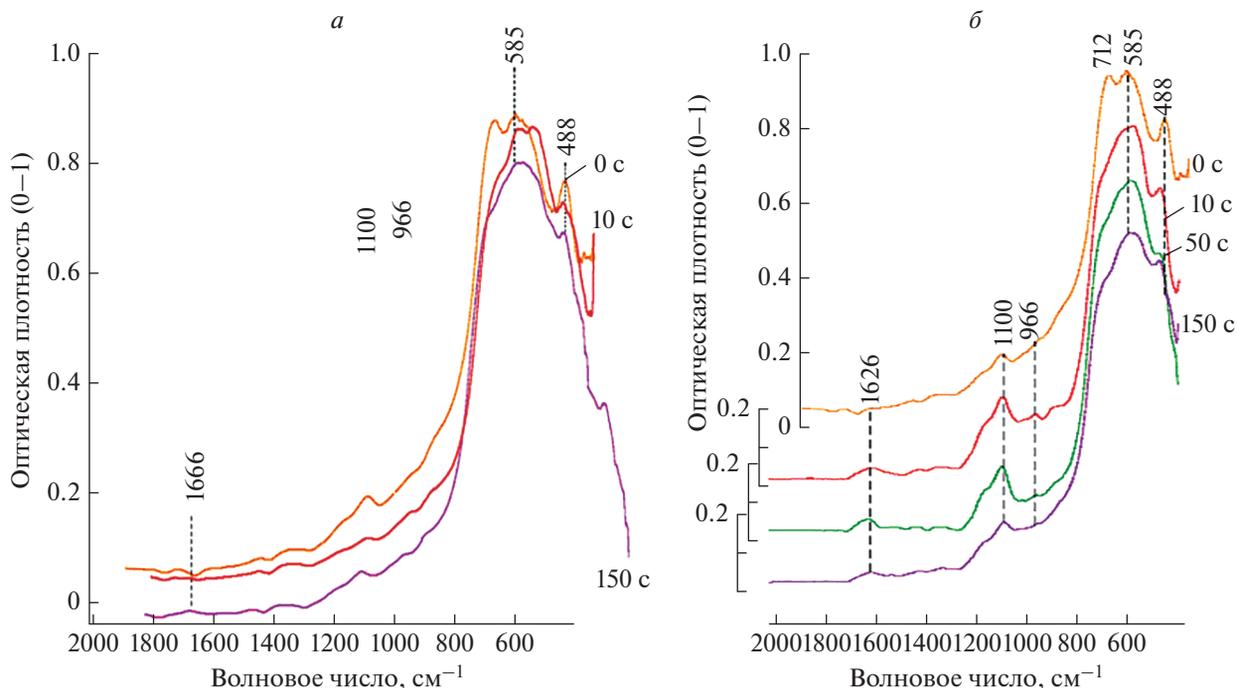


Рис. 1. ИК-спектры ильменита в исходном состоянии ($t_{\text{обр}} = 0$ с) и после воздействия МЭМИ (а) и ДБР (б) ($t_{\text{обр}} = 10, 50$ и 150 с).

мировали на оптическую плотность максимума поглощения при 490 см^{-1} .

Изменение структурного состояния (морфологии) поверхности ильменита в результате электромагнитных импульсных воздействий анализировали на минеральных аншлифах методами аналитической электронной микроскопии (РЭМ–РСМА). Микротвердость минерала определяли по методу Виккерса (HV, МПа; ГОСТ-2999–75) с использованием методики [16]: микротвердомер ПМТ-3М; нагрузка на индентор составляла 100 г, время нагружения – 10–15 с. Для определения потенциала течения (“протекания”), ζ -потенциал, мВ) минеральных частиц (размером ≤ 50 мкм) использовали анализатор Microtrac ZETA-Check Zeta Potential Analyzer. Краевой угол смачивания (Θ°) поверхности аншлифов до и после энергетических воздействий измеряли методом лежащей (“покоящейся” на плоскости) капли дистиллированной воды диаметром ~ 2 –3 мм с использованием методики [15, 17, 18], цифрового оптического микроскопа и программу для анализа изображений ImageJ со специальными плагинами DropSnake и LB-ADSA [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ИКФ-спектр ильменита в исходном состоянии (рис. 1) соответствовал известным данным о колебательных спектрах и характеристических полосах поглощения, обусловленных колеба-

ниями структурных группировок в кристаллической решетке минерала [4, 23, 24]. Полоса в спектре с максимумом при 490 см^{-1} отвечает валентным колебаниям (ν) связей Ti–O–Ti; полоса при 583 см^{-1} – валентным колебаниям связи Ti–O в TiO_6 -октаэдрах; полоса при 648 см^{-1} отвечает валентным колебаниям связи Fe–O; полоса при 712 см^{-1} – валентным колебаниям связи Ti–O; полоса при 1098 см^{-1} – деформационным колебаниям (δ) связи Fe–OH. Также в спектре ильменита отмечены слабые максимумы поглощения около 3135 и 1686 см^{-1} , связанные с валентными и деформационными колебаниями OH в составе адсорбированной воды.

В результате воздействия высоковольтных наносекундных импульсов в ИКФ-спектрах ильменита (рис. 1а) появились дополнительные линии 917 – 968 см^{-1} , связанные с колебаниями –O–O–пероксо-групп. Интенсивность линий поглощения при 648 и 1098 см^{-1} варьировалась, а линии при 580 см^{-1} (область колебаний связи Ti–O в TiO_6 -октаэдрах) – возрастала. Анализ зависимости интенсивности (относительных интенсивностей, $I_{\text{отн}}$) спектральных линий ильменита от продолжительности электромагнитной импульсной обработки ($t_{\text{обр}} = 10$ – 150 с) показал, что с увеличением $t_{\text{обр}}$ до 50 с наблюдалось снижение содержания Fe–OH-групп, т.е. происходило дегидроксилирование поверхности минерала, а при $t_{\text{обр}} \geq 50$ с,

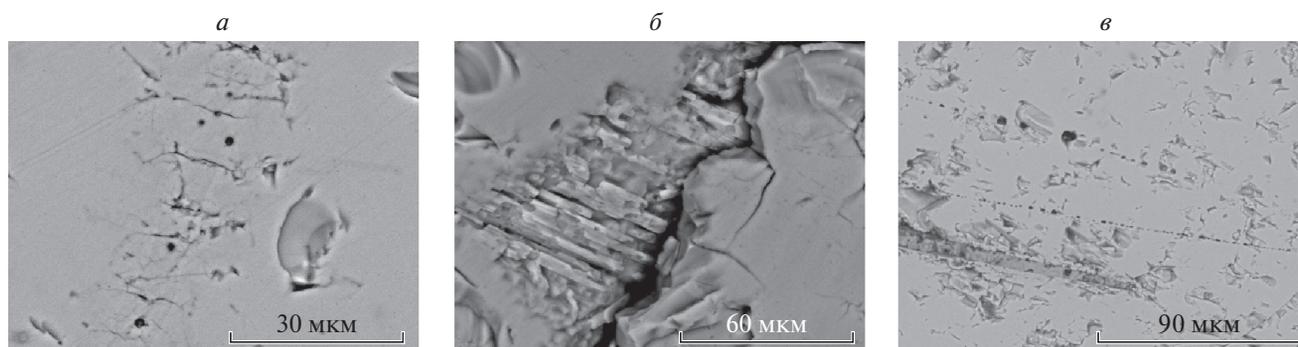


Рис. 2. Поверхность ильменита после воздействия высоковольтных наносекундных импульсов (а), (б) и диэлектрического барьерного разряда (в) ($t_{\text{обр}} = 50$ с). РЭМ; масштабные линейки: (а) 30, (б) 60, (в) 90 мкм.

наоборот, — гидроксирование поверхности. Похожая тенденция сохранялась и для изменения содержания ОН-групп в составе адсорбированной на поверхности ильменита молекул воды. Следует отметить, что при $t_{\text{обр}} = 30$ с относительная интенсивность линии около 650 см^{-1} , отвечающих колебаниям связи Fe—O, также достигала своего минимума.

Одним из возможных механизмов влияния не-теплого [25] воздействия мощных наносекундных электромагнитных импульсов, вызывающего изменение структурного состояния и физико-химических свойств поверхности ильменита, является трансформация (деструкция) кристаллической структуры минерала, представленной чередующимися вдоль оси *c* слоями октаэдров двух типов — Fe^{2+}O_6 и Ti^{4+}O_6 . По всей видимости, в условиях импульсного периодического воздействия электрического поля высокой напряженности [26], превышающей электрическую прочность минеральных зерен ($\geq 10^7 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$), происходило нарушение связей Fe—O в октаэдрах первого типа, в то время как связи Ti—O в октаэдрах второго типа не претерпевали существенных деструктивных изменений. Другим возможным механизмом, вызывающим изменения в ИК-спектрах ильменита, является процесс электрического разрушения и удаления тонких пленок оксидов (гидроксидов) железа с поверхности ильменита при $t_{\text{обр}} \leq 30\text{--}50$ с и последующее гидроксирование и/или окисление (ионов железа Fe^{2+} до Fe^{3+}) поверхности при $t_{\text{обр}} \geq 30\text{--}50$ с вследствие действия продуктов плазмы искровых микроразрядов.

Результаты ИКФС в целом отвечают данным о нелинейном характере изменения краевого угла смачивания и электрокинетического потенциала ильменита с увеличением времени воздействия МЭМИ ($t_{\text{обр}} = 10\text{--}150$ с). При кратковременной ($t_{\text{обр}} = 10\text{--}30$ с) электроимпульсной обработке шлифов наблюдалось увеличение краевого угла смачивания минеральной поверхности (Θ) с

103.5° до 106.2° за счет снижения концентрации гидроксидных соединений железа, что свидетельствует о повышении гидрофобных свойств поверхности минерала; при $t_{\text{обр}} = 50\text{--}150$ с происходило последовательное уменьшение Θ с 89.8° до $\sim 72^\circ$ вследствие повышения концентрации ОН-групп.

Отрицательный знак электрокинетического потенциала ильменита в нейтральной среде определяется особенностями кристаллохимического строения минерала [9], так что несущие отрицательный заряд ионы кислорода, располагаясь ближе к поверхности (плоскости раскалывания), частично перекрывают положительно заряженные катионы железа и титана [4, 27], а также свойствами двойного электрического слоя минеральных частиц в водной суспензии. В результате кратковременной ($t_{\text{обр}} = 10$ с) электромагнитной импульсной обработки минеральных проб происходило повышение электрокинетического потенциала ильменита в области отрицательных значений с -69.5 мВ в исходном состоянии до -73.7 мВ, а с увеличением продолжительности обработки ($t_{\text{обр}} = 50\text{--}150$ с) — снижение до первоначальных отрицательных значений $-70.1\text{...}-69.5$ мВ.

Установленные изменения структурного состояния поверхностного слоя ильменита обуславливали особенности морфологии и снижение микротвердости (разупрочнение) поверхности минерала: в результате кратковременной ($t_{\text{обр}} = 10\text{--}30$ с) электроимпульсной обработки на поверхности шлифов происходило образование протяженных фрагментированных следов стримерных разрядов со сложной внутренней дискретной структурой (рис. 2а). При увеличении продолжительности электроимпульсной обработки до $t_{\text{обр}} = 50$ с происходило образование каналов электрического пробоя и кристаллографически ориентированных микротрещин, что вызывало разрушение локальных областей минеральной поверхности (рис. 2б). С увеличением времени элект-

троимпульсной обработки происходило монотонное снижение микротвердости ильменита с ~ 671.4 МПа в исходном состоянии до ~ 518.8 МПа ($t_{\text{обр}} = 150$ с); относительное снижение микротвердости $-\Delta HV_{\text{max}} \sim 22.7\%$.

В условиях воздействия диэлектрического барьерного разряда происходили следующие изменения в ИК-спектрах ильменита (рис. 1б): увеличение относительных интенсивностей линий, отвечающих колебаниям связей Ti–O в TiO_6 -октаэдрах, а также линий –O–O– пероксо-групп, что, по всей видимости, обусловлено окислением поверхности минерала при воздействии продуктов (O_3 , H_2O_2 , NO, N_2O и др.) низкотемпературной плазмы ДБР; также с увеличением времени обработки ($t_{\text{обр}}$) возрастала интенсивность линий, связанных с адсорбированными на поверхности молекулами воды. В результате кратковременного ($t_{\text{обр}} = 10$ с) воздействия ДБР относительная интенсивность линии при 1098 см^{-1} , отвечающей деформационным колебаниям (δ) связи Fe–OH, оказалась существенно большей ($I_{\text{отн}} \sim 0.28$) по сравнению с интенсивностями линий образцов в исходном ($I_{\text{отн}} \sim 0.2$) и измененном МЭМИ ($I_{\text{отн}} = 0.05\text{--}0.15$) состояниях. В целом зависимость относительной интенсивности линии (Fe–OH) от времени воздействия ДБР имела нелинейный характер. Минимальные концентрации на поверхности ильменита анионов O^{2-} , OH^- и адсорбированной H_2O достигались при $t_{\text{обр}} = 30$ с. Также следует отметить, что в ИК-спектрах образцов ильменита, подвергнутых воздействию ДБР, отсутствовали линии около 648 см^{-1} (Fe–O, ν) и 712 см^{-1} (Ti–O, ν). Морфологические изменения поверхности минерала связаны с образованием эрозионных микрократеров и дорожек (рис. 2в), внешне напоминающих микроструктурные особенности отпечатков (автографов) токовых каналов высоковольтного искрового разряда микросекундной длительности на поверхности металлической пластины [28].

Изменение микроструктуры и морфологии поверхности ильменита, вызванные воздействием ДБР ($t_{\text{обр}} = 10\text{--}150$ с), вызывало монотонное снижение краевого угла смачивания поверхности с 103.5° в исходном состоянии до $\sim 70^\circ$ при $t_{\text{обр}} = 150$ с. Величина электрокинетического потенциала ильменита от времени воздействия излучения барьерного разряда изменялась нелинейно: в результате плазменной обработки минеральных частиц в течение $t_{\text{обр}} = 10$ с происходило увеличение ζ -потенциала в области отрицательных значений с -69.5 мВ в исходном состоянии до -76 мВ; в диапазоне $t_{\text{обр}} = 30\text{--}150$ с происходило последовательное снижение ζ -потенциала до -16.5 мВ. Увеличение времени НТП-обработки минеральных частиц до $t_{\text{обр}} = 300$ с вызывало повышение электрокинетического потенциала иль-

менита до первоначальных отрицательных значений -67.6 мВ.

С увеличением времени обработки минеральных аншлифов ($t_{\text{обр}} = 10\text{--}150$ с) в условиях действия таких факторов излучения ДБР, как сильное электрическое поле, повышенная температура диэлектрического барьера, концентрация электрического заряда на поверхности образца [15, 29], происходило монотонное снижение микротвердости ильменита с 671.4 МПа в исходном состоянии до 587 МПа при $t_{\text{обр}} = 150$ с; относительное снижение микротвердости $\Delta HV_{\text{max}} \sim 13\%$, что значительно ниже по сравнению с установленным эффектом разупрочнения при воздействии МЭМИ.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности и перспективах применения сравнительно непродолжительных (кратковременных $-\ t_{\text{обр}} = 10\text{--}30$ с) электромагнитных импульсных воздействий (МЭМИ, ДБР) на воздухе при стандартных условиях для структурно-химического модифицирования поверхности и физико-химических свойств ильменита с целью повышения эффективности процессов переработки комплексных титановых руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резниченко В.А., Аверин В.В., Олюнина Т.В. Титанаты: научные основы, технология, производство. М.: Наука, 2010. 267 с.
2. Богатырева Е.В., Чуб А.В., Ермилов А.Г. // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. 2014. № 2. С. 169.
3. Обзор рынка титанового сырья в СНГ. М.: Изд-во ООО "ИГ "Инфолайн", 2018. 20 с.
4. Найфонов Т.Б., Белобородов В.И., Захарова И.Б. Флотационное обогащение комплексных титановых и циркониевых руд. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. 155 с.
5. Базуев Г.В., Королев А.В., Головкин Б.Г. // ФТТ. 2016. Т. 58. № 7. С. 1289; Bazuev G.V., Korolev A.V., Golovkin B.G. // Phys. Sol. St. 2016. V. 58. No. 7. P. 1332.
6. Ribeiro R.A.P., Lazaro S.R. // RSC Advances. 2014. No. 4. Art. No. 59839.
7. Базуев Г.В., Королев А.В., Николаенко И.В. и др. // ДАН. 2015. Т. 462. № 5. С. 546.
8. Raghavender A.T., Hong N.H., Lee K.J. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2013. V. 331. No. 4. P. 129.
9. Чантурия В.А., Шафеев Р.Ш. Химия поверхностных явлений при флотации. М.: Недра, 1977. 191 с.
10. Белоконев Е.Л., Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П. и др. // ДАН СССР. 1978. Т. 242. № 2. С. 330.
11. Шуй П.Т. Полупроводниковые рудные минералы. Л.: Недра, 1979. 288 с.
12. Nuri O.S., Irannajad M., Mehdilo A. // JMREE. 2017. V. 51. No. 2. P. 93.
13. Чантурия В.А., Гуляев Ю.В., Лунин В.Д. и др. // ДАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 680.

14. *Автаева С.В.* Барьерный разряд. Исследование и применение. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2011. 193 p.
15. *Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Рязанцева М.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 9. С. 1355; *Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 9. P. 1161.
16. *Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Анашкина Н.Е. и др.* // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. 2015. № 4. С. 130.
17. *Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Рязанцева М.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 6. С. 738; *Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 6. P. 668.
18. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 6. С. 789; *Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 6. P. 716.
19. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 9. С. 1341; *Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 9. P. 1161.
20. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. и др.* // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. 2021. № 1. С. 107.
21. *Каминский Ф.В., Белоусова Е.А.* // Геолог. и геофиз. 2009. Т. 50. № 12. С. 1560.
22. *Stalder A.F., Melchior T., Müller M. et al.* // Colloid. Surf. A. 2010. V. 364. Nos. 1–3. P. 72.
23. *Накамото К.* ИК-спектры и КР-спектры неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.
24. *Chukanov N.V.* Infrared spectra of mineral species. N.-Y.: Springer Sci., 2014. 1726 p.
25. *Черепенин В.А.* // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1124.
26. *Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Рязанцева М.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 5. С. 633; *Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 5. P. 561.
27. *Брагина В.И., Коннова Н.И., Пехова Л.П.* // Горн. информ.-аналит. бюлл. (науч.-тех. журн.). 2011. № 5. С. 123.
28. *Карелин В.И., Тренькин А.А., Шибитов Ю.М. и др.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 10. С. 54.
29. *Лазукин А.В., Грабельных О.И., Сердюков Ю.А. и др.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 2. С. 18.

Effect of high-voltage nanosecond pulses and dielectric barrier discharge on the structural state and physicochemical properties of the ilmenite surface

I. Zh. Bunin^{a,*}, V. A. Chanturiya^a, N. E. Anashkina^a, E. V. Koporulina^a, G. K. Khachatryan^b

^a*Mel'nikov Institute of the Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Science, Moscow, 111020 Russia*

^b*Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Mineral Processing Department, Moscow, 117545 Russia*

*e-mail: bunin_i@mail.ru

We studied the mechanism of action of high-voltage nanosecond pulses and dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure on the morphology, structural state of the surface, and physicochemical properties (microhardness, contact angle, electrokinetic potential) of ilmenite using analytical scanning electronic microscopy (SEM – EDX) and confocal laser scanning microscopy (CLSM), microhardness testing, contact angle of surface wetting and streaming potential testing. The advantages of a short-term energy impacts ($t_{\text{treat}} = 10\text{--}30$ s) application for structural and chemical modification of the surface and physicochemical properties of ilmenite in order to increase the efficiency of processing of complex titanium ores are shown.