

Г. П. Андронов, Н. М. Филимонова, М. С. Хохуля

Разделение титансодержащих минералов магнитной сепарацией

Выполнены исследования по разделению титансодержащих минералов Африкандского месторождения (Мурманская область) магнитной сепарацией. Технологическая схема рудоподготовки и последующего обогащения руды разработана с учетом вкрапленности и раскрытия полезного компонента для получения как титаномагнетитового, так и перовскитового концентрата. Минералогическая характеристика дробленной руды месторождения показала высокую степень раскрытия титаномагнетита. Проведение первой стадии магнитной сепарации дробленной руды – эффективный метод выделения титаномагнетита. Магнитная сепарация дробленной руды исключает переизмельчение титаномагнетита, так как мелкозернистая вкрапленность перовскита предусматривает более тонкое дальнейшее измельчение, а также сокращает количество рудной массы, поступающей на измельчение в цикле выделения перовскита. Немагнитная фракция представлена оливином, перовскитом, а также незначительно кальцитом. Выполнен анализ изменения гранулометрического состава руды в зависимости от времени ее измельчения. При различной крупности измельчения магнитной сепарацией получены кондиционные титаномагнетитовые концентраты. Выход концентрата от руды составил 10,9–10,5 % при содержании $Fe_{\text{общ}}$ 60,6–62,0 %. Перовскит обладает слабо выраженной магнитной восприимчивостью относительно титаномагнетита. Проведены исследования по получению перовскитового концентрата магнитной сепарацией. Показано влияние степени измельчения питания сепарации, обесшламливания и предварительной классификации на показатели разделения перовскита магнитной сепарацией. Получены перовскитовые концентраты с содержанием 44–46 % TiO_2 . Представлены показатели обогащения титаномагнетит-перовскитовой руды магнитной сепарацией с получением титаномагнетитового и перовскитового концентрата. Существенная роль в получении качественных концентратов связана с предварительной подготовкой руды – ее измельчением, обесшламливанием и классификацией.

Ключевые слова: магнитная сепарация, измельчение, титаномагнетит, перовскитовый концентрат

Информация о статье: поступила в редакцию 02.03.2017; получена после доработки 07.03.2019

Введение

Несмотря на наличие в России достаточно больших запасов титанового и редкометалльного сырья, в стране не производится диоксид титана различных марок и его соединений, также отсутствует выпуск редкометалльной и редкоземельной продукции. Зависимость от импортных поставок и высокая стоимость данных видов продукции не позволяет развивать передовые отрасли промышленности.

Привлечение к переработке нетрадиционных видов сырья должно послужить решению этой важной проблемы. Одним из таких видов сырья является перовскитовый концентрат, который может извлекаться промышленным образом из руд Африкандского месторождения, расположенного на Кольском полуострове и местонахождение которого обозначено на карте (рис. 1).

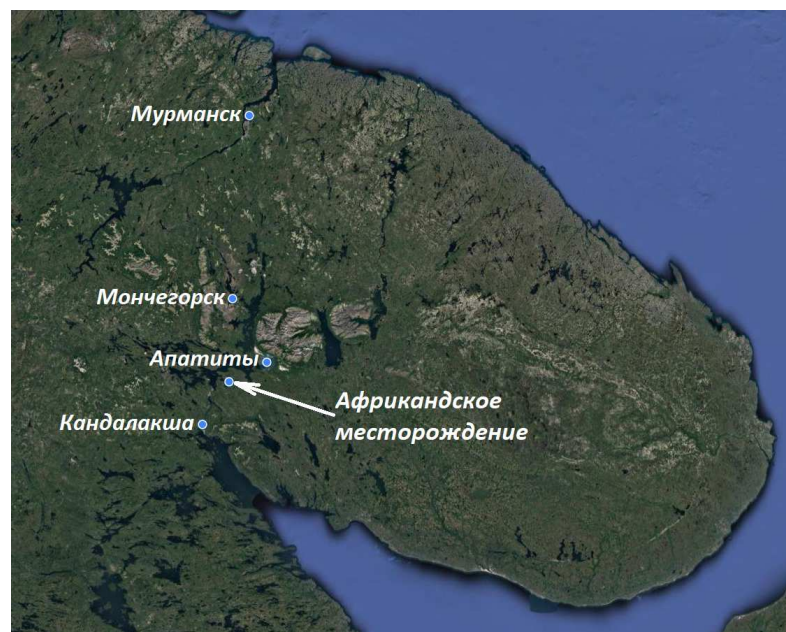


Рис. 1. Местонахождение Африкандского месторождения
Fig. 1. Location of the Africanda deposit

Данное перовскит-титаномагнетитовое месторождение относится к числу наиболее крупных, перспективных и полно изученных объектов и служит источником получения титана, железа, тантала, ниобия и редкоземельных элементов. В пределах месторождения выделено несколько типов руд: крупнозернистый рудный пироксенит, амфиболовый рудный пироксенит, рудный оливинит и пироксено-нефелиновый рудный пегматит. Разновидности руд отличаются друг от друга содержанием рудных и нерудных минералов, вкрапленностью перовскита и степенью дезинтеграции.

Перовскитовые руды занимают особое место из-за специфики химического состава перовскита (около 55–56 % двуокиси титана, примерно 1 % пятиокисей тантала и ниобия и до 4 % суммы редких земель) и отсутствия аналогов промышленного освоения подобных руд в мировой практике. Руда содержит также значительное количество железа и ванадия, которые могут иметь промышленное значение.

На протяжении длительного времени проводились технологические исследования, связанные с вопросами получения как титаномагнетитового, так и перовскитового концентратов и выделения из них разнообразной химической продукции с использованием различных методов обогащения и химической обработки. Применение магнитных, гравитационных и флотационных методов для обогащения титаномагнетитовых руд различного минерального состава описано в целом ряде работ [1–10].

Институтом "Механобр" в результате первоначального изучения обогатимости руды Африкандского месторождения была предложена магнитно-гравитационная технология ее переработки. В дальнейшем данная технология претерпела изменения благодаря тому, что Горным институтом КФАН СССР была доказана практическая возможность обогащения перовскитовых руд по магнитно-флотационной схеме как на свежей, так и оборотной воде, что подтверждено лабораторными и опытно-промышленными испытаниями. После предварительной дезинтеграции руда проходила несколько стадий магнитной сепарации с целью получения титаномагнетитового концентрата, а немагнитная фракция направлялась на получение флотационного перовскитового концентрата [11–13]. Выход концентрата составлял 16–17 % с содержанием 48–48,5 % TiO_2 при извлечении до 64–66 %.

Материалы и методы

Исследования на обогатимость с целью выделения магнитной сепарацией титаномагнетитового и перовскитового концентратов проводились на примере представительной пробы перовскитовой руды Африкандского месторождения.

Изучены минеральный и химический составы исходной пробы руды, которые показали, что содержание в ней TiO_2 и $Fe_{общ}$ находится примерно на одинаковом уровне и составляет около 10,4–10,5 %. Рудные минералы представлены титаномагнетитом (7,5 % TiO_2 , 63–65 % $Fe_{общ}$) и перовскитом (52–55 % TiO_2), содержание которых равно 10,6 и 15,3 % соответственно, а нерудные – в основном оливином (группа пироксенов), кальцитом и флогопитом (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный и химический составы перовскитовой руды
Table 1. Mineral and chemical compositions of perovskite ore

Минерал	Содержание минералов, %	Основной химический компонент	Содержание основного химического компонента, %
Перовскит	15,3	TiO_2	10,36
Пироксены	70,3	$Fe_{общ}$	10,46
Титаномагнетит	10,6	SiO_2	34,99
Кальцит	2,0	CaO	20,36
Флогопит	0,7	Al_2O_3	2,43
Прочие	1,1	$(Nb, Ta)_2O_5$	0,95

Результаты выполненного по узким фракциям гранулометрического состава (табл. 2) показывают, что примерно одинаковое содержание диоксида титана наблюдается в классах крупностью +1,6 и $-0,315+0,1$ мм, которое составляет в среднем более 11,5 %. В более мелких фракциях содержание TiO_2 начинает плавно уменьшаться, достигая минимального значения 7,89 % в классе $-0,05$ мм. Такая же тенденция в содержании сохраняется и для других химических компонентов руды, когда процентное расхождение между максимальными и минимальными значениями не превышает 2–5 %.

Следует отметить, что около 60 % всего материала сосредоточено во фракции крупностью $-1+0,2$ мм с распределением в ней около 58 % диоксида титана, что необходимо будет учитывать для обоснования включения в технологию гравитационных процессов обогащения руды. Другими компонентами руды являются общее железо, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO; их общее содержание превышает 68 %.

Таблица 2. Гранулометрическая характеристика и химический состав перовскитовой руды
Table 2. Particle size distribution and chemical composition of perovskite ore

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %					Распределение, %				
		TiO ₂	Fe _{общ}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Fe _{общ}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
+1,6	3,9	11,65	15,45	30,58	2,08	19,64	4,3	5,8	3,4	3,3	3,8
-1,6+1,0	13,4	10,56	13,46	33,47	2,23	18,57	13,6	17,2	12,8	12,3	12,2
-1,0+0,63	17,5	9,19	11,51	36,54	2,35	20,30	15,5	19,3	18,3	16,9	17,5
-0,63+0,5	10,3	9,71	11,07	35,65	2,29	20,00	9,6	10,9	10,5	9,7	10,1
-0,5+0,315	15,0	10,64	9,82	35,90	2,44	21,10	15,4	14,1	15,4	15,1	15,5
-0,315+0,2	16,1	11,37	8,54	34,80	2,41	21,42	17,6	13,1	16,0	16,0	16,9
-0,2+0,16	4,6	11,93	8,21	34,45	2,45	21,31	5,3	3,6	4,5	4,6	4,8
-0,16+0,1	7,4	11,44	8,04	34,90	2,64	21,16	8,2	5,7	7,4	8,0	7,7
-0,1+0,071	4,0	10,07	8,83	34,78	2,60	20,50	3,9	3,4	4,0	4,3	4,0
-0,071+0,05	3,2	9,25	8,97	35,25	2,96	19,63	2,8	2,7	3,2	3,9	3,1
-0,05	4,6	7,89	9,57	34,06	3,07	19,33	3,5	4,2	4,5	5,8	4,4
Итого	100,0	10,36	10,46	34,99	2,43	20,36	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

С целью изучения вещественного состава руды, выявления степени раскрытия зерен перовскита и титаномагнетита проведены минералогические с применением оптико-геометрического метода (стереомикроскоп LEICAMZ-6 с цветной цифровой камерой высокого разрешения LEICADFC 320 R2), а также петрографические (поляризационный микроскоп ZEISS AXIOPLAN-2) исследования.

Минеральный состав пробы перовскитовой руды выполнялся весовым методом до класса крупности +0,2 мм, а в классах меньшей крупности – оптико-геометрическим и иммерсионным методами. Результаты минералогического анализа были скорректированы с учетом данных химического анализа.

Технологические работы проводились на стандартном лабораторном дробильно-измельчительном, классифицирующем и магнитном оборудовании с использованием щековой дробилки, шаровой мельницы МЛ-7, мокрого магнитного сепаратора с низкой напряженностью магнитного поля 209 СЭ (I стадия), индукционно-роликового магнитного сепаратора СЭ 138Т (последующие стадии).

Результаты и обсуждение

В настоящей работе проведены исследования по разработке более совершенной технологической схемы, предусматривающей подготовку руды (измельчение) с учетом вкрапленности и раскрытия конкретного рудного минерала для получения как титаномагнетитового, так и перовскитового концентрата.

Минералогическая характеристика дробленой руды Африкандского месторождения показала высокую степень раскрытия титаномагнетита (табл. 3). В данном случае до измельчения целесообразно проведение первой стадии магнитной сепарации дробленой руды (напряженность магнитного поля $8,0 \cdot 10^4$ А/м (~1200 эрстед)). В основном, в мировой практике титаномагнетитовые концентраты выделяются с использованием магнитного метода обогащения [14–17].

Таблица 3. Раскрытие зерен титаномагнетита (дробленая руда)
Table 3. Liberation of grains of titanomagnetite (crushed ore)

Класс крупности, мм	Титаномагнетит свободный, %
+1,6	60
-1,6+1,0	65
-1,0+0,63	70
-0,63+0,5	75
-0,5+0,315	80
-0,315+0,2	85
-0,2+0,1	95
-0,1	98

Анализ результатов показал эффективность процесса. Выход магнитной фракции составил более 17 %, при содержании 40,4 % Fe_{общ} и извлечении 65 % Fe_{общ} (рис. 2). В классах минус 0,2 мм магнитной фракции содержание Fe_{общ} увеличилось до 52–53 % (рис. 3).

Магнитная сепарация дробленой руды исключает переизмельчение титаномагнетита, так как мелкозернистая вкрапленность перовскита предусматривает более тонкое дальнейшее измельчение, а также сокращает количество рудной массы, поступающей на измельчение в цикле выделения перовскита.

Для получения качественного титаномагнетитового концентрата необходимо измельчить руду перед II стадией сепарации. Дальнейшие исследования состояли в изучении влияния степени измельчения

магнитной фракции I (сепарация дробленой руды) на характеристики получаемого титаномагнетитового концентрата.

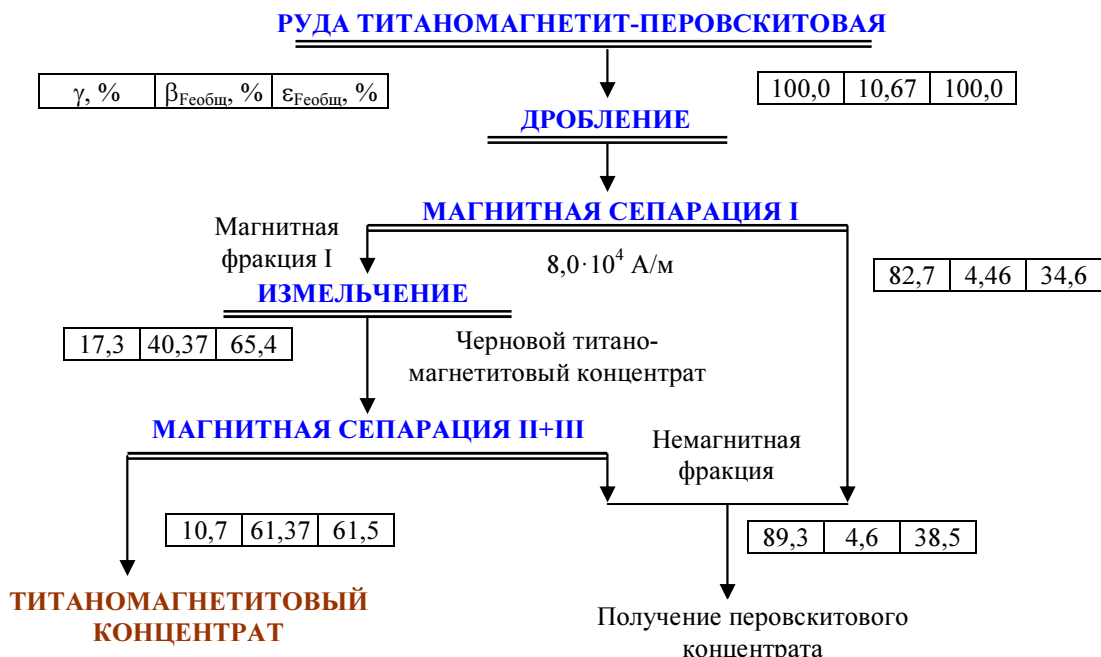


Рис. 2. Схема получения титаномагнетитового концентрата
 Fig. 2. Technological flowsheet for production of titanium-magnetite concentrate

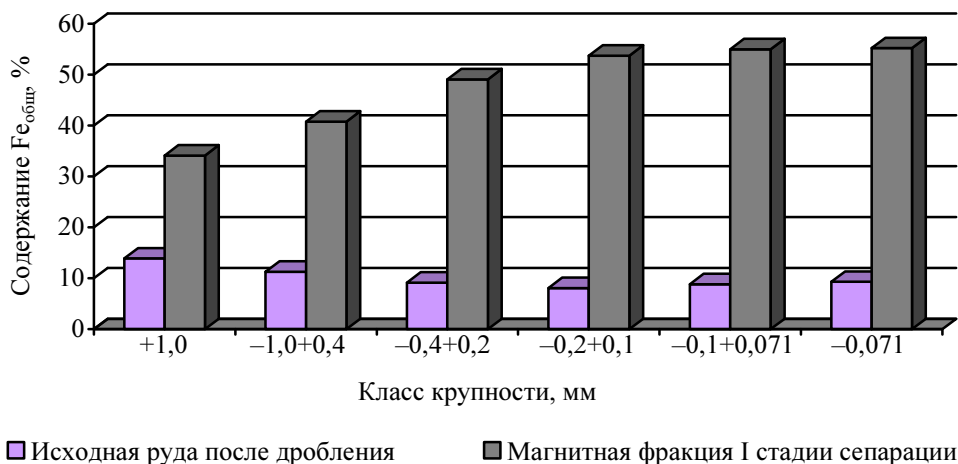


Рис. 3. Содержание Fe_{общ} по классам крупности в дробленой руде и магнитной фракции I стадии сепарации

Fig. 3. The content of the mass fraction of total iron in crushed ore and magnetic fraction of the first stage of separation

Изменение гранулометрического состава магнитной фракции I от времени измельчения (10–20 мин) представлено на рис. 4.

Магнитная сепарация черного титаномагнетитового концентрата дает возможность получить качественный концентрат. Черновой концентрат проходит 2 стадии магнитной сепарации. Напряженность поля магнитной сепарации II составляет $8,0 \cdot 10^4$ А/м (~1200 эрстед), сепарации III – $4,8 \cdot 10^4$ А/м (600 эрстед).

В результате проведения 2 стадий магнитной сепарации получены качественные титаномагнетитовые концентраты различной крупности (рис. 5). Выход концентрата от руды составил 10,9–10,5 % при содержании Fe_{общ} 60,6–62,0 %.

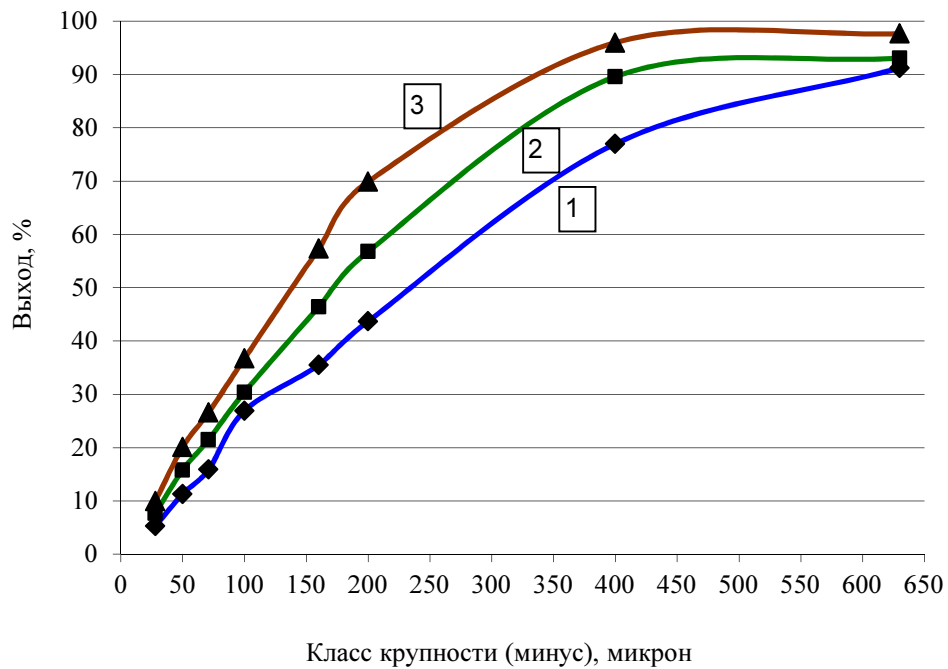


Рис. 4. Динамика изменения гранулометрического состава магнитной фракции I в зависимости от времени измельчения: 1 – 10 мин; 2 – 15 мин; 3 – 20 мин
 Fig. 4. Particle size distribution curve of magnetic fraction I depending on the grinding time: 1 – 10 min; 2 – 15 min; 3 – 20 min

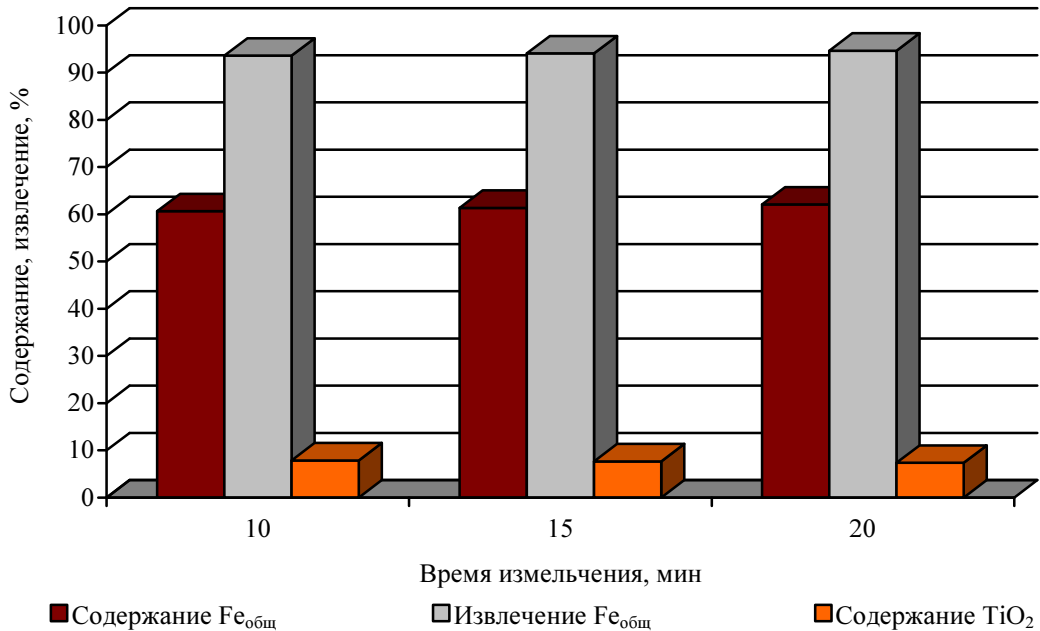


Рис. 5. Влияние времени измельчения магнитной фракции дробленой руды на технологические показатели получения титаномагнетитового концентрата
 Fig. 5. Effect of grinding time of magnetic fraction produced from crushed ore on the technological parameters of titanium-magnetite concentrate production

Гранулометрический состав концентратов в зависимости от времени измельчения магнитной фракции руды приведен в табл. 4.

Таблица 4. Гранулометрический состав титаномагнетитового концентрата
Table 4. Particle size distribution of titanium-magnetite concentrate

Класс крупности, мм	Время измельчения, мин		
	10	15	20
-2,0+0,63	14,1	6,9	3,5
-0,63+0,4	20,5	10,7	3,2
-0,4+0,2	31,7	35,4	32,7
-0,2+0,1	16,6	23,3	30,0
-0,1+0,071	5,7	7,3	10,0
-0,071+0,05	2,1	3,8	4,3
-0,05	9,3	12,6	16,3
Итого	100,0	100,0	100,0

Суммарная немагнитная фракция представлена в основном (82 % от руды) дробленой рудой после проведения I стадии сепарации и примерно 5 % немагнитной фракцией сепарации после измельчения. Содержание класса +0,4 мм составило 46,6 %.

Дробленую немагнитную фракцию руды измельчали. Выполнен анализ изменения гранулометрического состава руды в зависимости от времени измельчения (8–40 мин). Содержание класса +0,2 мм уменьшается с 29 % (8 мин измельчения) до 8,7 % (15 мин), а класса -0,071 мм увеличивается с 24,6 % (8 мин) → 36 % (15 мин) → 57,5 % (30 мин) до 70 % (40 мин измельчения).

Немагнитная фракция представлена оливином, перовскитом, а также незначительно кальцитом. Содержание CO₂ и TiO₂ по классам крупности в измельченной немагнитной фракции руды (15 мин) представлено на рис. 6.

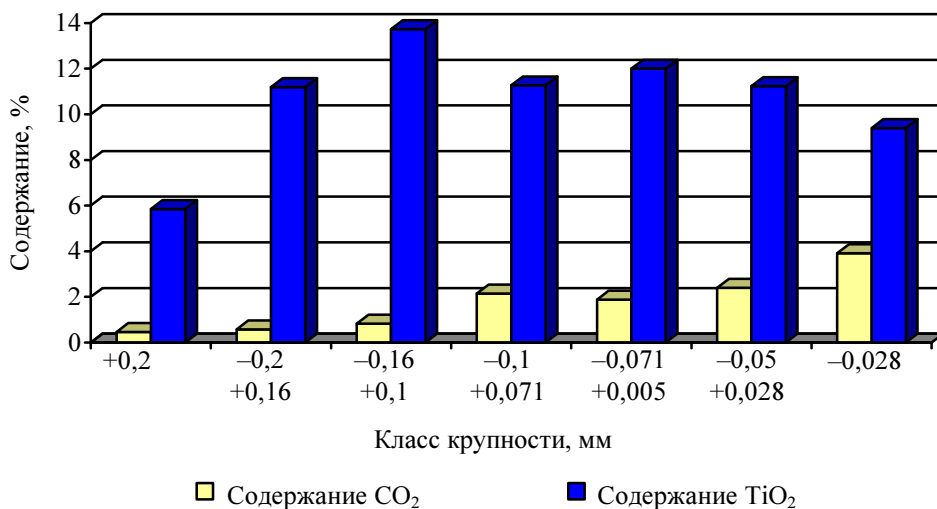


Рис. 6. Распределение CO₂ и TiO₂ по классам крупности в немагнитной фракции (время измельчения 15 мин)

Fig. 6. Distribution of CO₂ and TiO₂ in size classes in non-magnetic fraction (grinding time – 15 minutes)

Титаносодержащий минерал – перовскит (CaTiO₃) – обладает слабо выраженной магнитной восприимчивостью (2,7–13,9×10⁻⁸ эл. магн. ед/г) относительно титаномагнетита 10 000×10⁻⁸ эл. магн. ед/г. Выполнены исследования по получению перовскитового концентрата магнитной сепарацией. Предварительно немагнитную фракцию измельчали до содержания класса -0,071 мм (35–36 %) (класс +0,2 мм – 8–9 %). После проведения 4-х стадий магнитной сепарации (сухой электромагнитный сепаратор) с увеличением напряженности магнитного поля от 5,0·10⁵ до 9,8·10⁵ А/м получен перовскитовый концентрат с содержанием 44,95 % TiO₂ при извлечении 12,7 % TiO₂.

Перовскитовый концентрат с содержанием 48,08 % TiO_2 получен магнитной сепарацией с предварительным обесшламливанием по классу 20 микрон (рис. 7).

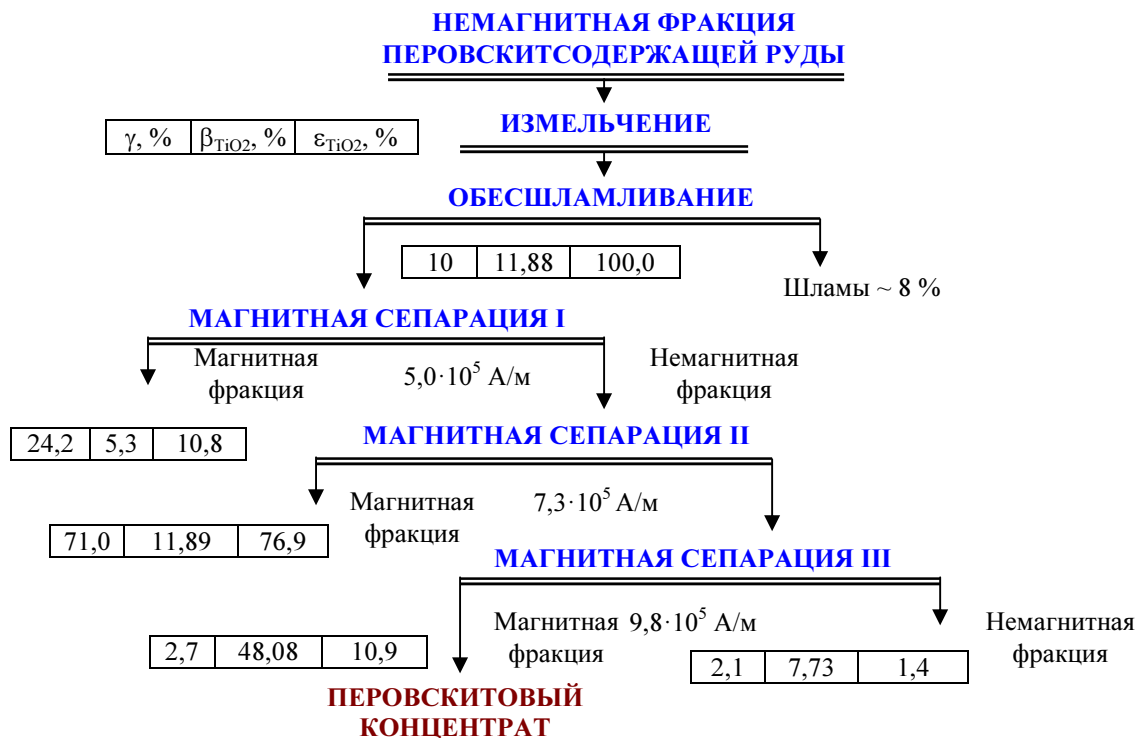


Рис. 7. Магнитная сепарация с предварительным обесшламливанием
 Fig. 7. Magnetic separation with preliminary desliming of non-magnetic fraction

С целью изучения влияния крупности руды на показатели магнитной сепарации проведены исследования по получению перовскитового концентрата из "узких" классов в зависимости от степени измельчения (время измельчения – 10, 15 и 30 мин).

При измельчении 10 мин (класс +0,2 мм, 22 %; класс –0,071 мм, 28 %) из класса –0,1+0,05 мм получен перовскитовый концентрат с содержанием 44,9 % TiO_2 , при извлечении от операции 38,3 %. Из "тонких" классов менее 50 микрон получен продукт с содержанием 32 % TiO_2 .

При измельчении 15 мин (класс +0,2 мм, 9 %; класс –0,071 мм, 36 %) из класса –0,315+0,1 мм и класса –0,1+0,05 мм получены качественные перовскитовые концентраты с содержанием 48–49 % TiO_2 . Суммарный выход концентрата (48,8 % TiO_2) составил 4,8 % от немагнитной фракции руды при извлечении 19,7 % TiO_2 (рис. 8).

С увеличением времени измельчения до 30 мин (класс +0,16 мм – 1,3 %; –0,071 – 25 %) качественное разделение минералов с получением перовскитового концентрата (50 % TiO_2) происходит только из "верхнего" класса –0,2+0,071 мм, общий выход которого составил 4,6 %.

В период освоения магнитно-флотационной технологии переработки перовскитовых руд были изучены их радиационные характеристики. Исследования показали, что данные руды и концентраты, полученные из них, содержат природные радионуклиды рядов урана-238 и тория-232 в количестве 0,003–0,020 мас.% и 0,010–0,120 мас.% соответственно [13; 18]. Показано, что радиоактивность перовскита обусловлена наличием акцессорных минералов (сфен и др.), редкоземельных элементов и структурой перовскита CaTiO_3 , в кристаллической решетке которого атомы титана могут изоморфно замещаться близкими по химическим свойствам элементами [19].

Радиологические исследования перовскитового концентрата, содержащего более 48 % диоксида титана, выполнялись ранее с использованием радиоаналитических методов по аттестованным методикам на радиометрической и спектрометрической аппаратуре [20]. Результаты исследований показали, что эффективная удельная активность $A_{\text{эфф}}$ обогащенного перовскитового концентрата составляет около 5000 Бк/кг. Основными радионуклидами в нем являются U-238 и Th-232, массовая доля которых соответственно равна 0,008 и 0,07 %. Суммарное содержание редкоземельных окислов CeO_2 , Pr_6O_{11} , Nd_2O_3 , Sm_2O_3 находится в выделенном концентрате на уровне 2,95 %. Эффективная удельная активность продуктов обогащения превышает 740 Бк/кг, поэтому они относятся к 4 классу радиоактивности. Наибольший вклад в $A_{\text{эфф}}$ вносит Th-232 (71 %), вклад Ra-226 – 29 %. В связи с повышенным содержанием природных радионуклидов в обогащаемом материале (торийсодержащее сырье, группа радиотоксичности – А) необходим контроль

за их содержанием в конечных технологических продуктах и составление баланса распределения радиоактивности по схеме переработки в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

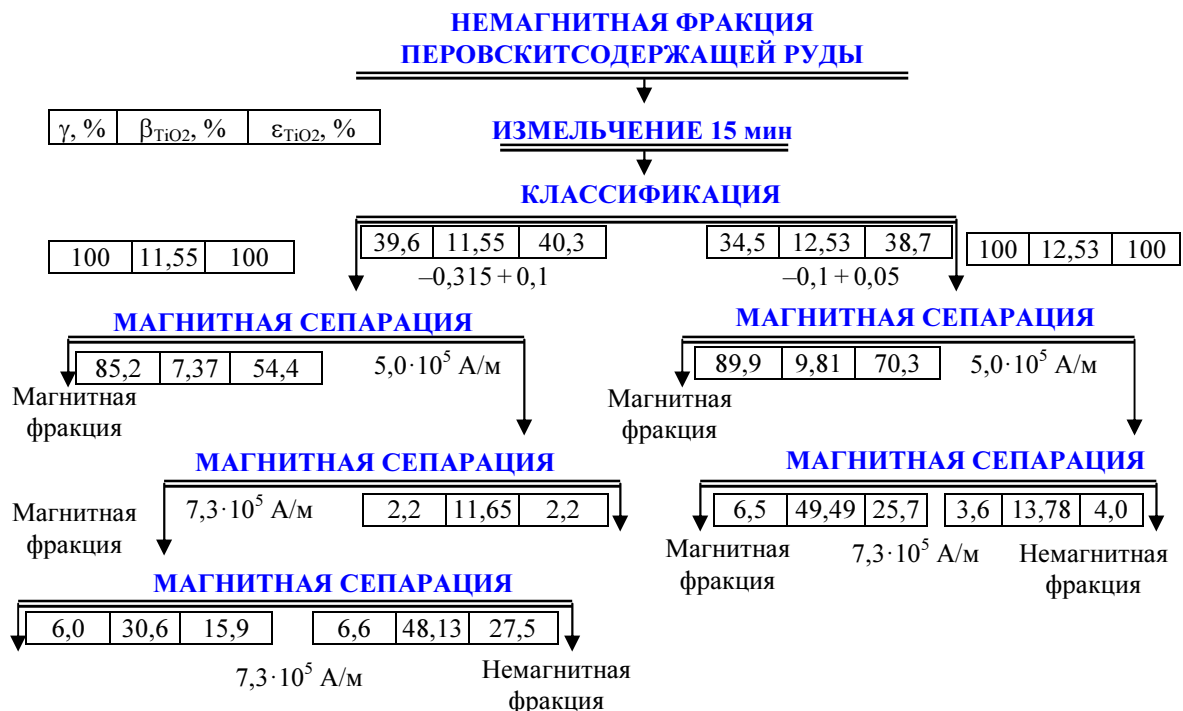


Рис. 8. Магнитная сепарация (измельчение 15 мин)
Fig. 8. Magnetic separation of ore without desliming (grinding time – 15 minutes)

Заключение

На основании изучения минералогических особенностей перовскитовой руды Африкандского месторождения установлена крупность дробленой руды, при которой достигается необходимая степень раскрытия титаномагнетита, и определена последовательность стадий рудоподготовки, включающих в себя дробление и измельчение. Магнитная сепарация дробленой руды позволяет получить черновой титаномагнетитовый концентрат с высокой эффективностью. После измельчения и второй стадии сепарации получены титаномагнетитовые концентраты с различными гранулометрическими характеристиками в зависимости от крупности измельчения. Введение операции рудоподготовки материала способствует созданию оптимальных условий для разделения титаномагнетита и перовскита с использованием магнитного цикла получения концентратов.

Рассмотрены варианты переработки руды магнитной сепарацией на необесшламленном и обесшламленном продукте, а также из узких классов крупности в зависимости от степени ее измельчения. Получены перовскитовые концентраты с содержанием 44–48 % TiO_2 . Наиболее высокие технологические показатели обогащения достигнуты на руде, прошедшей стадию классификации и предварительно измельченной в течение 15 мин.

Проведены радиологические исследования перовскитового концентрата, показавшие его принадлежность к 4 классу радиоактивности из-за повышенного содержания в нем природных радионуклидов, что потребует определенного контроля по их содержанию в продуктах обогащения согласно существующей нормативной документации.

Библиографический список

1. Резниченко В. А., Шабалин Л. И. Титаномагнетиты: месторождения, металлургия, химическая технология / отв. ред. А. И. Манохин. М. : Наука, 1986. 292 с.
2. Борисенко Л. Ф., Делицин Л. М. Перспективы освоения титанового сырья в России // Горная промышленность. 1996. № 4. С. 23–25.
3. Остапенко П. Е. Обогащение железных руд. М. : Недра, 1977. 274 с.
4. Резниченко В. А., Зеленова И. М., Соловьев В. И. Обогащение бедной титаномагнетит-ильменитовой руды // Цветные металлы. 1990. № 5. С. 102–104.
5. Борисенко Л. Ф. Перспективы расширения комплексности использования титаномагнетитовых руд качканарского типа // Горный журнал. 1993. № 9. С. 11–13.

6. Нестерова Н. А., Дробченко Л. А., Зайцев Г. В., Конева С. Т. Влияние магнитных свойств титаномагнетитов на технологию обогащения // Горный журнал. 1980. № 10. С. 49–52.
7. Еремин Н. Я., Стаханов В. В., Войцехович Е. Б. Особенности обогащения качканарских титаномагнетитовых руд // Обогащение руд. 1969. № 5. С. 5–14.
8. Кушпаренко Ю. С., Тигунов Л. П., Иванков С. И. [и др.]. Новая концепция технологии переработки комплексных титаномагнет-ильменитовых руд // Ресурсосберегающие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр : мат. 1-й междунар. конф., Москва, 16–18 сент. 2002 г. М. : Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2002. С. 169–171.
9. Смирнов Л. А., Тигунов Л. П., Масловский П. А. [и др.]. Куранахское ильменит-титаномагнетитовое месторождение // Геологическое строение, комплексная переработка руд : сб. науч. тр. Екатеринбург : УРО РАН, 2004. С. 210–213.
10. Сысолятин С. А. Пути решения проблемы флотации титаномагнетитовых руд // Горный журнал. 1974. № 1. С. 59–61.
11. Найфонов Т. Б., Алексеева Н. А., Ключникова А. И. [и др.]. Усовершенствование технологии обогащения перовскитовых руд // Известия вузов. Цветная металлургия. 1966. № 6. С. 6–11.
12. Найфонов Т. Б. Флотация титановых минералов при обогащении комплексных титаносодержащих руд. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. 165 с.
13. Найфонов Т. Б., Белобородов В. И., Захарова И. Б. Флотационное обогащение комплексных титановых и циркониевых руд. Апатиты : КНЦ РАН, 1994. 152 с.
14. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные методы обогащения. М. : Недра, 1984. 416 с.
15. Мовчан В. П., Вызов В. Ф., Капленко Ю. П., Ломовцев Л. А. Совершенствование технологии сухой магнитной сепарации // Горный журнал. 2001. № 9. С. 62–64.
16. Капленко Ю. П., Ломовцев Л. А., Ганжа Р. П. [и др.]. Опыт повышения эффективности сухого магнитного обогащения железных руд // Горный журнал. 2000. № 10. С. 38–40.
17. Мясников Н. Ф., Пономарев М. А., Галевская Т. Н., Кальвасинский А. Ф. [и др.]. Полупромышленные испытания обогащения бедных титаномагнетитовых руд на магнитных сепараторах с шариковой рабочей зоной // Магнитная сепарация тонковкрапленных окисленных руд : [сб. ст.] / [Терентьев (отв. ред.)]. М. : Недра, 1971. С. 32–37.
18. Мельник Н. А. Распределение радиоактивности при гидрометаллургической переработке перовскитового концентрата различными методами // Цветная металлургия. 2003. № 3. С. 20–26.
19. Мельник Н. А. Радиогеоэкологические аспекты безопасности использования горнопромышленных отходов Кольского региона в производстве строительных материалов = Radiogeoeological aspects of safe handling of Kola mining wastes in the production of building materials. Апатиты : КНЦ РАН, 2003. 114 с.
20. Мельник Н. А., Хохуля М. С. Распределение природных радионуклидов при гравитационном дообогащении перовскитового концентрата Африкандского месторождения // 2-я Российская конф. с междунар. участием "Новые подходы в химической технологии минерального сырья. Применение экстракции и сорбции" : мат. конф., Санкт-Петербург, 03–06 июня 2013. СПб., 2013. Ч. 1. С. 99–101.

References

1. Reznichenko V. A., Shabalin L. I. Titanomagnetite: mestorozhdeniya, metallurgiya, khimicheskaya tekhnologiya [Titanium-magnetite: deposits, metallurgy, chemical technology] / otv. red. A. I. Manokhin. M. : Nauka, 1986. 292 p.
2. Borisenko L. F., Delitsin L. M. Perspektivy osvoyeniya titanovogo syr'ya v Rossii [The prospects of development of titanic raw materials in Russia] // Gornaya promyshlennost'. 1996. N 4. P. 23–25.
3. Ostapenko P. Ye. Obogashcheniye zheleznykh rud [Benefication of iron ores]. M. : Nedra, 1977. 274 p.
4. Reznichenko V. A., Zelenova I. M., Solov'yev V. I. Obogashcheniye bednoy titanomagnetit-il'menitovoy rudy [Benefication of poor titanium-magnetite-ilmenite ore] // Tsvetnyye metally. 1990. N 5. P. 102–104.
5. Borisenko L. F. Perspektivy rasshireniya kompleksnosti ispol'zovaniya titanomagnetitovykh rud kachkanarskogo tipa [Prospects of expansion of complex use of the Kachkanar titanium-magnetite ores] // Gornyy zhurnal. 1993. N 9. P. 11–13.
6. Nesterova N. A., Drobchenko L. A., Zaytsev G. V., Koneva S. T. Vliyaniye magnitnykh svoystv titanomagnetitov na tekhnologiyu obogashcheniya [Influence of magnetic properties of titanium-magnetite on beneficiation technologies] // Gornyy zhurnal. 1980. N 10. P. 49–52.
7. Yeremin N. Ya., Stakhanov V. V., Voytsekhovich Ye. B. Osobennosti obogashcheniya kachkanarskikh titano-magnetitovykh rud [Features of the Kachkanar titanium-magnetite ores] // Obogashcheniye rud. 1969. N 5. P. 5–14.
8. Kushparenko Yu. S., Tigunov L. P., Ivankov S. I. [i dr.]. Novaya kontseptsiya tekhnologii pererabotki kompleksnykh titanomagnet-il'menitovykh rud [A new concept of a processing technology for complex titanium-magnetite-ilmenite ores] // Resursosberegayushchiye, malootkhodnyye i prirodookhrannyye tekhnologii osvoyeniya

nedr : mat. 1-y mezhdunar. konf., Moskva, 16–18 sent. 2002 g. M. : Izd-vo Ros. un-ta druzhby narodov, 2002. P. 169–171.

9. Smirnov L. A., Tiginov L. P., Maslovskiy P. A. [i dr.]. Kuranakhskeye il'menit-titanomagnetitovoye mestorozhdeniye [The Kuranakhskeye ilmenite-titanium-magnetite deposit] // Geologicheskoye stroeniye, kompleksnaya pererabotka rud : sb. nauch. tr. Yekaterinburg : URO RAN, 2004. P. 210–213.

10. Sysolyatin S. A. Puti resheniya problemy flotatsii titanomagnetitovykh rud [Ways to solve a problem of titanium-magnetite ore flotation] // Gornyy zhurnal. 1974. N 1. P. 59–61.

11. Nayfonov T. B., Alekseyeva N. A., Klyuchnikova A. I. [i dr.]. Usovershenstvovaniye tekhnologii obogashcheniya perovskitovykh rud [Enhancement of the perovskite ore processing technology] // Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. 1966. N 6. P. 6–11.

12. Nayfonov T. B. Flotatsiya titanovykh mineralov pri obogashchenii kompleksnykh titanosoderzhashchikh rud [Flotation of titanite minerals during complex titanium-containing ore processing]. L. : Nauka. Leningr. otdniye, 1979. 165 p.

13. Nayfonov T. B., Beloborodov V. I., Zakharova I. B. Flotatsionnoye obogashcheniye kompleksnykh titanovykh i tsirkoniyevykh rud [Flotation concentration of complex titanium and zirconium ores]. Apatity : KNTS RAN, 1994. 152 p.

14. Karmazin V. I., Karmazin V. V. Magnitnyye metody obogashcheniya [Magnetic beneficiation methods]. M. : Nedra, 1984. 416 p.

15. Movchan V. P., Vyzov V. F., Kaplenko Yu. P., Lomovtsev L. A. Sovershenstvovaniye tekhnologii sukhoy magnitnoy separatsii [Enhancement of dry magnetic separation technology] // Gornyy zhurnal. 2001. N 9. P. 62–64.

16. Kaplenko Yu. P., Lomovtsev L. A., Ganzha R. P. [i dr.]. Opyt povysheniya effektivnosti sukhogo magnitnogo obogashcheniya zheleznykh rud [Experience of increase in efficiency of dry magnetic concentration of iron ores] // Gornyy zhurnal. 2000. N 10. P. 38–40.

17. Myasnikov N. F., Ponomarev M. A., Galevskaya T. N., Kal'vasinskiy A. F. [i dr.]. Polupromyshlennyye ispytaniya obogashcheniya bednykh titanomagnetitovykh rud na magnitnykh separatorakh s sharikovoy rabochey zonoy [Pilot testing of poor titanium-magnetite ores beneficiation on magnetic separators with a ball working zone] // Magnitnaya separatsiya tonkovkraplennykh oksilennykh rud : [sb. st.] / [Terent'yev (otv. red.)]. M. : Nedra, 1971. P. 32–37.

18. Mel'nik N. A. Raspredeleniye radioaktivnosti pri gidrometallurgicheskoy pererabotke perovskitovogo kontsentrata razlichnymi metodami [The distribution of radioactivity during hydrometallurgical processing of perovskite concentrate by various methods] // Tsvetnaya metallurgiya. 2003. N 3. P. 20–26.

19. Mel'nik N. A. Radiogeokologicheskiye aspekty bezopasnosti ispol'zovaniya gornopromyshlennykh otkhodov Kol'skogo regiona v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Radiogeocological aspects of safe handling of Kola mining wastes in the production of building materials]. Apatity : KNTS RAN, 2003. 114 p.

20. Mel'nik N. A., Khokhulya M. S. Raspredeleniye prirodnykh radionuklidov pri gravitatsionnom doobogashchenii perovskitovogo kontsentrata Afrikandskogo mestorozhdeniya [Distribution of natural radionuclides during gravity processing of perovskite concentrate (the Africanda deposit)] // 2-ya Rossiyskaya konf. s mezhdunar. uchastiyem "Novyye podkhody v khimicheskoy tekhnologii mineral'nogo syr'ya. Primeneniye ekstraktsii i sorbtsii" : mat. konf., Sankt-Peterburg, 03–06 iyunya 2013. SPb., 2013. Ch. 1. P. 99–101.

Сведения об авторах

Андронов Георгий Павлович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: andronov@goi.kolasc.net.ru

Andronov G. P. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: andronov@goi.kolasc.net.ru

Филимонова Нина Михайловна – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, вед. технолог; e-mail: filimonova@goi.kolasc.net.ru

Filimonova N. M. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Leading Technologist; e-mail: filimonova@goi.kolasc.net.ru

Хохуля Михаил Степанович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: mike@goi.kolasc.net.ru

Khokhulya M. S. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: mike@goi.kolasc.net.ru

G. P. Andronov, N. M. Filimonova, M. S. Khokhulya

Magnetic separation of titanium-containing minerals

The studies have been carried out on the Afrikanda (the Murmansk region) titanium-containing minerals segregation by magnetic separation. The technological scheme of ore preparation and further enrichment is developed taking into account the dissemination and disclosure of a specific mineral for obtaining both titanium-magnetite and perovskite concentrate. Mineralogical characteristics of the crushed ore of the deposit have shown a high degree of titanium-magnetite disclosure. The first stage of magnetic separation of crushed ore is an effective method for isolating titanium-magnetite. The magnetic separation of crushed ore excludes the re-grinding of titanium-magnetite, since fine-grained perovskite perforation provides for finer further grinding, and also reduces the amount of ore mass entering the grinding process in the perovskite release cycle. The nonmagnetic fraction is represented by olivine, perovskite and also slightly calcite. The analysis of the change in the granulometric composition of the ore as a function of the grinding time has been performed. At various fineness of grinding by magnetic separation, conditioned titanium-magnetite concentrates have been obtained. The yield of the concentrate from the ore is 10.9–10.5 %, with $Fe_{\text{о6и}}$ content equal to 60.6–62.0 %. Perovskite has a weakly expressed magnetic susceptibility with respect to titanium-magnetite. Studies have been carried out on the preparation of perovskite concentrate by magnetic separation. The influence of the degree of grinding of the separation feed, desliming and preliminary classification on the separation of perovskite by magnetic separation has been shown. Perovskite concentrates with the content of 44–46 % TiO_2 have been obtained. The indexes of enrichment of titanium-magnetite-perovskite ore by magnetic separation have been presented to obtain titanium-magnetite and perovskite concentrate. An important role in obtaining quality concentrates is associated with the preliminary preparation of ore – grinding, desliming and classifying.

Key words: magnetic separation, grinding, titanium-magnetite, perovskite concentrate

Article info: received 02.03.2017; received in revised 07.03.2019