

Применение магнитно-гравитационной сепарации для получения титаномагнетитовых концентратов из руд различных месторождений России

А.С. Опалев ✉, А.В. Фомин, С.А. Алексеева, Р.В. Калюжная

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ a.opalev@ksc.ru

Резюме: В статье рассматриваются результаты технологических исследований по получению титаномагнетитовых концентратов из руд месторождений Кольского полуострова, Урала и Сибири. Изучены особенности вещественного состава исходного минерального сырья, определены оптимальные параметры рудоподготовительных операций, процессов магнитной и магнитно-гравитационной сепарации. В результате проведенных исследований предложены технологические решения, обеспечивающие выделение качественных титаномагнетитовых концентратов из руд различных месторождений. Из апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений, характеризующихся низким содержанием титаномагнетита – на уровне 0,4%, получен концентрат с массовой долей железа общего – 59,6%, диоксида титана – 13,0% и сквозным извлечением титаномагнетита более 90%. Для перовскит-титаномагнетитовых руд Кольского полуострова, содержащих 14,4% железа общего, предложена технология получения титаномагнетитового концентрата с содержанием железа 63% и диоксида титана около 7% при извлечении железа общего – 63,7% от исходной руды. На примере титаномагнетитового концентрата, полученного из руд Уральских месторождений, показана возможность повышения его качества применением магнитно-гравитационной сепарации со значений на уровне 61,6–61,7% до 63,9–64,8% по железу общему при высоком операционном извлечении ценного компонента. Для комплексных титаномагнетит-перовскит-титанит-apatитовых руд Сибири предложены технологические решения по выделению титаномагнетитового концентрата, характеризующегося содержанием железа общего 57,4% при его извлечении 56,5%, содержание диоксида титана в концентрате составило 11,8%.

Ключевые слова: титаномагнетитовые руды, титаномагнетит, железо, титан, измельчение руды, магнитная сепарация, магнитно-гравитационная сепарация, технология обогащения

Для цитирования: Опалев А.С., Фомин А.В., Алексеева С.А., Калюжная Р.В. Применение магнитно-гравитационной сепарации для получения титаномагнетитовых концентратов из руд различных месторождений России. *Горная промышленность*. 2026;(1):89–96. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-89-96>

Application of magnetic-and-gravity separation in production of titanomagnetite concentrates from ores of various Russian deposits

A.S. Opalev ✉, A.V. Fomin, S.A. Alekseeva, R.V. Kaliuzhnaia

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ a.opalev@ksc.ru

Abstract: The article discusses the results of technological studies on the production of titanomagnetite concentrates from ores of the Kola Peninsula, the Urals, and Siberia. Specific features of the material composition of the mineral raw materials were studied, and the optimal parameters for ore preparation operations, magnetic and magnetic-and-gravity separation were determined. As a result of the research, technological solutions have been proposed to extract high-quality titanomagnetite concentrates from ores of various deposits. A concentrate with the weight fractions of 59.6% of total iron and 13.0% of titanium dioxide with the overall titanomagnetite recovery of over 90% was obtained from the apatite-nepheline ores of the Khibiny deposits characterized by a low titanomagnetite content of about 0.4%. A technology to produce a titanomagnetite concentrate with the iron content of 63% and titanium dioxide content of about 7%, with the total iron recovery of 63.7% from the source ore has been proposed for the perovskite-titanomagnetite ores of the Kola Peninsula containing 14.4% of total iron. Using titanomagnetite concentrate obtained from the ores of the Ural deposits as an example, the possibility of improving its quality through magnetic-and-gravity separation was demonstrated, increasing the total iron content from 61.6–61.7% to 63.9–64.8%, while maintaining a high operational recovery of the valuable component. Technological solutions have been proposed for complex titanomagnetite-perovskite-titanite-apatite ores of Siberia to produce a titanomagnetite concentrate characterized by the total iron content of 57.4% and its recovery of 56.5% with the titanium dioxide content in the concentrate being 11.8%.

Keywords: titanomagnetite ore, titanomagnetite, iron, titanium, ore reduction, magnetic separation, magnetic-and-gravity separation, separation technology

For citation: Opalev A.S., Fomin A.V., Alekseeva S.A., Kaliuzhnaia R.V. Application of magnetic-and-gravity separation in production of titanomagnetite concentrates from ores of various Russian deposits. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):89–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-89-96>

Введение

ВТитаномагнетитовые руды – комплексное нетрадиционное сырье, важный промышленный источник железа, ванадия и титана. С ними связано 6,5% подтвержденных запасов железных руд, более 90% запасов пентоксида ванадия и около 60% запасов диоксида титана.

Занимая одно из первых мест в мире по запасам титано-содержащего сырья (15% мировых), Россия почти не использует его для производства ценнейших продуктов – металлического титана и его диоксида. По состоянию на 1 января 2021 г. балансовые запасы составили 606,9 млн т TiO₂, они заключены в 18 коренных (97% запасов) и 15 россыпных месторождениях, ещё два коренных и два россыпных содержат только забалансовые запасы [1].

В России, кроме собственно титаномагнетитовых месторождений, аналогичных мировому уровню, есть и другие, уникальные в геологогенетическом отношении титаномагнетитсодержащие руды, из которых можно получать концентраты титаномагнетита попутно, к ним можно отнести руды Хибинских апатит-нефелиновых месторождений [2–5]. В Кольском научном центре на протяжении многих лет проводятся исследования, направленные на получение и химическую переработку титаномагнетитовых концентратов [6]. Однако сложность вещественного состава руд и снижение их качества требуют оптимизации методов и технологии обогащения. Тенденция последних лет – снижение массовой доли титаномагнетита в добываемых рудах с 1–1,2% [7] до значений на уровне 0,4–0,5% [8]. Данное обстоятельство требует проведения исследований, направленных на разработку и оптимизацию технологических схем получения титаномагнетитового концентрата требуемого качества из хвостов апатитовой флотации с низким содержанием ценного минерала.

Новым источником титана могут стать перовскит-титаномагнетитовые руды, связанные с щелочно-ультраосновными породами, проявления которых выявлены в Мурманской и Иркутской областях и в Красноярском крае. Наиболее крупным и наиболее изученным из них является Африкандовское месторождение перовскит-титаномагнетитовых руд в Мурманской области [9].

Несмотря на высокую ценность рассматриваемого минерального сырья процесс извлечения полезных компонентов из этих руд сталкивается с рядом сложностей, связанных с их химическим и минералогическим составом (от содержания диоксида титана и вредных примесей), а также низкой эффективностью традиционных методов обогащения. Поэтому постоянно продолжается поиск новых решений по переработке руд, концентратов и минералов титаномагнетитовых месторождений с целью наиболее рационального использования всех компонентов сырья [10].

Нельзя не отметить важность развития методов переработки малотитанистых руд Урала. Несмотря на низкие содержания вредных примесей в получаемых из данного типа руд концентратах и возможность их доменной плавки [11] дальнейшее повышение качества выделяемого концентрата будет способствовать снижению стоимости их

металлургической переработки и повышению конкурентоспособности конечной продукции как на внутреннем, так и на внешних рынках.

Актуальность проблемы переработки титаномагнетитовых руд также подтверждается зарубежными исследованиями, где рассматриваются вопросы рудоподготовки [12], магнитной сепарации [13], флотации [14] и химической переработки концентратов [15–17].

Таким образом, исследования современных методов получения титаномагнетитового концентрата являются актуальной задачей. В настоящей работе авторы делают акцент на оценке перспектив применения магнитно-гравитационной сепарации (МГС) в цикле получения титаномагнетитового концентрата. Данный метод уже нашел применение на ряде горно-обогатительных предприятий России и ближнего зарубежья, перерабатывающих магнетитовые руды [18], поэтому логично было расширить сферу его применения и на титаномагнетитовые руды.

Объекты исследований

Руды Хибинских месторождений

Исследования по получению титаномагнетитового концентрата из руд Хибинских месторождений проводились на крупнообъемной пробе апатит-нефелиновой руды, отобранной со склада среднедробленной руды. В табл. 1 приведены результаты изучения характеристик вещественного состава исходного материала.

Таблица 1
Результаты минерального и химического анализов пробы апатит-нефелиновой руды

Table 1
Results of mineral and chemical analyses of apatite-nepheline ore samples

Минерал	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Фтороapatит	19,71	P ₂ O ₅	8,12
Нефелин	39,25		
Пироксены	5,12		
Амфиболы	2,33	Al ₂ O ₃	17,14
Полевые шпаты	9,36		
Канкринит	1,27		
Содалит	0,72	TiO ₂	2,60
Цеолиты	5,78		
Титанит	3,26		
Ильменит	0,31	Fe _{общ}	4,99
Титаномагнетит	0,41		
Лампрофиллит	1,48		
Слюды	5,59	K ₂ O	5,19
Хлориты	0,61		
Итого гидрослюды с хлоритами	2,93		
Глинистые минералы	3,79	Na ₂ O	7,46
Гидроксиды Fe	1,00		
Итого	100		

Как следует из представленных данных, массовая доля титаномагнетита находится на довольно низком уровне и составляет 0,41%, что представляет определенные сложности для выделения качественного титаномагнетитового концентрата из исходного минерального сырья. Содержание железа общего и диоксида титана в пробе составило 4,99% и 2,6% соответственно, основными минералами-концентраторами данных компонентов выступают пироксены и титанит.

Руды Африкандовского месторождения

Исследования по разработке технологии получения титаномагнетитового концентрата из руд Африкандовского месторождения выполнялись на представительной пробе, отобранной на месторождении.

Основные ценные минералы в исходном материале представлены перовскитом (12,3%), титаномагнетитом (8,1%), титанитом (3,6%), ильменитом (1,8%), а также редкометалльными минералами, доля которых составила 1,8%. Большая часть породных минералов принадлежат к группе пироксенов (22,6%) и амфиболов (15,5%). В целом руда характеризуется довольно обширным составом, насчитывающим 27 минеральных фаз.

Содержание железа общего в пробе составило 14,4%, диоксида титана – 9,4%.

Титаномагнетит в рудах данного месторождения относится к среднетитанистой разновидности, в нем содержится 60–63% Fe_{общ}, 6–9% TiO₂ и 0,1% V₂O₅. Он наблюдается в пробе как в виде самостоятельных зёрен размером от ед. мкм до 6 мм, так и в виде характерных плотных сростаний с другими минералами, в т.ч. перовскитом.

Изучение измельчаемости руды показало, что при измельчении до крупности –0,2 мм в свободном состоянии находится около 95% минерала, а наибольшая степень раскрытия титаномагнетита наблюдается в классах менее 0,1 мм.

Титаномагнетитовый концентрат, полученный из руд Уральских месторождений

Исследования по дообогащению титаномагнетитового концентрата, выделенного из малотитанистых руд Урала, выполнялись на примере двух проб концентратов. Результаты изучения их гранулометрического состава с определением массовой доли железа общего и диоксида титана по классам крупности приведены на рис. 1.

Содержания железа общего в пробах составляет 61,6–61,7%, диоксида титана – 3,0–3,1%. Определенное различие в пробах прослеживается в гранулометрическом составе

– так, для пробы №1 выход класса –0,04 мм находится на уровне 65%, в то время как для пробы №2 данный показатель составил 51%. Основная масса железа и титана концентрируется во фракции –0,071 мм.

Комплексные руды Сибири

Технологические исследования по разработке технологии получения титаномагнетитового концентрата проводились на пробе титаномагнетит-перовскит-титанит-апатитовых руд одного из месторождений Сибири. Проба характеризуется следующими содержаниями ценных компонентов: TiO₂ – 9,3%; Fe_{общ} – 13,9%; P₂O₅ – 2,5%.

По данным рентгенометрического фазового анализа основными минералами-концентраторами титана в пробе являются перовскит (9,17%), титанит (4,8%), ильменит (1,59%) и рутил (0,84%). На долю апатита приходится 9,12%. Пустая порода представлена преимущественно амфиболами и пироксенами, содержащимися в количестве 34,2% и 14,5% соответственно.

Титаномагнетит является концентратором и железа, и титана, его содержание составляет 7,16%. Крупность зерен титаномагнетита составляет от ед. мкм до 1 мм. Форма выделений титаномагнетита ксеноморфная, реже изометричная. В составе минерала среднее содержание железа составляет около 60%, диоксида титана – 10–12%.

Свободные зерна титаномагнетита начинают встречаться при крупности –0,63+0,4 мм, но раскрытие более 80% свободных зерен достигается только при крупности –0,1 мм.

Методы исследований

Минеральный состав определялся с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра D2 Phaser производства компании Bruker AXS GmbH путем сравнения с дифрактограммами стандартов ICDD PDF2, гранулометрический состав – на просеивающей машине Retsch AS200 с набором стандартизированных сит, химический анализ выполнен в химико-аналитической лаборатории Горного института, степень раскрытия ценных минералов определялась оптическим методом с использованием рудно-петрографического микроскопа Leica DM2500P.

Технологические эксперименты по магнитной сепарации материала выполнялись с использованием лабораторного барабанного сепаратора МБС-Л (Эрга), по магнитно-гравитационной сепарации – с использованием лабораторного магнитно-гравитационного сепаратора, разработанного в Горном институте. Также в ходе исследований и опытно-промышленных испытаний была задействована опытно-промышленная установка Горного института [19].

Результаты

Руды Хибинских месторождений

С целью наработки черного титаномагнетитового концентрата из апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений были проведены опытно-промышленные испытания. Дробленая руда в замкнутом цикле измельчалась до крупности –0,315 мм при содержании 24% класса +0,16 мм и 49,9% класса –0,071 мм и затем подавалась в апатитовый цикл, который проводился в усеченном виде, с

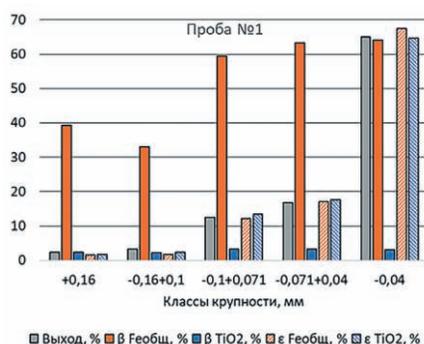


Рис. 1
Характеристика вещественного состава проб титаномагнетитовых концентратов

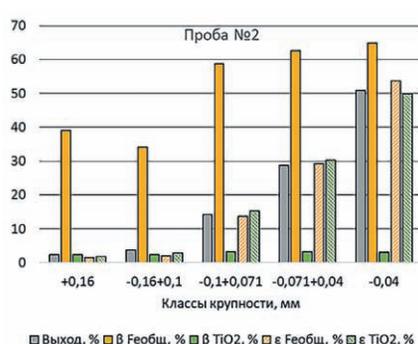


Fig. 1
Characteristics of the material composition of titanomagnetite concentrate samples

Таблица 2
Качественно-количественные показатели наработки черного титаномагнетитового концентрата из хвостов апатитовой флотации

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Fe _{общ}	TiO ₂	Fe _{общ}	TiO ₂
м.ф. ММС	2,57	22,65	5,94	11,67	5,87
н.ф. ММС	76,53	5,265	2,586	80,75	76,12
Апатитовый продукт	20,90	1,81	2,24	7,58	18,01
Исходная руда	100,0	4,99	2,60	100,0	100,0

Table 2
Qualitative and quantitative indicators of rough titanomagnetite concentrate produced from apatite flotation tailings

Таблица 3
Результаты сравнительных опытов по перечистке доизмельченного черного титаномагнетитового концентрата с использованием различных методов

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Fe _{общ}	TiO ₂	Fe _{общ}	TiO ₂
ММС					
Концентрат	33,34	55,82	12,08	82,51	69,04
Хвосты	66,66	5,92	2,71	17,49	30,96
Итого	100,0	22,56	5,83	100,0	100,0
МГС					
Концентрат	26,88	58,86	12,3	69,16	56,79
Хвосты	73,12	9,65	3,44	30,84	43,21
Итого	100,0	22,88	5,82	100,0	100,0

Table 3
Results of comparative tests on re-cleaning of finely ground titanomagnetite concentrate using various methods

проведением основной, контрольной флотаций и одной перечисточной операцией, камерный продукт которой возвращался в голову процесса. Реагентный режим апатитовой флотации соответствовал режиму, применяемому на действующем производстве. Хвосты контрольной апатитовой флотации поступали на мокрую магнитную сепарацию с использованием барабанного магнитного сепаратора. Полученная магнитная фракция представляет собой черновой титаномагнетитовый концентрат, полученный по технологии, аналогичной технологии переработки руд на действующем производстве. Результаты наработки черного титаномагнетитового концентрата из хвостов апатитовой флотации приведены в табл. 2. Выход концентрата составил 2,6% от исходной руды, содержание железа общего – 22,7%, диоксида титана 5,9%. Извлечение данных компонентов находится на уровне 11,7% и 5,9% от исходной руды.

Номинальная крупность d₉₅ черного концентрата составила 0,27 мм, основная часть (61%) минеральных частиц представлена зернами крупностью менее 0,071 мм, где распределено 45% железа общего и 43% диоксида титана. С повышением крупности материала происходит увеличение массовой доли рассматриваемых компонентов. В классе крупности +0,16 мм содержание Fe_{общ} и TiO₂ составляет 43,9% и 11,7% соответственно при их распределении в данную фракцию на уровне 38–39%.

На начальном этапе исследований по дообогащению черного титаномагнетитового концентрата была оценена возможность доводки полученного материала перечисткой на барабанном магнитном сепараторе при напряженности поля 1300 Э. Было достигнуто качество концентрата по Fe_{общ} на уровне 53% при операционном извлечении 87%. Массовая доля TiO₂ в магнитной фракции составила 12%.

С целью повышения качественно-количественных показателей получения титаномагнетитового концентрата была оценена возможность применения доизмельчения

чернового концентрата для повышения степени раскрытия ценного минерала. Измельчение проводилось в шаровой мельнице до крупности 81% класса –0,04 мм. Измельченный материал поступал на дообогащение с использованием мокрой магнитной сепарации (ММС) при напряженности поля 1300 Э. Также оценена возможность использования магнитно-гравитационной сепарации (МГС). Результаты сравнительных опытов по сепарации доизмельченного материала приведены в табл. 3.

Доизмельчение черного концентрата позволило повысить его качество до 55,8% Fe_{общ}, используя ММС, в случае применения МГС содержание железа увеличивается до значений на уровне 58,9% при этом несколько снижается извлечение ценного компонента.

На основании полученных данных с целью получения высококачественного титаномагнетитового концентрата дальнейшие технологические исследования проводились с использованием доизмельчения и МГС и заключались в основном в оптимизации режимов рудоподготовки и обогащения. По результатам экспериментов обоснованы оптимальные значения скорости восходящего потока 0,8 см/с и напряженности поля сепаратора 70 Э, гранулометрический состав питания МГС, который характеризовался выходом класса –0,04 мм на уровне 53% и –0,071 мм – 72%, что в итоге позволило повысить качество концентрата на 0,7% по железу общему.

В результате проведенных научно-исследовательских работ предложена технологическая схема (рис. 2) получения титаномагнетитового концентрата из хвостов апатитовой флотации, получаемых при переработке руд Хибинских месторождений. Достигнуто содержание железа общего в концентрате 59,6%, диоксида титана – 13,0%. Извлечение Fe_{общ} в концентрат составило 9%, а TiO₂ – 3,8% от исходной руды. Низкие показатели по извлечению ценных компонентов объясняются тем, что основными минералами-концентраторами железа в рудах выступают пироксены, а титана – титанит. Оценивая извлечение ти-

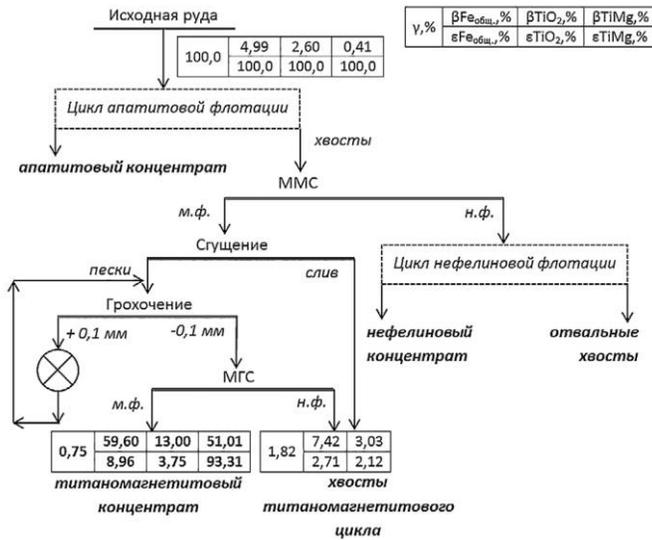


Рис. 2
Схема получения титаномагнетитового концентрата из апатит-нефелиновых руд

Fig. 2
A flow chart showing production of titanomagnetite concentrate from apatite-nepheline ores

титаномагнетита в получаемый концентрат, можно констатировать, что оно находится на уровне 93%.

Руды Африкандовского месторождения

Разработка технологии получения титаномагнетитового концентрата из руд Африкандовского месторождения проводилась с учетом необходимости получения перовскитового концентрата. На основании результатов минералогических исследований по оценке степени раскрытия ценных минералов и исследования кинетики измельчения исходной руды обоснованы параметры ее рудоподготовки: шаровое измельчение до крупности 32–36% класса –0,071 мм с контрольным грохочением по зерну 0,2 мм.

Измельченная руда поступала на стадию магнитной сепарации с использованием барабанного сепаратора при напряженности поля 1300 Э, немагнитная фракция которой является питанием перовскитового цикла, а магнитная – черновым титаномагнетитовым концентратом (рис. 3). Был выделен черновой титаномагнетитовый концентрат, характеризующийся содержанием железа общего 56% и диоксида титана 7,5%. Дообогащение черного концентрата проводилось по двум альтернативным вариантам: с использованием магнитной сепарации и

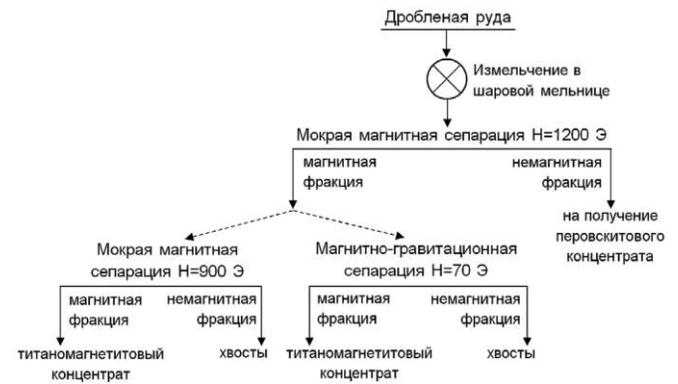


Рис. 3
Схема получения титаномагнетитового концентрата с применением на доводке ММС и МГС из руд Африкандовского месторождения

Fig. 3
A flow chart showing production of titanomagnetite concentrate using wet magnetic separation and magnetic-and-gravity separation when refining ores from the Afrikanda deposit

магнитно-гравитационной сепарации. Качественно-количественные показатели титаномагнетитового цикла переработки руд Африкандовского месторождения представлены в табл. 4.

В случае использования мокрой магнитной сепарации на второй стадии обогащения при напряженности поля 900 Э был выделен титаномагнетитовый концентрат с содержанием $Fe_{общ}$ – 61,62% и TiO_2 – 7,35%. Сквозное извлечение $Fe_{общ}$ в магнитную фракцию составило 65%. В случае применения магнитно-гравитационной сепарации на доводочных операциях можно ожидать повышения качества титаномагнетитового концентрата до 63% $Fe_{общ}$ при небольшом снижении сквозного извлечения железа до 63,7%.

Титаномагнетитовый концентрат, полученный из руд Уральских месторождений

На примере двух проб титаномагнетитовых концентратов была выполнена оценка возможности повышения качества данного материала методом магнитно-гравитационной сепарации. В ходе опытов варьировались такие параметры, как скорость восходящего потока и напряженность поля. Полученные результаты представлены на рис. 4 в виде гистограмм.

Таблица 4
Показатели получения титаномагнетитового концентрата из руд Африкандовского месторождения

Table 4
Indicators of titanomagnetite concentrate production from the ores of the Afrikanda deposit

Продукты	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		$Fe_{общ}$	TiO_2	$Fe_{общ}$	TiO_2
Основная магнитная сепарация					
Магнитная фракция ММС-1	16,89	56,41	7,46	65,98	13,39
Немагнитная фракция ММС-1	83,11	5,91	9,81	34,02	86,61
Исходная руда	100,0	14,44	9,41	100,0	100,0
Мокрая магнитная сепарация на доводке					
Магнитная фракция ММС-2	15,25	61,62	7,35	65,08	11,91
Немагнитная фракция ММС-2	1,64	7,94	8,47	0,90	1,48
Магнитно-гравитационная сепарация на доводке					
Магнитная фракция МГС	14,61	63,00	7,07	63,74	10,97
Немагнитная фракция МГС	2,28	14,16	9,99	2,24	2,42

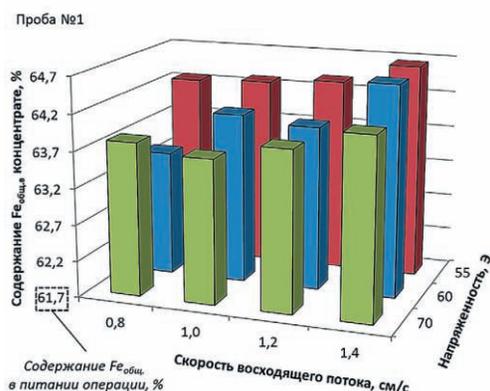


Рис. 4
Содержание железа в титаномагнетитовых концентратах после перечистки магнитно-гравитационной сепарацией

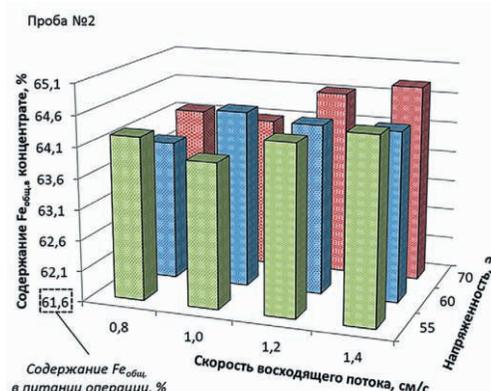


Fig. 4
Iron content in titanomagnetite concentrates after re-cleaning using magnetic-and-gravity separation

Из пробы №1 с массовой долей $Fe_{общ}$ на уровне 61,7% получен концентрат, характеризующийся содержанием $Fe_{общ}$ 63,4–64,7% при операционном извлечении более 98%. Из пробы №2, содержащей около 61,6% $Fe_{общ}$, выделен концентрат с массовой долей железа на уровне 63,9–64,8% при операционном извлечении не менее 98%. Сливы (хвосты) МГС содержат от 13% до 20% $Fe_{общ}$, что не позволяет отнести их к отвальному продукту, однако потери железа с ними невысоки и составляют 1–2% от операции. Таким образом, применение МГС для дообогащения проб титаномагнетитовых концентратов, полученных из малотитанистых руд Урала, обеспечивает прирост их качества на 2–3% по $Fe_{общ}$.

Комплексные руды Сибири

Для комплексной переработки данных руд разработана технология обогащения с получением трех концентратов, включающая в себя: измельчение дробленой руды до крупности –0,2 мм, магнитное обогащение для выделения титаномагнетитового концентрата и флотационное обогащение немагнитной фракции для получения апатитового и сфен-перовскитового концентратов.

В цикле получения титаномагнетитового концентрата изучалась возможность получения продукта с максимально высоким содержанием по железу и минимальным содержанием по TiO_2 . Исследования проводились с использованием двух методов разделения – мокрой магнитной сепарации и магнитно-гравитационной сепарации.

Измельченная руда крупностью –0,2 мм поступала на магнитную сепарацию с использованием барабанного магнитного сепаратора, немагнитная фракция которого направлялась в цикл выделения других ценных минералов, а магнитная фракция являлась черновым титаномагнетитовым концентратом, характеризующимся следующими показателями: массовая доля железа общего 33%, диоксида титана – 12% при извлечении данных компонентов 66,5% и 36,5% соответственно.

С целью дораскрытия сростков ценных минералов черновой концентрат доизмельчался до крупности менее 0,1 мм. Полученный материал поступал на серию сравнительных опытов по его дообогащению с использованием магнитной и магнитно-гравитационной сепарации, результаты которых представлены в табл. 5. С целью повышения качества получаемого концентрата магнитная

Таблица 5
Сравнительные результаты доводки черного титаномагнетитового концентрата с использованием магнитной и магнитно-гравитационной сепарации

Table 5
Comparative results of upgrading metal content in the rough titanomagnetite concentrate using magnetic and magnetic-and-gravity separation

Продукты	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		$Fe_{общ}$	TiO_2	$Fe_{общ}$	TiO_2
ММС-2 (1 перечистка, H=1000 Э)					
Концентрат	65,66	47,21	11,64	93,15	63,66
Хвосты	34,34	6,64	12,71	6,85	36,34
Итого	100,00	33,28	12,01	100,00	100,00
ММС-3 (2 перечистка, H=800 Э)					
Концентрат	89,96	51,67	11,69	98,45	90,33
Хвосты	10,04	7,27	11,21	1,55	9,67
Итого	100,00	47,21	11,64	100,00	100,00
ММС-4 (3 перечистка, H=600 Э)					
Концентрат	95,05	53,91	11,75	99,18	95,58
Хвосты	4,95	8,56	10,45	0,82	4,42
Итого	100,00	51,67	11,69	100,00	100,00
МГС					
Концентрат	49,32	57,36	11,75	85,00	48,24
Хвосты	50,68	9,84	12,26	15,00	51,76
Итого	100,00	33,28	12,01	100,00	100,00

сепарация была выполнена в три операции при последовательном снижении напряженности магнитного поля сепаратора от 1000 до 600 Э, при этом магнитно-гравитационная сепарация выполнялась в один прием.

Из представленных данных наглядно видно преимущество магнитно-гравитационной сепарации при дообогащении черного титаномагнетитового концентрата, которое заключается не только в выделении концентрата более высокого качества, но и в уменьшении количества операций по его получению.

В заключение следует отметить, что работы, посвященные данному объекту, не завершены и в настоящее время продолжаются. Установлена принципиальная возможность получения титаномагнетитового концентрата с массовой долей железа 58,7% при снижении крупности измельчения черного концентрата.

Заключение

В работе рассмотрен опыт обогащения титаномагнетитового минерального сырья, полученного из руд различных месторождений России. Показано преимущество применения магнитно-гравитационной сепарации в сравнении с классической магнитной сепарацией на до-

дочных операциях для получения качественного титаномагнетитового концентрата.

Из апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений, характеризующихся низким содержанием титаномагнетита – на уровне 0,4%, с использованием МГС получен концентрат с массовой долей железа общего – 59,6%, диоксида титана – 13,0% и сквозным извлечением титаномагнетита более 90%.

Для перовскит-титаномагнетитовых руд Кольского полуострова предложена технология получения титаномагнетитового концентрата с содержанием железа 63% и диоксида титана около 7% при извлечении железа общего – 63,7% от исходной руды.

На примере титаномагнетитового концентрата, полученного из руд Уральских месторождений, показана возможность повышения его качества применением магнитно-гравитационной сепарации со значений на уровне 61,6–61,7% до 63,9–64,8% по железу общему при операционном извлечении компонента не менее 98%.

Для комплексных руд Сибири предложены технологические решения по выделению титаномагнетитового концентрата с содержанием железа общего 57,4% при его извлечении 56,5%.

Список литературы / References

1. Леонтьев Л.И., Заякин О.В., Волков А.И. Проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России с учётом состояния минерально-сырьевой базы. *Вестник Российской академии наук*. 2023;93(7):631–645. <https://doi.org/10.31857/S086958732307006X>
Leont'ev L.I., Zayakin O.V., Volkov A.I. Overcoming problems in the development of the metallurgical industry to ensure the technological sovereignty of Russia considering the state of the mineral and raw material base. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(7):631–645. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S086958732307006X>
2. Быховский Л.З., Пахомов Ф.П., Турлова М.А. Комплексные руды титаномагнетитовых месторождений России – крупная минерально-сырьевая база черной металлургии. *Разведка и охрана недр*. 2007;(6):20–23.
Bykhovsky L.Z., Pakhomov F.P., Turlova M.A. Complex ores of titanomagnetite deposits in Russia – a major mineral resource base for ferrous metallurgy. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2007;(6):20–23. (In Russ.)
3. Пахомов Ф.П., Тигунов Л.П., Быховский Л.З. *Титаномагнетитовые месторождения России: минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования*. М.: ВИМС; 2010. 137 с.
4. Быховский Л.З., Пахомов Ф.П., Турлова М.А. Минерально-сырьевая база и перспективы комплексного использования титаномагнетитовых и ильменитовых магматогенных месторождений России. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(1):209–215. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2008/1/16_Bihovskiy8.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
Bykhovsky L.Z., Pakhomov F.P., Turlova M.A. Mineral resource base and prospects for the integrated utilization of titanomagnetite and ilmenite magmatogene deposits in Russia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(1):209–215. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2008/1/16_Bihovskiy8.pdf (accessed: 27.11.2025).
5. Гершенкоп А.Ш., Хохуля М.С., Мухина Т.Н. Переработка техногенного сырья Кольского полуострова. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2010;(1):4–8.
Gershenkop A.Sh., Hohulya M.S., Mukhina T.K. Technogenic raw material processing in the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2010;(1):4–8. (In Russ.)
6. Попов И.О., Брянцев А.Я., Макаров А.М., Ракаев А.И., Брыляков Ю.Е. Технология доводки и гидрометаллургической переработки Хибинского высокотитанистого титаномагнетита. *Обогащение руд*. 2004;(1):23–27.
Popov I.O., Bryantsev A.Ya., Makarov A.M., Rakayev A.I., Brylyakov Yu.Ye. The Khibini mountains high-titanium titanomagnetite final concentration and hydrometallurgical processing technology. *Obogashchenie Rud*. 2004;(1):23–27. (In Russ.)
7. Герасимова Л.Г., Николаев А.И., Щукина Е.С., Сафонова И.В. Минеральные отходы обогащения апатит-нефелиновых руд – сырьевой источник получения функциональных материалов. *Горный журнал*. 2020;(9):78–84. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.111>
Gerasimova L.G., Nikolaev A.I., Shchukina E.S., Safonova I.V. Apatite–nepheline ore mill tailings – A source of functional materials. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):78–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.111>
8. Митрофанова Г.В., Черноусенко Е.В., Компанченко А.А., Калугин А.И. Особенности действия реагента-собирателя из класса алкиловых эфиров фосфорной кислоты при флотации апатит-нефелиновых руд. *Записки Горного института*. 2024;268:637–645. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16264> (дата обращения: 27.11.2025).
Mitrofanova G.V., Chernousenko E.V., Kompanchenko A.A., Kalugin A.I. Specific action of collector from phosphoric acid alkyl esters class in flotation of apatite-nepheline ores. *Journal of Mining Institute*. 2024;268:637–645. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16264> (accessed: 27.11.2025).

9. Афанасьев Б.В. *Минеральные ресурсы щёлочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова*. СПб.: Роза ветров; 2011. 224 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/2741> (дата обращения: 27.11.2025).
10. Садыхов Г.Б., Резниченко В.А., Карязин И.А., Наумова Л.О. О научных основах комплексного использования титаномагнетитов. *Металлы*. 1993;(1):53–56.
Sadykhov G.B., Reznichenko V.A., Karyazin I.A., Naumova L.O. On the scientific basis for the comprehensive use of titanomagnetites. *Metally*. 1993;(1):53–56. (In Russ.)
11. Бузмаков В.Н., Володина Ю.В. Оценка влияния минерального состава рудных тел титаномагнетитов Гусевогорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(3):62–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-62-68>
Buzmakov V.N., Volodina Yu.V. Estimation of influence of the mineral composition of ore bodies of titanomagnetites of the Gusevogorskoye deposition the concentration of vanadium in the products of their processing. *News of the Ural State Mining University*. 2020;(3):62–68. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-62-68>
12. Guo X., Dai S., Wang Q. Influence of different comminution flowsheets on the separation of vanadium titanomagnetite. *Minerals Engineering*. 2020;149:106268. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106268>
13. Wu S., Li Z., Sun T., Lu S., Cao Z. Individual enrichment of titanium and iron from low-titanium beach titanomagnetite via preconcentration-reduction roasting and magnetic separation with calcium fluoride. *Powder Technology*. 2022;409:117810. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117810>
14. Chen P., Hou P., Zhai J., Sun W. A novel method for the comprehensive utilization of iron and titanium resources from a refractory ore. *Separation and Purification Technology*. 2019;226:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.079>
15. Malybayev G., Korabayev A., Sharipov R., Al Azzam K.M., Negim E.-S., Baigenzhenov O. et al. Processing of titanium-containing ores for the production of titanium products: A comprehensive review. *Heliyon*. 2024;10(3):e24966. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24966>
16. Shi Y., Zhu D., Pan J., Guo Z., Lu S., Xue Y. Investigation into the coal-based direct reduction behaviors of various vanadium titanomagnetite pellets. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:243–262. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.146>
17. Gilligan R., Nikoloski A.N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources. *Minerals Engineering*. 2020;146:106106. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106106>
18. Опалев А.С., Черезов А.А. Опыт освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях России и стран СНГ для повышения качества железорудного сырья. *Горная промышленность*. 2023;(3):122–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-122-128>
Opalev A.S., Cherezov A.A. Experience in the development of magnetic gravity separation at enterprises in Russia and CIS countries to improve the quality of iron ore raw materials. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):122–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-122-128>
19. Мухина Т.Н., Марчевская В.В., Максимов В.И. Исследования и разработка новых технологий на опытно-промышленной установке горного института. *Горный журнал*. 2020;(9):54–60. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.07>
Mukhina T.N., Marchevskaya V.V., Maksimov V.I. Studies and development of new technologies at pilot plant of the Mining Institute. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):54–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.07>

Информация об авторах

Опалев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5120-7595> e-mail: a.opalev@ksc.ru

Фомин Александр Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0366-7439> e-mail: a.fomin@ksc.ru

Алексеева Светлана Александровна – старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0183-9345> e-mail: a.alekseeva@ksc.ru

Калюжная Раиса Вячеславовна – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5693-3051> e-mail: r.kalyuzhnaya@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.10.2025

Поступила после рецензирования: 16.12.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

Information about the authors

Alexander S. Opalev – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5120-7595>; e-mail: a.opalev@ksc.ru

Alexander V. Fomin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0366-7439>; e-mail: a.fomin@ksc.ru

Svetlana A. Alekseeva – Senior Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0183-9345>; e-mail: a.alekseeva@ksc.ru

Raisa V. Kaliuzhnaia – Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5693-3051>; e-mail: r.kalyuzhnaya@ksc.ru

Article info

Received: 29.10.2025

Revised: 16.12.2025

Accepted: 13.01.2026