

УДК 622.7

**ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД
ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ
МЕТОДАМИ КРУПНОКУСКОВОЙ СЕПАРАЦИИ**

Д. Н. Шибаетва¹, А. А. Компанченко²

¹Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: shibaeva_goi@mail.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

²Геологический институт КНЦ РАН,

E-mail: komp-alena@yandex.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

Представлены результаты оценки обогатимости железных руд Яковлевского месторождения Курской магнитной аномалии с применением различных методов крупнокускового обогащения: магнитного, гравитационного, рентгенорадиометрического. Детальное изучение проводилось на материале класса крупности – 100+25 мм, содержащем 25–45 % Fe_{общ}, 3–35 % Fe_{магн} и требующем обогащения. Установлено, что эффективное разделение исходной рудной массы на рудный и породный продукты обеспечивается посредством рентгенорадиометрического метода кускового предварительного обогащения на классе крупности – 50+25 мм. При значении аналитического параметра, равного 2, обеспечивается повышение содержания Fe_{общ} в рудном продукте в 1.18 раза при его потерях 5.52 %.

Железная руда, крупнокусковое обогащение, минералого-технологические свойства, магнитное обогащение, гравитационное обогащение, радиометрическое обогащение

DOI: 10.15372/FTPRPI20230611

Яковлевское месторождение локализовано в северной части Белгородского железорудного района Курской магнитной аномалии (КМА) — крупнейшего железорудного района мира, насчитывающего около десятка залежей [1–3].

В геологическом строении Яковлевского месторождения выделяются два структурных этажа, образованные различными комплексами пород: нижний — докембрийский кристаллический фундамент и верхний — осадочные породы. Нижний этаж — кристаллический фундамент — сложен магматическими и метаморфическими породами архея и нижнего протерозоя. В разрезе верхнего этажа — стратифицированной толщи — прослеживаются четыре серии пород: обоянская и михайловская (архей), курская и оскольская (нижний протерозой). С курской серией и ее коробковской свитой связаны все железорудные месторождения КМА. Коробковская свита состоит из двух железорудных и двух сланцевых подсвит. Главенствующая роль в железорудной свите принадлежит железистым кварцитам, а подчиненное — сланцам. К зоне выветривания железистых кварцитов ВІF-формации приурочены богатые железные руды, являющиеся латеритной корой выветривания железистых кварцитов. Они образуют лентообразные залежи шириной 200–600 м, вертикальной мощностью от 20–50 м у лежащего бока до 350–400 м у висячего бока [4–5].

На месторождении можно выделить два генетических типа богатых железных руд: коренные и переотложенные [6–7]. Коренные богатые железные руды представляют собой продукты латеритного выветривания железистых кварцитов различных типов, а переотложенные — продукты последующей переработки коренных руд. Переотложенные руды составляют около 3–5 % от общих запасов и имеют подчиненное значение. Коренные руды — основной тип, определяющий экономическую ценность месторождения. Главными рудообразующими минералами месторождения являются гематит (в том числе мартит — псевдоморфоза гематита по магнетиту), магнетит, гидроокислы железа (гетит, лимонит и др.), сидерит, железосодержащие слюды, кварц, глинистые минералы и др. В зависимости от количественного соотношения главных рудообразующих минералов определены следующие основные минералогические типы руд: железнослюдковые, железнослюдково-мартитовые и мартитовые; мартит-гидрогематитовые; гидрогематит-гидрогетитовые; карбонатизированные и хлоритизированные (железнослюдково-мартитовые, мартит-гидрогематитовые, гидрогематит-гидрогетитовые). Каждый из типов руд приурочен к определенному типу железистых кварцитов и пространственно обособлен. Содержание железа зависит от минерального состава руд. Наиболее высокие концентрации (более 60 %) отмечаются в железнослюдковых и мартит-железнослюдковых рудах, а в мартит-гидрогематитовых и гидрогематит-гидрогетитовых количество железа всегда ниже. Балансовые запасы богатых железных руд Яковлевского месторождения составляют более 9.6 млрд т, характеризуются высоким качеством (содержание $Fe_{\text{общ}}$ более 60 %) и как природное агломерационное сырье не имеют аналогов в России.

Яковлевское месторождение относится ко второй группе сложности. Проблемы с разработкой месторождения связаны с крайне сложной и изменчивой формой рудного тела, неравномерной выветрелостью, неоднородностью самих руд и сложностью гидрогеологической и инженерно-геологической обстановки [4]. Кроме того, разработка месторождения ведется подземным способом в сложных горно-геологических и гидрологических условиях [8–9]. Это обуславливает вероятность включения в добытую рудную массу большего, по сравнению с открытой технологией отработки запасов, количества разубоживающих пород, что снижает качество руды [10]. Данная работа направлена на оценку возможности минимизации неоднородности состава руд путем внедрения дополнительной рудоподготовительной операции — кускового предварительного обогащения.

Цель исследования — выявление минералого-технологического свойства, обеспечивающего эффективное разделение исходной рудной массы на рудный и породный продукты. Достижение обозначенной цели обеспечивается проведением сравнительной оценки традиционного для железных руд метода предварительного кускового обогащения, использующего различия в магнитных свойствах руд и вмещающих пород, а также гравитационного и радиометрических методов. Эти два метода основаны на разделении по плотности, способности люминесцировать, интенсивности характеристического рентгеновского излучения атомов элементов, входящих в состав пород и руд, полезных и сопутствующих минералов в их составе.

Опыт применения сухой магнитной сепарации (СМС) или сухой центробежной сепарации (СЦМС) мелкодробленных магнетитовых руд, внедренной на большинстве ГОКов России и стран СНГ, уже описан в ряде работ [7, 11–14]. За счет удаления части породы в хвосты перед измельчением удалось расширить объемы годовой переработки железорудного сырья более чем на 80 млн т. На примере Оленегорского рудного поля, эксплуатируемого предприятием АО «Олкон», доказана успешность применения используемой на предприятии сухой магнитной сепарации на пробах железистых кварцитов класса $-25 + 0$ мм и на рудной массе крупностью более 25 мм [12]. Проведены сравнительные исследования эффективности разделения трудно-

и легкообогатимых руд Костомукшского рудного поля посредством кусковой магнитной сепарации, включающие оценку влияния текстуры руд и крупности исходного материала на технологические показатели разделения [13]. Типизация обогатимости руд определяется вкрапленностью магнетита: преобладанием более крупных кусков в пробе. Результаты исследования свидетельствуют об эффективности формирования рудного и породного продуктов разделения посредством СМС на классе крупности $-80 + 0$ мм: потери $Fe_{общ}$ с немагнитной фракцией составляют не более 4 % при повышении его содержания в магнитном продукте не менее 3.3 %.

Месторождения железных руд КМА, Оленегорского и Костомукшского рудных полей обладают схожими чертами в плане происхождения и возраста, геологии и минерального состава. Все эти объекты относятся к докембрийским ВІF-формациям (Banded Iron Formation), имеют осадочно-метаморфическое происхождение, главными рудными минералами являются магнетит и гематит [15]. Однако исследованные пробы месторождений Оленегорского и Костомукшского рудных полей преимущественно магнетитовые, состав пробы Яковлевского месторождения КМА существенно гематитовый. Эффективность реализации крупнокусковой магнитной сепарации на пробах железистых кварцитов, отобранных с месторождений, эксплуатируемых горно-обогатительными предприятиями ПАО «Северсталь» (куда входят предприятия АО «Олкон» и ООО «Яковлевский ГОК»), определяет необходимость проверки данного метода на рудной массе месторождения Яковлевское, а также оценки возможности применения процесса сепарации крупных классов, минимальный размер единичного куска в которых составляет 25 мм.

Радиометрическое разделение при выполнении кускового предварительного обогащения железосодержащих руд описано в [16–18]. Успешный пример рентгенорадиометрической сепарации (PPC) при обогащении сидеритовых руд Бакальского рудоуправления представлен в [19]. Результаты испытаний PPC показали возможность увеличения содержания $Fe_{общ}$ с 26.5 до 34 % на кусковой фракции руды шахтной добычи класса крупности $-30 + 10$ мм при низких потерях железа (не более 10 %).

МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследования выполнялись на пробе железной доменной руды Яковлевского месторождения КМА класса крупности $-100 + 0$ мм. Анализ химического состава исходного кускового материала пробы проводился на 4 элемента: $Fe_{общ}$ и $Fe_{магн}$ — методом титрования, $F_{гем}$ — расчетным методом (по содержаниям FeO , $Fe_{к/р}$ и $Fe_{магн}$, определяемым методом титрования), SiO_2 — фотоколориметрическим методом. Гранулометрический состав пробы определялся методом ситового анализа. Использовался набор сит с сетками, имеющими квадратные отверстия размерами 50, 25 мм.

Минералого-петрографический анализ состава пробы включал в себя визуальный и инструментальный методы. Визуальный анализ выполнялся с помощью стереомикроскопа МБС-10 и базировался на оценке морфологических особенностей, оптических (цвет, блеск), механических (твердость) и магнитных свойств пород и минералов, входящих в их состав. Микроскопические исследования проводились на оптическом рудно-петрографическом поляризационном микроскопе Carl Zeiss Axioplan II. Диагностика низкоотражающих порообразующих минералов осуществлялась на рамановском спектрометре EnSpectr R532, совмещенном с оптическим микроскопом Olympus VX-43.

Оценка целесообразности реализации процесса кускового предварительного обогащения основана на изучении равномерности распределения в пробе полезного компонента (ПК). Для количественного описания использован показатель контрастности по Мокроусову [20], кото-

рый представляет собой средневзвешенное относительное отклонение содержания полезного компонента в определенных объемах горной массы от среднего содержания этого объема в изучаемом объекте и определяется формулой

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n |(y_i - \alpha)| m_i}{\alpha \sum_{i=1}^n m_i},$$

где n — полное количество единичных объемов горной массы, входящих в состав изучаемого объекта; y_i — содержание полезного компонента в единичных объемах горной массы; α — среднеарифметическое содержание полезного компонента; m_i — масса каждого отдельного единичного объема руды с содержанием полезного компонента, равным y_i .

Для качественной оценки равномерности распределения $Fe_{\text{общ}}$ в пробе применялась классификация руд по показателю контрастности О. А. Архипова и Е. П. Лемана [21 – 22].

Исследование эффективности использования различий магнитных свойств образцов железной руды Яковлевского месторождения и вмещающих ее пород для формирования рудного (магнитного) и породного продуктов проведено в два этапа. На первом этапе реализована сухая магнитная сепарация пробы, на втором — детально рассмотрен каждый образец пробы.

Сухая магнитная сепарация проб руды выполнена на лабораторном барабанном сепараторе серии СМБС-Л в стадийном режиме. Последовательно формировались фракции при каждом значении магнитной индукции B : от 0.16 Тл для выделения сильномагнитных частиц и до 0.75 Тл для извлечения слабомагнитных частиц. Скорость вращения обечайки барабана магнитного сепаратора составляет 57 об/мин. Питанием первой стадии СМС при $B = 0.16$ Тл на поверхности обечайки барабана (сектор 1) является исходная проба железной руды. На вторую стадию при $B = 0.32$ Тл (сектор 2) подается немагнитный продукт первой стадии сепарации. Для питания третьей стадии сепарации при $B = 0.45$ Тл (сектор 3) используется немагнитный продукт второй стадии. Завершающий этап реализуется при магнитной индукции, равной 0.75 Тл (сектор 4), на немагнитном продукте третьей стадии сепарации.

Детальные исследования включали измерение средней магнитной восприимчивости каждого куска посредством измерителя — капаметра SM-30. Необходимо отметить, что данный прибор чувствителен к неровности поверхности, поэтому результат измерения кусков рудной массы из-за нестабильности формы (соотношения длины куска к толщине и наличия вогнутых или выпуклых поверхностей) может обладать погрешностью. В этой связи для проверки эффективности применения магнитного метода проведены исследования магнитных свойств кусков рудной массы после дробления на материале класса крупности $-0.01 + 0$ мм.

Гравитационный метод обогащения железистых кварцитов Яковлевского месторождения основывается на изучении плотностных характеристик образцов различных групп породных разновидностей с использованием метода гидростатического взвешивания. Измерение плотности образцов проведено на весах серии UW2200HV, оснащенных комплектом определения плотности SMK-102.

Применение рентгенолюминесцентного метода реализовано на экспериментальном образце рентгенолюминесцентного сепаратора, разрабатываемого в Горном институте КНЦ РАН [23 – 24]. В качестве признака рентгенолюминесцентного метода разделения выбрана интегральная интенсивность люминесценции куска во всем спектральном диапазоне, в качестве параметра разделения — значение сигнала от куска, измеренного с двух противоположных сторон, за вычетом фона (от люминесценции в зоне измерения). Образцы измерялись в статическом режиме — в ячейке барабанного раскладчика. Барабанный раскладчик — третий элемент

в системе транспортирования рентгенолюминесцентного сепаратора, обеспечивающий перемещение образцов через зону облучения и регистрации и разделение общего потока на рудную и породную составляющие. Вариации расстояния между источником первичного рентгеновского излучения и поверхностью образцов обусловлены только их формой и размером.

Эффективность сухого кускового предварительного обогащения железистых кварцитов Яковлевского месторождения посредством рентгенорадиометрического метода исследовалась на рентгенофлуоресцентном сепараторе СРФ-2-100/10. В основе реализации данного метода — измерение спектральных параметров вторичного характеристического рентгеновского излучения элементов. В качестве аналитического параметра рентгенофлуоресцентного разделения использовалось спектральное отношение количества зарегистрированных квантов в области фотопика характеристического излучения железа к количеству квантов рассеянного породой рентгеновского излучения источника. Измерения спектральных характеристик кусков рудной массы проведены в режиме “Настройка”, при котором возможно получить информацию о каждом отдельном образце. Смоделирована ситуация двустороннего алгоритма возбуждения характеристического рентгеновского излучения элементов и выполнены измерения двух противоположных сторон куска рудной массы. Вторичное излучение регистрировалось с поверхности образцов на траектории свободного падения.

Оценка целесообразности и эффективности реализации процесса разделения посредством гравитационного и радиометрических методов основана на результатах измерения каждого образца представительной пробы, сформированной с учетом степени вкрапленности полезного компонента, равномерности его распределения и гранулометрического состава. Наилучший метод разделения железной руды Яковлевского месторождения крупностью более 25 мм определяется по результатам сравнительной оценки “теоретических показателей” [25]. Имеются в виду возможные технологические показатели, рассчитанные по данным фракционного состава пробы при различных порогах разделения. Фракционный состав формируется из условия достижения максимальной дискретности — минимального диапазона значений исследуемой величины (магнитная восприимчивость, плотность, интенсивность люминесценции, интенсивность характеристического рентгеновского излучения) и ограничения по минимальному выходу отдельной фракции — 1.5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрический и химический состав пробы железистых кварцитов Яковлевского месторождения Курской магнитной аномалии приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический и химический состав пробы железистых кварцитов Яковлевского месторождения, %

Класс крупности	Выход	Содержание			
		Fe _{общ}	Fe _{магн}	Fe _{гем}	SiO ₂
– 100 + 50 мм	16.2	39.67	1.06	32.35	33.51
– 50 + 25 мм	28.0	40.34	1.00	32.52	32.94
– 25 + 0 мм	55.8	46.20	1.50	35.00	28.40
Исходная руда	100	43.94	1.27	34.01	30.51

Детально изучались кварциты класса крупности – 100 + 50 мм и – 50 + 25 мм, для которых характерно меньшее по отношению к крупности – 25 + 0 мм содержание Fe_{общ} — на 5.86–6.53 % (в 1.15–1.16 раза). Согласно классификации руд в пределах железорудной провинции КМА [26], материал класса крупности – 25 + 0 мм относится к типу богатые железные руды

белгородского типа (45–69%), не требующие обогащения для доменного передела; класс крупности – 100 + 25 мм — к типу железистые кварциты курского типа, рядовые руды, содержащие 25–45 % $Fe_{общ}$ и 3–35 % $Fe_{магн}$, требующие обогащения.

Минералого-петрографический состав пробы железистых кварцитов Яковлевского месторождения представлен следующими породными разновидностями: железистые кварциты — тонкополосчатые, плейчатые, тонковкрапленные, брекчиевые и др.; сланцы — черные углеродсодержащие хлорит-талек-амфиболовые и серо-зеленые талек-хлоритовые; известняк.

Главные минералы железистых кварцитов — гематит, магнетит, кварц, карбонаты, барит, сульфиды (пирит, арсенопирит). Гематит отмечен в двух морфологических разновидностях: тонкой сыпи в кварце и отдельных лейстовидных кристаллов, иногда собирающихся в сплошные прослои (рис. 1).

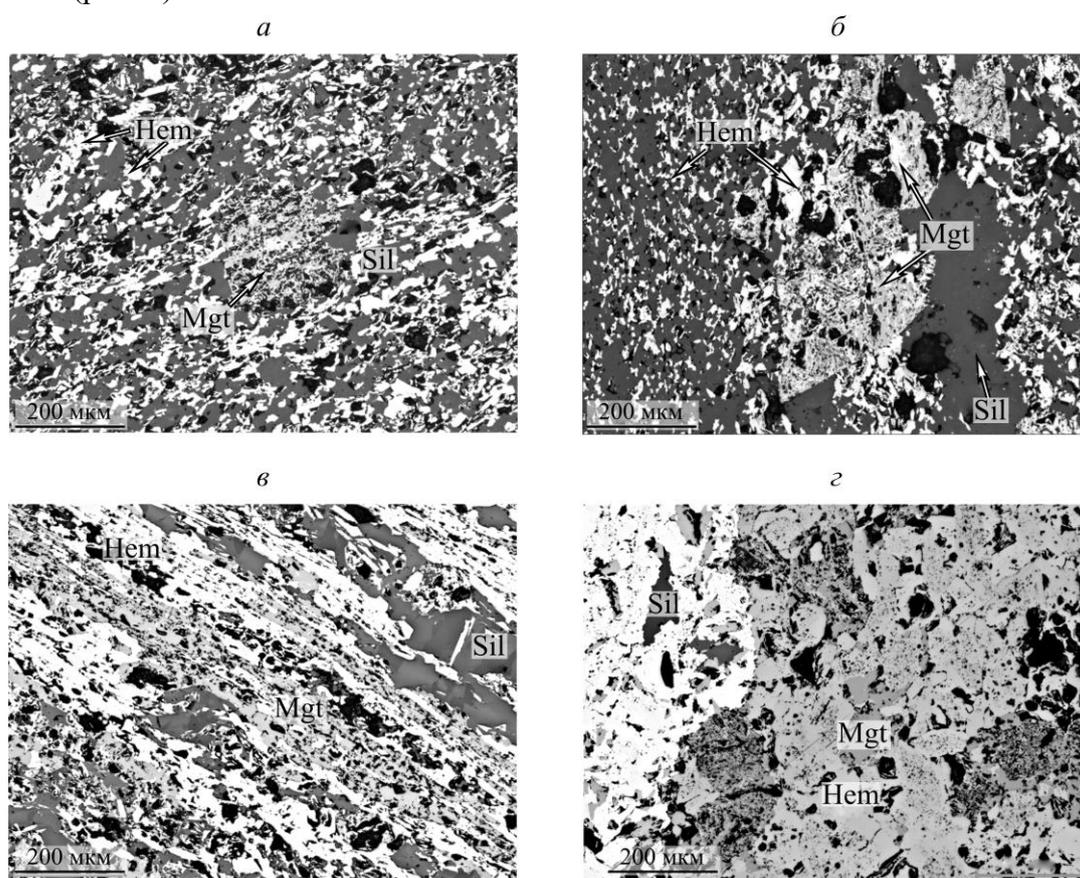


Рис.1. Минералы железистых кварцитов (фото в отраженном поляризованном свете): Ару — арсенопирит; Hem — гематит; Mgt — магнетит; Sil — породообразующие нерудные минералы (кварц, карбонаты, сульфаты)

Первая разновидность из-за тесного срастания с кварцем и мелкого размера будет раскрыться крайне сложно, в отличие от второй. Магнетит чаще всего встречается с первой разновидностью гематита. Гематит часто замещает магнетит, образует псевдоморфозы по магнетиту и скелетные кристаллы, по габитусу близкие к шпинелям. Сульфиды отмечаются в виде тонкой вкрапленности, реже как более крупные гнезда и представлены в основном пиритом, марказитом и арсенопиритом. Кварц является главным породообразующим нерудным минералом. В брекчиевых рудах веществом, цементирующим магнетит-гематит-кварцевые обломки, выступают карбонаты и сульфаты.

Тонкозернистые, сланцеватые, тальк-хлоритовые сланцы содержат редкие гнезда сульфидов и часто покрыты налетом гидроксидов железа (лимонит, гетит, лепидокрокит). Известняк наблюдается в классах крупности – 50 + 25 мм и меньше в виде округлых обособлений, без следов дробления и с налетом гидроокислов железа.

Показатель контрастности M пробы класса крупности – 100 + 25 мм составляет 0.34, что характеризует ее, согласно классификациям О. А. Архипова и Е. П. Лемана, как малоконтрастную и неконтрастную по содержанию $Fe_{общ}$ соответственно. На рис. 2 представлено распределение $Fe_{общ}$ в классе крупности – 100 + 25 мм пробы железистых кварцитов.

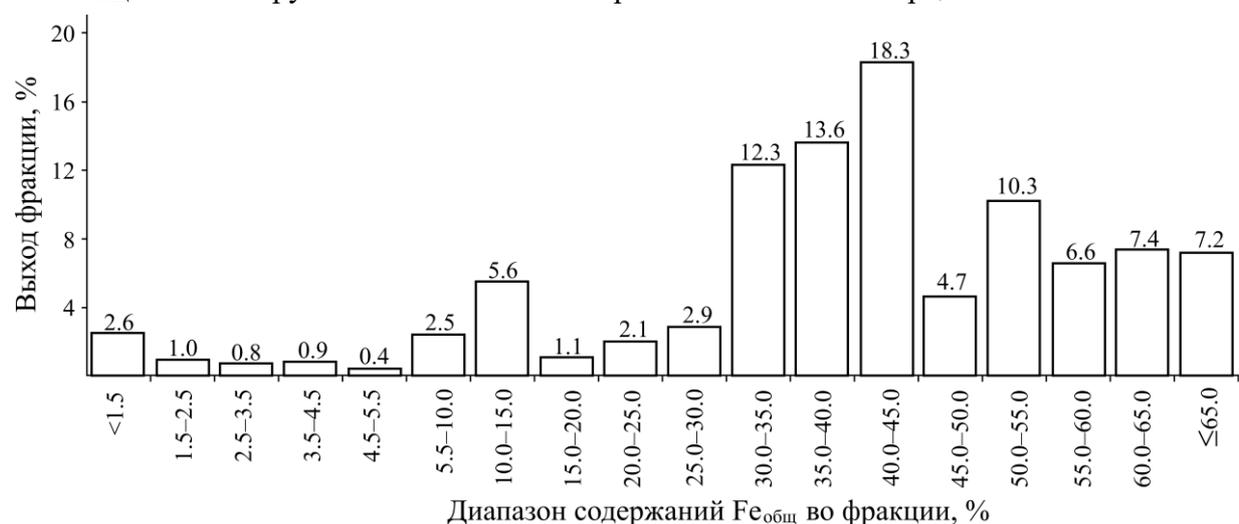


Рис. 2. Распределение содержания $Fe_{общ}$ в исследуемой пробе железистых кварцитов

Установлено присутствие в пробе кусков с низким содержанием $Fe_{общ}$. Минимальное значение $Fe_{общ}$ в пробе для оконтуривания балансовых запасов гематит-мартитовых руд Яковлевского месторождения составляет 45 % [1]. Прогнозные предельно возможные технологические показатели разделения пробы железистых кварцитов по содержанию $Fe_{общ}$ приведены в табл. 2. При разделении по пороговому значению 10 % $Fe_{общ}$ потери его с породным продуктом не превышают 1 %, увеличивая при этом содержание железа на 8.3 % (с 40.1 до 48.4 % $Fe_{общ}$) в рудном продукте. Повышение содержания $Fe_{общ}$ до 45.41 % сопровождается ростом потерь $Fe_{общ}$ с породным продуктом более чем в 3 раза и составляет 2.58 %.

ТАБЛИЦА 2. Предельно возможные технологические показатели разделения по содержанию $Fe_{общ}$, %

Порог разделения по $Fe_{общ}$	Породный продукт			Рудный продукт		
	Выход	Содержание	Извлечение	Выход	Содержание	Извлечение
< 1.5	2.6	1.35	0.09	97.4	41.28	99.91
< 2.5	3.5	1.60	0.14	96.5	41.67	99.86
< 3.5	4.3	1.94	0.21	95.7	41.98	99.79
< 4.5	5.2	2.36	0.30	94.8	42.33	99.70
< 5.5	5.6	2.59	0.36	94.4	42.49	99.64
< 10	8.1	4.18	0.84	91.9	43.42	99.16
< 15	13.6	7.61	2.58	86.4	45.41	97.42
< 20	14.7	8.37	3.06	85.3	45.76	96.94
< 25	16.8	10.09	4.21	83.2	46.34	95.79
< 30	19.7	12.71	6.22	80.3	47.01	93.78

Магнитный метод. В табл. 3 представлены результаты первого этапа исследований эффективности использования различий магнитных свойств образцов железной руды Яковлевского месторождения и вмещающих ее пород, реализуемого посредством проведения стадийальной сухой магнитной сепарации материала классов крупности – 100 + 50 мм и – 50 + 25 мм.

ТАБЛИЦА 3. Результаты стадийальной сухой магнитной сепарации пробы $Fe_{\text{общ}}$ различных классов крупности, %

Продукт	Выход	Содержание	Извлечение	Выход	Содержание	Извлечение
	– 100 + 50 мм			– 50 + 25 мм		
Магнитная фракция						
$B = 0.16$ Тл	4.5	50.4	5.5	4.2	62.5	6.9
$B = 0.32$ Тл	15.9	45.3	17.7	21.6	49.7	27.9
$B = 0.45$ Тл	6.9	56.5	9.6	7.5	46.1	9.1
$B = 0.75$ Тл	14.0	47.2	16.2	18.9	47.0	23.2
объединенная	41.2	48.4	49.0	52.3	49.25	67.1
Немагнитная фракция $B = 0.75$ Тл	58.8	35.5	51.0	47.7	26.5	32.9
Исходная руда	100.0	40.7	100.0	100.0	38.4	100.0

Определена зависимость средних значений магнитной восприимчивости k и содержания $Fe_{\text{общ}}$. Корреляционные зависимости описываются логарифмической функцией с достоверностью аппроксимации для класса крупности – 100 + 50 мм, равной 0.40, для класса крупности – 50 + 25 мм — 0.54. По шкале Чеддока, позволяющей дать качественную оценку связи между анализируемыми параметрами, коэффициент детерминации для класса крупности – 100 + 50 мм свидетельствует об “умеренной” связи анализируемых параметров, для класса крупности – 50 + 25 мм — о “заметной” связи. Дополнительно проведены измерения на дробленном материале класса крупности – 0.01 + 0 мм, более равномерно покрывающем поверхность детектора каппаметра, что исключает влияние нестабильности формы кусков (вогнутых и выпуклых поверхностей).

Сравнительный анализ кривых на рис. 3 свидетельствует о практически полном совпадении кривых, построенных по среднему значению k , зарегистрированному с разных сторон поверхности образцов и по значению k кусков рудной массы после дробления (ось ординат) на материале класса крупности – 0.01 + 0 мм. Этот факт обуславливает возможность проведения оперативной оценки магнитных свойств по значениям k , полученным с поверхности куска, и отсутствию необходимости введения корректирующих коэффициентов, минимизирующих и/или полностью исключающих влияние нестабильности формы кусков (вогнутых и выпуклых поверхностей).

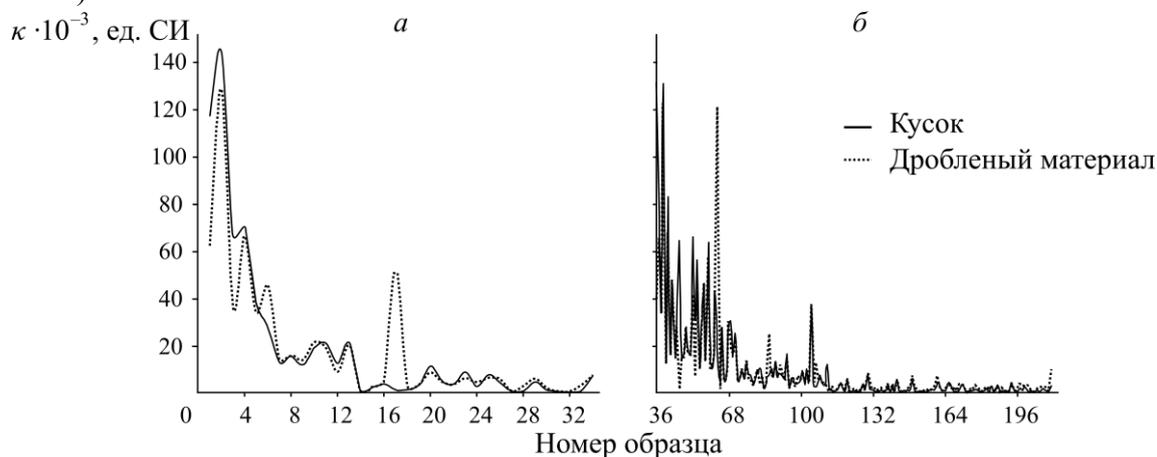


Рис. 3. Магнитная восприимчивость в кусках руды классов крупности: – 100 + 50 мм (а), – 50 + 25 мм (б) и дробленном материале

Гравитационный метод. Для обеспечения возможности предварительной оценки результатов гравитационного разделения на рудный и породный продукты сформирован фракционный состав пробы (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Результаты гравитационного разделения пробы железной руды $Fe_{общ}$ при различных порогах, %

Порог разделения (плотность ρ , г/см ³)	Рудный продукт			Породный продукт		
	Выход	Содержание	Извлечение	Выход	Содержание	Извлечение
Класс крупности – 100+50 мм						
2.3	97.9	41.54	99.93	2.1	1.35	0.07
2.5	96.4	41.76	98.89	3.6	12.39	1.11
2.7	94.2	42.49	98.42	5.8	11.21	1.58
2.9	81.0	44.93	89.48	19.0	22.58	10.52
3.1	77.6	45.11	85.99	22.4	25.41	14.01
3.3	59.6	45.40	66.52	40.4	33.74	33.48
3.5	28.7	53.20	37.48	71.3	35.67	62.52
3.7	19.5	56.26	26.91	80.5	36.93	73.09
3.9	6.9	65.64	11.05	93.1	38.86	88.95
Класс крупности – 50+25 мм						
1.7	98.3	38.98	99.82	1.7	4.07	0.18
1.9	97.4	39.31	99.78	2.6	3.31	0.22
2.1	97.2	39.39	99.77	2.8	3.18	0.23
2.3	96.3	39.46	99.00	3.7	10.39	1.00
2.5	94.6	39.84	98.19	5.4	12.88	1.81
2.7	86.3	42.67	95.95	13.7	11.35	4.05
2.9	77.1	45.80	91.98	22.9	13.44	8.02
3.1	67.6	47.39	83.43	32.4	19.62	16.57
3.3	50.3	50.71	66.47	49.7	25.90	33.53
3.5	35.9	53.46	49.98	64.1	29.95	50.02
3.7	21.6	58.13	32.68	78.4	32.95	67.32
3.9	11.2	61.23	17.88	88.8	35.50	82.12

Корреляционная зависимость описывается степенной функцией с достоверностью аппроксимации для классов крупности – 100 + 50 и – 50 + 25 мм, равной 0.63. По шкале Чеддока, значение коэффициента аппроксимации характеризует наличие “заметной” связи между анализируемыми параметрами. Дискретность диапазона вариации значений плотности в каждой фракции составляет 0.2 г/см³.

Рентгенолюминесцентный метод. При взаимодействии первичного рентгеновского излучения с поверхностью образцов зарегистрировать поток вторичного излучения (люминесценции) не удалось даже от кусков рудной массы, относящихся к известнякам и обладающих, согласно минералого-технологическим свойствам [27], способностью люминесцировать при взаимодействии с различными видами излучения, в том числе рентгеновским.

Рентгенорадиометрический метод. По результатам изучения аналитического параметра кусков рудной массы, составляющих пробу классов крупности – 100 + 50 и – 50 + 25 мм, в режиме “Настройка” получена корреляционная зависимость значения интенсивности рентгеновского излучения I , зарегистрированного с поверхности образцов, и содержания $Fe_{общ}$ в них.

Полученные корреляционные зависимости описываются степенной функцией с достоверностью аппроксимации для класса крупности – 100 + 50 мм, равной 0.18, для класса крупности – 50 + 25 мм — 0.78. Коэффициенты свидетельствуют соответственно о “слабой” и “высокой”

связи (по шкале Чеддока) между анализируемыми параметрами. Данные предварительной качественной и количественной оценки возможных вариантов сортового разделения, определяемых граничным значением между рудной и породной частями, представлены в табл. 5. Дискретность диапазона вариации значений аналитического параметра в каждой фракции составляет 0.5 усл. ед.

ТАБЛИЦА 5. Результаты рентгенорадиометрического разделения пробы железной руды при различных порогах, %

Порог разделения <i>I</i> (аналитический параметр)	Рудный продукт			Породный продукт		
	Выход	Содержание	Извлечение	Выход	Содержание	Извлечение
	Класс крупности – 100 + 50 мм					
1.0	96.2	40.85	96.60	3.8	36.78	3.40
1.5	95.4	41.18	96.48	4.6	30.78	3.52
2.0	90.8	42.00	93.77	9.2	27.69	6.23
2.5	83.2	44.19	90.38	16.8	23.34	9.62
3.0	76.9	45.30	85.59	23.1	25.37	14.41
3.5	68.4	46.56	78.22	31.6	28.02	21.78
4.0	53.9	50.32	66.61	46.1	29.45	33.39
4.5	15.4	59.96	22.66	84.6	37.19	77.34
	Класс крупности – 50 + 25 мм					
0.5	97.44	39.30	99.76	2.56	3.58	0.24
1.0	93.09	40.91	99.21	6.91	4.39	0.79
1.5	87.89	42.82	98.05	12.11	6.19	1.95
2.0	80.29	45.17	94.48	19.71	10.76	5.52
2.5	75.52	46.55	91.60	24.48	13.17	8.40
3.0	67.94	48.35	85.59	32.06	17.26	14.41
3.5	50.31	49.58	64.99	49.69	27.04	35.01
4.0	21.59	53.55	30.12	78.41	34.21	69.88
4.5	6.78	55.28	9.77	93.22	37.15	90.23

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов сухой магнитной сепарации пробы железной руды Яковлевского ГОКа показал, что минимальные потери $Fe_{\text{общ}}$ с немагнитным продуктом сепарации, составляющие 51 % и 32.9 % в классах крупности – 100 + 50 мм и – 50 + 25 мм соответственно, достигаются при значении магнитной индукции 0.75 Тл. В немагнитный продукт извлекаются слабомагнитные куски данной пробы, магнитная восприимчивость которых для класса крупности – 100 + 50 мм не превышает $12 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, для класса крупности – 50 + 25 мм — менее $8 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Высокие потери $Fe_{\text{общ}}$ в результате процесса разделения, основанного на отличии магнитных свойств рудных минералов и минералов, характерных для вмещающих пород, объясняются особенностями минералого-петрографического состава исследуемой пробы. Основные рудные минералы гематит и магнетит характеризуются различными магнитными свойствами. Гематитовые образцы с высокими значениями содержания $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{гем}}$ обладают слабыми магнитными свойствами и низкими значениями магнитной восприимчивости. Среднее значение магнитной индукции гематитовых кусков в немагнитной фракции в классе крупности – 50 + 25 мм составляет $1.2 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, содержание $Fe_{\text{магн}}$ — менее 0.25 %.

Так называемые теоретические показатели рудного и породного продуктов, сформированных с применением альтернативных магнитному разделению методов — гравитационного и рентгенорадиометрического, свидетельствуют о возможности значительного снижения потерь $Fe_{\text{общ}}$ с по-

родным продуктом. Необходимо отметить, что рентгенолюминесцентный метод разделения для железистых кварцитов Яковлевского месторождения не применим, так как идентифицировать куски рудной массы, относящиеся к вмещающим породам, не содержащим полезных компонентов, не представляется возможным.

Основанием для повышения эффективности реализации процесса кускового разделения посредством гравитационного и рентгенорадиометрического методов является повышение значения коэффициента достоверности аппроксимации степенной функцией зависимости между плотностью (с 0.54 до 0.63)/аналитическим параметром рентгенофлуоресцентного разделения (с 0.54 до 0.78) и содержанием $Fe_{общ}$ в классах крупности – 50 + 25 мм. Связь между аналитическим параметром рентгенофлуоресцентного разделения и содержанием $Fe_{общ}$ в классе крупности – 100 + 50 мм, количественно описываемая достоверностью аппроксимации степенной функцией, равной 0.18, отсутствует.

Установлено, что для класса крупности – 100 + 50 мм наибольшая эффективность разделения достигается при реализации гравитационного разделения. Это определяется следующими технологическими показателями: выход породного продукта, потери с ним $Fe_{общ}$, повышение содержания $Fe_{общ}$ в рудном продукте. При граничном значении плотности (пороге разделения), равном 2.7 г/см³, содержание $Fe_{общ}$ в хвостах составляет 11.21 %, выход 5.8 %. Повышение значения порога разделения до 2.9 г/см³ сопровождается увеличением выхода хвостов до 19.0 %, содержащих 22.58 % $Fe_{общ}$, и ростом потерь $Fe_{общ}$ — 1.6 – 10.5 %.

Технологические показатели гравитационного и рентгенорадиометрического разделения рудной массы класса крупности – 50 + 25 мм обладают близкими качественными характеристиками продуктов разделения: отклонения составляют не более пяти относительных процентов (табл. 6). Например, при граничных значениях плотности $\rho = 2.9$ г/см³ и интенсивности излучения $I = 2.5$ усл. ед. формируется 22.9 и 24.5 % породного продукта, содержащего 13.44 и 13.17 % $Fe_{общ}$ соответственно.

ТАБЛИЦА 6з. Результаты гравитационного и рентгенорадиометрического разделения рудной массы класса крупности – 50 + 25 мм, %

Порог разделения	Продукт	Выход	Содержание	Извлечение	
Гравитационный метод					
ρ , г/см ³ : 2.5	Рудный	94.60	39.84	98.19	
	Породный	5.40	12.88	1.81	
	2.9	Рудный	77.10	45.80	91.98
		Породный	22.90	13.44	8.02
Рентгенорадиометрический метод					
I , усл. ед.: 1	Рудный	93.09	40.91	99.21	
	Породный	6.91	4.39	0.79	
	2.5	Рудный	75.52	46.55	91.60
		Породный	24.48	13.17	8.40

ВЫВОДЫ

Исследования природных предпосылок реализации методов кускового предварительного обогащения, включающие анализ минералого-петрографического состава, распределение кусков по содержанию $Fe_{общ}$, показали наличие в материале пород с низким содержанием железа общего — менее 15 %, представленных тонкозернистыми, сланцеватыми, тальк-хлоритовыми сланцами и известняками.

Получены количественные показатели для сравнительной оценки — коэффициенты достоверности аппроксимации графика степенной функции, описывающие связи между содержанием $Fe_{общ}$ и минералого-технологическими свойствами исследуемых образцов пробы. Для класса

крупности – 100 + 50 мм пробы железной доменной руды Яковлевского месторождения установлены максимальные значения, относящиеся к гравитационному методу разделения. Это свидетельствует о наилучших технологических показателях разделения по сравнению с другими проанализированными методами.

Для рудного материала класса крупности – 100 + 50 мм связь между значением плотности и содержанием $Fe_{\text{общ}}$ определена как “заметная”. Эффективное разделение исходной рудной массы на рудный и породный продукты обеспечивается посредством рентгенорадиометрического метода кускового предварительного обогащения на классе крупности – 50 + 25 мм. Коэффициент достоверности аппроксимации степенной функцией составляет 0.78 и характеризует высокую связь между аналитическим признаком и содержанием $Fe_{\text{общ}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железорудная база России / ред. В. П. Орлова. — М.: ООО “Геоинформмарк”, 2007. — 871 с.
2. Погорельцев И. А., Петина В. И., Белоусова Л. И., Гайворонская Н. И., Бугаева Е. А. Минерально-сырьевая база Белгородской области как основа развития ее экономики в XXI веке // Науч. ведомости Белгородского государственного университета. Естественные науки. — 2016. — Т. 35. — № 11. — С. 172–182.
3. Kalashnikov A. O., Nikulin I. I., and Stepenshchikov D. G. Unsupervised geochemical classification and automatic 3D mapping of the Bolshetroitskoe high-grade iron ore deposit (Belgorod Region, Russia), Scientific Reports, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-74505-y.
4. Сергеев С. В., Лябах А. И., Зайцев Д. А. Опыт разработки богатых железных руд Яковлевского месторождения КМА // Научные ведомости. Естественные науки. — 2011. — № 3 (98). — С. 200–208.
5. Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В., Пацкевич П. Г. Обоснование параметров геотехнологии добычи железных руд на Яковлевском месторождении // ГИАБ (научно-технический журнал). — 2015. — № 12. — С. 9–15.
6. Гзогян Т. Н., Гзогян С. Р. Особенности вещественного состава богатых железных руд месторождений КМА // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Естественные науки. — 2018. — Т. 42. — № 2. — С. 131–141.
7. Gzogyan T. N., Gzogyan S. R., Grishkina E. V., Romanenko E. F., and Ermolaev D. V. High-grade iron ores of KMA as a raw material for metallization, COMPUSOFT, An Int. J. Advanced Computer Technol., 2019, Vol. 8 (6). — P. 3223–3229.
8. Трушко В. Л., Трушко О. В. Комплексное освоение железорудных месторождений конкурентоспособных подземных геотехнологий // Зап. горн. института. — 2021. — Т. 25. — С. 569–577.
9. Тхориков А. И. Прогноз напряженно-деформированного состояния массива при разработке месторождений богатых железных руд: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб: Санкт-Петербургский Горный университет, 2021. — 110 с.
10. Ву Дык Туан. Обоснование рационального уровня потерь и засорения угля при открытой разработке месторождения “Тай Нам Да Май”, Вьетнам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб: Санкт-Петербургский Горный университет, 2018. — 123 с.
11. Кретов С. И. Повышение технико-экономических показателей обогащения гематитсодержащих магнетитовых кварцов путем применения сухой магнитной сепарации перед измельчением: автореф. дис. ... докт. тех. наук. — М.: Московский государственный горный университет, ОАО “Михайловский ГОК”, 2007. — 148 с.
12. Терещенко С. В., Шibaева Д. Н., Алексеева С. А., Компанченко А. А. Исследование влияния вещественного состава и крупности железистых кварцитов Оленегорского месторождения на результаты сухой магнитной сепарации // Обогащение руд. — 2020. — № 6. — С. 15–20.

13. **Shibaeva D. N., Tereschenko S. V., and Kompanchenko A. A.** Analysis of the effect of dry magnetic separation on the process of ferruginous quartzites disintegration, *Miner.*, 2021, Vol. 11, No. 8.
14. **Ezhov A. M. and Shvaljov Y. B.** Dry magnetic separation of iron ore of the bakchar deposit, *Proc. Chem.*, 2015, Vol. — P. 160–166.
15. **Alexandrov E. A.** The precambrian banded iron-formations of the Soviet Union, *Economic Geology*, 1973, Vol. 68. — P. 1035–1062.
16. **Neumayer Pereira Lima, Luciana Gois, Rodrigo Fina Ferreira, and Jacek Kolacz.** Evaluation of ore sorting technology for iron ore coarse particles, technical contribution to the 20^o, Simpósio de Mineração, 2019. — P. 1–8.
17. **Юрьев Б. П., Шешуков О. Ю.** Разработка экологически чистой технологии обогащения сидеритовых руд // Бюл. науч.-тех. и эконом. информации “Черная металлургия”. — 2019. — № 75 (8). — С. 923–929.
18. **Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю.** Моделирование процесса рентгенофлуоресцентной сепарации // ГИАБ. — 2022. — № 11–1. — С. 127–139.
19. **Юрьев Б. П., Шешуков О. Ю.** Разработка экологически чистой технологии обогащения сидеритовых руд // Бюл. науч.-тех. и эконом. информации “Черная металлургия”. — 2019. — № 75 (8). — С. 923–929.
20. **Мокроусов В. А., Лилеев В. А.** Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М.: Недра, 1979. — 192 с.
21. **Денисов Г. А., Леман Е. П., Томский И. В., Пикунова Т. Ю.** Геотехнологическая интерпретация рентгенорадиометрического опробования руд. — СПб.: Международная академия наук, экологии, безопасности человека и природы, 2002. — 130 с.
22. **Архипов О. А.** Радиометрическая обогатимость руд при их разведке. — М.: Недра, 1985. — 144 с.
23. **Пат. РФ № 2662828 С1** Радиометрический сепаратор / А. А. Ежов, С. В. Терещенко, Д. Н. Павлишина, А. А. Ежов, Б. А. Власов // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 22.
24. **Шибаетва Д. Н., Терещенко С. В., Власов Б. А., Шумилов П. А., Булатов В. В.** Анализ систем транспортирования и разделения радиометрических сепараторов: поиск путей повышения эффективности их работы // ГИАБ. — 2021. — № 5–2. — С. 338–349.
25. **Оценка обогатимости** руд черных и легирующих металлов методами крупнокусковой сепарации. Методические рекомендации № 103. — М.: ВИМС им. Н. М. Федоровского, 2014. — 35 с.
26. **Журавлева Е. С.** Научное и экспериментальное обоснование электрохимических методов повышения технологических показателей переработки черновых магнетитовых концентратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2017. — 111 с.
27. **Изоитко В. М.** Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб: Наука, 1997. — 582 с.

Поступила в редакцию 28/VII 2023

После доработки 15/X 2023

Принята к публикации 16/XI 2023