ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 622.7

Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения

Т.Н.АЛЕКСАНДРОВА[1], **А.В.ЧАНТУРИЯ**[2], **В.В.КУЗНЕЦОВ**[1] ✉

[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *ООО УК «Металлоинвест», Старый Оскол, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Александрова Т.Н., Чантурия А.В., Кузнецов В.В. Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58

Аннотация. Растущая потребность в продукции черной металлургии обуславливает необходимость внедрения технологий, повышающих эффективность обогатительного передела железосодержащего сырья. Перспективным направлением в этой области является внедрение решений, основанных на возможности селективной дезинтеграции руд. Целью данной работы являлось установление закономерностей селективного разрушения железистых кварцитов на основании результатов исследования минералого-технологических свойств сырья. Представлены данные по изучению минералого-технологических особенностей железистых кварцитов Михайловского месторождения методами рентгено-флуоресцентного анализа и автоматизированного минералогического анализа. На основании исследований характера вкрапленности и размеров зерен породных и рудных минералов сформулированы задачи рудоподготовительного передела. В результате изучения измельчения руды установлены параметры распределения железа и оксида кремния по классам крупности в продуктах измельчения. На основании эмпирических зависимостей спрогнозирована крупность измельчения, при которой должно достигаться максимально эффективное раскрытие сростков рудных минералов и их минимальный переход в класс крупности –44 мкм.

***Ключевые слова*:** железистые кварциты; железо; железные руды; рудоподготовка; селективная дезинтеграция; селективное разрушение минералов; автоматизированный минералогический анализ; минеральные сростки

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-55-12002).

Поступила: 13.04.2022 ***Принята: 25.05.2022*** ***Онлайн: 03.11.2022*** ***Опубликована: 03.11.2022***

Введение. Основной тенденцией, характеризующей развитие мировой железорудной промышленности в последние десятилетия, является несоразмерное с приростом запасов разведанных месторождений возрастание объемов потребления продукции [1-3]. В Российской Федерации по состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы железных руд составили 112,4 млрд т, а общие запасы разрабатываемых месторождений – 29,4 млрд т [4]. Соотношение прироста запасов за счет разведки к добыче в 2020 г. составило 0,21 (табл.1). В настоящее время пристальное внимание исследователей привлекают проблемы рационального использования базы железорудного сырья [5] как на этапе горных работ [6-8], так и на стадии металлургии [9-11]. Одним из ключевых факторов повышения эффективности производства остается внедрение цифровых технологий [12-14].

Таблица 1

Состояние сырьевой базы железных руд Российской Федерации в 2018-2020 гг. [4]

Год	Прирост запасов категорий $A + B + C_1$ за счет разведки, млн т	Прирост/убыль запасов категорий $A + B + C_1$ за счет переоценки, млн т	Добыча руды, млн т
2018	22,3	1146,6	357,3
2019	59,0	–73,8	366,0
2020	37,3	80,4	376,1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

Большая часть запасов российской железорудной базы приурочена к месторождениям железистых кварцитов, расположенных в пределах Курской магнитной аномалии. Крупнейшим по запасам является Михайловское месторождение, относящееся к гематит-магнетитовому геологическому типу [15]. Несмотря на высокие объемы запасов руды в месторождениях, около 38 % из них относится к категории C_2 [16]. Дополнительно железистые кварциты Михайловского месторождения относятся к труднообогатимым по ряду факторов: высокая крепость руды, абразивность, тесная ассоциация рудных и нерудных минералов [17]. Совокупность данных факторов обуславливает необходимость внедрения технологических решений, повышающих полноту извлечения железа из данных руд [18, 19]. Однако полупромышленные испытания новых технологических решений на обогатительных и металлургических переделах весьма затратны, что вызывает необходимость проведения предварительных комплексных исследований физико-химических свойств сырья.

Различия минералогического состава и текстурно-структурных особенностей железных руд обуславливают вариативность схем обогащения [20]. Основными критериями выбора технологии обогащения являются вещественный состав железных руд, характер вкрапленности компонентов, контрастность разделительных свойств и прогнозируемая эффективность обогатительного передела [21, 22]. На сегодняшний день, помимо основного передела железных руд – магнитного обогащения, применяют комбинированные схемы. Подтвердило свою эффективность применение гравитационного метода обогащения и флотации для доизвлечения железосодержащих минералов из хвостов магнитного обогащения [23, 24].

Перспективным направлением модернизации схем переработки железистых кварцитов является совершенствование технологий рудоподготовки [25, 26]. Стандартным проектным решением является стадиальный вывод немагнитной фракции на дообогащение и доизмельчение магнитной фракции. Основными проблемами в таком случае являются переизмельчение рудных минералов железа и загрязнение концентратов минералами пустой породы вследствие их механического захвата на стадии магнитного обогащения. Значения микротвердости кварца, гематита, магнетита и гидрогетита подтверждают склонность рудных минералов к переизмельчению [27].

Переизмельчение сырья ведет к повышенным энергозатратам и, как следствие, к снижению рентабельности производства концентрата. Решением данной проблемы может служить получение продукта с заданным распределением компонентов по крупности за счет различной скорости разрушения рудных и породных минералов. Данный принцип лежит в основе технологий селективного разрушения [28-30]. Решения в этой области должны быть обоснованы исследованиями минералого-технологических особенностей руды. Основными являются исследования минеральной текстуры: изучение особенностей границ срастания рудных и породных минералов, оценка распределения минеральных зерен по размеру, расчет параметров удельной площади межфазного контакта и трещиноватости [31, 32]. Текстура тесно связана со степенью раскрытия сростков, и, как следствие, с перераспределением химических элементов по классам крупности в процессе рудоподготовки [33, 34].

Таким образом, целью работы являлось установление закономерностей селективного разрушения железистых кварцитов на основании результатов исследования минералого-технологических свойств сырья.

Методология. Объектом исследования являлись пробы богатой руды Михайловского месторождения после мелкого дробления, P_{80} для исследованной пробы составило 1477,67 мкм. Основными железосодержащими минералами в руде являются магнетит, гематит, мартит, гидроокислы железа, селадонит и сидерит. В зависимости от преобладания одного из компонентов выделяют два технологических типа руд: гематит-магнетитовые и карбонатно-мартитовые. Породообразующие минералы в пробе в основном представлены различными силикатами и карбонатами.

Серии экспериментальных исследований измельчения железистых кварцитов производились в лабораторной шаровой мельнице. Крупность измельчения оценивалась по показателю P_{80}. Исследования были проведены для четырех значений P_{80}: 692,81; 160,08; 124,69; 80,00 мкм. Для исключения случайных ошибок каждый опыт повторялся три раза. Данные по гранулометрическому составу проб и распределению анализируемых компонентов после измельчения были получены

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.58

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526
© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

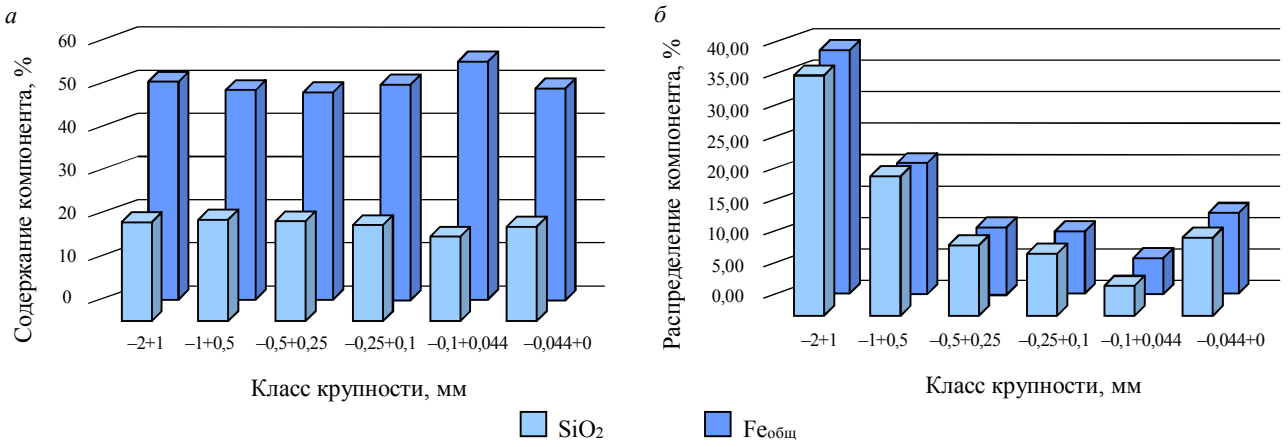


Рис.1. Значения содержаний (*а*) и распределений (*б*) железа и оксида кремния в классах крупности исходной пробы [36]

путем рассева на ситах с ячейками размерами 2000, 1000, 500, 250, 100 и 44 мкм. Полученные классы взвешивались, после чего из них были выделены представительные пробы для анализа элементного состава. Анализ химического состава исходной пробы и продуктов измельчения проводился на аппарате для рентгенофлуоресцентного анализа EDX 7000 Shimadzu, автоматизированный минералогический анализ осуществлялся на инструментальном автоматическом комплексе MLA 650 (FEI Company).

Значения содержаний основных компонентов в исходной пробе железистых кварцитов по результатам РФА: SiO_2 23,00; TiO_2 0,06; Al_2O_3 1,90; $Fe_{общ}$ 50,24; MnO 0,02; MgO 0,30; CaO 0,51; Na_2O < 0,1; K_2O 0,22 %.

На основании изучения результатов химического анализа (рис.1) установлено, что основными компонентами пробы являются кремний, представленный в расчете на оксид кремния, и железо, рассчитанное как железо общее. Также в исследованной пробе установлено присутствие карбонатов железа.

Анализ содержаний компонентов в классах крупности исследованной пробы показал, что наибольшее содержание железа общего соответствует классу крупности –0,1+0,044 мм, а наибольшее содержание оксида кремния соответствует классу крупности –1+0,5 мм (рис.1, *а*). Значения содержаний железа общего в классах крупности изменяется в диапазоне от 48,3 до 55,7 %. Значения содержаний оксида кремния – в диапазоне от 20,06 до 23,80 %.

При исследовании распределения оксида кремния и железа общего по классам крупности в пробе установлено, что максимальные значения распределения компонентов соответствуют классу крупности –2+1 мм (рис.1, *б*). С уменьшением крупности класса до 0,044 мм значения распределений компонентов убывают. В классе крупности –0,044+0 мм установлено повышение значений распределения для оксида кремния до 12,91 %, для железа общего – до 13,20 %.

В работе [35] предложено обоснование селективности операций рудоподготовки по распределению компонентов сырья по классам крупности. Аналогичный принцип использован в данной статье. Для количественной характеристики распределения компонентов в продуктах измельчения по классам крупности в работе применялась интегральная функция гамма-распределения. Аргументом функции являлась крупность в микрометрах, а значением функции являлось значение суммарного распределения компонента «по минусу» в процентах:

$$\varepsilon_i = \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\gamma\left(\alpha, \frac{d}{\beta}\right), \qquad (1)$$

где β, α – параметры гамма-распределения; $\gamma\left(\alpha, \frac{d}{\beta}\right)$ – неполная гамма-функция.

Выбор гамма-распределения для характеристики распределения компонентов по крупности в продуктах измельчения обусловлено высокой сходимостью расчетов экспериментальных значений

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526 DOI: 10.31897/PMI.2022.58
© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

распределений. Параметры α, β характеризуют математическое ожидание функции распределения и интервал значений крупности, для которого характерны максимальные значения распределения компонента, а также форму графической зависимости распределения в зависимости от крупности.

Параметр α характеризует эксцесс функции – меру остроты пика функции. Параметр β характеризует дисперсию значений функции распределения компонента относительно значения математического ожидания.

При измельчении параметр β будет монотонно возрастать с уменьшением P_{80} продукта измельчения. В то же время α с уменьшением крупности продукта измельчения будет незначительно убывать, достигнув минимума, затем резко возрастать. На этапе грубого измельчения переход материала в более мелкие классы обуславливает увеличение остроты пика функции распределения и уменьшение значения параметра α. При тонком измельчении сокращается предельная крупность материала, что повышает равномерность распределения компонентов по существующим классам крупности и обуславливает рост параметра α.

Значения параметров β, α распределений определялись с использованием метода наименьших квадратов. Производилась итерация этих значений до достижения минимума параметра ψ:

$$\psi = \sum_{i=1}^{n} \left(\varepsilon_{\text{экс}}(t_n) - \varepsilon_{\text{рас}}(t_n) \right)^2, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{экс}}(t_n)$, $\varepsilon_{\text{рас}}(t_n)$ – экспериментальное и расчетное значения суммарного распределения компонента по крупности материала соответственно.

Обсуждение. Для анализа характера вкраплений и срастания рудных и породных минералов в исходной пробе проведен комплекс минералогических исследований, результаты которых представлены в табл.2 и на рис.2, *а*.

Таблица 2

Элементный состав сростков

Минерал	Содержание, %							Точка спектра
	Fe	Si	Mn	Mg	Ca	O	Сумма	
Магнетит	69,88	1,56	–	–	–	28,56	100,00	3
	70,23	1,19	–	–	–	28,58	100,00	4
	69,26	1,29	–	–	–	29,45	100,00	6
	69,55	1,46	–	–	–	28,99	100,00	9
Гематит	68,10	0,66	–	–	–	31,24	100,00	2
	68,31	0,68	–	–	–	31,01	100,00	7

Минерал	Содержание, %								Точка спектра
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	CO_2	Сумма	
Селадонит	50,83	1,77	29,19	4,32	–	13,29	–	100,00	1
Кварц	96,39	0,05	0,42	–	–	3,14	–	100,00	5

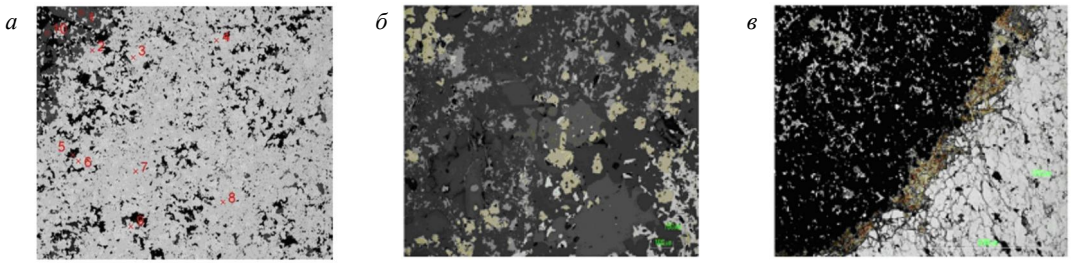


Рис.2. Результаты минералогических исследований проб железистых кварцитов Михайловского месторождения: *а* – магнетит в тесном срастании с гематитом и кварцем, изображение в обратно рассеянных электронах; *б* – гематит-магнетит-гидрогетит-карбонат-селадонит-кварцевые прослои в железистых кварцитах; *в* – контакт безрудного кварцевого прослоя (светлый) с рудным гематит-магнетитовым прослоем (черный) с прожилком карбоната (коричневый)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.58

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526
© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

Установлено, что текстура образцов исследованных руд в основном тонкополосчатая и тонкослоистая (рис.2, *в*). Наиболее часто встречаются сростки гематита, магнетита и кварца (табл.2). Меньшее содержание характерно для сростков магнетита и гематита с селадонитом и гидрогетитом. Для магнетита и гематита характерна тесная ассоциация. Гематит расположен ближе к контакту с породообразующими минералами. В пробе гематит присутствует в виде двух морфологических форм выделений: изометричной и удлиненно-пластинчатой, что обусловлено природой его образования. Гидрогетит в пробах железистых кварцитов образуется как продукт окисления оксидов, карбонатов и силикатов железа (магнетита, сидерита, селадонита). Наибольшая концентрация гидрогетита отмечается в гематит-магнетит-гидрогетит-карбонат-селадонит-кварцевых прослоях (рис.2, *б*) и на контакте кварц-магнетит-гематитовых прослоев с карбонатными прожилками. В пробе руды контакт железосодержащих минералов характеризуется ровными протяженными границами срастаний. Граница контактов породных и рудных минералов характеризуется сложным взаимопроникновением границ одного минерала в другой.

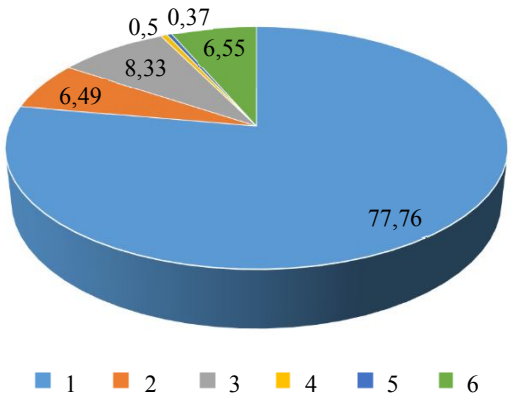


Рис.3. Распределение железа по минералам в исходной пробе железистых кварцитов и классифицированном материале

1 – гематит; 2 – магнетит; 3 – гидрогетит; 4 – прочие минералы; 5 – селадонит; 6 – сидерит

Исследование распределения железа по основным минералам пробы и оценка раскрытия минеральных сростков проведены с применением автоматизированного минералогического анализа, проба была измельчена до крупности –0,12 мм (рис.3).

Анализ характера срастания минеральных зерен (рис.4) показывает, что 84,25 % железа в пробе ассоциировано с гематитом и магнетитом, 14,88 % железа приходится на продукты

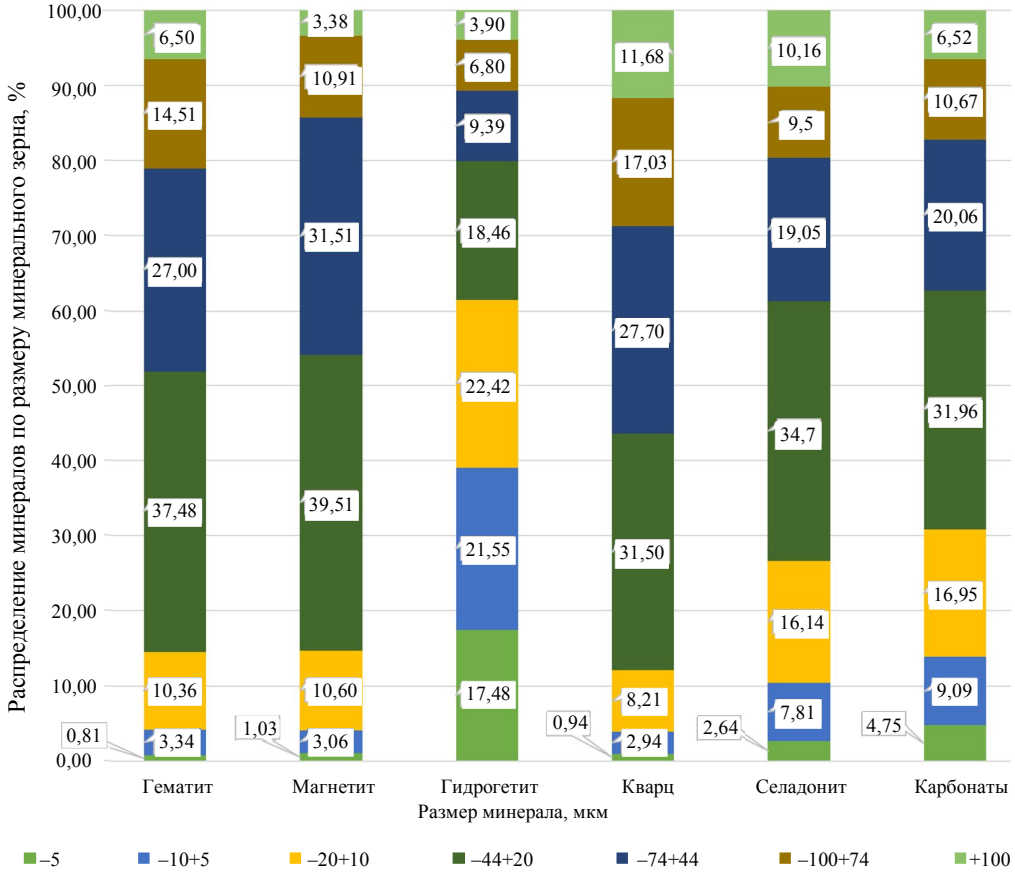


Рис.4. Результаты анализа характера срастания минеральных зерен в пробе мелкодробленной руды Михайловского месторождения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

окисления основных рудных минералов – гидрогетит и сидерит, остальная часть железа ассоциирована с минералами вмещающей породы.

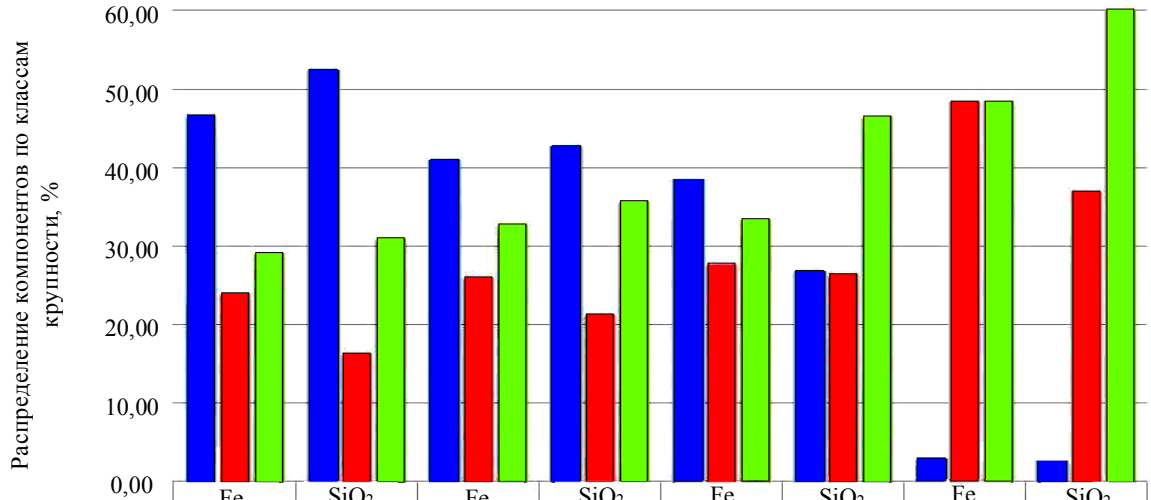
На основании полученных данных (рис.4) установлено, что преобладающим классом крупности минеральных частиц железосодержащих минералов является класс –44+20 мкм. Исключение составляет гидрогетит, для зерен которого преобладающим классом крупности являются классы –20+10 и –10+5 мкм. Преобладание низкоразмерных зерен окисленных минералов железа связано с их генезисом. Характер их вкрапленности и низкая твердость, вероятно, будут обуславливать их склонность к переизмельчению в процессе рудоподготовки.

Распределение размеров минеральных зерен гематита и магнетита коррелируется, что подтверждает их тесную ассоциацию в исследуемой руде. По сравнению с ними для минералов вмещающей породы характерны более высокие значения распределения в классы крупности +100, –100+74, –74+44 мкм; 56,41 % массы минеральных зерен кварца, 38,71 % массы минеральных зерен селадонита имеют крупность больше 44 мкм. Преобладание зерен минералов вмещающей породы больше +44 мкм, вероятно будет способствовать более быстрому раскрытию в процессе измельчения. Их повышенная прочность по сравнению с рудными минералами является предпосылкой к селективному разрушению компонентов руды.

Минералы вмещающей породы, в отличие от рудных минералов, предположительно, должны иметь более низкую скорость измельчения и оставаться в крупных классах продуктов измельчения. Однако, значительная часть рудных минералов пробы вкраплена в минералы вмещающей породы, преимущественно в кварц. Их тесная ассоциация не позволит эффективно обогатить руду магнитными методами, требуется тонкое измельчение для раскрытия сростков. В то же время необходимо не допустить высокой степени переизмельчения железосодержащих минералов и их перехода в класс крупности –44 мкм. С уменьшением размера сростки железосодержащих минералов будут иметь меньшую магнитную восприимчивость, что снизит их обогатимость основным магнитным переделом [37]. Таким образом, селективное разрушение должно обеспечивать раскрытие сростков рудных минералов и их минимальное распределение в класс крупности –44 мкм.

Графическая интерпретация результатов исследования распределения железа и оксида кремния по классам крупности –2000+200, –200+44 и –44 мкм в продуктах измельчения приведена на рис.5.

Установлено, что максимальные значения распределения железа и оксида кремния в класс –100+44 мкм получены при значении P_{80}, равном 80,03 мкм, и составили 48,46 и 37,07 % соответственно. Наибольший прирост железа и оксида кремния в класс крупности –44 мкм составил 14,88



	Fe	SiO_2	Fe	SiO_2	Fe	SiO_2	Fe	SiO_2
	692,81		160,08		120,02		80,03	
–2000+100 мкм	46,77	52,58	41,10	42,10	38,58	26,58	3,07	2,66
–100+44 мкм	24,08	16,35	26,08	21,32	27,82	26,54	48,46	37,07
–44 мкм	29,15	31,08	32,82	35,89	33,59	46,58	48,47	60,27

Рис.5. Распределение железа и оксида кремния по классам крупности в продуктах измельчения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.58

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526
© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

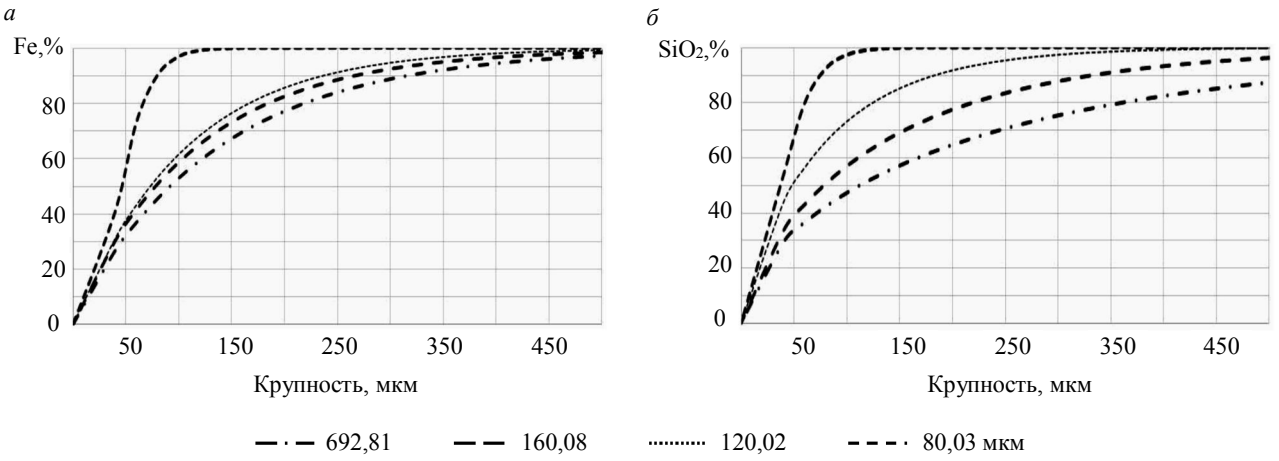


Рис.6. Суммарные распределения железа (*а*) и оксида кремния (*б*) по крупности в продуктах измельчения в зависимости от параметра P_{80}

и 13,69 % соответственно при изменении значения P_{80} от 120 до 80 мкм. Значения распределения железа в класс –44 мкм около 29 % при крупности измельчения P_{80} = 692,81 мкм обусловлен переизмельчением раскрытых сростков окисленных минералов железа. Резкий прирост железа в класс крупности –44 мкм при достижении крупности измельчения P_{80} = 80,03 мкм, вероятно, обусловлен разрушением сростков минералов вмещающей породы и переизмельчением раскрытых рудных минералов. При грубом измельчении низкие значения прироста распределения железа в тонкие классы связаны с возможным разрушением раскрытых железосодержащих породных минералов.

Для количественной характеристики экспериментальных значений суммарных распределений железа общего и оксида кремния установлены параметры гамма-распределения в зависимости от параметра P_{80} по формуле (1) (табл.3). Графическая интерпретация суммарных распределений компонентов по крупности в зависимости от параметра P_{80} приведена на рис.6.

Таблица 3

Параметры функции распределения железа и оксида кремния в зависимости от параметра P_{80}

Компонент	P_{80}, мкм							
	692,81		160,08		120,02		80,03	
	Fe	SiO_2	Fe	SiO_2	Fe	SiO_2	Fe	SiO_2
α	0,94	0,58	0,96	0,71	1,06	0,84	4,36	3,07
β	141,61	376,72	116,82	187,93	99,74	91,09	11,08	13,79

Для кривых распределения железа при значениях P_{80} 692,81, 160,08 и 120,02 мкм (рис.6) характерно незначительное изменение выпуклости функции, в отличие от распределения оксида кремния, что подтверждает незначительное перераспределение железа внутри класса для данных крупностей измельчения. Дополнительно для железа наблюдается незначительное изменение показателя α для параметров P_{80}. Поскольку параметр α характеризует меру остроты пика функции распределения, его увеличение свидетельствует о концентрировании в узком классе крупности. При тонком измельчении это объясняется переходом компонента в самый мелкий класс крупности. Тогда для обеспечения максимальной селективности при классификации продукта измельчения показатель α_{Fe} должен быть минимальным, а α_{SiO_2} – максимальным.

На основании полученных экспериментальных данных установлены эмпирические зависимости, связывающие показатель P_{80} и параметр распределения α компонентов в продуктах измельчения:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526 DOI: 10.31897/PMI.2022.58
© Т.Н.Александрова, А.В.Чантурия, В.В.Кузнецов, 2022

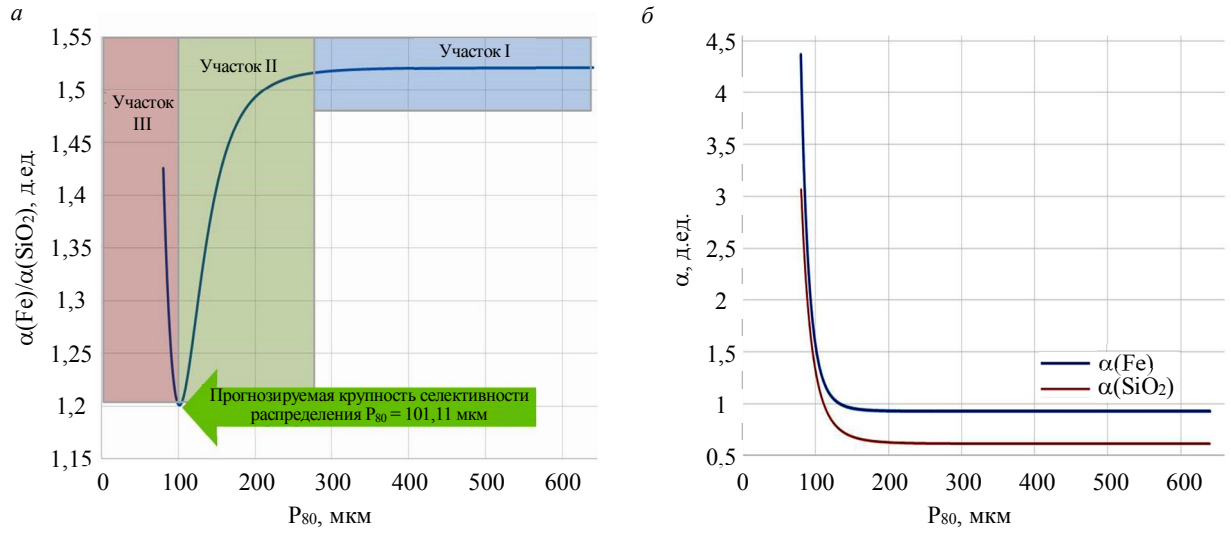


Рис.7. Зависимость α_{Fe}, α_{SiO_2} и их отношения от значения P_{80}

$$\alpha_{Fe} = \frac{8,317 \cdot 10^{14}}{P_{80}^{7,558}} + 0,928;$$

$$\alpha_{SiO_2} = \frac{1,504 \cdot 10^{11}}{P_{80}^{5,668}} + 0,610.$$

Расхождения между рассчитанными значениями и экспериментальными значениями показателя α не превысили 5 %.

Для оценки селективности распределения компонентов по крупности для диапазона P_{80} рассчитаны отношения α_{Fe} к α_{SiO_2} (рис.7).

Характер изменения зависимостей (рис.7, *а*) можно разделить на три участка. На первом участке изменение показателей незначительно и может быть объяснено постепенным переходом компонентов из класса –2000+100 мкм. Второй участок характеризуется резким возрастанием показателя α_{SiO_2}, что, вероятно, обусловлено разрушением сростков минералов вмещающей породы и их переходом в класс –44 мкм. Третий участок характеризуется началом роста показателя α_{Fe} и, вероятно, связан с освобождением вкрапленных в массив пустой породы зерен рудных минералов и их более интенсивном измельчением.

Селективность разрушения характерна для минимума функции $\alpha_{Fe}/\alpha_{SiO_2}$, который был определен, исходя из равенства нулю первой производной функции отношения:

$$f'\left(\frac{\alpha_{Fe}}{\alpha_{SiO_2}}\right) = \frac{u'v - v'u}{v^2} = 0;$$

$$u = P_{80}^{(5,668-7,558)} 8,317 \cdot 10^{14} + 0,928\, P_{80}^{5,668};$$

$$v = 1,504 \cdot 10^{11} + 0,610 P_{80}^{5,668};$$

$$u' = P_{80}^{(5,668-7,558-1)} 8,317 \cdot 10^{14} \left(5,668 - 7,558\right) + 0,928 \cdot 5,668 P_{80}^{(5,668-1)};$$

$$v' = 0,610 \cdot 5,668 P_{80}^{(5,668-1)}.$$

Отношение $\alpha_{Fe}/\alpha_{SiO_2}$ достигает своего минимума при значении P_{80} = 101,11 мкм. Данное значение крупности измельчения является прогнозным для максимально эффективного раскрытия сростков железосодержащих минералов и их минимальном переизмельчении. Полученные данные

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

можно использовать для дальнейших исследований обогатимости железистых кварцитов Михайловского месторождения.

Выводы. Растущий спрос на продукцию черной металлургии в различных отраслях промышленности обуславливает потребность повышения эффективности переработки железорудного сырья и полноты извлечения железа. Основные запасы железосодержащего сырья Российской Федерации приурочены к месторождениям железистых кварцитов. Тонкая вкрапленность рудных минералов, высокая абразивность и крепость пород обуславливают высокие затраты на этапе рудоподготовки. Перспективным направлением модернизации операций дробления и измельчения является применение технологий, основанных на селективном разрушении. В исследовании установлены закономерности селективного разрушения железистых кварцитов на основании результатов изучения их минералого-технологических свойств.

Установлено, что рудные минералы и минералы вмещающей породы железистых кварцитов Михайловского месторождения в исследованной пробе преимущественно сконцентрированы в классах крупности –2+1, –1+0,5 и –0,044 мм. Контакт рудных и породных минералов в пробе отличается сложным характером взаимопрорастания. По результатам автоматизированного минералогического анализа пробы руды установлено, что 84,25 % железа в пробе ассоциировано с гематитом и магнетитом, 14,88 % железа приходится на продукты окисления основных рудных минералов – гидрогетит и сидерит. Установлено преобладание минеральных зерен кварца и селадонита крупностью больше 77 мкм. Основная крупность зерен рудных минералов составляет – 44 мкм.

Различие в прочности рудных и породных минералов является предпосылкой для применения технологий селективного разрушения (контроля распределения компонентов по классам крупности в продуктах измельчения). Характер вкрапленности рудных минералов в массив вмещающей породы обуславливает затруднение раскрытия железосодержащих минералов в процессе рудоподготовки и их переизмельчения.

На основании интерпретации результатов исследования измельчения установлены закономерности селективного разрушения железистых кварцитов спрогнозировано значение крупности измельчения, при которой должно обеспечиваться раскрытие рудных минералов и их минимальный переход в класс крупности –44 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Литвиненко В.С., Сергеев И.Б.* Инновационное развитие минерально-сырьевого сектора // Проблемы прогнозирования. 2019. № 6 (177). С. 60-72.

2. *Чантурия В.А., Вайсберг Л.А., Козлов А.П.* Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2(350). С. 3-9. DOI: 10.17580/or.2014.02.01

3. *Bisweswar D., Swagat S.R.* Existing and New Processes for Beneficiation of Indian Iron ores // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2020. № 3 (73). С. 505-514. DOI: 10.1007/s12666-020-01878-z

4. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. URL: https://www.rosnedra.gov.ru/article/13931.html (дата обращения 06.04.2022).

5. *Помельников И.И.* Состояние и перспективы развития железорудной промышленности при устойчивом снижении мировых цен на железорудное сырье // Горный журнал. 2015. № 7. С. 78-88. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.11

6. *Баженов И.Н., Басов О.О.* Метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 123-130. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

7. *Юнгмейстер Д.А., Судариков С.М., Киреев К.А.* Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88-95. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88

8. *Whitworth A.J., Forbes E., Verster I. et al.* Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes // Cleaner Engineering and Technology. 2022. Vol. 7. № 100451. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100451

9. *Авдохин В.М., Губин С.Л.* Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд // Горный журнал. 2007. № 2. С. 58-64.

10. *Корнев А.В., Кусков В.Б., Бажин В.Ю.* Окускование железных руд экструзионным методом // Черные металлы. 2019. № 11. С. 4-10.

11. *Cheremisina E., Cheremisina O., Ponomareva M. et al.* Kinetic features of the hydrogen sulfide sorption on the ferro-manganese material // Metals. 2021. Vol. 11. № 1. P. 1-12. DOI: 10.3390/met11010090

12. *Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V.* The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // Eurasian Mining. 2020. № 1. P. 36-41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. *Litvinenko V.S.* Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. № 3. P. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4

14. *Savchenkov S.A., Bazhin V.Yu., Volkova O.* Tendencies of innovation development of the russian iron and steel industry on the base of patent analytics for the largest national metallurgical companies // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 20. P. 76-82. DOI: 10.17580/cisisr.2020.02.16

15. *Чернышов Н.М., Петров С.В., Молотков С.П.* Особенности распределения и формы нахождения благородных металлов в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА и их техногенных продуктах (Центральная Россия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2003. № 1. С. 93-104.

16. *Варичев А.В.* От добычи руды к производству металла: развитие Михайловского ГОКа с 2000 до 2010 г. // Горный журнал. 2006. № 7. С. 6-9.

17. *Исмагилов Р.И., Козуб А.В., Гридасов И.Н., Шелепов Э.В.* Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В.Варичева» // Горная промышленность. 2020. № 4. С. 98-103. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103

18. *Кретов С.И., Губин С.Л., Потапов С.А.* Совершенствование технологии переработки руд Михайловского месторождения // Горный журнал. 2006. № 7. С. 71-74.

19. *Трушко В.Л., Трушко О.В.* Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 569-577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10

20. *Юшина Т.И., Чантурия Е.Л., Думов А.М., Мясков А.В.* Современные тенденции в развитии технологий переработки железных руд // Горный журнал. 2021. № 11. С. 75-83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10

21. *Кусков В.Б., Сищук Ю.М.* Совершенствование технологий обогащения железных руд различных типов и вещественного состава // Горный журнал. 2016. № 2. С. 70-74. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.14

22. *Пелевин А.Е.* Тонкое грохочение и его место в технологии обогащения железных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 110-117.

23. *Игнатова Т.В., Шелепов Э.В.* Особенности процесса колонной флотации для железных руд сложного вещественного состава Михайловского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 4. С. 241-245.

24. *Filippov L.O., Severov V.V., Filippova I.V.* An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation // International Journal of Mineral Processing. 2014. № 127. DOI: 10.1016/j.minpro.2014.01.002

25. *Бирюков В.В., Олейник А.Г., Опалев А.С., Щербаков А.В.* Модернизация технологии обогащения железных руд на ОАО «Олкон» с использованием имитационного моделирования // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. № 5 (18). С. 183-188.

26. *Kuskov V. B., Lvov V.V., Yushina T.I.* Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 1. P. 4-8. DOI: 10.17580/cisisr.2021.01.01

27. *Гзогян Т.Н.* Состав и свойства магнетита Михайловского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 12. С. 20-25.

28. *Хопунов Э.А.* Основы дезинтеграции руд и техногенных материалов (теория, эксперимент, технологии). М.: Русайнс, 2016. 474 с. DOI: 10.15216/978-5-4365-1445-1

29. *França J.R.O., Barrios G.K., Turrer H.D., Tavares L.M.* Comminution and liberation response of iron ore types in a low-grade deposit // Minerals Engineering. 2020. № 158. № 106590. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106590

30. *Hesse M., Popov O., Lieberwirth H.* Increasing efficiency by selective comminution // Minerals Engineering. 2017. № 103. P. 112-126. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106590

31. *Чантурия Е.Л., Вишкова А.А., Ананьев П.П. и др.* Интенсификация измельчения руд с использованием энергетических воздействий // Горный журнал. 2014. № 12. С. 63-69.

32. *Donskoi E., Poliakov A., Holmes R. et al.* Iron ore textural information is the key for prediction of downstream process performance // Minerals Engineering. 2016. № 86. P. 10-23. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.11.009

33. *Jankovic A.* Developments in iron ore comminution and classification technologies of iron ore // Metals and Surface Engineering, Woodhead Publishing, 2022. P. 269-308. DOI: 10.1016/B978-1-78242-156-6.00008-3

34. *Schulz B., Merker G., Gutzmer J.* Automated SEM Mineral Liberation Analysis (MLA) with Generically Labelled EDX Spectra in the Mineral Processing of Rare Earth Element Ores // Minerals. 2019. Vol. 9. № 527. DOI: 10.3390/min9090527

35. *Aleksandrova T.N., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Selective Disintegration Justification Based on the Mineralogical and Technological Features of the Polymetallic Ores // Minerals. 2021. Vol. 11. № 8. DOI: 10.3390/min11080851

36. *Nikolaeva N., Aleksandrova T., Chanturiya E.L., Afanasova A.* Mineral and Technological Features of Magnetite-Hematite Ores and Their Influence on the Choice of Processing Technology // ACS Omega. 2021. Vol. 6. № 13. P. 9077-9085. DOI: 10.1021/acsomega.1c00129

37. *Jena S.K., Sahoo H., Rath S.S. et al.* Characterization and Processing of Iron Ore Slimes for Recovery of Iron Values // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2015. Vol. 36. P. 174-182.

***Авторы*: Т.Н.Александрова,** *д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, профессор, https://orcid.org/0000-0002-3069-0001* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **А.В.Чантурия,** *руководитель управления, https://orcid.org/0000-0003-2357-4579* (*ООО УК «Металлоинвест», Старый Оскол, Россия*), **В.В.Кузнецов,** *аспирант, s205058@stud.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0001-6159-316X* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0