

# Марганцевые руды: объемы переработки и методы обогащения

Куандык Бактибаевич ДЮСЕНБЕКОВ  
Дмитрий Витальевич ШЕХИРЕВ\*

Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия

## Аннотация

**Цель и актуальность работы.** Минералы марганца в основном встречаются в сочетании с железом, однако наличие высокого содержания железа в марганцевых рудах делает эти руды непригодными для производства ферросплавов. Строгие требования к марганцевым концентратам с повышенными массовыми соотношениями ( $Mn/Fe > 7$ ), а также стремления обогатителей максимально повысить содержание марганца в концентрате обуславливают необходимость разработки новых и эффективных методов обогащения бедных железисто-марганцевых руд.

**Методология.** В настоящем обзоре большое внимание уделяется предварительному обогащению руды рентгенометрическим методом и традиционному физическому обогащению по селективному извлечению марганца и железа из труднообогатимых железомарганцевых руд. Также был представлен обзор обогащенных марганцевых концентратов с повышенными массовыми соотношениями ( $Mn/Fe > 7$ ) и изложены проблемы, связанные с традиционными методами обогащения руды.

**Результаты и область применения.** Основным потребителем марганца является черная металлургия. В настоящее время наблюдается резкий рост спроса на марганцевые ферросплавы, но на мировом рынке наблюдается дефицит дешевых марганцевых руд с высоким содержанием марганца. Из результатов, полученных в ходе исследования, можно сделать вывод: все традиционные физические методы носят фундаментальный характер для повышения эффективности обогащения и в настоящее время приближаются к пределам своих возможностей, что делает их неспособными участвовать в переработке труднообогатимых железомарганцевых руд. Для вовлечения в эксплуатацию бедных и труднообогатимых железомарганцевых руд более широко должны применяться современные технологии рудоподготовки на основе крупнокусковой рентгенометрической сепарации, обеспечивающей значительное сокращение перерабатываемой труднообогатимой марганцевой руды с удалением отвального продукта. При этом значительно повышается содержание ценных компонентов и резко снижаются затраты на основные процессы обогащения.

**Выводы.** Для усовершенствования процессов подготовки к обогащению нужна модернизация соответствующего оборудования с целью уменьшения шламообразования. Традиционный процесс дробления в щековых и конусных дробилках необходимо заменить на дробление в ударно-центробежной дробилке и роллер-прессах, а также применить способ предварительного рентгенометрического обогащения с получением богатых крупнокусковых металлургических концентратов.

**Ключевые слова:** марганцовый концентрат, железомарганцевая руда, труднообогатимая руда, гравитационное разделение, магнитная сепарация, радиометрическое обогащение, рудоподготовка, шламообразование.

## Введение

Марганец является важным сырьем, ключевой сферой использования марганцевых руд и концентратов является черная металлургия, обеспечивающая около 90 % мирового потребления [1]. Помимо производства стали марганец имеет ряд других важных применений, которые каждый год вносят значительный вклад в национальную и мировую экономику. Например, он является важнейшим элементом при производстве различных химических источников тока, специальных сплавов, применяется в химической промышленности [2].

Поскольку богатые марганцевые руды постепенно истощаются, многие современные исследования направлены на извлечение марганца из труднообогатимых желе-

зомарганцевых руд для обеспечения потребности в сырье для развития металлургической промышленности.

Оксидные и карбонатные руды марганца составляют основную сырьевую базу для добычи марганца. Выбор способа обогащения во многом зависит от содержания примесей в рудах и последующего применения полученных концентратов. Марганец в основном встречается в минералах в сочетании с железом из-за схожих геохимических свойств. Наряду с требованиями к качеству концентратов по вредным примесям существуют ограничения по содержанию железа.

По соотношению марганца и железа руды делятся на следующие типы:

\*shekhirev.dv@misis.ru

**Таблица 1. Мировая добыча и запасы марганца в 2022 г.**  
**Table 1. World production and reserves of manganese in 2022**

Страны	Добыча руды, тыс. т		Запасы, тыс. т
	2021 г.	2022 г.	
США	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Австралия	3260	3300	270 000
Бразилия	542	400	270 000
Бирма	206	200	Неизвестно
Китай	991	990	280 000
Кот-д'Ивуар	362	360	Неизвестно
Габон	4340	4600	61 000
Грузия	224	220	Неизвестно
Гана	940	940	13 000
Индия	453	480	34 000
Казахстан (концентрат)	90	110	5 000
Малайзия	356	360	Неизвестно
Мексика	226	230	5 000
ЮАР	7200	7200	640 000
Украина (концентрат)	600	400	140 000
Вьетнам	146	150	Неизвестно
Другие	150	150	Мало
Всего в мире (округленно)	20 100	20 000	1 700 000

– марганцевые руды ( $Mn/Fe > 6-7$ );  
– железисто-марганцевые руды ( $Mn/Fe \sim 1$ );  
– марганцовисто-железные руды ( $Mn/Fe < 1$ ); содержание Mn около 5–10 % [3].

Труднообогатимые железомарганцевые руды и бедные ресурсы марганцевых руд распространены во всем мире. При промывке, дроблении, измельчении и транспортировке богатых марганцевых руд около 30 % добытых руд преобразуются в мелочь марганцевой руды с низким содержанием марганца [4]. В Индии почти половина ресурсов марганцевой руды имеет железистый характер, и железо не может быть удалено обычным методом гравитационного разделения, главным образом, из-за небольшой разницы в плотности минералов железа и марганца [5]. В Китае больше 73 % марганцевых руд относятся к железомарганцевым рудам с низким массовым отношением  $Mn/Fe < 3$  [6]. В целом у марганцевого концентрата товарного качества для выплавки высококачественного ферромарганца отношение содержаний марганца к железу должно быть не ниже 7 [7].

В настоящем обзоре большое внимание уделяется предварительному обогащению руды рентгенорадиометрическим методом и традиционному физическому обогащению по селективному извлечению марганца и железа из труднообогатимых железомарганцевых руд. Также был представлен обзор обогащенных марганцевых концентратов с повышенными массовыми соотношениями ( $Mn/Fe > 7$ ) и выявлены проблемы, связанные с традиционными методами обогащения руды.

#### Результаты

#### Мировое производство марганцевой руды (2015–2022)

В настоящее время наблюдается резкий рост спроса на марганцевые ферросплавы, но на мировом рынке наблюдается дефицит дешевых марганцевых руд с высоким содержанием марганца.

Южная Африка заняла первое место по производству марганца в 2022 г., произведя около 7,2 млн т, в настоящее время на ее долю приходится около 70 % выявленных мировых ресурсов марганца, при этом запасы страны составляли около 640 млн т. В табл. 1 приведены мировые запасы и добыча марганцевых руд. Недавнее исследование, проведенное Геологической службой США, показало, что в мире остались ограниченные запасы высококачественного марганца в размере около 1,7 млрд т [8].

Мировое производство марганцевой руды в 2022 г. сократилось до 21,1 млн т, что на 3 % меньше, чем в предыдущем году (рис. 1). Снижение поставок средне- и низкосортной руды (–5 % и –1 % соответственно) компенсирует увеличение добычи богатой руды на 1 % из-за роста затрат на электроэнергию, поскольку производство марганцевых сплавов требует меньше энергии при использовании руды с более высоким содержанием. Производство руды с высоким содержанием Mn ( $> 44 \% Mn$ ) в настоящее время составляет 40 % от общего объема добычи, в то время как руда со средним содержанием ( $> 30 \%$  и  $< 44 \% Mn$ ) составляет 50 %, а руда с низким содержанием ( $< 30 \% Mn$ ) составляет оставшиеся 10 %. В 2022 г. производство сократилось в Южной Африке, Австралии, Китае, Гане, Бразилии, Кот-д'Ивуаре и Мексике, но увеличилось в Габоне и Индии. На Южную Африку сейчас приходится 40 % мирового производства марганцевой руды, что значительно больше, чем в 2021 г., за ней следуют Габон (22 %) и Австралия (14 %), рис. 2.

Казахстан занимает одно из основных мест в мире по запасам марганца, но большая часть марганцевых руд характеризуется низким содержанием фосфора, но высоким – железа и кремнезема. В большинстве случаев наличие высокого содержания железа в марганцевых рудах делает эти руды непригодными для производства ферросплавов. Сходство физических характеристик минералов железа и марганца делает процесс разделения сложным и

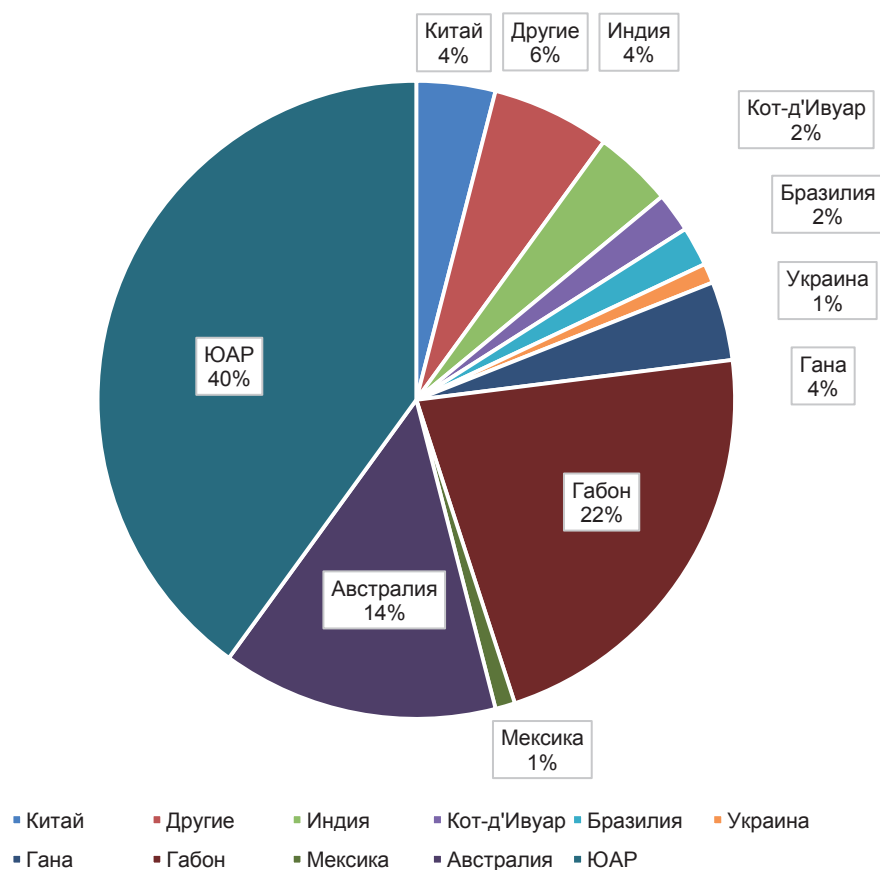


Рисунок 1. Крупнейшие производители марганцевой руды в 2022 г. [9]  
 Figure 1. Largest producers of manganese ore in 2022 [9]

дорогостоящим [7]. Возможно, это изоморфное замещение элементов железа и марганца в решетке гематита и оксидов марганца (гаусманит, пиролюзит) при длительном выветривании или существует возможность тонкого срастания минералов оксидов железа и оксидов марганца. Поэтому исследователи, работающие в этой области, сосредоточены на разработке новых и эффективных методов обогащения труднообогатимых и низкосортных железомарганцевых руд.

Российская Федерация обладает достаточно крупной сырьевой базой марганцевых руд, входя в десятку мировых держателей их запасов, однако товарно-сырьевую продукцию не производит. Внутренняя промышленность использует закупаемые за рубежом товарные марганцевые руды и ферросплавы [1]. Распределение ресурсов марганца несбалансированно, и более 50 % запасов марганцевых руд страны расположены в Усинском месторождении. Качество российских руд в целом низкое: по содержанию марганца они относятся к бедным и труднообогатимым (среднее значение марганца по месторождениям колеблется в пределах 6,6–31 %), при этом данные руды содержат повышенное количество фосфора, а также железа и диоксида кремния [10]. В целом из-за очень низкого содержания марганца стоимость извлечения может быть высокой.

**Процессы извлечения и разделения Mn и Fe**

Во всем мире основными методами обогащения марганцевых руд являются промывка, гравитация, магнитная

сепарация, флотация и др. Именно эти традиционные методы – первый шаг на пути отделения марганца и железа из железомарганцевых руд [7, 11].

Промывка является первоначальной процедурой удаления от вмещающих и сопутствующих песчано-глинистых минералов из железомарганцевых руд и обеспечивает предпосылки для бесперебойного проведения последующих разделительных операций по переработке [7, 12].

Гравитационное разделение основано на разнице плотностей различных минералов в железомарганцевых рудах. Плотности минералов гаусманита, пиролюзита, псиломелана, родохрозита и браунита составляют, г/см<sup>3</sup>: 4,7–4,9; 4,5–5,0; 3,5–4,71; 3,5–4,5 и 4,7–5,0 соответственно. Плотности гематита, магнетита, сидерита и лимонита составляют, г/см<sup>3</sup>: 4,9–5,3; 4,8–5,2; 3,55–3,95 и 2,7–4,3 соответственно [13]. Плотность минералов марганца и железа почти на одном уровне, поэтому разделение минералов железа и марганца гравитационным способом не является эффективным.

Гравитационное разделение позволяет достичь эффективного обогащения в некоторых случаях, в зависимости от географического региона. Индия располагает значительными запасами кремнистых руд, которые обогащаются с использованием традиционных методов гравитационного обогащения, таких как отсадка и спирали. Данные руды измельчаются до более мелких фракций для удаления кварцевых и глинистых жильных минералов

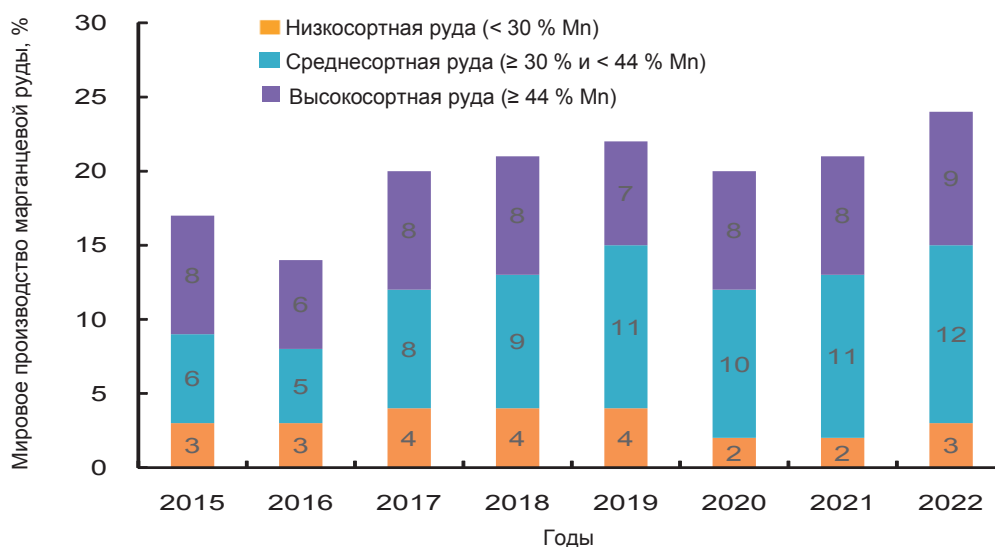


Рисунок 2. Мировое производство марганцевой руды по сортам [9]  
Figure 2. World production of manganese ore by grade [9]

Таблица 2. Результаты физического разделения марганца и железа из железомарганцевых руд  
Table 2. Results of physical separation of manganese and iron from ferromanganese ores

Страны	Метод обогащения	Содержание исходной руды, %			Содержание Mn концентрата, %			Извлечение, %
		Mn	Fe	Mn/Fe	Mn	Fe	Mn/Fe	
Китай	Магнитная сепарация высокой интенсивности	19,11	15,50	1,23	23,37	17,88	1,31	81,90
ЮАР	Магнитная сепарация высокой интенсивности	29,80	19,22	1,55	29,72	21,18	1,40	59,90
Индия	Магнитная сепарация высокой интенсивности	22,40	14,50	1,54	45,80	14,77	3,10	44,70

методом отсадки и спиралей. Данный метод пригоден для удаления свободного кремнезема в некоторых рудах, но не может эффективно отделить железо и марганец, содержащиеся в железистых рудах [14–17].

М. А. Гурман, Л. И. Щербак разработали комбинированную многостадийную схему переработки гематит-браунитовой руды, включающую операции мокрой и сухой магнитной сепарации в слабом и сильном поле и гравитационного обогащения, которая обеспечивает возможность получения марганцевых концентратов с содержанием 37,85–46,46 % марганца. Использование метода обратной магнитной сепарации гематит-браунитовой руды в высокоинтенсивном магнитном поле предусматривает возможность стадийного вывода отвальных хвостов из технологического цикла со средним содержанием 2,66 % марганца [18, 19].

Магнитная сепарация является одним из наиболее широко используемых процессов обогащения марганцевой руды. Кроме того, методы сухой магнитной сепарации приобретают все большее значение из-за таких преимуществ, как экономия воды и отсутствие стадии обезвоживания [20, 21]. В работе Бходжа и др. использовали обогащение труднообогатимой железомарганцевой руды

методом одностадийной сухой магнитной сепарации с исходным содержанием ~28 % по марганцу, Mn : Fe ~1. В результате получены оптимальные содержания 35,52 % по марганцу при соотношении Mn : Fe = 1,77 и извлечении 44 % марганца в случае образца 1, тогда как для образца 2 получили содержание 33,75 % по марганцу с отношением Mn : Fe, равным 1,66 при извлечении Mn 44 %. Кроме того, было замечено, что высвобождение минерала марганца происходило в классе крупности от 300 до 450 мкм [22].

Магнитная сепарация высокой интенсивности также является распространенной технологией для обогащения железомарганцевых руд с учетом различий в магнитной восприимчивости различных минералов, но степень разделения марганца и железа все еще недостаточна [23, 24].

В. Сингх и др. [4] использовали низкосортную марганцевую руду и методами гравитационной и магнитной сепарации получили богатую марганцевую руду, содержащую 42 % марганца по массе и отношение Mn/Fe = 5 при значении извлечения марганца около 48 %. К сожалению, полученные результаты не удовлетворяют требованиям марганцевых концентратов соответствующего уровня с более высокими массовыми соотношениями Mn/Fe.

В табл. 2 приведены результаты магнитного разделения с высокой интенсивностью марганца и железа из типичных железомарганцевых руд в Китае, Южной Африке и Индии [12, 24, 25]. Результаты обогащения показывают, что эффективно разделить марганец и железо очень сложно, хотя породные минералы можно легко удалить, а содержание марганца и железа в концентратах повышается. В целом из-за сложной минералогии железомарганцевых руд эффективно отделить железо и получить марганцевые концентраты с высоким соотношением Mn/Fe только традиционными методами обогащения затруднительно [26].

Магнитное разделение часто считается подходящим для обогащения марганцевой руды, когда руда богата кремнистыми минералами пустой породы. Однако этот процесс считается неприемлемым для железистого типа руды и остается недостижимой областью исследований. Для получения концентрата, пригодного для использования в производстве ферромарганца, рекомендуется, чтобы руда содержала минимальную начальную концентрацию ~25 % марганца и ~10 % железа [22].

Процесс флотации позволяет достичь высокой степени разделения и относительно высокого содержания при переработке бедной карбонатной марганцевой руды с мелким размером зерен, что является одним из важных способов обработки этого вида руды. Однако из-за сложного состава руд требования к флотореагентам также выше; поэтому для эффективного использования флотационных методов разделения для извлечения марганца необходима разработка эффективных флотационных технологий [26].

Флотационное обогащение труднообогатимых железомарганцевых руд применяют весьма редко, так как флотационные свойства оксидных минералов марганца, железа и других породных минералов очень близки.

Согласно работе Марка Дональда Паррента, были проведены исследования по разделению пиролюзита и гематита с помощью пенной флотации. Два условия испытаний смогли достичь цели; первым из них был тест VI13, который проводился при pH 11 с использованием 200 г/т олеата натрия при 80 % проходимости частиц размером 117 мкм. Вторым испытанием, достигшим поставленной цели, был тест VI23, который проводился при pH 9 с использованием 200 г/т олеата натрия и 250 г/т картофельного крахмала, а также с размером прохождения 80 % 117 мкм. Минералогические исследования, проведенные на спиральном концентрате Вабуш и продуктах стеновой флотации, показали, что частицы пиролюзита высвобождаются на ~50 % от частиц гематита в объемной пробе спирального концентрата. Учитывая уменьшение размера частиц с 80 % при переходе от 365 мкм до 117 мкм для испытаний VI13 и VI23, делаем вывод, что высвобождение не является ограничивающим фактором при разделении пиролюзита. Механизм адсорбции олеата натрия на пиролюзите и гематите был исследован с помощью измерений зета-потенциала и ИК-Фурье. Было обнаружено, что пиролюзит и гематит имеют значения нулевой точки заряда pH 4,6 и 6,5 соответственно, что согласуется со значениями, приведенными в литературе. Измерения FTIR показали, что олеат натрия физически и химически адсорбирует-

ся как пиролюзитом, так и гематитом при pH 7, тогда как при pH 11 на обоих минералах наблюдалась только химическая адсорбция. Одним из факторов, ответственных за селективную флотацию гематита в лабораторных условиях при pH 11, была разница в способе связывания олеата. Было обнаружено, что при pH 11 олеат адсорбируется на гематите в смеси режимов совместной поверхностной гидратации ISMM и OS, в то время как на пиролюзите адсорбция, как было обнаружено, в основном является ISMM, с вкладом режимов общей поверхностной гидратации OS и ISBB. Различия в способе связи были объяснены разной кристаллической структурой гематита и пиролюзита, что влияет на способность катионов металлов связываться с обоими атомами кислорода карбоксилатной группы. Другим важным наблюдением была интенсивность адсорбции олеата на гематите и пиролюзите в целом. Было обнаружено, что полосы адсорбции разновидностей олеата натрия имеют более высокую интенсивность в FTIR-спектрах гематита как при pH 7, так и при pH 11 по сравнению с пиролюзитом. Учитывая это, видим, что олеат имеет более высокое сродство к адсорбции на гематите, чем на пиролюзите. Это подтверждается измерениями зета-потенциала, которые показывают, что при концентрации олеата натрия  $2,5 \cdot 10^{-6}$  моль/л происходит значительное смещение нулевой точки заряда гематита, в то время как нулевая точка заряда пиролюзита не изменяется. В лабораторных условиях прямая флотация позволила получить гематитовые концентраты с выходом продукта 60 % при извлечении 90 % [27].

Как видно, обогащение оксидных марганцевых руд методом прямой флотации возможно, однако улучшение соотношения Mn/Fe не достигается. Обзор исследований флотации показывает, что флотация минералов оксида марганца может повысить содержание марганца за счет удаления примесей или других полезных минералов, но удаление железа затруднено, и необходимо изучить новые методы, такие как биофлотация, для улучшения селективной флотации нежелательных минералов [28].

Основные работы по селективному извлечению и разделению марганца и железа из железомарганцевых руд были проведены российскими учеными.

В центральной лаборатории Западно-Сибирского геологического управления проводились исследования железомарганцевой руды Кайгадатского, Дурновского и Селезеньского месторождений на обогатимость. Данные руды имеют высокое содержание диоксида кремния на уровне 42–62 %, достаточно высокое содержание железа и низкое содержание марганца. Обогащение руды проводилось промывкой, гравитацией, магнитной сепарацией и флотацией. Положительных результатов не было достигнуто, исследования показали низкую эффективность при обогащении традиционными способами [1].

Применение магнитных и гравитационных методов обогащения осложняется для труднообогатимых окисленных руд Порожинского месторождения нивелированием магнитных и гравитационных свойств разделяемых минералов марганца и железа. Кроме того, данные руды имеют склонность к шламообразованию марганцевых минералов. Основным принципом обогащения таких марганцевых руд является щадящая технология, пред-

усматривающая максимальное сохранение исходной крупности руды, позволяющая выделить обогащенные марганцевые концентраты. В качестве метода крупнокускового обогащения была выбрана радиометрическая сепарация [7].

Технология РРС является известным процессом обогащения марганцевых, железомарганцевых руд с повышенным содержанием железа. Рентгенорадиометрическое обогащение труднообогатимых железомарганцевых руд – достаточно известный способ предварительного обогащения марганцевых руд.

За последние тридцать лет технология РРС прошла большую опытную и промышленную апробацию. Например, на Жайремском ГОКе проводились работы по обогащению железомарганцевой руды месторождения Ушкатын-III способом рентгенорадиометрической сепарации. Извлечение марганца в марганцевый концентрат составляло 94,19 %, железа в железный концентрат – 87,04 %. При этом в марганцевом концентрате доля марганца 52,3 %, железа 0,82 %, а отношение Mn/Fe больше 60. Таких высоких показателей обогащения традиционными физическими методами до сих пор не удавалось достичь [7].

Современные методы РРС при сортировке марганцевых руд с повышенным содержанием железа одновременно с концентратом марганца позволяют дополнительно получать концентрат железа, качество которых задается критерием обогащения по марганцу и критерием обогащения по железу [29].

Для получения марганцевых концентратов соответствующего уровня с более высокими массовыми соотношениями Mn/Fe проведено много работ по селективному извлечению и выделению марганца и железа из железомарганцевых руд. Эффективное разделение марганца и железа затруднено и возможно только с использованием предварительного обогащения методом РРС и традиционных физических методов обогащения, таких как гравитационный, магнитный или флотация. Это обусловлено тесной связью между марганцем, железом в железомарганцевых рудах или ошламованием в процессах физического разделения. Большую часть пустой породы минералов можно легко удалить традиционными физическими методами и получить концентраты с высоким содержанием марганца, но в них также извлекается большое количество железа, превышая лимиты по содержанию в кондиционных продуктах вредных примесей.

К примеру, авторами А. В. Вишняковым, Ю. О. Федоровым, А. Ю. Чикиным был предложен новый способ получения двух металлургических кусковых концентратов в зависимости от задаваемых пороговых значений аналитических параметров  $P_{Mn}$  и  $P_{Fe}$ , а также исходных содержаний марганца и железа в руде: один – по марганцу (например, три сорта – Mn > 45 %, Mn > 40 %, Mn > 30 %), другой – по железу (например, два сорта – Fe > 40 %, Fe > 30 %) [30].

Таким образом, можно считать, что РРС стала основной технологией обогащения марганцевых руд с получе-

нием крупнокусковых металлургических концентратов, которая существенно расширяет эффективность освоения труднообогатимых железомарганцевых месторождений.

#### Заключение

Минералы марганца в основном встречаются в сочетании с железом, однако наличие высокого содержания железа в марганцевых рудах делает эти руды непригодными для производства ферросплавов, поэтому исследователи, работающие в этой области, сосредоточены на разработке новых, эффективных методов обогащения бедных железомарганцевых руд.

Проведены многочисленные исследования по извлечению и выделению марганца и железа из труднообогатимых железомарганцевых руд, которые характеризуются низким содержанием марганца, высоким содержанием железа, сложным вещественным составом и близкими технологическими свойствами слагающих их минеральных комплексов. Из результатов, полученных в ходе исследования, можно сделать вывод: все традиционные физические методы, изложенные ранее, носят фундаментальный характер и в настоящее время приближаются к пределам своих возможностей, что делает их неспособными участвовать в переработке труднообогатимых железомарганцевых руд.

Для вовлечения в эксплуатацию бедных и труднообогатимых железомарганцевых руд более широко должны применяться современные технологии рудоподготовки на основе крупнокусковой рентгенорадиометрической сепарации, обеспечивающей значительное сокращение перерабатываемой труднообогатимой марганцевой руды с удалением отвального продукта, что значительно повышает содержание ценных компонентов и резко снижает затраты на основные процессы обогащения. В этом случае в металлургический передел марганцевые концентраты поступают без процесса окускования. Это, в свою очередь, сокращает число операций рудоподготовки в технологических схемах. Как известно, при процессе рудоподготовки происходит шламообразование вследствие некоторого переизмельчения, которое несет значительные потери по марганцу. Для дезинтеграции потерь основного компонента необходимо выстраивать процесс таким образом, чтобы разрушение железомарганцевой руды со сложным минеральным комплексом происходило не по случайным направлениям сжимающих усилий, а преимущественно по границам срастания минеральных зерен, при которых происходит максимальное раскрытие железомарганцевых минералов. Для усовершенствования процессов подготовки к обогащению и модернизации соответствующего оборудования с целью уменьшения шламообразования традиционный процесс дробления в щековых и конусных дробилках необходимо заменить на дробление в ударно-центробежной дробилке и роллер-прессах. Таким образом, новый подход к обогащению труднообогатимых железомарганцевых руд сократит число операций рудоподготовки в технологических схемах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нохрина О. И., Рожихина И. Д., Голодова М. А., Израильский А. О. Изучение возможности обогащения железомарганцевых руд Кузбасса // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 9. С. 904–909. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-9-904-909>
2. Clarke C., Upson S. A global portrait of the manganese industry – A socioeconomic perspective // NeuroToxicology. 2017. Vol. 58. P. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2016.03.013>
3. Корчевский А. Н., Самойлик В. Г. Обогащение руд черных металлов. Донецк: ДонНТУ, 2021. 270 с.
4. Singh V., Ghosh T. K., Ramamurthy Y., Tathavadkar V. Beneficiation and agglomeration process to utilize low-grade ferruginous manganese ore fines // International Journal of Mineral Processing. 2011. Vol. 99. Issues 1–4. P. 84–86. <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.03.003>
5. Singh V., Biswas A. Physicochemical processing of low grade ferruginous manganese ores // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 158. P. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.11.013>
6. Liu B., Zhang Y., Lu M., Su Z., Li G., Jiang T. Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 286–303. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.016>
7. Марганец / К. Н. Трубецкой [и др.]. М.: Изд-во АГН, 1999. 271.
8. U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023. Reston: The U. S. Government Printing Office, 2023. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
9. U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries – manganese // USGS. 2023. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>
10. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 г.: гос. доклад / М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) / гл. ред. Д. Д. Тетенькин, Е. И. Петров. М., 2022. 622 с.
11. Manganese: Global Industry Markets & Outlook to 2020. London, UK: Roskill Information Services, 2015. 279 p.
12. Tripathy S. K., Banerjee P. K., Suresh N. Effect of desliming on the magnetic separation of low-grade ferruginous manganese ore // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2015. Vol. 22 (7). P. 661–673. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1120-0>
13. Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В. Технологические свойства минералов: справочник для технологов. М.: Теплоэнергетик, 2007. 296 с. <https://www.elibrary.ru/qkgvul>
14. Peravadhanulu A., Prasad Rao P. D., Mathur G. P., Altekar V. A. Beneficiation of manganese ores. Monograph on ores and minerals of India – beneficiation and agglomeration techniques for industrial and economic exploitation. Jamshedpur: CSIR – NML, 1979. P. 163–192. URL: <http://eprints.nmlindia.org/3727>
15. Güven O., Burat F., Kangal O., Acarkan N. Beneficiation of low-grade Turkish manganese Ore // Proceedings of XXVI International Mineral Processing Congress (New Delhi, India, 24–28 September 2012). Article number 177. P. 1828–1833.
16. Nurjaman F., Amarella S., Noegroho A., Ferdian D., Suharno B. Beneficiation of two different low-grade Indonesian manganese ores to improve the Mn/Fe ratio // International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering, IC3PE 2017 (Yogyakarta, Indonesia, 15 November 2016–16 November 2016). I. Fatimah, & G. Purwiandono (Eds). 2017. Vol. 1823. Issue 1. P. 1–7. Article number 020021. <https://doi.org/10.1063/1.4978094>
17. Singh V., Chakraborty T., Tripathy S. K. A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Vol. 41. Issue 6. P. 417–438. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634567>
18. Гурман М. А., Щербак Л. И. Комбинированные методы обогащения гематит-браунитовой руды // ФТПРПИ. 2018. № 1. С. 144–159.
19. Гурман М. А. Повышение степени извлечения марганца из гематит-браунитовой руды // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения-2017): материалы Междунар. науч. конф. (Красноярск, 12–15 сент. 2017 г.). Красноярск: СФУ, 2017. С. 231–234.
20. Elliott R., Barati M. A review of the beneficiation of low-grade manganese ores by magnetic separation // Canadian Metallurgical Quarterly. 2020. Vol. 59. Issue 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1080/00084433.2020.1711654>
21. Шиббаева Д. Н., Терещенко С. В., Асанович Д. А., Шумилов П. А. К вопросу о необходимости классификации горной массы, направляемой на сухую магнитную сепарацию // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 603–612. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.79>
22. Bhoja S. K., Tripathy S. K., Murthy Y. R., Ghosh T. K., Raghu Kumar C., Chakraborty D. R. Influence of Mineralogy on the Dry Magnetic Separation of Ferruginous Manganese Ore – A Comparative Study // Minerals. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 1–20. Article number 150. <https://doi.org/10.3390/min11020150>
23. Grieco G., Kastrati S., Pedrotti M. Magnetic enrichment of braunite-rich manganese ore at different grain sizes // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2014. Vol. 35. Issue 4. P. 257–265. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.793680>
24. Mpho M., Samson B., Ayo A. Evaluation of reduction roasting and magnetic separation for upgrading Mn/Fe ratio of fine ferromanganese // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23. Issue 4. P. 537–541. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.07.012>
25. Yu Y. H., Zhou Y. C. Feasibility research on the beneficiation of ferromanganese ore in Sichuan // Technological Innovations (applied journal). 2014. No. 5. P. 20–21. (In Chinese).
26. Xiao J., Zou K., Chen T., Xiong W., Deng B. Extraction of Manganese and Iron from a Refractory Coarse Manganese Concentrate // Metals. 2021. Vol. 11. Issue 4. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/met11040563>
27. Parrent M. D. Separation of Pyrolusite and Hematite by Froth Flotation. PhD Thesis. Edmonton, Canada: University of Alberta, 2012. 168 p. <https://doi.org/10.7939/R30933>
28. Abdel-Khalek N. A., Selim K. A., Hassan M. A., Moharram M. R., Saleh A. M., Ramadan A. M. The Role of Interaction between Paenibacillus polymyxa Bacteria and Pyrolusite-Hematite System through Bioflotation // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 4. Issue 4. P. 1121–1129.
29. Пат. 2764394 Рос. Федерация, СПК В 03 В 13/06. Способ рентгенорадиометрического обогащения марганцевых руд / Федоров Ю. О., Вишняков А. В., Макаров С. А., Куликов В. И.; патентообладатель АО «Иргиредмет». № 2020138515; заявл. 23.11.20; опубл. 17.01.22, Бюл. № 2.
30. Вишняков А. В., Федоров Ю. О., Чикин А. Ю. Совершенствование технологии рентгенорадиометрической сепарации марганцевых руд // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 2. С. 79–87. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-79-87>

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2024 года

# Manganese ores: processing volumes and enrichment methods

Kuandyk Baktibaevich DYUSENBEKOV  
Dmitriy Vital'evich SHEKHIREV\*

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

## Abstract

**Purpose and relevance of the work.** Manganese minerals are mainly found in combination with iron, but the presence of high iron content in manganese ores makes these ores unsuitable for the production of ferroalloys. Strict requirements for manganese concentrates with increased mass ratios ( $Mn/Fe > 7$ ), as well as the desire of ore enrichment specialists to maximize the manganese content in the concentrate, necessitate the development of new and effective methods for enrichment of poor ferrous-manganese ores.

**Methodology.** In this review, much attention is paid to preliminary enrichment of ore by the X-ray radiometric method and traditional physical enrichment for the selective extraction of manganese and iron from difficult-to-enrich ferromanganese ores. A review of enriched manganese concentrates with increased mass ratios ( $Mn/Fe > 7$ ) was also presented and problems associated with traditional ore enrichment methods were outlined.

**Results and scope.** The main consumer of manganese is ferrous metallurgy. Currently, there is a sharp increase in demand for manganese ferroalloys, but there is a deficit of cheap manganese ores with a high manganese content on the world market. Based on the results obtained in the course of the study, it can be concluded that all traditional physical methods are of a fundamental nature for increasing the efficiency of enrichment and are currently approaching the limits of their capabilities, which makes them incapable of participating in the processing of difficult-to-enrich ferromanganese ores. To involve poor and difficult-to-enrich ferromanganese ores in operation, modern ore preparation technologies based on large-piece X-ray radiometric separation should be used more widely, ensuring a significant reduction in the processed difficult-to-enrich manganese ore with the removal of waste product. At the same time, the content of valuable components significantly increases and the costs of the main enrichment processes are sharply reduced.

**Conclusions.** To improve the processes of preparation for enrichment, it is necessary to modernize the corresponding equipment in order to reduce sludge formation. The traditional process of crushing in jaw and cone crushers must be replaced by crushing in an impact-centrifugal crusher and roller presses, and also to apply the method of preliminary X-ray radiometric enrichment with the production of rich large-piece metallurgical concentrates.

**Keywords:** manganese concentrate, ferromanganese ore, difficult-to-enrich ore, gravity separation, magnetic separation, radiometric enrichment, ore preparation, sludge formation.

## REFERENCES

1. Nokhrina O. I., Rozhikhina I. D., Golodova M. A., Izrail'skiy A. O. 2020, Study of the possibility of enrichment of ferromanganese ores of Kuzbass. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], vol. 76, no. 9, pp. 904–909. (In Russ.) <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-9-904-909>
2. Clarke C., Upson S. 2017, A global portrait of the manganese industry – A socioeconomic perspective. *NeuroToxicology*, vol. 58, pp. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2016.03.013>
3. Korchevsky A. N., Samoylik V. G. 2021, Enrichment of ferrous metal ores. Donetsk, 270 p. (In Russ.)
4. Singh V., Ghosh T. K., Ramamurthy Y., Tathavadkar V. 2011, Beneficiation and agglomeration process to utilize low-grade ferruginous manganese ore fines. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 99, issues 1–4, pp. 84–86. <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.03.003>
5. Singh V., Biswas A. 2017, Physicochemical processing of low-grade ferruginous manganese ores. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 158, pp. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.11.013>
6. Liu B., Zhang Y., Lu M., Su Z., Li G., Jiang T. 2019, Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review. *Minerals Engineering*, vol. 131, pp. 286–303. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.016>
7. Trubetskiy K. N. [et al.]. 1999, Manganese. Moscow, 271 p. (In Russ.)
8. 2023, U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023. Reston: The U. S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
9. 2023, U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries – manganese. USGS. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>
10. Tetenkin D. D., Petrov E. I. 2022, On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021: State report. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Federal Agency for Subsoil Use (Rosnedra). Moscow, 622 p. (In Russ.)
11. 2015, Manganese: Global Industry Markets & Outlook to 2020. London, UK: Roskill Information Services, 279 p.
12. Tripathy S. K., Banerjee P. K., Suresh N. 2015, Effect of desliming on the magnetic separation of low-grade ferruginous manganese ore. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 22 (7), pp. 661–673. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1120-0>
13. Doroshenko M. V., Bashlykova T. V. 2007, Technological properties of minerals: A handbook for technologists. Moscow, 296 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qkgvul>

\*shekhirev.dv@misis.ru



14. Peravadhanulu A., Prasad Rao P. D., Mathur G. P., Altekar V. A. 1979, Beneficiation of manganese ores. Monograph on ores and minerals of India – beneficiation and agglomeration techniques for industrial and economic exploitation. Jamshedpur: CSIR – NML, pp. 163–192. URL: <http://eprints.nmlindia.org/3727>
15. Güven O., Burat F., Kungal O., Acarkan N. 2012, Beneficiation of low-grade Turkish manganese Ore. Proceedings of XXVI International Mineral Processing Congress. Article number 177. India, pp. 1828–1833.
16. Nurjaman F., Amarella S., Noegroho A., Ferdian D., Suharno B. 2017, Beneficiation of two different low-grade Indonesian manganese ores to improve the Mn/Fe ratio. International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering, IC3PE 2017, vol. 1823, issue 1, pp. 1–7. Article number 020021. <https://doi.org/10.1063/1.4978094>
17. Singh V., Chakraborty T., Tripathy S. K. 2019, A Review of Low-grade Manganese Ore Upgradation Processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 41, issue 6, pp. 417–438. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634567>
18. Gurman M. A., Shcherbak L. I. 2018, Combined methods of enrichment of hematite-braunite ore. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems of mineral development], no. 1, pp. 144–159. (In Russ.)
19. Gurman M. A. 2017, Increasing the degree of extraction of manganese from hematite-braunite ore. Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksin readings-2017): Materials of the International scientific conference (Krasnoyarsk, September 12–15, 2017). Krasnoyarsk, pp. 231–234. (In Russ.)
20. Elliott R., Barati M. 2020, A review of the beneficiation of low-grade manganese ores by magnetic separation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 59, issue 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1080/00084433.2020.1711654>
21. Shibaeva D. N., Tereshchenko S. V., Asanovich D. A., Shumilov P. A. 2022, On the need to classify rock mass fed to dry magnetic. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 256, pp. 603–612. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.79>
22. Bhoja S. K., Tripathy S. K., Murthy Y. R., Ghosh T. K., Raghu Kumar C., Chakraborty D. R. 2021, Influence of Mineralogy on the Dry Magnetic Separation of Ferruginous Manganese Ore – A Comparative Study. *Minerals*, vol. 11, no. 2, pp. 1–20. Article number 150. <https://doi.org/10.3390/min11020150>
23. Grieco G., Kastrati S., Pedrotti M. 2014, Magnetic enrichment of braunite-rich manganese ore at different grain sizes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 35, issue 4, pp. 257–265. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.793680>
24. Mpho M., Samson B., Ayo A. 2013, Evaluation of reduction roasting and magnetic separation for upgrading Mn/Fe ratio of fine ferromanganese. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 23, issue 4, p. 537–541. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.07.012>
25. Yu Y. H., Zhou Y. C. 2014, Feasibility research on the beneficiation of ferromanganese ore in Sichuan. *Technological Innovations (applied journal)*, no. 5, pp. 20–21. (In Chinese).
26. Xiao J., Zou K., Chen T., Xiong W., Deng B. 2021, Extraction of Manganese and Iron from a Refractory Coarse Manganese Concentrate. *Metals*, vol. 11, issue 4, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/met11040563>
27. Parrent M. D. 2012, Separation of Pyrolusite and Hematite by Froth Flotation. PhD Thesis. Edmonton, Canada: University of Alberta, 168 p. <https://doi.org/10.7939/R30933>
28. Abdel-Khalek N. A., Selim K. A., Hassan M. A., Moharram M. R., Saleh A. M., Ramadan A. M. 2017, The Role of Interaction between Paenibacillus polymyxa Bacteria and Pyrolusite-Hematite System through Bioflotation. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, issue 4, pp. 1121–1129.
29. Fedorov Yu. O., Vishnyakov A. V., Makarov S. A., Kulikov V. I. 2022, Patent 2764394 Russian Federation, SPK B 03 B 13/06. Method of X-ray radiometric enrichment of manganese ores. Patent holder: AO Irgiredmet. No. 2020138515; applied 23.11.20; published 17.01.22, Bulletin no. 2. (In Russ.)
30. Vishnyakov A. V., Fedorov Yu. O., Chikin A. Yu. 2021, Improving the technology of manganese ore X-ray radiometric separation. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], no. 2, pp. 79–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-79-87>

The article was received on April 23, 2024