

# НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

## SUBSOIL USE

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.71

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16



## ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ БУРОЖЕЛЕЗНЯКОВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА

Колодежная Е.В.<sup>1</sup>, Горлова О.Е.<sup>1,2</sup>, Шадрунова И.В.<sup>1</sup>, Гаркави М.С.<sup>3</sup>, Хардин И.С.<sup>3</sup>, Шавакурова О.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup> ЗАО «Урал-Омега», Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** По мере истощения традиционной сырьевой базы магнетитовых руд необходимо проводить комплекс мероприятий, направленных на оценку перспектив и разработку технологий переработки бедных бурожелезняковых руд, которых на Южном Урале известно свыше 20 месторождений. В статье рассмотрены новые технологические подходы к переработке окисленного труднообогатимого железорудного сырья на примере одного из месторождений бурых железняков Зигазино-Комаровской группы. **Цель работы.** Оценка возможности обогащения бурожелезняковой руды наиболее простыми и менее затратными сухими процессами обогащения и разработка технологической схемы для получения железного концентрата, пригодного для металлургического передела. **Используемые методы.** Изучение вещественного состава пробы руды проведено рентгено-флуоресцентным и оптико-минералогическим методами, магнитных свойств – осциллографическим способом. Дифференциальный-термический анализ выполнен на приборе STA 499 F3 Jupiter. Измельчение и классификация руды проводились в измельчительном комплексе КИ-0,36, работающем с центробежным классификатором КЦ-0,3. Сухая магнитная сепарация проведена на валковом сепараторе ЭВС-28/9 с магнитной индукцией 1,7 Тл, мокрая магнитная сепарация – на полиградиентном мокром магнитном сепараторе с кассетой с ферромагнитными телами. **Новизна.** Разработана технологическая схема сухого обогащения бурожелезняковой руды (без магнетизирующего обжига), позволяющая получать концентрат для аглодоменного производства с массовой долей железа на уровне 47,5–49,1% (52,9–54,7% на прокаленное вещество) при достаточно высоком для данного типа руд извлечении 55,5–72,3%. **Результат.** Данная технологическая схема может рассматриваться в качестве альтернативы технологиям гравитационного обогащения и мокрой магнитной сепарации в сильном магнитном поле, обжиг-магнитного обогащения бурых железняков при технико-экономическом обосновании отработки некоторых небольших месторождений. Установлена оптимальная крупность помола руды при сухом обогащении – 0,315 мм и показана целесообразность обесшламливания руды перед сухой магнитной сепарацией. **Практическая значимость.** Технология может быть реализована в виде мобильной дробильно-обогатительной установки сухого предварительного обогащения бурожелезняковой руды непосредственно на месторождениях, не требующих при этом водоснабжения и водоотведения. Это повысит коммерческую привлекательность и потенциал использования небольших по запасам месторождений бурожелезняковых руд для металлургической промышленности Южного Урала.

**Ключевые слова:** бурожелезняковые руды, удельная магнитная восприимчивость, испытания на обогатимость, магнетизирующий обжиг, сухое обогащение, магнитная сепарация, обесшламливание, измельчительно-классифицирующий комплекс

© Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакурова О.П., 2025

### Для цитирования

Перспективы переработки бурожелезняковых руд Южного Урала / Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакурова О.П.// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## PROSPECTS FOR PROCESSING THE LOW-GRADE BROWN IRON ORES OF THE SOUTHERN URALS

Kolodezhnaya E.V.<sup>1</sup>, Gorlova O.E.<sup>1,2</sup>, Shadrunova I.V.<sup>1</sup>, Garkavi M.S.<sup>3</sup>, Khardin I.S.<sup>3</sup>, Shavakuleva O.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup>Ural-Omega CJSC, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** As the traditional raw material base of magnetite ores is depleted, it is necessary to carry out a set of measures aimed at assessing the prospects and developing technologies for processing low-grade brown iron ores, of which there are over 20 known deposits in the Southern Urals. The article considers new technological approaches to the processing of oxidized difficult-to-dress iron ore raw materials using one of the brown iron ore deposits of the Zigazino-Komarovo Formation as an example. **Objectives** are evaluation of the possibility of enriching brown iron ore using the simplest and least expensive dry enrichment processes and development of a process flow diagram for obtaining iron concentrate suitable for metallurgical processing. **Methods Applied.** The material composition of the ore sample was studied using X-ray fluorescence and optical-mineralogical methods, and the magnetic properties were studied using the oscillographic method. Differential thermal analysis was performed on the STA 499 F3 Jupiter device. Grinding and classification of ore were carried out in the CG-0,36 grinding complex, working with the CC-0,3 centrifugal classifier. Dry magnetic separation was carried out on the EVS-28/9 roller separator with a magnetic induction of 1,7 T; wet magnetic separation was carried out on a polygradient wet magnetic separator with a cassette with ferromagnetic bodies. **Originality.** A technological scheme for dry enrichment of brown iron ore (without magnetizing roasting) has been developed, making it possible to obtain concentrate for sintering and blast-furnace production with an iron mass fraction of 47,5–49,1% (52,9–54,7% on a calcined substance basis) at a sufficiently high extraction of 55,5–72,3% for this type of ore. **Result.** This process flow chart can be considered as an alternative to gravity enrichment and wet magnetic separation in a strong magnetic field, roasting-magnetic enrichment of brown iron ores in the feasibility study of developing some small deposits. The optimal ore grinding size during dry enrichment was established (0,315 mm), and the feasibility of ore desliming before dry magnetic separation was shown. **Practical Relevance.** The technology can be implemented as a mobile crushing and enrichment unit for dry preliminary enrichment of brown iron ore directly at the deposits, which does not require water supply and drainage. This will increase the commercial attractiveness and potential for using small brown iron ore deposits for the metallurgical industry of the Southern Urals.

**Keywords:** brown iron ore, specific magnetic susceptibility, enrichment tests, magnetizing roasting, dry enrichment, magnetic separation, desliming, grinding and classifying unit.

### For citation

Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E., Shadrunova I.V., Garkavi M.S., Khardin I.S., Shavakuleva O.P. Prospects for Processing the Low-Grade Brown Iron Ores of the Southern Urals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 5–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16>

### Введение

Бурожелезняковые руды кор выветривания имеют важное экономическое значение, поскольку по запасам занимают третье место в мире [1]. Однако использование их в металлургическом производстве в настоящее время весьма ограничено в силу ряда причин. Содержание железа в рудах составляет 17–44%, большинство руд относятся к бедным и требуют обогащения. Наличие в руде фосфора вызывает трудности при разработке технологий их переработки и в ряде случаев удаление фосфора из концентратов возможно только при обжиге [2]. Природные слабомагнитные оксиды и оксигидроксиды железа – гематит, лепидокрокит, гётит, гидрогётит, ферригидрид – составляют значительную часть рудных минералов,

имеют тонкодисперсную зернистость и вкрапленность, образуют порошковые, скрытокристаллические и коллоидальные массы, а также имеют низкую контрастность магнитных свойств. Характерной особенностью железосодержащих минералов данного типа руд является наличие большого количества переходных форм, различающихся по содержанию железа и текстурно-структурным признакам.

Промышленную переработку такого типа руд на территориях России и стран ближнего зарубежья осуществляют только на Бакальском рудоуправлении (Российская Федерация), перерабатывающем руду Ново-Бакальского месторождения по обжиг-магнитной схеме, и на обогатительной фабрике (ОФ) Лисаковского ГОКа, перерабатывающей руду Лисаковского ме-

сторождения (Республика Казахстан) по гравитационно-магнитной и обжиг-магнитной схемам [3]. Основное сырье для производства железного концентраты на Бакальском рудоуправлении – сидеритовая руда, бурый железняк является сопутствующим типом руды. Среднее содержание железа общего в рудах Бакальского рудоуправления варьирует от 29 до почти 52% [4]. В то же время в Казахстане бурожелезняковые руды являются стратегически важным сырьем для черной металлургии, основные запасы которых сосредоточены на месторождениях Лисаковское, Аятское, Кокбулак, Кутанбулак и Талдыспе и др. [5–8].

Около 15% запасов железных руд заключено в недрах Уральского федерального округа на территории Свердловской и Челябинской областей. На Урале производится около 20% железорудного сырья России и исторически имеются огромные металлургические мощности по его переработке. При этом ряд комбинатов Южного Урала (Магнитогорский, Челябинский) работают на дальнепривозном сырье и испытывают острый дефицит собственного железорудного сырья. До 65% сырья завозится для них с месторождений КМА, из Республики Карелия, Мурманской и Иркутской областей [9].

В то же время на Южном Урале известно свыше 20 перспективных месторождений бурых железняков (Туканское, Тара, Наратай и др.), представляющих собой серию тектонических чешуй, имеющих значительное сходство и однотипность отдельных объектов. Приуроченность рудных тел к определенным стратиграфическим горизонтам обуславливает линейность в их расположении. Запасы железных руд данного района по категориям А+В+С1 составляют около 74 млн т со средним содержанием железа 40,5% [10]. Характерной особенностью руд данного района является относительно невысокое содержание фосфора – 0,01–0,03%, что делает их перспективным сырьем для металлургической переработки. По мере истощения традиционной сырьевой базы легкообогатимых магнетитовых руд необходимо проводить комплекс мероприятий, направленных на оценку перспектив и разработку технологий переработки бедных бурожелезняковых руд, которых только в Зигазино-Комаровско-Инзерском районе Республики Башкортостан известно свыше 20 месторождений [11].

Традиционно переработка таких руд осуществляется по сложным обжиг-магнитно-гравитационным схемам, включающим, как правило, стадиальную промывку и обесшламливание руды, что значительно удлиняет технологическую цепочку фабрики [12]. Рудоподготовка таких структурно-неоднородных и легкошламующихся руд, как бурые железняки, сопровождается образованием вторичных шламов при большом количестве присутствующих первичных шламов, с которыми связаны основные потери ценностного компонента и трудности в обезвоживании полученных продуктов переработки. Наличие в руде глины и охристых частиц потребует создания особых

условий при транспортировке и складировании исходного сырья, сгущении продуктов переработки. Разрабатываются и более сложные комбинированные технологии обогащения и дефосфорации бурожелезняковых руд, к примеру обжиг-магнитная с выщелачиванием обожженного продукта для руды месторождения Кокбулак в Казахстане [13].

Технология термомагнитного обогащения представляет собой наиболее жизнеспособный и приемлемый способ обогащения бурых железняков и применяется на Лисаковском ГОКе в Казахстане, Кремиковском металлургическом комбинате в Болгарии. Сущность технологии заключается в предварительном обжиге руды или концентрата с последующим магнитным обогащением полученного огарка. Термообработка окисленной руды позволяет повысить содержание железа в материале за счет удаления гидратной влаги. В результате обжига могут измениться магнитные свойства железосодержащих минералов за счет перехода гётита в гематит. Гётит превращается в структурно неупорядоченный гематит при температурах до 250°C. При дальнейшем нагревании структура гематита становится всё более совершенной, и к 600°C этот процесс в основном завершается. При этом качество железного концентрата, получаемого из обожженной руды, становится выше, но и себестоимость технологии переработки обожженной руды значительно возрастает [4].

Целями исследования являлись оценка возможности обогащения окисленных бурожелезняковых руд Южного Урала наиболее простыми и наименее затратными сухими процессами обогащения и разработка технологической схемы сухого обогащения для получения железного концентрата, пригодного для металлургического передела.

### **Теория вопроса, материалы и методы исследования**

При переработке бурожелезняковых руд получают концентраты с невысокой массовой долей железа на уровне 50–55%, поэтому построение экономически выгодных технологических схем обогащения данного типа руд должно осуществляться на основе современных научных достижений в области рудоподготовки и магнитной сепарации и включать в себя комплексное изучение вещественного состава, магнитных свойств и их модификации с целью формирования и управления потоками материала, обладающими контрастными свойствами по одному или нескольким разделительным признакам. При переработке бурожелезняковой руды к таким признакам относятся крупность рудных минералов, как природная, сформировавшаяся в месторождении, так и изменяющаяся под действием прикладываемой нагрузки в операциях дезинтеграции, и магнитная восприимчивость материала различной дисперсности. Эти два параметра являются взаимосвязанными и должны изучаться в комплексе.

Разработка схемы сухого обогащения бурожелезняковых руд представляется нам вполне перспективной, так как позволит вводить в эксплуатацию мелкие месторождения, расположенные в неблагоприятных условиях, снизить энергетические затраты во всех операциях обогащения и удешевить природоохраные мероприятия за счет исключения затрат на строительство и содержание хвостохранилища и водно-шламового хозяйства в целом.

Использование воды в качестве транспортирующей и разделительной среды в обогатительных операциях увеличивает объем перерабатываемой рудной массы и удорожает проект в целом. Необходимость строительства вблизи горно-обогатительного комбината хвостохранилища и станции очистки сточных вод создает дополнительные экологиче-ко-социальные трудности. Стабильность водоснабжения технологических процессов также вызывает трудности при освоении небольших месторождений, расположенных в горных и засушливых районах. Наличие в бурожелезняковых рудах железосодержащих минералов ряда гётит-гидрогётит определяет необходимость проведения обжига, что также ставит под сомнение целесообразность использования воды в последующих процессах обогащения.

Применение сухой магнитной сепарации в практике обогащения окисленных бурожелезняковых руд ограничено, так как руды обладают слабомагнитными свойствами и относятся к шламующимся материалам [14, 15]. Современные магнитные сепараторы российских производителей позволяют регулировать индукцию магнитного поля в зависимости от крупности питания и магнитных свойств руды [14]. Высокоиндуктивные валковые сепараторы для сухого обогащения слабомагнитных руд ЭРГА СМВИ компании «ЭРГА» имеют повышенную индукцию на рабочей поверхности до 2 Тл, а сепараторы 2ЭВС-36/100 завода «Рудормаш» имеют индукцию в рабочей зоне не менее 1,65 Тл. В связи с общей направленностью проводимого исследования на применение сухих процессов рудоподготовки и обогащения была испытана сухая магнитная сепарация измельченной бурожелезняковой руды.

Технологии обогащения с использованием сухой магнитной и электрической сепараций, пневматического обогащения, радиометрических методов сегодня можно назвать альтернативой традиционным гравитационным и флотационным схемам обогащения, они имеют большие перспективы для многих видов минерального сырья [16]. Особенностью опробованных технологических решений является использование центробежно-ударной техники в операции рудоподготовки. Реализуемый в оборудовании принцип разрушения свободным ударом в воздушной среде и возможность регулирования величины прилагаемой нагрузки под особенности перерабатываемого сырья позволяет решать широкий спектр задач рудоподготовки [17].

В центробежно-ударную мельницу материал подается внешним управляемым питателем и поступает на вращающийся ускоритель. В ускорителе материал распределается, приобретает высокую скорость и выбрасывается в камеру измельчения. При ударе частиц о статичную поверхность они разрушаются. Измельченные частицы подхватываются воздушным потоком и направляются во встроенный классификатор. В классификаторе производится разделение: частицы, превышающие установленную границу крупности, направляются в ускоритель на повторный цикл измельчения. Частицы, удовлетворяющие установленной границе, воздушным потоком удаляются из мельницы, осаждаются и разгружаются в готовый продукт. Возможность регулировки гранулометрического состава продуктов классификации за счет изменения числа оборотов и расхода воздуха классификатора позволяет регулировать качественно-количественные показатели переработки в некотором диапазоне значений (рис. 1). Производительность комплексов от 10 до 50 т/ч и гибкость компоновочных решений позволяют легко встраивать пневмоклассифицирующие комплексы в современные проектные решения.

По нашему мнению, варьирование степени дисперсности руды в процессе рудоподготовительных операций и дозированная термообработка сырья позволят достичь в процессе обогащения бурожелезняковых руд технологических показателей, приемлемых для введения в промышленную переработку перспективного железорудного сырья. При разрушении бурожелезняковой руды произойдет избирательное разрушение частиц менее прочных глинистых минералов и бедных окристых минералов, а последующая воздушная классификация в центробежном классификаторе позволит получить продукты, отличающиеся не только по гранулометрическому, но и химическому составу.

Объектом исследований является бурожелезняковая окристая руда, отобранная на одном из месторождений Зигазино-Комаровской группы (Республика Башкортостан, Белорецкий район).

Изучение вещественного состава руды проведено рентгено-флуоресцентным методом на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific с использованием программного обеспечения UniQuant. Дифференциаль-но-термический анализ выполнен на приборе STA 499 F3 Jupiter. Минеральный состав проб определялся оптико-минералогическим методом анализа на автоматизированном анализаторе горных пород, руды и рудных концентратов «Минерал С7».

Магнитные свойства минералов характеризуются магнитной восприимчивостью, коэрцитивной силой и удельной намагниченностью, которые были определены осциллографическим способом для порошкообразных материалов, позволяющим визуально наблюдать кривую гистерезисного цикла при намагничивании образца переменным током на экране электронного осциллографа [18].

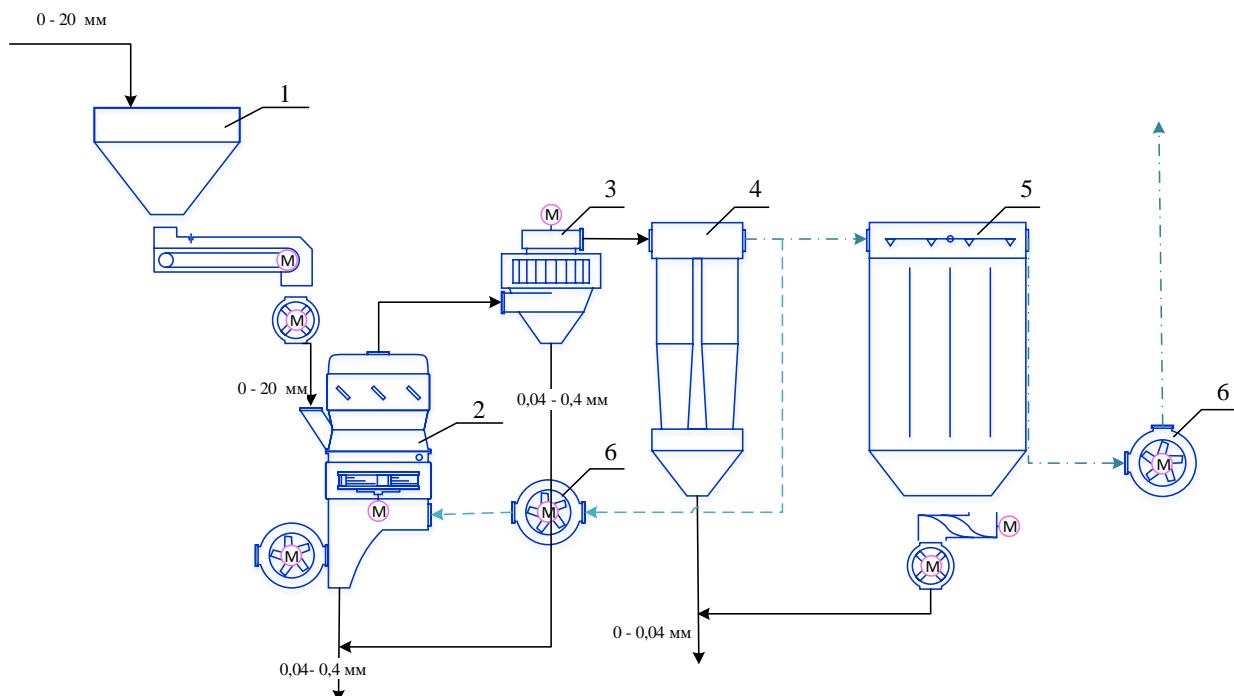


Рис. 1. Измельчительно-классифицирующий комплекс: 1 – бункер с ленточным питателем; 2 – центробежно-ударная мельница МЦ; 3 – центробежный классификатор КЦ; 4 – группа циклонов; 5 – фильтр рукавный; 6 – вентилятор

Fig. 1. Grinding and classifying unit: 1 is hopper with belt feeder; 2 is centrifugal impact mill MC; 3 is centrifugal classifier CC; 4 is cyclone group; 5 is bag filter; 6 is fan

Измельчение и классификация руды проводились в измельчительном комплексе КИ-0,36, работающем с центробежным классификатором КЦ-0,3 компании ЗАО «Урал-Омега» (Россия). Производительность комплекса по исходному материалу составляет до 300 кг/ч. Обжиг руды проводился в муфельной печи ЭКПС-10 при температуре 400°C в течение 1 ч.

Сухая магнитная сепарация проведена на лабораторном валковом сепараторе ЭВС-28/9 с максимальной магнитной индукцией в рабочей зоне до 1,7 Тл. Производительность сепаратора до 600 кг/ч. Мокрая магнитная сепарация осуществлялась на установке, включающей электромагнитную систему и кассету с ферромагнитными телами – железными шарами с напряженностью электромагнитного поля на обкладках кассеты 115–355 кА/м, представляющей собой полиградиентный мокрый магнитный сепаратор.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Опробованные руды относятся к гипергенным бурым железнякам, сформировавшимся при выветривании сидеритов, а также основных и ультраосновных пород. Данная руда содержит 0,02% фосфора и является перспективным металлургическим сырьем (табл. 1). Влажность руды составила 8,5%.

Таблица 1. Химический состав технологической пробы руды

Table 1. Chemical composition of the technological ore sample

Массовая доля компонентов, %								
Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
42,8	14,0	0,28	0,80	9,60	0,30	1,40	1,79	42,8

Руды представлены плотными бурыми железняками и рыхлыми охристыми разностями. Главные рудные минералы: гётит, гидрогётит с подчиненными количествами гидрогематита, соотношение которых в параллельно отобранных пробах колеблется в широком диапазоне. В небольших количествах присутствуют гематит и гидроксиды марганца. Другие ценные попутные минералы, кроме марганцевых, отсутствуют. Вмещающие породы представлены слабометаморфизованными известняками, доломитами и углисто-глинистыми и алевролито-глинистыми сланцами. Содержание железа общего в пробе составило 42,8%.

Для определения температуры обжига руды, при которой происходит удаление химически связанной влаги из рудных минералов, был проведен дифференциально-термический анализ исходного материала, результаты которого приведены на рис. 2.

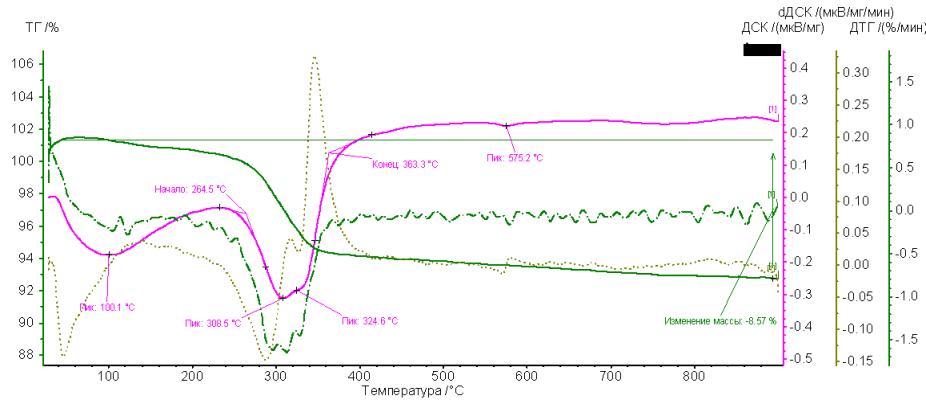


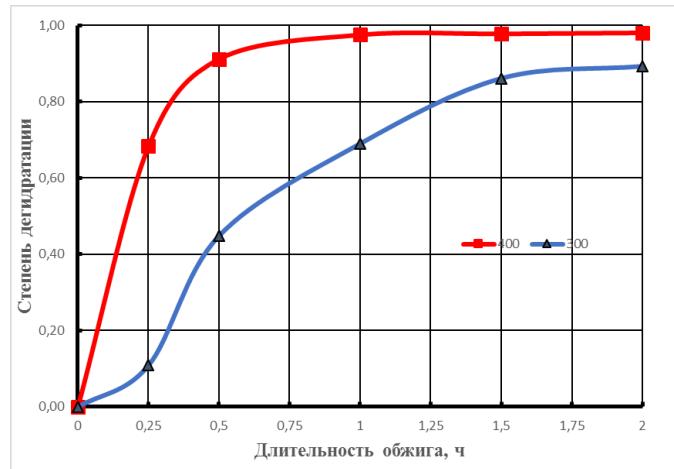
Рис. 2. Результаты дифференциального-термического анализа

Fig. 2. Results of differential thermal analysis

Как следует из представленных данных, при температуре 400°C происходит наиболее полная дегидратация бурожелезняковой руды. Содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в руде при обжиге возрастает с 45 до 51,0%. Для определения времени, необходимого для обжига, проведены эксперименты и установлены зависимости степени дегидратации руды от времени при температуре

обжига 300 и 400°C (рис. 3). Достаточен обжиг при температуре 400°C в течение 1 ч.

Для определения расхода тепла, необходимого для обжига материала, проведен теплотехнический расчет при содержании  $\alpha\text{-FeOOH}$  в руде, равном 53% (табл. 2). Общий расход тепла на обжиг составит 1139,2 кДж/кг.

Рис. 3. Кинетика дегидратации бурожелезняковой руды  
Fig. 3. Kinetics of dehydration of brown iron oreТаблица 2. Расчет расхода тепла на обжиг  
Table 2. Calculation of heat consumption for firing

Исходные данные	Результаты расчета
1. Начальная температура материала $t_h = 20^\circ\text{C}$	1. Расход тепла на нагрев материала: $Q_h = c_m(t_k - t_h) = 302,1 \text{ кДж/кг}$
2. Температура обжига $t_k = 400^\circ\text{C}$	2. Расход тепла на испарение физической влаги: $Q_{\text{исп}} = (2500 - 4,2 \cdot t_h) \cdot \frac{w}{100 - w} = 137,7 \text{ кДж/кг}$
3. Удельная теплоемкость материала $c_m = 0,795 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$	3. Тепловой эффект реакции дегидратации: $2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O};$ $Q_p = 5,6 \cdot (\sum \Delta H_{\text{пр}} - \sum \Delta H_{\text{исх}}) = 1319,7 \text{ кДж/кг}$
4. Влажность материала $w = 5,4\%$	4. Расход тепла на дегидратацию: $Q_p = 0,53 \cdot 1319,7 = 699,4 \text{ кДж/кг}$
5. Стандартная энталпия компонентов $\Delta H_{298}$ :	5. Общий расход тепла: $Q_{\text{общ}} = 302,1 + 137,7 + 699,4 = 1139,2 \text{ кДж/кг}$
– $\alpha\text{-FeOOH} = -558 \text{ кДж/моль}$	
– $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 = -823,3 \text{ кДж/моль}$	
– $\text{H}_2\text{O} = -57,8 \text{ кДж/моль}$	
6. Содержание $\alpha\text{-FeOOH}$ в руде – 53%	

Изучение магнитных свойств материала проводилось на разделенном исходном продукте по классам крупности  $+0,5$ ,  $-0,5+0,1$ ,  $-0,1+0$  мм. Результаты определения магнитной восприимчивости, коэрцитивной силой и удельной намагниченности с использованием осциллографического способа представлены на **рис. 4**. Изучение магнитных свойств различных классов крупности бурожелезняковой руды показало, что с уменьшением крупности материала снижаются магнитные свойства материала. Так, для крупности более  $0,5$  мм удельная магнитная восприимчивость составляет  $2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , коэрцитивная сила –  $14 \text{ кА/м}$ , для крупности  $-0,5+0,1$  мм удельная магнитная восприимчивость составляет  $2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , коэрцитивная сила –  $23 \text{ кА/м}$  и для крупности менее  $0,1$  мм удельная магнитная восприимчивость составляет всего  $1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , а коэрцитивная сила – только  $4 \text{ кА/м}$ . Следовательно, материал крупностью более  $0,1$  мм обладает

более выраженными магнитными свойствами. Слабые магнитные свойства мелких частиц свидетельствуют о нецелесообразности их обогащения магнитным методом, поэтому они преимущественно будут переходить в хвосты. Показатели магнитных свойств материала крупностью более  $0,5$  мм подтверждают возможность отделения железосодержащих минералов при магнитной индукции в рабочей зоне сепаратора более  $1,5 \text{ Тл}$ .

При увеличении крупности материала увеличивается гистерезис остаточной намагничиваемости образцов, но ввиду установленного низкого значения данной характеристики в изученных пробах это несущественно повлияет на эффективность процесса сепарации. Определяющее значение будет играть раскрытие сростков железистых минералов при измельчении и наличие шламов в зоне действия магнитной системы.

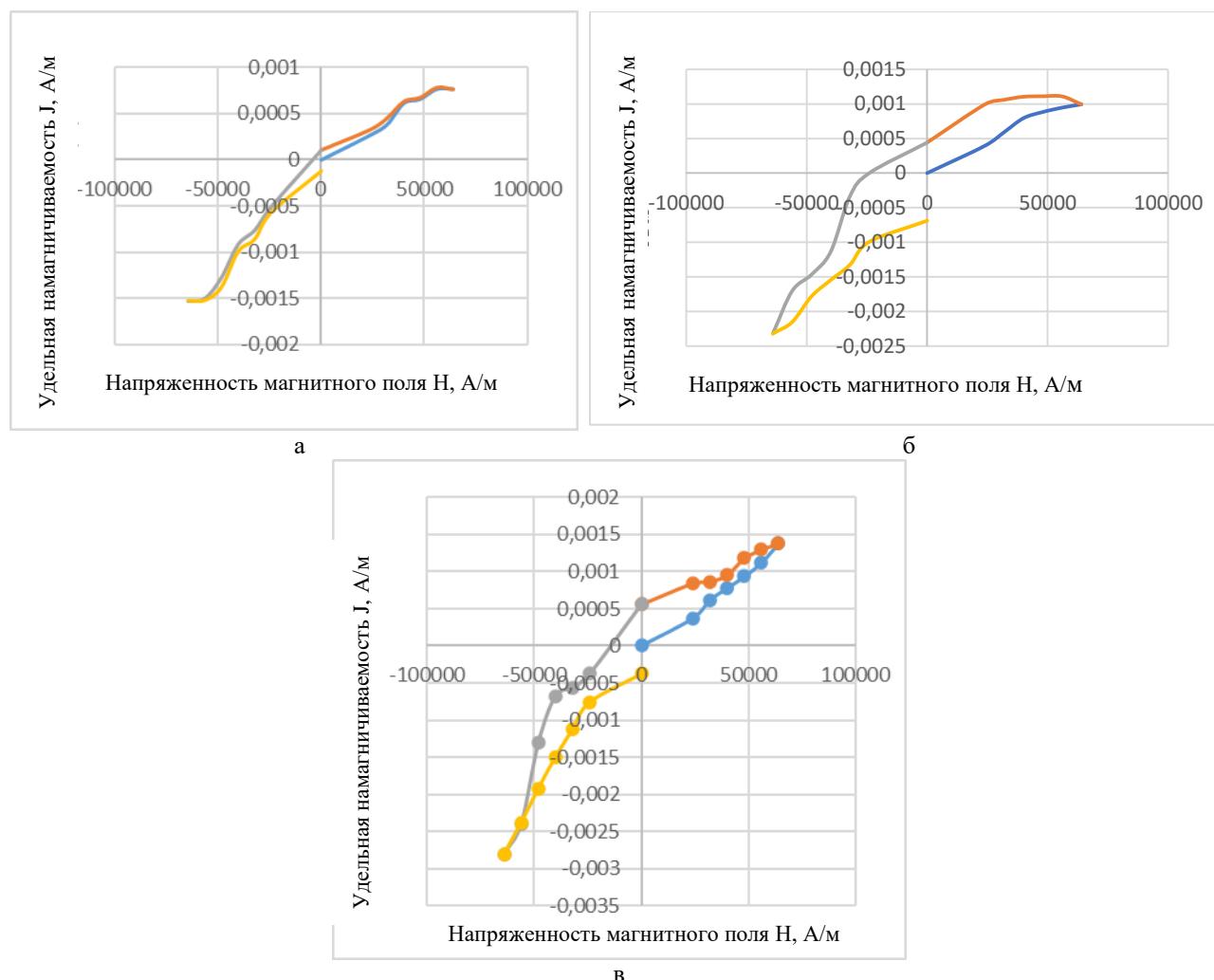


Рис. 4. Результаты определения магнитных свойств классов крупности бурожелезняковой руды:  
а – менее  $0,1$  мм; б –  $0,5-0,1$  мм; в – более  $0,5$  мм

Fig. 4. Results of determining the magnetic properties of grain-size classes of brown iron ore: less than  $0.1$  mm (a),  $0.5-0.1$  mm (б), more than  $0.5$  mm (в)

Для сравнения технологических показателей сухой и мокрой магнитной сепарации были проведены технологические испытания по двум вариантам схем (рис. 5). Проба исходной руды была высушена (без магнетизирующего обжига) и усреднена. Далее руда стадиально дробилась до крупности менее 5 мм и была разделена на две идентичные пробы.

Схема сухого обогащения включала измельчение руды в центробежно-ударной мельнице, воздушную классификацию по границе 0,04 мм и сухую магнитную сепарацию. В результате испытаний установлены

оптимальные параметры работы комплекса, позволяющие достичь требуемой крупности помола руды при минимальных потерях ценного компонента со шламами (рис. 6, а). При проведении исследований было установлено, что при повышении крупности разделения потери железа со шламовым продуктом уменьшаются, а затем начинают увеличиваться ввиду недораскрытия сростков железистых минералов и минералов породы. Оптимальной крупностью руды при сухом обогащении изученной пробы является 0,315 мм.



Рис. 5. Показатели переработки бурожелезняковой руды по схемам сухого (а) и мокрого (б) обогащения  
Fig. 5. Indicators of processing of brown clay iron ore according to dry (a) and wet (b) enrichment schemes

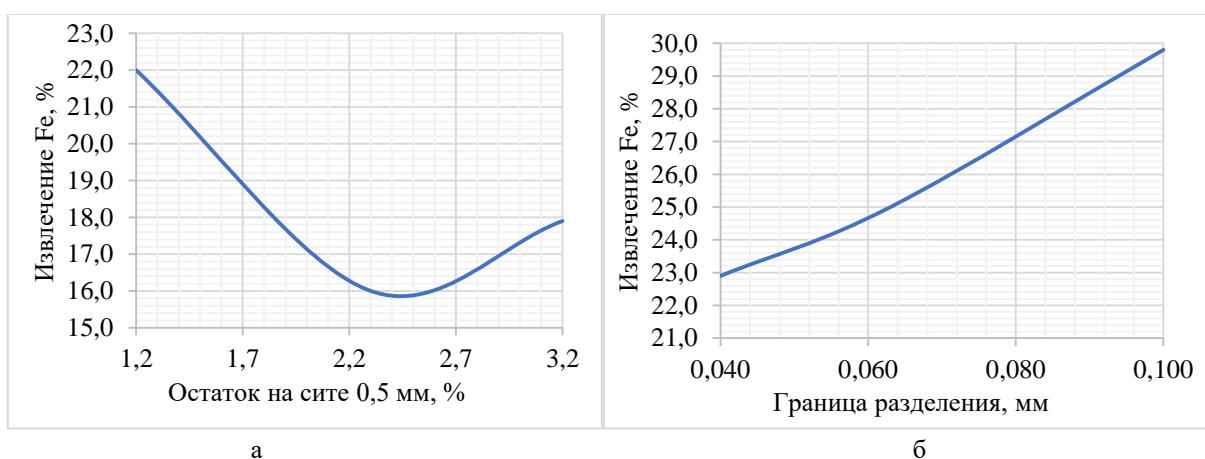


Рис. 6. Зависимости потерь ценного компонента (железа) со шламами: а – при обесшламливании воздушной сепарацией и сухом обогащении; б – при обесшламливании промывкой и мокром обогащении  
Fig. 6. Dependencies of valuable component (iron) losses with sludge: a is during desliming by air separation and dry enrichment and; б is during desliming by washing and wet enrichment

Схема мокрого обогащения включала промывку дробленой руды с выделением шламов и мокрую магнитную сепарацию обесшламленного материала. При промывке также произошло разрушение слабых рудных агрегатов, и крупность обесшламленного материала составила 100% класса -0,5 мм. Крупность шламовой фракции, при которой обеспечиваются минимальные потери железа с хвостами переработки, составила 0,04 мм (рис. 6, б).

Установлено, что качественно-количественные показатели переработки бурожелезняковой руды по схеме сухого магнитного обогащения по выходу магнитного продукта и извлечению в него железа значительно превосходят показатели, достигнутые по традиционной схеме переработки с промывкой и полиградиентной мокрой магнитной сепарацией.

Разработанная и испытанная технологическая схема сухого обогащения бурожелезняковой руды позволила без магнетизирующего обжига получить концентрат для аглодоменного производства с массовой долей железа на уровне 47,5–49,1% (52,9–54,7% на прокаленное вещество) при достаточно высоком для данного типа руд извлечении 55,5–72,3%. В случае снижения массовой доли железа в исходной руде и при необходимости повышения массовой доли железа в концентрате выше 48% в схему следует включить обжиг исходной руды при температуре 400°C, как показали проведенные исследования. Одновременно это будет способствовать повышению однородности материала, поступающего на переработку, исключит налипание глинистой руды на рабочие поверхности дробильного оборудования и повысит надежность работы всей технологической линии. Но, с другой стороны, включение в схему операции обжига руды будет удорожать стоимость переработки.

Данная технологическая схема сухого обогащения может рассматриваться в качестве альтернативы технологиям гравитационного обогащения и мокрой магнитной сепарации в сильном магнитном поле, обжиг-магнитного обогащения бурых железняков при технико-экономическом обосновании отработки некоторых небольших месторождений. Технология может быть использована в целях предварительного обогащения бурожелезняковой руды непосредственно на месторождении в составе мобильной дробильно-обогатительной установки, не требующей при этом водоснабжения и водоотведения, с последующим дообогащением полученного магнитного продукта уже на обогатительной фабрике. Полученные результаты открывают перспективы весьма значительного усовершенствования технологии переработки окисленного труднообогатимого железорудного сырья.

### Заключение

Бурожелезняковые руды в перспективе будут иметь важное экономическое значение для металлургической промышленности Южного Урала за счет их значительных запасов, пониженного содержания нормируемых примесей и в связи с исчерпанием бо-

гатых и легкообогатимых магнетитовых руд. Рост мирового производства стали в настоящее время увеличил спрос на железную руду, в связи с чем в последние десятилетия в мире были предприняты значительные усилия по созданию новых технологических схем переработки бурожелезняковых руд с получением кондиционных железорудных концентратов.

Технология сухого обогащения представляется наиболее приемлемой для отработки небольших по запасам месторождений и рудопроявлений ввиду отсутствия «привязки» к источникам водоснабжения, исключения необходимости складирования «мокрых» хвостов, наличия подходящего компактного оборудования отечественных производителей, что позволит создавать мобильные и передвижные обогатительные комплексы по типу современных высокотехнологичных дробильно-сортировочных комплексов по переработке шлаков. Сухие фракционированные хвосты обогащения в виде мелкого наполнителя и пигмента могут найти применение при производстве строительных материалов и изделий.

Строительство таких предприятий также будет способствовать развитию логистической инфраструктуры и улучшению социально-экономических показателей региона за счет создания рабочих мест и востребованности квалифицированных трудовых кадров. Полученные результаты лабораторных исследований бурожелезняковой руды месторождения Зигазино-Комаровской группы свидетельствуют о перспективности новых технологических подходов к обогащению окисленного железорудного сырья Южного Урала.

### Список источников

1. Дунаев В. А. Состояние и проблемы промышленного освоения минерально-сырьевой базы черной металлургии России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. №5. С. 117-122. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-problemy-promyshlennogo-osvoeniya-mineralno-syrievoy-bazy-chernoy-metallurgii-rossii> (дата обращения: 29.05.2025).
2. Термомагнитное обогащение и дефосфорация бурожелезняковых руд и концентратов / А.А. Мухтар, М.К. Мухымбекова, А.С. Макашев, В.Н. Савин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. №9. С. 708-713. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-708-713>.
3. Лопатин Ю. Н., Мушкетов А. А., Дмитриева Е. Г. Комплексные исследования по получению окисленных окатышей из бурожелезняковой руды // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 7. С. 55 – 68. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68.
4. Orlov V. P., Berigin M. I., Golovkin N. I. (eds.) Iron ore resources of Russia. Moscow: Geoinformatsia Publishing; 1998. (In Russ.).
5. Bogdanov O. S., Nenarokomov Iu. F. (eds.) Reference book on mineral processing. Processing plants. 2nd edition. Moscow: Nedra Publishing; 1984. 360 p. (In Russ.).
6. Смирнов Л.А., Бабенко А.А. Вовлечение в производство Лисаковского концентрата – одно из направлений расширения железорудной базы Урала

- и Сибири // Материалы Международного конгресса «300 лет Уральской металлургии». Екатеринбург, 2001. С. 48–49.
7. Рыбаков В.Н., Цылев Л.М., Громов М.И. Интенсификация процесса восстановления при магнетизирующем обжиге окисленных руд // Обжиг-магнитное обогащение окисленных руд. Киев, 1996. С.10–16.
  8. Мирко В.А., Кабанов Ю. А., Найденов В. А. Современное состояние развития месторождений бурых железняков Казахстана // Промышленность Казахстана. 2002. № 1. С. 79–82.
  9. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году». Москва, 2024.
  10. Пахомов В. П., Душин А. В. Оценка минерально-сырьевой безопасности УрФО // Экономика региона. 2008. № 3(15). С. 129–143.
  11. Определение степени обогатимости бурожелезняковой руды сухим способом / М. С. Гаркави, О. Е. Горлова, Е. В. Колодежная, И. С. Хардин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. С. 19.
  12. Громов М.И., Рыбаков В.Н. Подготовка железорудного сырья к металлургическому переделу. М.: Наука, 1973. С. 151–161.
  13. Комбинированная технология обогащения и дефосфорации бурожелезняковой руды месторождения Кокбулак / А. А. Мухтар, А. С. Макашев, Б. К. Касымова, М. М. Атакан // Обогащение руд. 2024. №2. С. 3–7. DOI: 10.17580/or.2024.02.01.
  14. Пелевин А.Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 579–592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
  15. Особенности обогащения низкотитанистых магнетитовых руд Урала / И. А. Гришин, Н. Н. Орехова, М. С. Гаркави, О. Е. Горлова // Горный журнал. 2019. № 11. С. 37–43. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.06.
  16. Шадрунова И. В., Колодежная Е. В., Горлова О. Е. Разработка технологии сухого обогащения флюоритовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 2. С. 43–57. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_2\_0\_43.
  17. Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенно-сложноструктурного сырья / О. Е. Горлова, Н. Н. Орехова, Е. В. Колодежная [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 3. С. 15–26. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26.
  18. Вечеркин М.В., Шавакулева О.П., Романова И.П. Измеритель концентрации ферромагнитного компонента в порошкообразном материале горно-обогатительного производства // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. В 2-х т. Т. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. С. 351.

## References

1. Dunaev V.A. The state and problems of industrial development of Russia's mineral resource base for ferrous metallurgy. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin], 2004;(5):117–122. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-problemy-promyshlennogo-osvoeniya-mineralno-syrievoy-bazy-chernoy-metallurgii-rossii> (Accessed May 29, 2025).
2. Mukhtar A.A., Mukhymbekova M.K., Makashov A.S., Savin V.N. Thermomagnetic enrichment and dephosphorization of brown iron ore and concentrates. *Izvestiya vysishih uchebnyh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2018;(6(9):708–713. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-708-713> (In Russ.)
3. Lopatin Yu.N., Mushketov A.A., Dmitrieva E.G. Integrated study on obtaining oxide pellets from brown iron ore. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], 2021;(7):55–68. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68 (In Russ.)
4. Orlov V.P., Berigin M.I., Golovkin N.I. Iron ore resources of Russia. Moscow: Geoinformatsiia Publishing, 1998, 842 p. (In Russ.)
5. Bogdanov O.S., Nenarokomov Iu.F. Reference book on mineral processing. Moscow: Nedra Publishing, 1984, 360 p. (In Russ.)
6. Smirnov L.A., Babenko A.A. Involvement in the production of Lisakovskiy concentrate is one of the directions for expanding the iron ore base of the Urals and Siberia. *Mater. Mezhdunar. kongr. «300 let Uralskoy metallurgii* [Proceedings of the International Conference "300 Years of the Ural Conference"]. Ekaterinburg, 2001, pp. 48–49. (In Russ.)
7. Rybakov V.N., Tsylev L.M., Gromov M.I. Intensification of the reduction process during magnetizing roasting of oxidized ores. *Obzhig-magnitnoe obogashchenie okislennyh rud* [Roasting and magnetic enrichment of oxidized ores]. Kyiv, 1996, pp.10–16. (In Russ.)
8. Mirko V.A., Kabanov Yu.A., Naidenov V.A. The current state of development of Kazakhstan's brown iron ore deposits. *Promyshlennost Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan], 2002;(17):79–82. (In Russ.)
9. The State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023". Moscow, 2024 (In Russ.)
10. Pakhomov V.P., Dushin A.V. Analysis of the mineral-raw material safety in the Ural Federation District. *Ekonomika regiona* [Economy of Regions], 2008;(15):129–143. (In Russ.)
11. Garkavi M.S., Gorlova O.E., Kolodezhna E.V., Khardin E.S. Determination of the enrichment degree of brown iron ore by the dry method. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: Tezisy dokladov 83-y mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Current issues of modern science, technology and education. Proceedings of the 83th Cross-Regional Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025, p. 19. (In Russ.)
12. Gromov M.I., Rybakov V.N. *Podgotovka zhelezorudnogo syria k metallurgicheskому peredelu* [Preparation of iron

- ore raw materials for metallurgical conversion]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 151-161. (In Russ.)
13. Mukhtar A.A., Makashev A.S., Kasyanova B.K., Atakhan M.M. Combined processing and dephosphorization of brown iron ore of the Kokbulak deposit. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment], 2025;(2):3-7. (In Russ.)
14. Pelevin A.E. Iron ore enrichment technologies in Russia and ways to improve their efficiency. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2022;(256):579-592. (In Russ.)
15. Grishin I.A., Orekhova N.N., Garkavi M.S., Gorlova O.E. Features of the Ural low-titanium magnetite ore processing. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2019;(11):37-43. (In Russ.)
16. Shadrunova I.V., Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E. Dry processing technology for fluorite ore. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin], 2023;(2):43-57. (In Russ.)
17. Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolokova M.S., Glagoleva I.V. Providing a rationale for an integrative criterion to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;(3):15-26. (In Russ.)
18. Vecherkin M.V., Shavakuleva O.P., Romanova I.P. Ferromagnetic component concentration meter in powdered mining and processing materials. *Akтуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции* [Current issues of modern science, technology and education. Proceedings of the 81st Cross-Regional Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023, p. 351. (In Russ.)

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 08.09.2025; опубликована 30.09.2025  
Submitted 23/06/2025; revised 08/09/2025; published 30/06/2025

**Колодежная Екатерина Владимировна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: kev@uralomega.ru. ORCID 0000 0002 0252 4479.

**Горлова Ольга Евгеньевна** – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия; ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: gorlova\_o\_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

**Шадрунова Ирина Владимировна** – доктор технических наук, профессор, заведующая отделом горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: shadrunova\_@mail.ru. ORCID 0000-0002-4410-8182.

**Гаркави Михаил Саулович** – доктор технических наук, заместитель главного инженера, ЗАО «Урал-Омега», Магнитогорск, Россия.

E-mail: gms@uralomega.ru. ORCID 0000-0002-1912-5415.

**Хардин Игорь Сергеевич** – лаборант, ЗАО «Урал-Омега», Магнитогорск, Россия.

E-mail: kev@uralomega.ru.

**Шавакулева Ольга Петровна** – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

E-mail: shavakylevo@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687.

**Ekaterina V. Kolodezhnaya** – PhD (Eng.), Lead Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: kev@uralomega.ru. ORCID 0000 0002 0252 4479.

**Olga E. Gorlova** – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Lead Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: gorlova\_o\_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

**Irina V. Shadrunova** – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of the Mining Ecology, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: shadrunova\_@mail.ru. ORCID 0000-0002-4410-8182.

**Mikhail S. Garkavi** – DrSc (Eng.), Deputy Chief Engineer, Ural-Omega CJSC, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: gms@uralomega.ru. ORCID 0000-0002-1912-5415.

**Igor S. Khardin** – Laboratory Assistant, Ural-Omega CJSC, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: kev@uralomega.ru.

**Olga P. Shavakyleva** – PhD (Eng.), Associate Professor,

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: shavakyleva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687.