

# Науки о Земле

УДК 553.3.072

DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-6-12

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ СИДЕРИТОВЫХ РУД БАКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

### IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR PROCESSING SIDERITE ORE FROM THE BAKAL DEPOSIT



**Е. Ю. Дегодя,**  
Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск  
magur@mail.ru



**Н. А. Сединкина,**  
Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск  
magnetyt@mail.ru



**О. П. Шавакулева,**  
Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск  
shavakuleva@yandex.ru



**Н. В. Гмызина,**  
Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск  
gmnat1307@mail.ru

**E. Degodya,**  
Nosov Magnitogorsk State  
Technical University  
Magnitogorsk,

**N. Sedinkina,**  
Nosov Magnitogorsk State  
Technical University,  
Magnitogorsk

**O. Shavakuleva,**  
Nosov Magnitogorsk State  
Technical University, Magni-  
togorsk

**N. Gmyzina,**  
Nosov Magnitogorsk State  
Technical University,  
Magnitogorsk

**У**рал – одна из уникальных железорудных провинций мира, включающая всё разнообразие железных руд. Сидеритовые руды представлены Бакальской группой месторождений, в которых сидерит в минералогическом отношении не представляет собой химически чистый карбонат железа, а имеет изоморфную примесь магния и кальция, образуя сидероплезит и пистомезит. Основным железорудным минералом сидеритовой руды месторождения является изоморфная смесь карбонатов железа, магния и марганца, которые встречаются в различном количественном соотношении. Предлагается схема обогащения руды, включающая в себя дробление до крупности 10...0 мм и сухую магнитную сепарацию во взвешенном состоянии при напряжённости магнитного поля 52 кА/м. Изучение сухой магнитной сепарации сидеритовой руды проводилось на сепараторе во взвешенном состоянии с постоянным магнитным полем и на электромагнитном сепараторе 138Т-СЭМ. Полученная магнитная фракция направляется на обжиг, последующее додробление до крупности 2...0 мм и сухую магнитную сепарацию во взвешенном состоянии. Для повышения массовой доли железа и снижения массовой доли оксида магния магнитная фракция направляется на измельчение и мокрую магнитную сепарацию. Результаты опытов показали, что обогащение с использованием высокointенсивной сухой магнитной сепарации сидеритовой руды различных участков месторождения массовая доля MgO снизилась с 9,4...12,3 % до 8,0...10,1 %, а массовая доля железа повысилась с 28,8...33,4 % до 31,4...40,8 %.

В результате получен продукт с массовой долей железа 59,3...60,1 % и оксида магния 10,0...11,3 %. Разработанная технология обогащения позволяет получать кондиционное сырьё, которое может служить перспективным сырьём для ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»)

**Ключевые слова:** сырьё; чёрная металлургия; сидеритовая руда; технология обогащения; обжиг; измельчение; дробление; сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии; концентрат; Бакальное месторождение

The Urals is one of the unique iron ore provinces of the world, including all the variety of iron ores. Siderite ores are represented by the Bakal group of deposits, in which siderite in mineralogical terms is not a chemically pure iron carbonate, but has an isomorphic admixture of magnesium and calcium, forming sideroplesite and pistomesite. The main iron ore mineral of the siderite ore of this deposit is an isomorphic mixture of iron, magnesium and manganese carbonates, which occur in different quantitative ratios. A scheme for ore dressing is proposed, which includes crushing to a size of 10-0 mm and dry magnetic separation in a suspended state at a magnetic field strength of 52 k/m. The study of dry magnetic separation of siderite ore was carried out on a suspended separator with a constant magnetic field and on an electromagnetic separator 138T-SEM.

The resulting magnetic fraction is sent to the baking, subsequent crushing to a size of 2-0 mm and dry magnetic separation in the suspended state. To increase the mass fraction of iron and reduce the mass fraction of magnesium oxide, the magnetic fraction is sent for grinding and wet magnetic separation. The results of the experiments have showed that the enrichment using high-intensity dry magnetic separation of siderite ore from various sections of the deposit, the mass fraction of MgO decreased from 9.4-12.3% to 8.0-10.1%, and the mass fraction of iron increased from 28.8-33.4% to 31.4-40.8%. As a result, a product with a mass fraction of iron 59.3-60.1% and magnesium oxide 10.0-11.3% has been obtained. The developed enrichment technology allows us to obtain conditioned raw materials, which can serve as a promising raw material for PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (PJSC MMK)

**Key words:** raw materials; ferrous metallurgy; siderite ore; processing technology; baking; grinding; crushing; dry magnetic separation in suspended state; concentrate; Bakalskoye field

---

**Введение.** Увеличенный спрос на продукцию чёрной металлургии привел к образованию дефицита на рынке железорудного сырья.

Железорудные предприятия России производят как стандартные виды железорудного сырья (концентрат, аглоруда, окатыши), так и агломерат. Однако основной товарной продукцией российских ГОКов является концентрат, доля которого составляет 49 % от выпускаемого в России железорудного сырья.

**Актуальность.** Магнитогорский металлургический комбинат (ПАО «ММК») является единственным в России производителем стали, который не обладает значительными железорудными активами. Одним из направлений в решении проблемы сырьевой базы является вовлечение в переработку сидеритовых и бурожелезняковых руд, поэтому совершенствование технологии обогащения сидеритовых руд Бакальского месторождения с целью получения качественного доменного сырья является актуальной научной задачей.

**Объектом исследований** являлась сидеритовая руда Бакальского месторождения. Предмет исследования – процессы сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии и мокрой магнитной сепарации.

**Цель исследований** – разработка технологии по переработке сидеритовых руд для повышения качества концентрата.

**Задачи исследований** – изучение процессов дробления, измельчения, сухой и мокрой магнитной сепарации.

В работе применён современный комплекс физических, химических и физико-химических методов с целью изучения химического состава и физико-механических свойств сидеритовой руды Бакальского месторождения; лабораторные исследования.

**Разработанность темы.** Данные типы железных руд сосредоточены в основном за рубежом. На Урале единственным перспективным месторождением сидеритовых и бурожелезняковых руд является Бакальская группа месторождений на западном склоне Южного Урала в Саткинском районе Челябинской области. На площади в 150 км<sup>2</sup> насчитывается 24 железорудных месторождения, характеризующихся сходством геологического строения и общностью геолого-промышленных типов руд.

По преобладающему рудному интервалу железные руды Бакальских месторождений относятся к карбонатному типу, которые принято называть сидеритовыми. Карбонатные (сидеритовые) руды Бакала характеризуются сложным и непостоянным химико-минералогическим составом.

Основным железорудным минералом сидеритовой руды данного месторождения является изоморфная смесь карбонатов железа, магния и марганца, которые встречаются в различном количественном соот-

ношении – сидероплезит и пистомезит (до 80...95 % рудной массы). Из нерудных минералов присутствуют кварц, анкерит, пирит, а в баритизированных рудах – барит и другие минералы.

По величине слагающих зёрен структура сидерита колеблется от равномерно или неравномерно зернистой до тонко- или крупнозернистой. Форма зёрен неправильная, близкая к изометрической.

Текстура у сидеритовой руды и вмещающих карбонатных пород разнообразна. На

месторождении выделяют следующие типы текстур: массивные, прожилковые, брекчевые, полосчатые, червячковые, фунтиковые (скролуповатые), стилолитовые, пятнистые. Химический состав сидеритовой руды приведён в табл. 1.

Изучение физико-механических свойств сидеритовой руды показало, что коэффициент крепости руды по шкале проф. М. М. Протодьяконова составляет 10...13, сланцев 4...9, доломита и диабаза 8...10, плотность руды 3,6 т/м<sup>3</sup>, породы 2,4...2,8 т/м<sup>3</sup> [3].

Таблица 1 / Table 1

Усреднённый химический состав сидеритовой руды /  
Average chemical composition of siderite ore

Способ добычи руды / Ore mining method	Содержание элемента / Element content, %										
	Fe общ.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	S	P	ппп
Шахта / Mine	28,2	0,83	36,8	8,5	1,3	9,7	4,5	1,1	0,21	0,012	36,8
Карьер / Quarry	32,5	1,5	43,61	3,8	0,66	8,0	3,8	1,3	0,12	0,007	37,2

*Результаты исследования на обогатимость сидеритовой руды Бакальского месторождения и их обсуждение*

Действующая схема обогащения сидеритовой руды ООО «Бакальское рудоуправление» включает дробление до крупности 60...0 мм с последующим грохочением на классы крупности 60...10 и 10...0 мм, обжиг руды класса 60...10 мм и грохочение обожжённого продукта на классы крупности 60...10 мм и 10...0 мм. Магнитный продукт класса крупности 60...10 мм после сухой магнитной сепарации является готовым продуктом и отправляется на плавку. Класс 10...0 мм также подвергается сухой магнитной сепарации, полученный магнитный продукт направляется в бункер-накопитель, а немагнитный продукт смешивается с классом 10...0 мм сырой руды и отправляется в отвалы.

Данная схема имеет ряд недостатков: низкая массовая доля железа (46...48 %) и высокая массовая доля MgO в магнитных продуктах (12,3...14,0 %) вследствие не полного удаления из исходной руды доломита, кварца, сланцев и других минералов вмещающих пород; низкая эффективность действующих магнитных сепараторов [4; 5].

Ввиду перечисленных недостатков существующая схема представляется мало-

эффективной и нуждается в доработке и усовершенствовании. Нами проведены исследования по разработке технологии обогащения Бакальских сидеритовых руд с использованием следующих процессов:

- высокоинтенсивная сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии;
- магнетизирующий обжиг при различных температурах;
- обжиг с использованием активирующих веществ;
- измельчение материала до крупности 0,040 мм;
- мокрая магнитная сепарация при различной напряжённости магнитного поля.

Проведены исследования по возможности получения дополнительного продукта из сырой сидеритовой руды класса крупности 10...0 мм с 5 различных участков. Изучение сухой магнитной сепарации сидеритовой руды проводилось на сепараторе во взвешенном состоянии с постоянным магнитным полем и на электромагнитном сепараторе 138Т-СЭМ. Результаты опытов показали, что обогащение с использованием высокоинтенсивной сухой магнитной сепарации сидеритовой руды различных участков месторождения понизило массовую долю MgO с 9,4...12,3 % до 8,0...10,1 %, а массовая

доля железа повысилась с 28,8...33,4 % до 31,4...40,8 %.

Обжиг сидеритовой руды с различных участков месторождения проводился в лабораторной муфельной печи и в печи сопротивления Штайнберга-Грамолина при температурах 600...650 °C и 900...950 °C в течение 30 мин. При более высоких температурах (1000 °C) образуется магнезиоферритный продукт – магнитный, со свободным MgO. Обжиг при температуре 600...650 °C создаёт в большей степени восстановительную среду и более экономичен, чем при более высоких температурах. Но при температуре 900...950°C будет происходить более полная декарбонизация, а удельная намагниченность насыщения будет выше [2; 6; 7].

Обжигу подверглась исходная и предварительно обогащённая руда. Полноту магнетизирующего обжига можно оценивать по содержанию CO<sub>2</sub> в обожжённой руде. Так, по-

тери при прокаливании составили для участка Новый Бакал для исходной и предварительно обогащенной руды составлено 36,7 и 35,2 %; для усреднённой руды – 30,8 и 32,5 %.

Магнетизирующий обжиг влияет на прочность руды и на гранулометрический состав [8]. При полной декарбонизации обожжённой руды в интервале температуры 600...1000 °C прочность на сжатие составляет лишь 23...24 кг/см<sup>2</sup>, а после обжига при температуре 1100 °C повышается до 78 кг/см<sup>2</sup> благодаря спеканию рудных и нерудных зёрен. В результате этого резко снижается извлечение железа в концентрат.

При изучении влияния обжига руды на ситовую характеристику установили, что при обжиге руда растрескивается и за счёт этого легче разрушается [1; 9–11].

Проведённые исследования позволяют рекомендовать схему обогащения сидеритовых руд Бакальского месторождения (рис. 1).

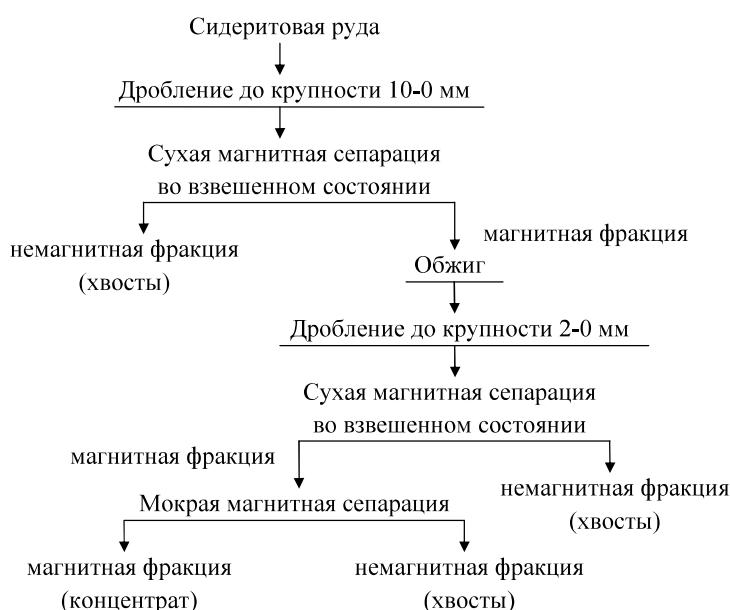


Рис. 1. Предлагаемая схема обогащения сидеритовых руд Бакальского месторождения /  
Fig. 1. Proposed scheme for the enrichment of the Bakal deposit's siderite ores

В работе рассмотрен вопрос добавки активатора в процесс обжига на показатели последующего дробления и магнитной сепарации. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения добавок

при обжиге сидеритовых руд. Материал, обработанный активатором перед обжигом, способствует селективному разрушению минеральных зёрен и более полному извлечению ценных минералов в процессе мокрой магнитной сепарации.

Таблица 2 / Table 2

*Результаты применения активаторов в процессе обжига /  
Results of the activators' use in the firing process*

<b>Условия обогащения / Conditions of enrichment</b>	<b>Продукты / Products</b>	<b>Массовая доля / Weight fraction, %</b>	
		<b>Fe</b>	<b>MgO</b>
Без активатора / Without activator	Магнитный	47,6	14,1
	Немагнитный	25,3	14,8
	Исходный	39,4	13,9
С активатором / With an activator	Магнитный	54,3	13,6
	Немагнитный	19,8	14,2
	Исходный	39,4	13,9

**Заключение.** Рекомендованная схема состоит из трёх стадий обогащения и исключает недостатки существующей схемы. Она содержит:

1) дробление до крупности 10...0 мм, это позволяет более полно раскрыть сростки и повысить эффективность последующего обогащения и обжига;

2) применение высокоинтенсивной сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии позволяет снизить затраты на обжиг, повысить и стабилизировать массовую долю железа в материале, поступающем на обжиг, удалить MgO, содержащийся в доломите, и предотвратить образование при высоких температурах магнезиаферритов, обладающих высокими магнитными свойствами и переходящими в концентрат;

3) обжиг при температуре 900...950 °C обеспечивает высокую степень декарбонизации, повышение массовой доли железа на 15...17 %;

4) сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии позволяет удалить раскрученные зёрна минералов вмещающих пород, в том числе и доломита, после разрушения зёрен при обжиге, и повысить массовую долю железа до 56...59 %;

5) измельчение позволяет раскрыть тончайшие включения минералов вмещающих пород и, главное, доломита;

6) мокрая магнитная сепарация позволяет выделить тончайшие раскрытия частицы вмещающих пород и повысить массовую долю железа до 60,1 % при снижении содержания MgO до 10,0 %.

Таким образом, внедрение разработанной схемы обогащения сидеритовых руд Бакальского месторождения позволит выдавать качественное доменное сырьё и использовать его на ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в шихте с другими составляющими.

#### Список литературы

1. Клочковский С. П., Смирнов А. Н., Савченко И. А. Разработка физико-химических основ комплексного использования высокомагнезиальных сидеритов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2015. № 1. С. 26–31.
2. Костина З. И., Крылова С. А., Понурко И. В. К вопросу о способах переработки сидеритовых руд // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11, ч. 4. С. 580–582.
3. Крылова С. А., Сысоев В. И., Алексеев Д. И. Физико-химические характеристики высокомагнезиальных сидеритов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17, № 2. С. 13–21.
4. Пелевин А. Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения. Екатеринбург: УГГУ, 2018. 296 с.
5. Пелевин А. Е. Повышение качества магнетитовых концентратов в переменном магнитном поле // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 19–24.
6. Смирнов А. Н., Великанов В. С., Гришин И. А., Масалимов А. В. Изучение возможности переработки отходов обогащения магнезита с получением высокоактивной магнезии // Горная промышленность. 2018. № 6. С. 83–85.

7. Юрьев Б. П. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам: монография. Екатеринбург: День РА, 2016. 428 с.
8. Юрьев Б. П., Костоусова Т. И. Исследование свойств сидеритовой руды и продуктов ее обжига в процессе термообработки // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. № 3. С. 17–23.
9. Юрьев Б. П., Меламуд С. Г., Спирин Н. А., Шацилло В. В. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам: монография. Екатеринбург: День РА, 2016. 428 с.
10. Юрьев Б. П., Шешуков О. Ю., Дудко В. А. Разработка экологически чистой технологии обогащения сидеритовых руд // Черная металлургия. 2019. Т. 75, № 8. С. 923–930.
11. Smirnov A. N., Klochkovsky S. P, Krylova S. A., Sysoev V I. Gasification of the kuznetsk basin coal concentrate using oxide iron-magnesium catalysts // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2019. Vol. 54, No. 2. P. 286–291.

---

## References

---

1. Klochkovsky S. P., Smirnov A. N., Savchenko I. A. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* (Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov), 2015, № 1, pp. 26–31.
2. Kostina Z. I., Krylova S. A., Ponurko I. V. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovanij* (International Journal of Applied and Fundamental Research, 2015, № 11, part 4, pp. 580–582.
3. Krylova S. A., Sysoev V. I., Alekseev D. I. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Metallurgiya"* (Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy", 2017, vol. 17, №. 2, pp. 13–21.
4. Pelevin A. E. *Magnitnye metody obogashcheniya* (Magnetic enrichment methods). Yekaterinburg: UGGU, 2018, 296 p.
5. Pelevin A. E. *Obogashchenie rud* (Ore dressing), 2019, no. 6, pp. 19–24.
6. Smirnov A. N., Velikanov V. S., Grishin I. A., Masalimov A.V. *Gornaya promyshlennost* (Mining industry), 2018, № 6, pp. 83–85.
7. Yuryev, B. P. *Tehnologicheskie i teplotehnicheskie osnovy podgotovki sideritovyh rud k metallurgicheskim peredelam: monografiya* (Technological and heat engineering bases of siderite ores' preparation for metallurgical processing: monograph). Yekaterinburg: Day of RA, 2016, 428 p.
8. Yuryev B. P., Kostousova T. I. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* (Proceedings of universities. Ferrous metallurgy), 1999, №. 3, pp. 17–23.
9. Yuryev B. P., Melamud S. G., Spirin N. A., Shatsillo V. V. *Tehnologicheskie i teplotehnicheskie osnovy podgotovki sideritovyh rud k metallurgicheskim peredelam: monografiya* (Technological and heat engineering bases of preparation of siderite ores for metallurgical processing: monograph). Yekaterinburg: LLC AMK "Day of RA", 2016. 428 p.
10. Yuryev B. P., Sheshukov O. Yu., Dudko V. A. *Chernaya metallurgiya* (Ferrous Metallurgy), 2019, vol. 75, №. 8, pp. 923–930.
11. Smirnov A. N., S.P Klochkovsky, Krylova S. A., Sysoev I. V. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy* (Journal of Chemical Technology and Metallurgy), 2019, vol. 54, № 2, pp. 286–291.

---

## Информация об авторе

---

Дегодя Елена Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: технологии по обогащению флюоритовых, медно-цинковых и золотосодержащих руд  
magur@mail.ru

Сединкина Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: технологии по обогащению железосодержащих руд, процесс сухой магнитной сепарации  
magnetyl@mail.ru

*Шавакурова Ольга Петровна*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: технологии по обогащению титаномагнетитовых, ильменитовых, магнетитовых, сидеритовых руд и периклазового сырья  
shavakulevao@yandex.ru

*Гмызина Наталья Викторовна*, канд. техн. наук, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: технологии по обогащению техногенного сырья и железосодержащих руд, процесс сухой магнитной сепарации.  
gmnat1307@mail.ru

*Elena Degodya*, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Geology, Surveying and Mineral Processing department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: technologies for the beneficiation of fluorite, copper-zinc and gold-bearing ores

#### **Information about the author**

*Natalia Sedinkina*, candidate of technical sciences, assistant professor, Geology, Surveying and Mineral Processing department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: technologies for the beneficiation of iron-bearing ores, the process of dry magnetic separation.  
magnetyt@mail.ru

*Olga Shavakuleva*, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Geology, Surveying and Mineral Processing department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: technologies for beneficiation of titanomagnetite, ilmenite, magnetite, siderite ores and periclase raw materials.  
shavakulevao@yandex.ru

*Natalia Gmyzina*, candidate of technical sciences, associate professor, Geology, Surveying and Mineral Processing department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: technologies for the enrichment of technogenic raw materials and iron-containing ores, the process of dry magnetic separation.

---

#### **Для цитирования**

*Дегодя Е. Ю., Сединкина Н. А., Шавакурова О. П., Гмызина Н. В. Совершенствование технологии обогащения сидеритовых руд Бакальского месторождения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 4. С. 6–12. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-6-12.*

*Degodya E., Sedinkina N., Shavakuleva O., Gmyzina N. Improvement of the technology for processing siderite ore from the Bakal deposit // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 6–12. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-6-12.*

Статья поступила в редакцию: 18.05.2021 г.  
Статья принята к публикации: 26.05.2021 г.