

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ ФЛЮОРИТОВЫХ РУД

И.В. Шадрунова¹, Е.В. Колодежная¹, О.Е. Горлова²

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия, e-mail: gorlova_o_e@mail.ru

Аннотация: Дана оценка состояния минерально-сырьевой базы промышленных месторождений флюорита России. Приведен обзор традиционных технологий обогащения флюорита и проанализирован имеющийся опыт с точки зрения переработки мелких месторождений в условиях дефицита водных ресурсов. Показано, что перспективность сухих методов обогащения полезных ископаемых состоит в снижении энергетических расходов во всех операциях обогащения и удешевлении природоохранных мероприятий за счет возможности сухого складирования отходов. Сухие классифицированные хвосты обогащения могут найти применение в качестве строительных материалов. Показана перспективность сухого обогащения руд, содержащих минералы, обладающих различной электрической проводимостью или способностью приобретать электрический заряд в процессе контактной электризации, методом электрической сепарации. Оценка возможности обогащения флюоритовой руды по технологическим схемам сухого обогащения проводилась на мало-сульфидной кварц-флюоритовой руде. Разработаны и испытаны технологические схемы сухого обогащения флюоритовой руды с использованием центробежно-ударного способа дробления или измельчения руды до различной крупности, воздушной классификации и электрической сепарации. По разработанной технологической схеме с одной стадией электросепарации возможно получение плавиковошпатового концентрата с массовой долей CaF_2 85%, отвечающего требованиям к металлургическим флюоритовым концентратам и концентратам для получения сварочных материалов, при выходе готового продукта 26%.

Ключевые слова: обогащение в воздушной среде, плавиковошпатовый концентрат, центробежно-ударное дробление, центробежный классификатор, электросепарация, флюоритовая руда, схемы обогащения.

Для цитирования: 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.

Dry processing technology for fluorite ore

I.V. Shadrunkova¹, E.V. Kolodezhna¹, O.E. Gorlova²

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,
e-mail: gorlova_o_e@mail.ru

Abstract: The article gives an estimate of mineral resources of the commercial fluorite deposits in Russia. The traditional technologies of fluorite processing are reviewed, and the existing experience of small deposit mining under conditions of water deficiency is analyzed. It is shown that the promising nature of dry mineral processing consists in reduction of energy input in all operations, and in cheapening of the environmental measures owing to possibility of dry waste storage. Dry classified tailings are usable as construction materials. Dry processing by electrical separation is promising with minerals possessing different electrical conductivities or capable to acquire electrical charge during contact electrization. Dry processing of fluorite ore was tested as a case-study of low-sulfide quartz–fluorite ore. The dry processing process flows were tested using percussion centrifugal crushing and milling of fluorite ore down to different sizes, air classification and electric separation. The developed process flow with single-stage electric separation allows production of fluoride concentrate with mass fraction of CaF_2 85%, meeting the requirements imposed on metallurgical fluorite concentrates and concentrates for weld metal production, at the finished product yield of 26%.

Key words: processing in air, fluoride concentrate, percussion centrifugal crushing, centrifugal classifier, electric separation, fluorite ore, processing process flows.

For citation: Shadrinova I. V., Kolodezhna E. V., Gorlova O. E. Dry processing technology for fluorite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):43-57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_43.

Введение

В настоящее время предприятия России испытывают недостаток в высококачественном плавиковошпатовом концентрате для металлургической, химической и электродной промышленности. При этом плавиковый шпат и сырье для его получения, в соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г. (Распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р.), относятся к значимым для экономики России полезным ископаемым. Согласно Государственному докладу «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» [39], внутреннее потребление в значительной степени обеспечивается импортируемыми концентратами, что обусловлено недостаточными объемами добычи из-за низкого качества руд. В связи с закрытием Ярославского ГОКа (Приморский край) производство плавикового шпата в

концентратах в России с 2014 г. ведется в весьма ограниченных количествах и в 2019 г. составило всего лишь 4 тыс. т, а 186 тыс. т плавиковошпатовых концентратов было импортировано, главным образом из Монголии.

На долю России приходится 12 млн т мировых промышленных запасов флюорита [39]. При этом 3,7 млн т флюорита содержится в комплексных рудах (плавиковый шпат из которых не извлекается по причине низкого содержания CaF_2 — 6,2 — 12%) и 8,3 млн т содержатся в 10 месторождениях плавиковошпатовых руд, однако в 2019 г. фактическая добыча на них приостановлена.

В России на сегодняшний день нет ни одного крупного разведанного месторождения с высококачественными флюоритовыми рудами. Отечественные руды в целом заметно беднее (средняя массовая доля 26 — 28% CaF_2), чем зарубежные (более 45,0% CaF_2). Сложный вещественный состав руд, присутствие в рудах

тонкодисперсных сростков флюорита с карбонатами кальция усложняет технологическую схему переработки и снижает показатели обогащения.

Практика обогащения флюоритовых руд [1, 2] включает ручную или механическую разборку для выделения крупнокускового металлургического концентрата, гравитационное обогащение отсадкой и тяжелосредной сепарацией, а также флотационное обогащение низкосортной руды с получением высококачественных концентратов для химической и сварочной отраслей промышленности [3]. Изучаются перспективы получения высококачественных флюоритовых концентратов флотацией из техногенного сырья — лежалых хвостов обогащения флюоритовых руд Ярославской горнорудной компании [4].

Таким образом, традиционные технологические схемы переработки в большинстве случаев построены на использовании мокрых процессов обогащения, когда вода является разделительной средой и средством транспортирования продуктов, что в свою очередь связано со значительными материальными затратами на оборотное водоснабжение и обезвоживание готовых концентратов. Расход воды при обогащении полезных ископаемых составляет 5—10 м³ на 1 т исходной руды, что обуславливает ежегодное ее потребление более 2 млрд м³ [5]. Проблемы водоснабжения трудно решаются при освоении отдаленных мелких месторождений и при расположении месторождений в безводных засушливых районах [6, 7]. Использование воды, флотореагентов, топлива для термической сушки неизбежно удорожает готовую продукцию, в том числе и за счет обязательных операций очистки сточных вод и отходящих газов [8].

В связи с этим перспективность сухих методов обогащения полезных ископаемых состоит, прежде всего, в отказе

от использования воды и обезвоживания продуктов обогащения, что резко снижает энергетические расходы во всех операциях обогащения и удешевляет природоохранные мероприятия за счет возможности сухого складирования отходов [9]. Также исключается необходимость затрат на капитальное строительство для поддержания водного хозяйства при отрицательных температурах, на строительство и эксплуатацию рудозвозной дороги, снимаются проблемы с организацией хвостохранилищ [10]. Сухие фракционированные хвосты обогащения в виде гравия, щебня, песка различной крупности найдут применение в качестве строительных материалов.

Технологии обогащения с использованием сухой магнитной и электрической сепараций, пневматического обогащения, радиометрических методов сегодня можно назвать альтернативными традиционным гравитационным и флотационным схемам обогащения и имеющими большие перспективы для многих видов минерального сырья, в частности, кианитовых [7], кварц-полевошпатовых [11], фосфоритовых [12], магнезитовых [13], магнетитовых [14] и, в целом, высокоглинистых руд [15], а также каменного угля [16]. Сухое обогащение угля и горючих сланцев [17, 18], фосфатов [19], железных [6, 20], сиенитовых [21] руд и других видов полезных ископаемых [22] применяется и за рубежом, где остро стоят вопросы использования как водных ресурсов, так и земельных под сооружение хранилищ мокрого складирования отходов переработки, а также и природоохранные вопросы.

Одним из перспективных методов сухого обогащения руд и россыпей, содержащих минералы, обладающие различной электрической проводимостью [22] или способностью приобретать электрический заряд в процессе контактной электризации [18] или поверхностной

обработки [23], является электрическая сепарация [24, 25]. В электрическом поле происходит разделение сухих частиц материалов по величине или знаку создаваемого на их поверхности заряда, в зависимости от их химического состава и размера, который, к тому же, можно искусственно изменять [26] и усиливать различия разделяемых компонентов в электрофизических свойствах. Достаточно обширный спектр руд (уголь, фосфориты, каолин, кианит, кварцевый песок, полевые шпаты, доводка концентратов руд редких и черных металлов и пр.) и других материалов (ТБО [27], отработанные ртутные лампы, металлосодержащие пластмассовые отходы, золошлаковые отходы [28] и др.), которые могут эффективно разделяться электрической сепарацией, говорит о перспективах более широкого использования технологий сухого обогащения на основе электросепарации [29]. Хорошие экспериментальные результаты электрического обогащения железных, хромовых, марганцевых, золотосодержащих сульфидных руд, титано-циркониевых песков расширяют диапазон потенциального применения сухой электрической сепарации и демонстрируют не меньшую ее технологическую универсальность, чем флотационные технологии, но при этом без использования воды и флотационных реагентов [25].

При обогащении флюоритовых руд электросепарация может применяться для разделения флюорита и кальцита в операциях доводки черновых концентратов. На данный момент нет практического опыта по обогащению флюоритов.

Химический состав флюоритовой руды
Chemical composition of fluorite ore

Массовая доля компонентов, %									
CaF ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe _{общ}	TiO ₂	S	P	CaCO ₃	ПМПП
44,0	33,7	3,78	2,27	0,73	0,20	0,12	0,02	7,8	6,63

вых руд с применением сухих методов обогащения, например воздушной классификации и электросепарации, и отсутствуют соответствующие технологические схемы переработки, что представляется актуальным, имеет практический интерес и послужило целью проводимых изысканий.

Объекты и методы исследования

Оценка возможности обогащения флюоритовой руды по технологическим схемам сухого обогащения проводилась на малосульфидной кварц-флюоритовой руде, которая по содержанию флюорита относится к средним (массовая доля CaF₂ 35 – 50%), со значительным количеством карбонатов – 7,8% (табл. 1).

По результатам оптико-петрографического анализа (МР № 111 НСОММИ «Петрографический анализ магматических, метаморфических и осадочных пород») с помощью оптического микроскопа Olympus BX 51 установлено, что руда представляет собой карбонатизированный углисто-глинистый сланец с прожилками флюорита. Основными минералами руды являются флюорит (40%), кварц (28%), карбонат (18%) и слюда (9%). Из второстепенных минералов преобладает углистое вещество (5%).

Текстура руды прожилковая, структура неравномернотзернистая. Углисто-глинистый сланец пронизан трещинами, выполненными карбонатами и флюоритом. Границы между агрегатами довольно четкие, неровные, по ним развиваются гидроксиды железа. Порода трещиноватая. Флюорит выполняет полости трещин в породе, образуя прожилки до

Таблица 2

Фазовый состав исходной руды
Phase composition of the initial ore

Минерал	Теоретическая формула	Содержание, мас., %
Кварц	SiO_2	35
Флюорит	CaF_2	42
Мусковит	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	14
Кальцит	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	7,5
Микроклин	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	0,5
Сумма кристаллических фаз		99

1,2 см различной мощности, которые участками выклиниваются. Присутствие флюорита в хорошо сформированных прожилках предопределяет возможность обогащения на крупности 1 мм и менее.

Фазовый анализ (методические указания НСАМ № 21 «Рентгенографический количественный фазовый анализ с использованием метода внутреннего стандарта») руды данной пробы, проведенный на рентгеновском дифрактометре X Pert PRO MPD, подтвердил присутствие 7,5% кальцита и высокое содержание кварца – 35% (табл. 2).

Для оценки возможности выделения на стадии дробления части материала в виде хвостов или промпродукта была произведена оценка распределения CaF_2 по классам крупности в дробленой до крупности менее 5 мм руде (табл. 3). Из данных табл. 3 следует, что распределе-

Распределение CaF_2 по классам крупности
Distribution of CaF_2 by size classes

Класс крупности, мм	Выход класса, %	Массовая доля CaF_2 , %	Извлечение CaF_2 в класс крупности, %
2,5–5	37,2	28,33	25,1
1,25–2,5	19,4	40,90	18,9
0,63–1,25	12,2	49,26	14,3
0,315–0,63	9,3	57,57	12,7
0,16–0,315	7,0	62,00	10,3
0–0,16	14,9	52,80	18,7
Итого:	100,0	42,04	100,0

ние CaF_2 по классам крупности равномерное, с некоторым преобладанием в крупном классе 2,5-5 мм, который при этом является наиболее бедным по содержанию флюорита.

Руда исходной крупности 150–200 мм дробилась в щековой дробилке (в две стадии) до фракции 0–5 мм и далее поступала на подготовку к электросепарации. Для технологических испытаний были приняты три схемы переработки материала, приведенные на рис. 1.

Первая и вторая схемы подготовки флюоритовой руды к электросепарации включали дробление руды в центробежно-ударной дробилке в цикле с грохотом и затем обеспыливание дробленого материала в центробежном классификаторе. Третья схема вместо дробления в центробежно-ударной дробилке включала сухое измельчение руды в измель-

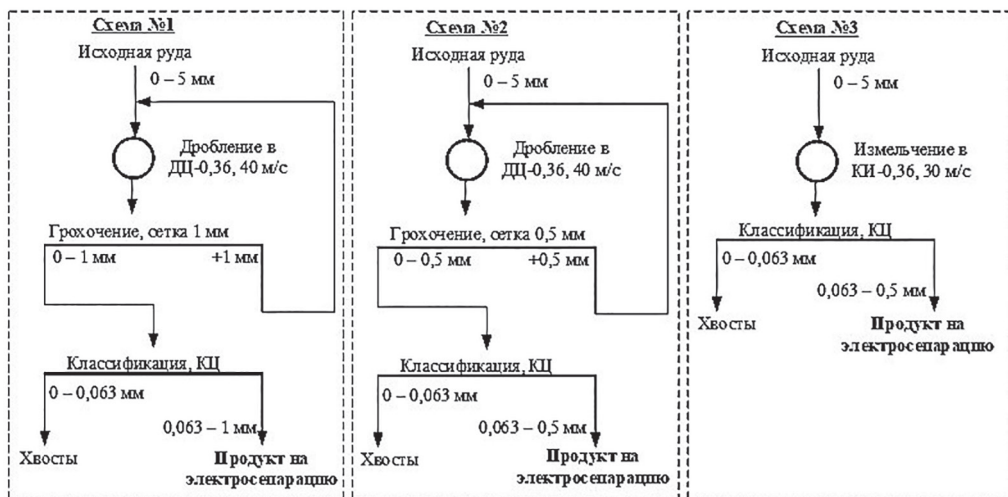


Рис. 1. Схемы подготовки руды к электросепарации
 Fig. 1. Schemes of ore preparation for electric separation

чительном комплексе КИ и обеспыливание в центробежном классификаторе.

Результаты и их обсуждение

В качестве процесса сухого обогащения зернистых сыпучих материалов крупностью от 3 до 0,05 мм может быть применена электрическая сепарация [24]. Удельное электрическое сопротивление кварца (1013 – 1016 Ом·м) и кальцита (109 – 1014 Ом·м) ниже, чем у флюорита (1015 – 1017 Ом·м). Следовательно, в качестве контрастных разделительных признаков для обогащения флюоритовой руды можно использовать разницу в электрических свойствах основных минералов. Результаты проведенных исследований электросепарации проб плавиковошпатовой руды подтвердили эффективность применения данного метода для разделения частиц флюорита и вмещающих пород.

Предварительная подготовка материала перед электросепарацией [23, 26] предусматривает улучшение условий разделения заряженных частиц и изменение в нужном направлении естественных электрофизических характеристик

минералов для повышения эффективности зарядки и является предпосылкой для успешного применения электрического разделения [25].

Разделение заряженных частиц улучшается при снижении их влажности, классификации и обеспыливания. При высокой влажности исходного материала резко возрастают силы сцепления частиц между собой, поэтому сушка материала до состояния сыпучести обязательна перед электрической сепарацией.

Пылевидные частицы, обволакивая более крупные, снижают селективность разделения материала, поэтому обеспыливание, как правило, улучшает показатели обогащения. На электросепарацию также рекомендуется подавать однородный по крупности материал, так как при неклассифицированном материале силы, величины которых пропорциональны диаметру частиц, могут нивелировать действие электрических сил. Таким образом, при подготовке кварц-флюоритовой руды к электросепарации необходимо было обеспечить:

- раскрытие сростков флюорита с минералами вмещающей породы, не до-

пуская при этом перехода ценного компонента в шламовые фракции (менее 0,05 мм);

- крупность материала не более 3 мм;
- узкий гранулометрический состав материала и его обеспыливание.

Достижение этих требований возможно при осуществлении на стадии рудоподготовки селективной дезинтеграции [30] и воздушной классификации материала [31].

Наиболее рациональными аппаратами, реализующими условия селективного раскрытия разнопрочностных фаз гетерогенных материалов, являются аппараты ударного действия [31 – 33]. При ударном воздействии на минералы разрушение происходит, как правило, по микротрещинам и ослабленным плоскостям на границах срастания минеральных фаз, обладающих контрастными физико-механическими свойствами [34, 35], за счет чего возникают сдвиговые и растягивающие напряжения на интеркристаллитных поверхностях раздела раскрываемых минералов [36].

Для высокоточной воздушной классификации сыпучих материалов различной дисперсности применяются центробежные классификаторы различных конструкций и производителей [37, 38].

Возможность совмещения селективного центробежно-ударного разрушения и центробежной классификации в одном аппарате реализована в комплексах КИ (компании «Урал-Омега»). Использование принципа разрушения свободным ударом в центробежно-ударной мельнице, при возможности регулирования величины прикладываемой нагрузки [32], позволяет селективно раскрывать сростки флюорита с кварцем без ошламования ценного компонента. Крупность помола материала в мельнице регулируется путем изменения скорости вращения ускорителя, положения лопаток, скорости потока воздуха в камере измельче-

ния. Применение высокоэффективного центробежного классификатора для разделения измельченного материала позволяет удалять пылевые частицы крупностью менее 0,040 мм [37].

При проведении петрографического анализа флюоритовой руды установлено, что раскрытие сростков флюорита с минералами породы возможно при крупности дробленой руды менее 1 мм. Однако уменьшение крупности материала менее 0,315 мм приведет к снижению селективности разделения при электро-сепарации и потерям ценного компонента со шламами. С учетом данных факторов были приняты технологические схемы рудоподготовки, включающие дробление руды до крупности 0,5 мм и 1 мм (схемы 1 и 2) и измельчение до крупности 0,5 мм (схема 3). Граница разделения при воздушной классификации была установлена 0,063 мм, поскольку наличие тонкодисперсных частиц будет резко снижать эффективность электро-сепарации.

Для увеличения выхода материала требуемой фракции за один проход через камеру дробления и, следовательно, снижения циклической нагрузки при дроблении была использована дробилка ДЦ-0,36 с металлической отбойной поверхностью. При проведении испытаний по дроблению руды до 1 мм циркуляционная нагрузка составила 2,8, 2,4 и 2,0 при скорости вращения ускорителя 40, 60 и 90 м/с соответственно. Выход фракции 0 – 0,063 мм составил 14,1 – 23,1%.

При уменьшении крупности дробленой руды до 0,5 мм циркуляционная нагрузка возросла до 3,3, 2,7 и 2,3 при скорости вращения ускорителя 40, 60 и 90 м/с соответственно. Выход фракции 0 – 0,063 мм при этом увеличился до 22,8 – 33,6%.

По результатам химического анализа дробленого материала (см. табл. 3) мелкий класс (–0,16 мм) обогащен флюори-

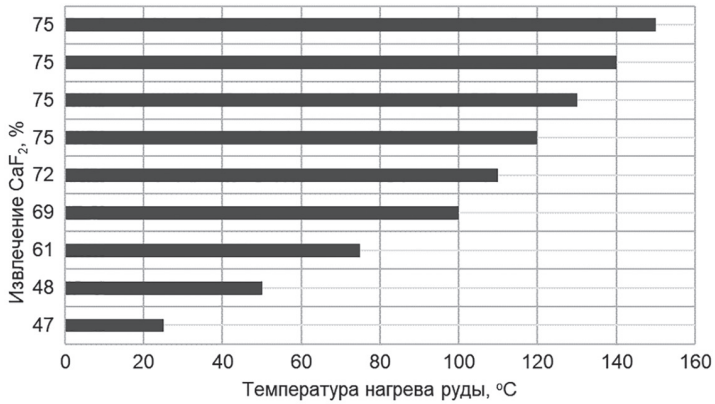


Рис. 2. Зависимость извлечения флюорита от температуры нагрева руды

Fig. 2. Dependence of fluorite extraction on ore heating temperature

том, и увеличение количества пылевых фракций при дроблении приведет к увеличению потерь ценного компонента в операции обеспыливания. Поэтому скорость вращения ускорителя была принята равной 40 м/с.

По третьей схеме измельчение дробленой руды фракции 0–5 мм в комплексе КИ осуществлялось в режиме работы, предназначенном для образования минимального количества фракции

–0,063 мм, при скорости вращения ускорителя 30 м/с. Полученный материал имел крупность 0–0,5 мм.

Для удаления частиц размером менее 0,063 мм перед электрической сепарацией применялся воздушный классификатор центробежного типа (КЦ).

Термическая обработка материала перед электросепарацией воздействует как на объемную, так и на поверхностную составляющую электропроводности. При

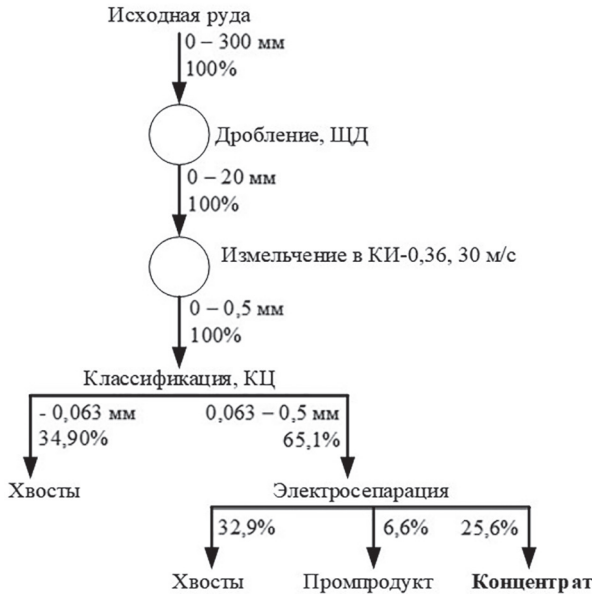


Рис. 3. Технологическая схема переработки флюоритовой руды

Fig. 3. Technological scheme of fluorite ore processing

Таблица 4

Результаты обогащения флюоритовой руды
Results of fluorite ore enrichment

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля CaF ₂ , %	Извлечение CaF ₂ , %
Технологическая схема 1			
Концентрат электросепарации	25,90	81,69	26,31
Промпродукт электросепарации	13,23	55,82	13,44
Хвосты электросепарации	41,06	12,84	41,70
Хвосты классификации	19,8	40,1	18,55
Исходная руда	100,0	42,17	100,0
Технологическая схема 2			
Концентрат электросепарации	19,83	80,89	38,66
Промпродукт электросепарации	26,98	53,82	35,02
Хвосты электросепарации	39,39	13,43	12,80
Хвосты классификации	13,8	40,89	13,52
Исходная руда	100,0	41,59	100,0
Технологическая схема 3			
Концентрат электросепарации	25,58	85,70	50,30
Промпродукт электросепарации	6,64	53,63	8,15
Хвосты электросепарации	32,88	11,05	8,35
Хвосты классификации	34,9	39,9	33,2
Исходная руда	100,0	44,73	100,0

термической обработке различие в электропроводности достигается вследствие неодинакового изменения проводимости компонентов руды. Зависимость между температурой и электропроводностью у разных минералов неодинакова, поэтому каждой минеральной «паре» соответствует оптимальный интервал температуры, при котором имеет место наибольшая разница в их электропроводности.

Результаты электросепарации при различной температуре подготовленной руды показали, что эффективность разделения материала снижается при температуре ниже 125 °С (рис. 2).

После стадии рудоподготовки фракционированный материал нагревался до 130 °С. Результаты переработки флюоритовой руды по принятым технологическим схемам (см. рис. 1) с учетом установленных параметров рудоподготовки и электрической сепарации пред-

ставлены в табл. 4. Как следует из представленных данных, при использовании в качестве заключительной операции уменьшения крупности и, соответственно, раскрытия материала перед электросепарацией сухого центробежно-ударного измельчения повышается качество концентрата, уменьшается выход промпродукта и хвостов электросепарации.

Разработана схема сухого обогащения флюоритовой руды с использованием электросепарации (см. рис. 3). Рудоподготовка включает стадийное дробление руды до крупности менее 20 мм, измельчение дробленого материала в измельчительном комплексе КИ до крупности менее 0,5 мм и разделение в центробежном классификаторе по границе 0,063 мм.

При электросепарации руды, подготовленной по предложенной схеме, был получен концентрат с массовой долей

CaF₂ 85,7%. Выход готового продукта составил 25,6%. Массовая доля примесей в концентрате составляет: серы — 0,07%, фосфора — 0,03% и диоксида кремния — 8,7%. Данный продукт по содержанию фтористого кальция и примесей удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кусковым и гравитационным металлургическим флюоритовым концентратам марок ФК-85, ФГ-85 (ГОСТ 29220-91) и к кусковым и гравитационным флюоритовым концентратам для получения сварочных материалов ФКС-85, ФГС-85 (ГОСТ 4421-73). Зерновой состав полученного концентрата может быть доведен до соответствия требованиям ГОСТов после окускования.

Заключение

Для освоения российских месторождений флюорита, которые по качеству существенно уступают сырьевым базам основных стран-производителей, и долгосрочного обеспечения потребностей отечественной промышленности в плавиковом шпате целесообразно продолжать изыскания в области эффективных технологий обогащения плавиковошпатовых руд с низким содержанием флюорита, повышенной карбонатностью и сложным вещественным составом. Альтернативными принятым технологиям флотационного и гравитационного обогащения флюоритовых руд могут быть схемы с использованием сухих процессов рудоподготовки и обогащения. Разработаны и испытаны технологические

схемы сухого обогащения малосульфидной кварц-флюоритовой руды с использованием центробежно-ударного способа дробления или измельчения руды до различной крупности, воздушной классификации и электрической сепарации.

Наиболее целесообразной является схема подготовки руды к электросепарации путем ее сухого измельчения до крупности 0,5 мм в измельчительном комплексе КИ с центробежно-ударной мельницей и обеспыливания в центробежном воздушном классификаторе.

По разработанной технологической схеме с одной стадией электросепарации возможно получение плавиковошпатового концентрата с массовой долей CaF₂ 85%, отвечающего требованиям к металлургическим флюоритовым концентратам и концентратам для получения сварочных материалов по содержанию фтористого кальция и примесей, при выходе готового продукта 26%.

Технологии сухой переработки минерального сырья обеспечивают получение новых высоколиквидных видов нерудной товарной продукции, характеризуются большей экологической безопасностью, уменьшением капитальных вложений в обогатительный комплекс и снижением общих эксплуатационных расходов и будут становиться все более востребованными, особенно в наши дни, когда экологические проблемы, а также потребление энергии и воды являются основными проблемами для горнодобывающей индустрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bulatovic S. M.* Beneficiation of Florite Ores // Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. 2015, vol. 3, pp. 57 – 76. DOI: 10.1016/B978-0-444-53083-7.00029-4.
2. *Фатьянов А. В., Никитина Л. Г., Глотова Е. В.* Технология обогащения флюоритовых руд. — Новосибирск: Наука, 2006. — 196 с.
3. *Фатьянов А. В., Никитина Л. Г., Щеглова С. А.* Повышение эффективности переработки карбонатно-флюоритовых руд Монголо-Забайкальской рудоносной провинции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 115–122. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-115-122.

4. Киенко Л. А., Воронова О. В. Васянович Ю. А. Проблемы снижения содержания двуокси кремния во флюоритовых концентратах при обогащении техногенного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S30. — С. 50–58. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-8-30-50-58.
5. Арсентьев В. А., Вайсберг Л. А., Устинов И. Д. Направления создания маловодных технологий и аппаратов для обогащения тонкоизмельченного минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 5. — С. 3–9.
6. Vaawuah E., Kelsey C., Addai-Mensah J., Skinner W. Economic and socio-environmental benefits of dry beneficiation of magnetite ores // Minerals. 2020, vol. 10, no. 11, article 955. DOI: 10.3390/min10110955.
7. Урванцев А. И., Кашеев И. Д. Сухое обогащение кианитовых руд // Новые огнеупоры. — 2013. — № 6. — С. 10–12. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-6-10-12.
8. Liang Dong, Ziming Wang, Enhui Zhou, Xuan Wang, Gongmin Li, Xuchen Fan, Bo Zhang, Chenlong Duan, Zengqiang Chen, Zhenfu Luo, Haishen Jiang, Yumin Zha A novel dry beneficiation process for coal // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2022, vol. 42, no. 4, pp. 1105–1125. DOI: 10.1080/19392699.2019.1692339.
9. Артамонов А. В., Гаркави М. С., Горлова О. Е., Колодежная Е. В., Шадрунова И. В. Технологии сухого обогащения природного и техногенного сырья с использованием центробежно-ударной техники / Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр». — Екатеринбург: Изд-во ОАО «Уралмеханобр», 2019. — С. 140–143.
10. Лебедев И. Ф. Обогащение полезных ископаемых с использованием аппаратов пневмосепарации // Международный научно-исследовательский журнал. — 2019. — № 4(82). — С. 65–68. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.012.
11. Кутенев А. А., Валиев Н. Г. Технология сухого обогащения кварц-полевошпатовой руды // Известия вузов. Горный журнал. — 2011. — № 2. — С. 103–105.
12. Беляев И. А., Постникова И. В. Проблемы и перспективы применения технологий полусухих и сухих способов обогащения бедных фосфоритовых руд // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. — 2017. — № 3(51). — С. 67–74.
13. Urvantsev A. M., Kashcheev I. D. Rawmaterials magnesite enrichment by a dry method // Refractories and Industrial Ceramics. 2012, vol. 53, no. 2, pp. 78–81.
14. Чокин К. Ш., Едильбаев А. И., Едильбаев Б. А., Югай В. Д. Использование пневмомангнитной сепарации при обогащении магнетитовых руд // Обогащение руд. — 2020. — № 2. — С. 33–40. DOI: 10.17580/or.2020.02.06.
15. Едильбаев А. И. Перспективы сухого обогащения высокоглинистых руд // Цветная металлургия. — 2012. — № 5. — С. 51–53.
16. Герасимов А. М., Дмитриев С. В. Комбинированная технология сухого обогащения угля // Обогащение руд. — 2016. — № 6. — С. 9–13. DOI: 10.17580/or.2016.06.02.
17. Dwari R. K., Rao K. H. Dry beneficiation of Coal-A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2007, vol. 28, no. 3, pp. 177–234. DOI: 10.1080/08827500601141271.
18. Chen J., Honaker R. Dry separation on coal–silica mixture using rotary triboelectrostatic separator // Fuel Processing Technology. 2015, vol. 131, pp. 317–324. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.11.032.
19. Sobhyab A., Taoua D. Innovative RTS technology for dry beneficiation of phosphate // Procedia Engineering. 2014, vol. 83, pp. 111–121. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.020.
20. Nunna V., Napugoda S., Eswarappa S. G., Raparla Sh. K., Pownceby M. I., Sparrow G. J. Evaluation of dry processing technologies for treating low grade lateritic iron ore fines // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022, vol. 43, no. 3, pp. 283–299. DOI: 10.1080/08827508.2020.1837127.
21. Ahmed H. A. M. Dry versus ungrading of nepheline syenite ores // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2011, vol. 46, pp. 107–118.

22. *Mijał W., Baic I., Blaschke W.* Modern methods of dry mineral separation – polish experience / Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021, vol. 109. pp. 407–425. DOI: 10.1007/978-3-030-60839-2_21.

23. *Manouchehri H. R.* Changing electrical beneficiation potential of minerals: a critical analysis of surface treatment methods in separation / Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018). Moscow, 2019, pp. 777–787.

24. *Месеняшин А. И., Логачева Н. А.* Электрическая сепарация минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 366–369.

25. *Shikhov N. V., Urvanzev A. I.* The study's results on the use of electrical separation for various ores / Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018). Moscow, 2019, pp. 663–671.

26. *Mohanta S. K., Dwari R. K.* Separation of the coal-quartz mixture using tribo-electrostatic separator: Effect of surface pretreatment // Advanced Powder Technology. 2020, vol. 31, no. 8, pp. 3361–3371. DOI: 10.1016/j.appt.2020.06.027.

27. *Шубов Л. Я., Статкевич И. В., Гречишкин В. С.* Электросепарация – метод обогащения легкой фракции бытовых отходов // Твердые бытовые отходы. – 2012. – № 1. – С. 16–20.

28. *Ryabov Yu. V., Delitsyn L. M., Ezhova N. N., Sudareva S. V.* Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use (a review) // Thermal Engineering. 2019, vol. 66, pp. 149–168. DOI:10.1134/S0040601519030054.

29. *Красногоров В. О., Тупиков Д. Ю., Тупиков А. Д.* Новые разработки в области электрического обогащения руд и россыпей // Горная промышленность. – 2020. – № 5. – С. 30–31.

30. *Юсупов Т. С.* Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков при освоении труднообогатимых объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 3. – С. 143–149.

31. *Vorob'ev V. A., Ivanov E. N., Larionov A. N., Ryazanov M. A.* Dry technologies of ore preparation as a tool for increasing extraction of valuable components / Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018). Moscow, 2019, pp. 708–715.

32. *Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В., Кутлубаев И. М.* Механизм дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 2. – С. 149–155.

33. *Паладеева Н. И.* Дробилки ударного действия // Известия вузов. Горный журнал. – 1996. – № 10–11. – С. 139–145.

34. *Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В.* Технология получения высокосортных концентратов из отходов металлургических шлаков // Обогащение руд. – 2019. – № 4. – С. 54–60. DOI: 10.17580/or.2019.04.10.

35. *Мамонов С. В., Закирничный В. Н., Метелев А. А., Дресвянкина Т. П., Волкова С. В., Кузнецов В. А., Зиятдинов С. В.* Перспективные технологии раскрытия минерального сырья при подготовке к флотационному обогащению // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 158–169. DOI: 10.15372/FTPRPI20190517.

36. *Хопунов Э. А.* Энергетические и силовые факторы селективного разрушения руд // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 79–88. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-79-88.

37. *Гаркави М. С., Орехова Н. Н., Горлова О. Е., Колодежная Е. В.* Применение механоактивации для получения целевых продуктов при переработке плавленого периклаза и шлаков // Обогащение руд. – 2020. – № 6. – С. 33–40. DOI: 10.17580/or.2020.06.06.

38. *Cepuritis R., Jacobsen S., Onnela T.* Sand production with VSI crushing and air classification: Optimising fines grading for concrete production with micro-proportioning // Minerals Engineering. 2015, vol. 78, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.025.

39. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. — М., 2020. — 494 с. **МИАБ**

REFERENCES

1. Bulatovic S. M. Beneficiation of Florite Ores. *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*. 2015, vol. 3, pp. 57–76. DOI: 10.1016/B978-0-444-53083-7.00029-4.
2. Fat'yanov A. V., Nikitina L. G., Glotova E. V. *Tekhnologiya obogashcheniya flyuoritovykh rud* [Technology of fluorite ore enrichment], Novosibirsk, Nauka, 2006, 196 p.
3. Fat'yanov A. V., Nikitina L. G., Shcheglova S. A. Improvement of processing efficiency for carbonate–fluorite ore of the Transbaikal–Mongolia province. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 115–122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-115-122.
4. Kienko L. A., Voronova O. V. Vasyanovich Yu. A. Problems of reducing the content of silicon dioxide in fluorite concentrates during the enrichment of technogenic raw materials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S30, pp. 50–58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-8-30-50-58.
5. Arsentiev V. A., Vaisberg L. A., Ustinov I. D. Directions for the creation of low-water technologies and devices for the enrichment of finely ground mineral raw materials. *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 5, pp. 3–9. [In Russ].
6. Baawuah E., Kelsey C., Addai-Mensah J., Skinner W. Economic and socio-environmental benefits of dry beneficiation of magnetite ores. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 11, article 955. DOI: 10.3390/min10110955.
7. Urvantsev A. I., Kashcheev I. D. Dry enrichment of kyanite ores. *Novye Ogneupory*. 2013, no. 6, pp. 10–12. [In Russ]. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-6-10-12.
8. Liang Dong, Ziming Wang, Enhui Zhou, Xuan Wang, Gongmin Li, Xuchen Fan, Bo Zhang, Chenlong Duan, Zengqiang Chen, Zhenfu Luo, Haishen Jiang, Yuemin Zha A novel dry beneficiation process for coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022, vol. 42, no. 4, pp. 1105–1125. DOI: 10.1080/19392699.2019.1692339.
9. Artamonov A. V., Garkavi M. S. Gorlova O. E., Kolodezhnaya E. V., Shadrinova I. V. Technologies of dry enrichment of natural and man-made raw materials using centrifugal impact technology. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineral'nogo i tekhnogenogo syr'ya: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr»* [Modern trends in the field of theory and practice of mining and processing of mineral and man-made raw materials: materials of the international Scientific conference dedicated to the 90th anniversary of the founding of the Institute «Uralmekhanobr»], Ekaterinburg, Izd-vo OAO «Uralmekhanobr», 2019, pp. 140–143. [In Russ].
10. Lebedev I. F. Mineral processing with the use of air separation devices. *International Research Journal*. 2019, no. 4(82), pp. 65–68. [In Russ]. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.012.
11. Kootenev A. A., Valiev N. G. Technology of dry enrichment of quartz-feldspar ore. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2011, no. 2, pp. 103–105. [In Russ].
12. Belyaev I. A. Postnikova I. V. Problems and prospects of application of technologies of semi-dry and dry methods of enrichment of poor phosphorite ores. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2017, no. 3(51), pp. 67–74. [In Russ].
13. Urvantsev A. M., Kashcheev I. D. Rawmaterials magnesite enrichment by a dry method. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012, vol. 53, no. 2, pp. 78–81.
14. Chokin K. Sh., Edilbaev A. I., Edilbaev B. A., Yugai V. D. The use of pneumomagnetic separation in the enrichment of magnetite ores. *Obogashchenie Rud*. 2020, no. 2, pp. 33–40. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.02.06.
15. Edilbaev A. I. Prospects of dry enrichment of high-clay ores. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2012, no. 5, pp. 51–53. [In Russ].

16. Gerasimov A. M., Dmitriev S. V. Combined technology of dry coal enrichment. *Obogashchenie Rud.* 2016, no. 6, pp. 9 – 13. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.06.02.
17. Dwari R. K., Rao K. H. Dry beneficiation of Coal-A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* 2007, vol. 28, no. 3, pp. 177 – 234. DOI: 10.1080/08827500601141271.
18. Chen J., Honaker R. Dry separation on coal–silica mixture using rotary triboelectrostatic separator. *Fuel Processing Technology.* 2015, vol. 131, pp. 317 – 324. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.11.032.
19. Sobhyab A., Taa D. Innovative RTS technology for dry beneficiation of phosphate. *Procedia Engineering.* 2014, vol. 83, pp. 111 – 121. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.020.
20. Nunna V., Hapugoda S., Eswarappa S. G., Raparla Sh. K., Pownceby M. I., Sparrow G. J. Evaluation of dry processing technologies for treating low grade lateritic iron ore fines. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* 2022, vol. 43, no. 3, pp. 283 – 299. DOI: 10.1080/08827508.2020.1837127.
21. Ahmed H. A. M. Dry versus ungrading of nepheline syenite ores. *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 2011, vol. 46, pp. 107 – 118.
22. Mijał W., Baic I., Blaschke W. Modern methods of dry mineral separation – polish experience. *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining. Lecture Notes in Civil Engineering.* 2021, vol. 109, pp. 407 – 425. DOI: 10.1007/978-3-030-60839-2_21.
23. Manouchehri H. R. Changing electrical beneficiation potential of minerals: a critical analysis of surface treatment methods in separation. *Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018).* Moscow, 2019, pp. 777 – 787.
24. Mesenyashin A. I., Logacheva N. A. Electric separation of mineral raw materials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2006, no. 1, pp. 366 – 369. [In Russ].
25. Shikhov N. V., Urvanzen A. I. The study's results on the use of electrical separation for various ores. *Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018).* Moscow, 2019, pp. 663 – 671.
26. Mohanta S. K., Dwari R. K. Separation of the coal-quartz mixture using tribo-electrostatic separator: Effect of surface pretreatment. *Advanced Powder Technology.* 2020, vol. 31, no. 8, pp. 3361 – 3371. DOI: 10.1016/j.apt.2020.06.027.
27. Shubov L. Ya., Statkevich I. V., Grechishkin V. S. Electro-separation – a method of enrichment of a light fraction of household waste. *Tverdye bytovye otkhody.* 2012, no. 1, pp. 16 – 20. [In Russ].
28. Ryabov Yu. V., Delitsyn L. M., Ezhova N. N., Sudareva S. V. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use (a review). *Thermal Engineering.* 2019, vol. 66, pp. 149 – 168. DOI:10.1134/S0040601519030054.
29. Krasnogorov V. O., Tupikov D. Yu., Tupikov A. D. New developments in the field of electric enrichment of ores and placers. *Russian Mining Industry.* 2020, no. 5, pp. 30 – 31. [In Russ].
30. Yusupov T. S. Improving the processes of disclosure of mineral accretions in the development of hard-to-enrich objects. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh.* 2016, no. 3, pp. 143 – 149. [In Russ].
31. Vorob'ev V. A., Ivanov E. N., Larionov A. N., Ryazanov M. A. Dry technologies of ore preparation as a tool for increasing extraction of valuable components. *Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018).* Moscow, 2019, pp. 708 – 715.
32. Shadrinova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaya E. V., Kutlubaev I. M. Metallurgical slag disintegration in centrifugal impact crushing machines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh.* 2015, no. 2, pp. 149 – 155. [In Russ].
33. Paladeeva N. I. Impact crushers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal.* 1996, no. 10 – 11, pp. 139 – 145. [In Russ].
34. Shadrinova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaya E. V. Technology of obtaining high-grade concentrates from waste of metallurgical slags. *Obogashchenie Rud.* 2019, no. 4, pp. 54 – 60. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.04.10.

35. Mamonov S. V., Zakirnichny V. N., Metelev A. A., Dresvyankina T. P., Volkova S. V., Kuznetsov V. A., Ziyatdinov S. V. Promising dissociation technologies for preparation of minerals to flotation. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 5, pp. 158 – 169. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPPI20190517.

36. Khopunov E. A. Energy and force factors of selective ore destruction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 79 – 88. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-79-88.

37. Garkavi M. S., Orekhova N. N., Gorlova O. E., Kolodezhnaya E. V. Application of mechanical activation for obtaining target products during processing of fused periclase and slags. *Obogashchenie Rud*. 2020, no. 6, pp. 33 – 40. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.06.06.

38. Cepuritis R., Jacobsen S., Onnela T. Sand production with VSI crushing and air classification: Optimising fines grading for concrete production with micro-proportioning. *Minerals Engineering*. 2015, vol. 78, pp. 1 – 14. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.025.

39. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiyskoy federatsii v 2019 godu»*. *Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii* [State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019». Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation], Moscow, 2020, 494 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шадрунова Ирина Владимировна*¹ – д-р техн. наук, профессор, e-mail: shadrunova@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3520-2705,

*Колодежная Екатерина Владимировна*¹ – канд. техн. наук,

e-mail: kev@uralomega.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0252-4479,

Горлова Ольга Евгеньевна – д-р техн. наук, доцент,

Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова, e-mail: gorlova_o_e@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1142-0652,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Горлова О.Е., e-mail: gorlova_o_e@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*I.V. Shadrunova*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: shadrunova@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3520-2705,

*E.V. Kolodezhnaya*¹, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: kev@uralomega.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0252-4479,

O.E. Gorlova, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University,

455000, Magnitogorsk, Russia,

e-mail: gorlova_o_e@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1142-0652,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: O.E. Gorlova, e-mail: gorlova_o_e@mail.ru.

Получена редакцией 22.06.2022; получена после рецензии 26.12.2022; принята к печати 10.01.2023.

Received by the editors 22.06.2022; received after the review 26.12.2022; accepted for printing 10.01.2023.