

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 622.732.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26



ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕГРАТИВНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ВОЗМОЖНОСТИ СЕЛЕКТИВНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО СЛОЖНОСТРУКТУРНОГО СЫРЬЯ

Горлова О.Е.¹, Орехова Н.Н.¹, Колодежная Е.В.², Колкова М.С.¹, Глаголева И.В.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Институт проблем комплексного освоения недр имени академика В.Н. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработка простых методов критериальной оценки возможности селективной дезинтеграции на стадии мелкого дробления является актуальной задачей в связи с вовлечением в переработку небольших партий горно-металлургических отходов, значительно отличающихся по структурно-технологическим, физико-механическим и химическим свойствам. Стадия мелкого дробления часто является первым приемом дезинтеграции в схемах переработки техногенного сырья, уже частично разрушенного в первичном процессе добычи и обогащения, то есть является стадией формирования продукта, в которой по возможности должны быть вскрыты гетерофазные сростки. Для быстрой прогнозной оценки, позволяющей сделать обоснованный выбор способа мелкого дробления, обеспечивающего наибольшую селективность дезинтеграции, подходящим инструментом может быть балльная оценка. **Цель работы.** Обоснования пунктов и критериев балльной оценки для центробежно ударного способа измельчения на основании наших многолетних исследований минералогических, структурно-текстурных особенностей и закономерностей дезинтеграции металлургических отходов. **Используемые методы.** Системный подход к формированию ключевых показателей, влияющих на эффективность селективности разрушения, на основе комплексного анализа вещественных и технологических характеристик металлургических шлаков, специфических особенностей их состава, строения и свойств, полученных ранее данных об их корреляции с эффективностью разрушения техногенных сростков материала по поверхности раздела фаз при ударном способе дезинтеграции. **Новизна.** Впервые сделана попытка обоснования состава ключевых показателей для определения значения интегративного критерия прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья в аппаратах центробежно-ударного действия на основе балльной оценки. **Результат.** Предложена система критериев оценки, состав ключевых показателей и шкала оценки и интерпретации результатов. **Практическая значимость.** Обоснованный выбор способа мелкого дробления на основании разрабатываемого критерия позволит снизить потери в процессах обогащения.

Ключевые слова: интегративный критерий, мелкое дробление, селективность, раскрываемость, балльная оценка, техногенное минеральное сырьё, центробежно-ударное воздействие, шлаки

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00526, <https://rscf.ru/project/22-27-00526/>.

© Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С., Глаголева И.В., 2023

Для цитирования

Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья / Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С., Глаголева И.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 15-26. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26>



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

PROVIDING A RATIONALE FOR AN INTEGRATIVE CRITERION TO PREDICT THE POTENTIAL SELECTIVE DISINTEGRATION OF TECHNOLOGY-RELATED, COMPLEX STRUCTURED RAW MATERIALS

Gorlova O.E.¹, Orekhova N.N.¹, Kolodezhnaya E.V.², Kolkova M.S.¹, Glagoleva I.V.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Development of simple methods of the criterion estimation of the potential selective disintegration at the stage of fine crushing is a relevant task due to involving in processing of small batches of mining and metallurgical wastes, considerably differing by structural, technological, physical, mechanical and chemical properties. The fine crushing stage is often the first method of the disintegration in flow charts of processing of technology-related raw materials, already partially crushed in the primary process of mining and beneficiation. It means that it is the stage of the product formation, when heterophase aggregates should be uncovered if possible. To ensure a quick predictive assessment used to make a reasonable choice of a fine crushing method providing the greatest selectivity of the disintegration, a suitable tool can be scoring. **Objectives.** The research is aimed at providing a rationale for points and criteria of scoring for a centrifugal impact grinding method based on our long-term studies on mineralogical, structural and textural features and patterns of the disintegration of metallurgical wastes. **Methods Applied.** A system approach to the formation of key indicators influencing efficiency of selectivity of crushing based on a comprehensive analysis of the material and technological characteristics of metallurgical slags, peculiar features of their composition, structure and properties, the previously obtained data on their correlation with efficiency of crushing technology-related aggregates of the material on the interface surface by an impact method of the disintegration. **Originality.** The authors made a novel attempt to provide a rationale for the composition of key indicators for determining the value of the integrative criterion used to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials in centrifugal impact facilities based on scoring. **Result.** The authors proposed a system of assessment criteria, the composition of key indicators and the scale of assessment and interpretation of results. **Practical Relevance.** A supported choice of the fine crushing method based on the developed criterion will contribute to reducing losses in beneficiation processes.

Keywords: integrative criterion, fine crushing, selectivity, release, scoring, technology-related mineral raw materials, centrifugal impact, slags

The research was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 22-27-00526, <https://rscf.ru/project/22-27-00526/>.

For citation

Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolkova 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, vol. 21, no. 3, pp. 15-26. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26>

Введение

В последнее время все в больших объемах рециклинг вовлекается сырье техногенного происхождения, то есть образующиеся на самих горнодобывающих, обогатительных, металлургических, химико-металлургических предприятиях отходы добычи и переработки минерального сырья [1]. Вопрос селективного раскрытия остро встает в стадии мелкого дробления, которая часто является первым приемом дезинтеграции в схемах переработки техногенного сырья, частично дезинтегрированного в первичном процессе добычи и переработки. Стадия мелкого дробления является стадией формирования продукта перед циклом измельчения, или первой

операции разделения, в которой по возможности должны быть вскрыты гетерофазные сростки. В связи с этим важным и интересным является исследование селективности раскрытия сростков техногенных фаз и минералов именно в этой стадии дезинтеграции сырья. Для достижения крупности выходящего куска 5-10 мм, характерного для питания шаровой мельницы, могут быть использованы конусная мелкого дробления, валковые дробилки, дробилки центробежно-ударного действия, мельницы полусамозмельчения, стержневые мельницы. Энергетические затраты мокрого измельчения значительно выше, чем затраты на сухое дробление. Поэтому более целесообразным и общепринятым выглядит получение мелкого продукта в дробилках.

В зависимости от факторов нагружения валковые дробилки относят к дробилкам с жестким типом нагрузки [2], дробилки центробежно-ударного действия – к оборудованию с мягким типом нагружения. Главным отличием устройств с мягким типом нагружения является то, что при дроблении вся энергия, переданная куску руды нагружающим устройством, полностью переходит в энергию деформации. Кинетическая энергия кусков породы переходит в потенциальную энергию упругих деформаций, которая затем трансформируется в другие виды: энергию разрушения, тепло и т.д., что в дальнейшем приводит либо к переизмельчению материала, либо к накоплению скрытых трещин. Во втором случае создаются предпосылки для дальнейшего селективного измельчения минеральных сростков [3].

В основе селективного разрушения минеральных сростков техногенных фаз и минералов (как и в случае природного сырья) лежит «возникновение на границе их раздела концентрации напряжений, превышающих прочность их связи» [2]. Существует два основных подхода к прогнозу селективности раскрытия сростков в результате дробления. Первый основан на изучении характера связей между минералами. Вывод о возможности селективного раскрытия делается на основании: морфологии границ структурных элементов [4, 5]; текстурно-структурного рисунка поверхности (по шлифам и аншлифам) [6]; размеров извлекаемых минералов и их распределение в разных классах крупности [7-9]; удельной поверхности межфазных и внутрифазных границ [3, 6, 10]; дефектов межзёренных границ [11, 12]; вида и доли матричных фаз [13, 14]; направления развития и размеров трещин [15]. Второй основан на определении тестовыми испытаниями раскрываемости в зависимости от способов воздействия, реализуемого в устройстве. Выбор оборудования для селективной дезинтеграции в итоге является трудозатратной процедурой, выполняемой только специальными исследовательскими лабораториями. Соответственно, процедура оправдана для значительных объемов перерабатываемого сырья.

Увеличение доли различного по своим характеристикам техногенного сырья, вовлекаемого в переработку, партии которого могут быть соизмеримо меньше по количеству, чем руды текущей добычи, диктует потребность разработки моделей, позволяющих экспрессно, на основании небольшого набора легко определяемых характеристик сырья, осуществить выбор дробилки, обеспечивающей более селективное раскрытие при сопоставимых энергозатратах. Или

разработки простых методов критериальной оценки возможности селективной дезинтеграции техногенного сырья в дробилках разных способов нагружения и энергоэффективности.

Под селективным разрушением можно понимать разные процессы [16]:

- разрушение материала по поверхности раздела фаз – геометрическая селективность разрушения;
- разрушение сростков с обособлением отдельных по химическому составу фаз – раскрытие зерна;
- разрушение с минимальными энергозатратами – энергетический принцип селективности разрушения.

В нашей работе под селективностью разрушения понимается разрушение сростков с обособлением отдельных по химическому составу фаз, что в последующем разделительном процессе позволит сконцентрировать эти фазы в равноименных продуктах, то есть обогатить. Фазой является часть минерального вещества техногенного сырья, обладающая определенным химическим составом, физико-механическими свойствами и структурой строения, отличающимися ее от другой части, и ограниченная от них поверхностями раздела.

Исходя из вышепринятого понятия селективности, практические процессы дезинтеграции на стадии мелкого дробления по большей части неселективны, поскольку полученные частицы состоят из смеси минеральных компонентов, присутствующих в исходной руде. Обоснованный выбор способа мелкого дробления на основании разрабатываемого критерия позволит снизить потери в процессах обогащения. Это снижение будет обеспечено более полным раскрытием зерновых агрегатов, а следовательно, и их более полным разделением по продуктам с различным химическим составом и исключением переизмельчения техногенных фаз по типу твердых растворов, содержащих в своем составе ценные компоненты в достаточном количестве.

История вопроса

В работах Хопунова [2, 16] показано, что после неоднократных попыток смоделировать селективное разрушение горных пород пришло понимание того, что классические оценки прочности (предельные напряжения при сжатии, растяжении и сдвиге), принятые в физике горных пород, ни терминологически, ни методически не приемлемы для характеристик руд, подвергаемых дезинтеграции с целью раскрытия минералов. Основными причинами этого считаются:

- невоспроизводимость структуры руды практически на всех масштабных уровнях дезинтеграции, вследствие чего разрушающая деформация каждый раз возникает на неопределенном сечении;
- невозможность использования для математического моделирования процессов раскрытия при дезинтеграции руд ни одной из теорий разрушения;
- пригодность гипотез разрушения только для идеального однородного материала.

Все это справедливо и в отношении техногенного металлургического сырья, которое по условиям своего происхождения является многофазным и структурно сложным, как это показано в наших работах [17, 18]. В этих условиях решить задачу разработки математического критерия оценки селективности раскрытия природного и техногенного минерального сырья не представляется возможным.

Набирающее обороты во всех сферах деятельности нейросетевое моделирование основано на аппроксимации закономерностей разрушения сростков. Такие закономерности могут быть найдены эмпирическим путем, и нейросеть для проведения оценки должна пройти адаптивное обучение при подаче обучающей выборки путем анализа закономерностей воздействия положительных и отрицательных факторов на селективное раскрытие [19]. При этом для каждого нового вида сырья необходима настройка нейросети, а нейросетевая модель не может рассматриваться как инструмент прогнозной оценки на стадии выбора способа дезинтеграции для селективного раскрытия минеральных фаз при разрушении сростков.

Для целей прогнозной оценки с нашей точки зрения более подходящим инструментом является балльная оценка, позволяющая по сумме баллов определить категорию сырья по раскрываемости для конкретного способа дезинтеграции.

В настоящей статье сделана попытка обоснования пунктов и критериев балльной оценки для центробежно ударного способа измельчения на основании многолетних совместных исследований минералогических, структурно-текстурных особенностей и закономерностей дезинтеграции металлургических отходов в ЗАО «УралОМЕГА» и кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Объекты и методика проведения исследований

В качестве объекта исследований выбраны железо и медьсодержащие шлаки, характерные

для групп шлаков различного генезиса. Изучены сталеплавильный шлак ОАО «ММК», медный шлак «Карабашмедь», никелевый шлак комбината «Североникель», медный шлак Балхашского медеплавильного завода, фракции некондиционных металлопродуктов, полученных при переработке шлаков АО «Уральская Сталь», лежалый клинкер вельцевания цинковых кеков Челябинского цинкового завода. Предметом исследования были закономерности разрушения шлаков в аппарате центробежно-ударного действия, зависимости раскрытия сростков от минерально-структурно-текстурных особенностей шлаков, физико-механических свойств.

Системный подход к формированию ключевых показателей, влияющих на селективность разрушения, основывался на комплексном анализе вещественных и технологических характеристик металлургических шлаков, специфических особенностей их состава, строения и свойств, полученных ранее данных об их корреляции с эффективностью разрушения техногенных сростков материала по поверхности раздела фаз при ударном способе дезинтеграции. Исходными данными для анализа были результаты собственных научных исследований, изложенных в соответствующих докладах и публикациях [17, 18, 21, 22], а также данные, приводимые в отечественных и зарубежных источниках, по вопросам прогноза селективности разрушения минерального сырья, по структурно-морфологическим и технологическим свойствам минерального сырья, поиску критериев для прогноза селективного разрушения и вопросам моделирования процесса дезинтеграции [1-16, 19, 20].

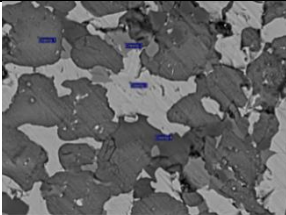
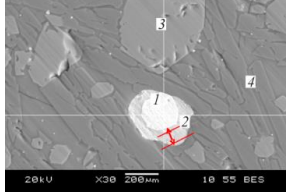
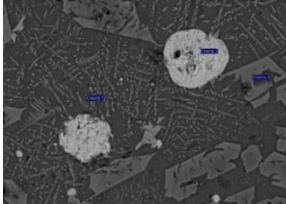


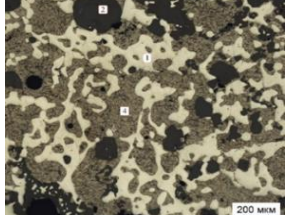
Исследования минералогических, текстурных и структурных особенностей проведено с использованием комплекса методов рентгенофазового, оптико-микроскопического и электронно-микроскопического анализов. Оптико-микроскопический анализ проведен на анализаторе Минерал-С7 с управляющей программой «SIAMS Photolab», электронномикроскопический анализ на электронном сканирующем микроскопе Leo 1420 VP. Определение микротвердости фаз клинкера вельцевания цинковых кеков проведено на микротвердомере Buehler Micromet 5103 Buehler, шлаковых фаз с использованием полуавтоматического микротвердомера ПТМ-3. Анализ индивидуальных фаз их элементного и атомарного составов проведен методом СЭМ (сканирующая электронная микроскопия) с помощью растрового электронного микроскопа

JSM 6490 LV в режиме вторичных электронов и установленным на микроскопе Leo 1420 VP рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA-300. PCMA проводили с использованием специальной приставки к сканирующему микроскопу – системы INCA Energy.

Результаты и систематизация

Фактическим материалом для обоснования критерия послужили установленные нами особенности раскрытия структурных элементов шлаков различного генезиса, частично представленные в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики структурных элементов раскрытия шлаков различного генезиса
Table 1. Characteristics of structural release elements of slags of various origins

Объект изучения	Фаза ценного компонента	Основные минералы матрицы	Основной текстурный рисунок раскрытия	Микротвердость основных фаз (Н), кг/мм ²		Соотношение микротвердостей (Нц/Нм)
				ценного компонента (ц)	минералов матрицы (м)	
Сталеплавильный шлак ОАО «ММК»	корольки металла	алит ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), кордиерит ($\text{Mg, Fe}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$), мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$		128	512 805 474	0,25 0,15 0,27
Медный шлак «Карабашмедь»	металлическая медь	фаялит с примесями $2\text{ZnO}\cdot\text{SiO}_2$, цинковая шпинель, вюстит с примесями Zn, Cr, Al		148	293 754 265	0,5 0,19 0,55
Никелевый шлак комбината «Североникель»	никеленосный пирротин	алюмосиликат с примесями Zn, Cr, Al, цинковая шпинель, оксиды Fe, Mn, Mg		155	293 778 365	0,52 0,19 0,42
Медный шлак Балхашского медеплавильного завода	магнетит, сульфиды Cu, Zn, Pb	фаялит $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, алюмосиликаты		596 142	293 326	2,03/0,48 1,82/0,43
Фракции некондиционных металлопродуктов, полученных при переработке шлаков АО «Уральская Сталь»	корольки металла, гидроксиды железа	ларнит Ca_2SiO_4 , псевдоволластонит $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$, мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$		134 109	604 517 453	0,22/0,18 0,26/0,21 0,3/0,24
Лежалый клинкер вельцевания цинковых кеков АО «ЧЦЗ»	техногенные минералы-сульфиды меди, твердые медьсодержащие растворы	мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$ (окерманит), минералы пирротин-пиритового ряда, коксик		290 181,7-580	460 145-170 41,8	0,63 1,2-3,4 4,33

Характер раскрытия рудных минералов зависит от их размеров, формы, твердости, хрупкости, наличия спайности, структуры руды, то есть характера его срастания с вмещающими минералами, разницы в их твердости, наличия вокруг зерен рудных минералов пленок или каемок продуктов их изменения, наличия в них микровключений, прожилок и т.д. [20].

Характеристики сырья, предопределяющие закономерности дезинтеграции техногенных объектов могут быть сгруппированы в три группы: структурно-технологические, физико-механические и химические.

Исследование текстурно-структурных характеристик комплексов техногенных минералов и минеральных фаз в сырье позволяет определить возможность селективного их разрушения. Например, к селективному разрушению имеет предрасположенность сырье с идиобластическим характером срастания минералов, в то время как мирмекитовое срастание минеральных комплексов показывает невозможность селективного разрушения [3]. Идиобластическая форма зерна в отличие от колломорфной также позволяет прогнозировать более селективное раскрытие. Фактор формы, близкий к единице, тоже может указывать на раскрытие минеральных зерен преимущественно по границам срастания.

К структурно-технологическим параметрам техногенных объектов с позиции их влияния на селективность дезинтеграции фаз по геометрическим границам отнесены: раскристаллизованность сырья; наличие свободных зерен ценного компонента; размеры минеральных фаз ценного компонента; форма зерен минералов ценного компонента.

При формировании критериев исходили из следующих результатов анализа сырья и рассуждений. Раскристаллизованность техногенно-гообразования, как и руды, может меняться от «раскристаллизованной» до «нераскристаллизованной» и, соответственно, структура – от полнокристаллической до стекловатой.

Для объектов исследования определена иерархия шлаков по усложнению текстурно-структурного рисунка (от простого к сложному) и влияния текстурно-структурных особенностей на селективное раскрытие. Первая группа – легко-раскрываемые, для них характерна полнокристаллическая однотонная структура с преобладанием ксеноморфных зерен, границы срастаний криволинейные, извилистые иногда зазубренные, присутствуют обособленные фазы с четкими ров-

ными границами. Единично присутствуют субидiomорфные зерна, с правильной формой срастания зерен. Вторая группа – среднераскрываемые. Они характеризуются полнокристаллической равномерной структурой, наличием эвтектических структур и присутствием ганита в виде каймы вокруг рудных выделений. Третья группа – трудноораскрываемые. Шлаки и клинкер характеризуется наличием сложных скрытокристаллических структур, присутствием структур распада твердых растворов, структур замещения элементов в кристаллической структуре минералов в виде каемок на периферии рудных зерен.

Селективное раскрытие в операции дезинтеграции более вероятно для зерен, размер которых сопоставим с размером куска, выходящего из операции. Для диапазона крупностей мелкого дробления 15-5 мм в качестве критерия, указывающего на возможность селективной дезинтеграции, принято наличие кусков ценного компонента крупностью более 10 мм. Для объектов исследования наличие крупных зёрен ценного минерала обусловлено скоростью остывания расплава, числом центров кристаллизации и свойствами его основы – дисперсионной среды.

В сырье встречаются разные варианты присутствия свободных зерен ценного компонента: от полного отсутствия до содержания в общей массе хорошо сформированных монометаллических корольков. Наличие свободных зерен ценного компонента в кусках материала крупностью менее 10 мм свидетельствует о склонности фазы ценного компонента к селективному раскрытию. А преобладание свободных зерен ценного компонента в каком-то одном узком классе крупности указывает на то, что при достижении крупности дробленого куска соответствующего размеру верхней границы узкого класса будет высок процент селективно раскрытых зерен ценного компонента.

Общим характерным свойством изученных нами шлаков и клинкеров является фактор формы отдельных фаз от 0,2 до 0,9, при этом размеры минеральных фаз ценного компонента в изучаемом техногенном сырье составляют от 20 до 500 мкм.

Фактор формы объекта определяется по формуле $F = 4\pi S/P^2$, где S – площадь объекта; P – периметр объекта. Зерен с фактором формы, близким к 1 (форма идеального круга в шлифе), мало. Фактор формы шестиугольника равен 0,9. Фактор формы равностороннего треугольника равен 0,605. Для равнобедренного треугольника,

опирающегося на диаметр, фактор формы равен 0,54. Зерно можно назвать равноосным при факторе формы от 0,6 до 0,9 [21].

Флотационное обогащение, как правило, осуществляется при крупности частицы минерала более 100 мкм. Частицы больше этого размера, присутствующие в сырье, имеющие ровные границы срастания и фактор формы более 0,6, во флотационном процессе будут селективно раскрыты с высокой долей вероятности.

На основании вышеперечисленного сформированы критерии оценки структурно-технологических параметров техногенных объектов, предопределяющие эффективность их дезинтеграции в центробежно-ударных дробилках по геометрической границе раздела фаз вмещающих пород и фаз ценного компонента: 1) наличие кусков ценного компонента крупностью более 10 мм; 2) наличие свободных зерен ценного компонента в кусках материала крупностью менее 10 мм; 3) наличие больше 50% свободных зерен ценного компонента, относящихся к одному узкому классу крупности с модулем шкалы $d_{\max}/d_{\min} = 1,2$; 4) свободные зерна ценного компонента имеют крупность более 0,1 мм; 5) зерна ценного компонента имеют четкую простую границу с вмещающими минералами; 6) свободные зерна ценного компонента имеют округлую форму.

К физико-механическим параметрам техногенных объектов отнесены: контрастность твердости контактирующих фаз; контрастность плотности фаз, содержащих ценный компонент; наличие дефектов на границе ценного компонента. Для изученных нами шлаков и клинкеров установлены границы значений данных параметров. Контрастность твердости контактирующих фаз, содержащих и не содержащих ценный компонент (Нц/Нм), от 0,15 до 2,5; контрастность плотности фаз, содержащих и не содержащих ценный компонент, от 1,2 до 3. Доказано наличие ослабленных структур на границе зерен ценного компонента [22].

К химическим факторам отнесен элементный состав контактирующих фаз, что вызвано общехимическими представлениями о том, что принадлежность катиона, находящегося на границе с фазой ценного компонента, к *s*-, *p*- или *d*-элементам определяет вероятность разрушения по границе контакта. При образовании материалов (шлаков) в высокотемпературных процессах энергетические особенности катиона будут сказываться на взаимодействии с соседними катионами, по крайней мере, по границе раздела фаз. Поскольку энергия электронного уровня растет в

ряду *s-p-d*, то в такой же последовательности, в первом приближении, должна возрастать прочность контакта на разделе фаз, что и должно отразиться в прочности на сжатие и изгиб. Можно предположить, что прочность контакта элементов *d-p*-уровней, отличающихся более высокой энергией, чем *s*-орбиталь, обеспечит контакту раздела фаз более высокую прочность при прочих равных условиях. Поэтому в качестве одного из критериев интегральной оценки химических параметров техногенных объектов, предопределяющих прочность контактов двух фаз предложена принадлежность катиона, находящегося на границе с фазой ценного компонента, к *s*-, *p*- или *d*-элементам.

На основе экспертной оценки раскристаллизованность шлака признана важнейшим фактором, который напрямую связан с качеством раскрытия микроагрегатов шлака в процессах рудоподготовки. С учетом этого факта присвоены баллы относительного влияния раскристаллизованности на разрушение объекта по геометрической границе раздела фаз вмещающих пород и фаз ценного компонента.

Основной подход к интегративному критерию, объединяющему структурные, физико-механические и химические параметры шлаков, заключался в следующем. Чем большему количеству критериев удовлетворяют параметры техногенного объекта, тем большее значение имеет интегративный критерий, и тем больше вероятность селективной дезинтеграции данного сырья в аппаратах центробежно-ударного действия и, следовательно, эффективность его переработки в целом. Поэтому для остальных критериев, кроме раскристаллизованности, приняты только две возможные балльные оценки – 1 и 0. В результате интегративный критерий может принимать значения от 0 до 15. На основании экспериментального изучения раскрытия минеральных фаз в процессе мелкого дробления на центробежно-ударном аппарате обоснованы и определены границы интервальной оценки при статистической обработке (табл. 2), характеризующие степень селективности дезинтеграции: 0-5 – неселективная дезинтеграция; 6-10 – дезинтеграция с низкой селективностью; 10-15 – селективная дезинтеграция.

На данном этапе работ выполнена балльная оценка параметров шлаков черной и цветной металлургии и клинкера цинкового производства и определены значения интегративного критерия селективности дезинтеграции данных техногенных объектов в центробежно-ударных дробилках.

Таблица 2. Результаты оценки возможности дезинтеграции сталеплавильных шлаков ММК, медеплавильных шлаков «Карабашмедь», клинкера Челябинского цинкового завода в центробежно-ударных дробилках по интегративному критерию

Table 2. Scoring of the potential disintegration of steelmaking slags of MMK, copper smelting slags of Karabashmed, clinker of the Chelyabinsk Zinc Plant in centrifugal impact crushers according to the integrative criterion

Группа критериев	Критерии оценки	Оценка в баллах	Значение оценки для техногенного сырья (относительно ценного компонента)			
			шлак сталеплавильный (железо)	шлак медеплавильный (медь)	вельц-клинкер (медь)	вельц-клинкер (железо)
Структурно-технологические	1. Раскристаллизованность шлака	полнокристаллическая – 4 неполнокристаллическая – 2 стекловатая – 0	4	2	2	2
	2. Наличие кусков ценного компонента крупностью более 10 мм	да – 1, нет – 0	1	0	0	1
	3. Наличие свободных зерен ценного компонента в кусках материала крупностью менее 10 мм	да – 1, нет – 0	1	1	0	1
	4. Больше 50% свободных зерен ценного компонента относятся к одному узкому классу крупности с модулем шкалы $d_{max}/d_{min} = 1,2$	да – 1, нет – 0	0	1	1	0
	5. Зерна ценного компонента имеют крупность более 0,1 мм	да – 1, нет – 0	1	0	0	1
	6. Зерна ценного компонента имеют четкую простую границу с вмещающими минералами	да – 1, нет – 0	1	1	0	1
	7. Свободные зерна ценного компонента имеют округлую форму (или фактор формы более 0,6)	да – 1, нет – 0	1	1	1	1
Физико-механические	1. Более высокая твердость фаз, содержащих ценный компонент	да – 1, нет – 0	1	0	0	0
	2. Повышенная плотность фаз, содержащих ценный компонент	да – 1, нет – 0	1	1	1	1
	3. Присутствие ценного компонента в металлической форме	да – 1, нет – 0	1	1	1	1
	4. Наличие ослабленных структур на границе зерен ценного компонента, имеющих твердость ниже, чем фаза ценного компонента и вмещающая фаза	да – 1, нет – 0	1	1	0	0
Химические	Принадлежность катиона, находящегося на границе с фазой ценного компонента, к <i>s</i> -, <i>p</i> - или <i>d</i> -элементам	<i>s</i> -элемент – 1; <i>p</i> - или <i>d</i> -элемент – 0	0	0	1	1
Значение интегративного критерия		Сумма баллов	$K = 12$	$K = 9$	$K = 7$	$K = 10$
Интерпретация: 0-5 – неселективная дезинтеграция, 6-10 – дезинтеграция с низкой селективностью, 10-15 – селективная дезинтеграция						

В табл. 2 в качестве примера приведен протокол определения интегративного критерия для сталеплавильного шлака ММК, медного шлака «Карабашмедь» и клинкера Челябинского цинкового завода. Для сталеплавильных шлаков ММК значение интегративного критерия $K = 12$ – дезинтеграция будет происходить селективно; для шлаков медной плавки «Карабашмедь» $K = 9$ – дезинтеграция будет происходить с низкой степенью селективности; для клинкера цинкового производства при раскрытии по ценному компоненту «медь» $K = 7$ – возможна низкоселективная дезинтеграция; при раскрытии по ценному компоненту «железу» $K = 10$ – возможна селективная дезинтеграция. Это хорошо согласуется с данными наших работ [22-24], в которых показано, что в дробленых продуктах дробилок ударного действия для сталеплавильных шлаков ММК по сравнению со шлаками медной плавки наблюдается перераспределение ценных компонентов в более мелкие «раскрытые» классы крупности, увеличивается степень раскрытия сростков металла и шлаковой составляющей, возрастает содержание свободных рудных зерен и зерен металлов.

Заключение

1. Разработка простых методов критериальной оценки возможности селективной дезинтеграции, то есть разрушения сростков с обособлением отдельных по химическому составу фаз техногенного сырья в дробилках разных способов нагружения и энергоэффективности, является актуальной задачей в связи с вовлечением в переработку относительно небольших в сравнении с природным сырьем партий горно-металлургических отходов, значительно отличающихся по структурно-технологическим, физико-механическим и химическим свойствам.

2. Для целей быстрой прогнозной оценки, позволяющей сделать обоснованный выбор способа мелкого дробления, обеспечивающего наибольшую селективность дезинтеграции, на основании интегративного критерия, наиболее подходящим инструментом является балльная оценка, в результате которой по сумме баллов можно определить категорию сырья по раскрываемости для конкретного способа дезинтеграции.

3. На основании теоретического анализа и результатов многолетних исследований минералогических, структурно-текстурных особенностей и закономерностей дезинтеграции металлургических отходов предложена система критериев балльной оценки, состав ключевых показателей структурно-технологических параметров техногенных объектов, предопределяющих эффективность их дезинтеграции в центробежно-

ударных дробилках, присвоены баллы относительного влияния, предложена шкала оценки и оценочные интервалы для интерпретации значения интегративного критерия.

4. Проведена оценка параметров шлаков черной и цветной металлургии и клинкера цинкового производства, определены значения интегративного критерия селективности дезинтеграции. Интегративный критерий может принимать значения от 0 до 15.

5. По проведенной балльной оценке по разработанному протоколу спрогнозировано, что дробление в аппаратах центробежно-ударного действия сталеплавильных шлаков ММК будет происходить селективно, поскольку значение интегративного критерия получено 12 баллов; для шлаков медной плавки завода «Карабашмедь» – дезинтеграция будет происходить с низкой степенью селективности ($K=9$); а для клинкера цинкового производства при раскрытии по ценному компоненту «железу» – возможна селективная дезинтеграция ($K=10$), в то время как по ценному компоненту «медь» раскрытие будет характеризоваться низкой степенью селективности при значении интегративного критерия только 7 баллов. Предварительные экспериментальные результаты подтверждают правильность выбора интерпретационных интервалов балльной оценки.

Список источников

1. Марченко Н.В., Ковтун О.Н. *Металлургическое сырье*. Красноярск, 2017. 221 с.
2. Хопунов Э.А. Роль факторов нагружения в формировании селективного разрушения руд // *Обогащение руд*. 2011. №2. С. 24.
3. Исследование процессов селективной дезинтеграции медно-никелевых руд Заполярного месторождения / Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Бабенко Т.А. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. №12. С. 73-87.
4. Смольяков А.Р. Границы срастания минералов в руде // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007. №11. С. 346-353.
5. Пауль Р. *Рудные минералы и их срастания* / пер. с нем. А.Д. Генкина и Т.Н. Шадлун; под ред. А.Г. Бетехтина. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 1432 с.
6. Пирогов Б.И. *Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов* // *Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ*. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 6.

7. Смольяков А.Р. Раскрытие минералов при измельчении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. №8. С. 224-234.
8. Газалесева Г.И. и др. Критерии выбора оптимальных схем рудоподготовки // Обогащение руд. 2015. №6. С. 3-8.
9. Морозов В.В., Демьяненко А.П., Николаева Т.С. Исследование стадийного обогащения смешанных медно-молибденовых руд в условиях последовательного раскрытия минеральных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №9. С. 128-135.
10. Васильев П.В. Разработка метода прогнозирования и контроля степени раскрытия магнетита на основе стереологического анализа при обогащении железистых кварцитов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИ (МГТУ), 1989. 194 с.
11. Головин Ю.И. и др. Размерные эффекты упругих и прочностных свойств отдельных фаз и межфазных границ поликристаллических материалов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т.80. №5. С. 573-573.
12. Влияние границ срастания минералов железистых кварцитов на рудоподготовку / Гзогян Т.Н., Головин Ю.И., Тюрин А.И., Гзогян С.Р. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. №3. С. 154-162.
13. Адаптация технологий сухой переработки горно-промышленных отходов: метод. указания / Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Чекушина Т.В., Колодежная Е.В., Стефунько М.С., Воробьев К.А. Екатеринбург, 2018. 50 с.
14. Никандров С. Н. Согласованная система классификаций основных групп породобразующих минералов (амфиболов, пироксенов, слюд) как матричных моделей. Геология и минералогия Ильменского комплекса: ситуация и проблемы. Мисс, 2006. С. 131-160.
15. Халкечев Р.К., Каширский А.С., Халкечев К.В. Управление технологией разрушения материалов на основе математического моделирования устойчивого и неустойчивого развития трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №11. С. 359-366.
16. Хопунов Э.А. Проблемы моделирования дезинтеграции руд // Современные научные исследования и инновации. 2016. №1. С. 102-112.
17. Обоснование параметров шлаков черной и цветной металлургии для селективной центробежно-ударной дезинтеграции / Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С. // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2022): материалы междунар. конф. М., 2022. С. 365-368.
18. Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т.13. №2(48). С. 224-237.
19. Зарубин М.Ю. Нейронные сети в системах управления процессами измельчения и обогащения руд черных металлов // Современные тенденции технических наук: материалы III Междунар. науч. конф., г. Казань, октябрь 2014 г. Казань: Бук, 2014. С. 33-40.
20. Коннова Н.И. Рудная и технологическая минералогия: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 176 с. ISBN 978-5-7638-4086-5
21. Количественный анализ изображений (structure.by). <http://structure.by/index.php/metallografiya/31-kolichestvennyj-analiz-izobrazhenij>
22. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г., Колодежная Е.В., Горлова О.Е. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. №5. С. 180-190.
23. Технологии сухого обогащения природного и техногенного сырья с использованием центробежно-ударной техники / Артамонов А.В., Гаркави М.С., Горлова О.Е., Колодежная Е.В., Шадрунова И.В. // 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, 2019. С. 140-143.
24. Шадрунова И.В., Горлова О.Е., Колодежная Е.В. Технология получения высококачественных концентратов из отвальных металлургических шлаков // Обогащение руд. 2019. №4. С. 54-60.

References

1. Marchenko N.V., Kovtun O.N. *Metallurgicheskoe syrie* [Metallurgical raw materials]. Krasnoyarsk, 2017, 221 p. (In Russ.)
2. Khopunov E.A. A role of load factors in forming the selective crushing of ores. *Obogashchenie rud* [Ore beneficiation]. 2011;(2):24. (In Russ.)
3. Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Kuznetsov V.V., Babenko T.A. Study on selective disintegration processes of copper-nickel ores from the Zapolyarny deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2021;(12):73-87. (In Russ.)
4. Smolyakov A.R. Interfaces of the mineral intergrowth in ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2007;(11):346-353. (In Russ.)
5. Ramdohr P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowth]. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1962, 1432 p. (In Russ.)

6. Pirogov B.I. Methodology of process mineralogy and nature of process properties of minerals. *Rezultaty fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy po razrabotke metodik tekhnologicheskoy otsenki rud metallov i promyshlennykh mineralov na rannikh stadiyakh geologorazvedochnykh rabot* [Results of basic and applied studies on developing procedures for a technological assessment of metal ores and industrial minerals at early stages of exploration activities]. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2006, p. 6. (In Russ.)
7. Smolyakov A.R. Release of minerals during ore crushing. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2007;(8):224-234. (In Russ.)
8. Gazaleeva G.I. et al. Criteria of selecting optimal ore preparation process flow charts. *Obogashchenie rud* [Ore beneficiation]. 2015;(6):3-8. (In Russ.)
9. Morozov V.V., Demyanenko A.P., Nikolaeva T.S. Study on the stage beneficiation of mixed copper-molybdenum ores during stage-by-stage release of mineral complexes. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2010;(9):128-135. (In Russ.)
10. Vasiliev P.V. *Razrabotka metoda prognozirovaniya i kontrolya stepeni raskrytiya magnetita na osnove stereologicheskogo analiza pri obogashchenii zhelezistykh kvartsitov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the method for predicting and monitoring of the release of magnetite based on a stereological analysis during beneficiation of ferruginous quartzites: PhD thesis]. Moscow: Moscow Institute of Mining, 1989. 194 p.
11. Golovin Yu.I. et al. Size effects of elastic and strength properties of separate phases and interface boundaries of polycrystalline materials. *Izvestiya Rossiiskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2016;80(5):573-577. (In Russ.)
12. Gzogyan T.N., Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Gzogyan S.R. Influence of the interface of intergrowth of ferruginous quartzite minerals on ore preparation. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Sciences]. 2017;(3):154-162. (In Russ.)
13. Shadrunkova I.V., Ozhogina E.G., Orekhova N.N., Gorlova O.E., Chekushina T.V., Kolodezhnaya E.V., Stefunko M.S., Vorobev K.A. *Adaptatsiya tekhnologii sukhoy pererabotki gornopromyshlennykh otkhodov: metod. ukazaniya* [Adapting technologies of dry processing of mining wastes: guidelines]. Yekaterinburg, 2018, 50 p. (In Russ.)
14. Nikandrov S.N. An approved system of classifications of main groups of rock-forming minerals (amphiboles, pyroxenes, micas) as matrix models. *Geologiya i mineralogiya Ilmenogorskogo kompleksa: situatsiya i problemy* [Geology and mineralogy of the Ilmenogorsk complex: situation and difficulties]. Miss, 2006, pp. 131-160. (In Russ.)
15. Khalkechev R.K., Kashirskiy A.S., Khalkechev K.V. Controlling the technology of crushing materials based on a mathematical simulation of sustainable and unsustainable cracking. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2014;(11):359-366. (In Russ.)
16. Khopunov E.A. Difficulties of simulating the ore disintegration. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern Research and Innovation]. 2016;(1):102-112. (In Russ.)
17. Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolkova M.S. Providing a rationale for parameters of ferrous and non-ferrous metallurgical slags for the selective centrifugal impact disintegration. *Sovremennye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineralnogo syrya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya (Plaksinskie chteniya – 2022): materialy mezhdunar. konf.* [Current difficulties of integrated and advanced processing of mineral raw materials of natural and technology-related origins (The 2022 Plaksin Readings): Proceedings of the International Conference]. Moscow, 2022, pp. 365-368. (In Russ.)
18. Chanturiya V.A., Shadrunkova I.V., Gorlova O.E. Innovative processes of advance and environmentally safe processing of technology-related raw materials during new economic challenges. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2021;13(2(48)):224-237. (In Russ.)
19. Zarubin M.Yu. Neural networks in systems for controlling ferrous metal ore crushing and beneficiation processes. *Sovremennye tendentsii tekhnicheskikh nauk: materialy III Mezhdunar. nauch. konf.* [Current trends in engineering sciences: Proceedings of the 3rd International Research Conference]. Kazan: Book, 2014, pp. 33-40. (In Russ.)
20. Konnova N.I. *Rudnaya i tekhnologicheskaya mineralogiya: ucheb. posobie* [Ore and process mineralogy: study guide]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019, 176 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7638-4086-5
21. A quantitative analysis of images. Available at: <http://structure.by/index.php/metallografiya/31-kolichestvennyj-analiz-izobrazhenij>
22. Shadrunkova I.V., Ozhogina E.G., Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E. Assessing selectivity of the disintegration of metallurgical slags. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Sciences]. 2013;(5): 180-190. (In Russ.)
23. Artamonov A.V., Garkavi M.S., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V., Shadrunkova I.V. Dry beneficiation technologies for natural and technology-related raw materials using centrifugal impact machines. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogennogo syrya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr»* [Current trends in the field of theory and practice of mining and processing of mineral and technology-related raw materi-

als: Proceedings of the International Research and Practical Conference devoted to the 90th anniversary of the Uralmekhanobr Institute]. Yekaterinburg, 2019, pp. 140-143. (In Russ.)

24. Shadrunkova I.V., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V. Technology of producing high-quality concentrates from dump metallurgical slags. *Obogashchenie rud* [Ore beneficiation]. 2019;(4):54-60. (In Russ.)

Поступила 03.08.2023; принята к публикации 16.08.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 03/08/2023; revised 16/08/2023; published 25/09/2023

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: n_orehova@mail.ru.

Колодежная Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика В.Н. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. Email: kev@uralomega.ru.

Колкова Мария Сергеевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: kolkova_ms@mail.ru.

Глаголева Ирина Викторовна – старший преподаватель кафедры прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: iva_290983@mail.ru.

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Mine Survey and Beneficiation of Minerals, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Mine Survey and Beneficiation of Minerals, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: n_orehova@mail.ru.

Ekaterina V. Kolodezhnaya – PhD (Eng.), Lead Researcher of the Mining Ecology Department, Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: kev@uralomega.ru.

Mariya S. Kolkova – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Lecturer of the Department of Geology, Mine Survey and Beneficiation of Minerals, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: kolkova_ms@mail.ru.

Irina V. Glagoleva – Senior Lecturer of the Department of Applied Mathematics and Information Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: iva_290983@mail.ru.