ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):63-77
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.7 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_63

МЕТОДИЧЕСКОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МИНЕРАЛОВ

Р.М. Никитин[1], А.С. Опалев[1], В.В. Бирюков[2], А.С. Китаева[1], А.А. Компанченко[3]

[1] Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e-mail: remnik@yandex.ru
[2] Филиал Мурманского арктического государственного университета в г. Апатиты, Апатиты, Россия
[3] Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Аннотация: Представлен этап исследований, направленных на разработку имитационной модели дезинтеграции минералов. Работы выполнялись на пробах железистых кварцитов, перерабатываемых на Стойленском ГОКе. В основе работы лежит алгоритм имитационного моделирования дезинтеграции минералов в процессах сокращения крупности минеральных частиц, позволяющий учитывать зависимость результата дезинтеграции от затраченной на нее энергии путем оценки влияния таких параметров как мощность оборудования, индекс работы Бонда, производительность. На текущем этапе рассмотрен подход к обеспечению имитационной модели дезинтеграции минералов базовой информацией, включающей дискретное распределение выходов узких минеральных фракций в питании сокращения крупности минеральных частиц, заданное в координатах классов крупности и классов содержания в них полезного минерала. Подход потребовал разработки прототипов оборудования для фракционирования минеральных частиц отдельных классов крупности, что позволило исключить применение в опытах тяжелых жидкостей и уменьшить время опытов. Для обработки результатов опытов по фракционированию предложен метод выявления непрерывных функций распределения выходов классов содержания с оценкой коэффициента детерминации в точках соответствующих дискретных распределений, что позволило для всего диапазона крупности установить единые границы классов содержания и представить вещественный состав питания сокращения крупности в виде прямоугольной матрицы выходов узких минеральных фракций.

Ключевые слова: сокращение крупности минеральных частиц, дезинтеграция минералов, имитационное моделирование, фракционирование минералов, узкая минеральная фракция, класс крупности минеральных частиц, класс содержания полезного минерала, распределение полезного минерала, вещественный состав рудной массы.

Для цитирования: *Никитин Р. М., Опалев А. С., Бирюков В. В., Китаева А. С., Компанченко А. А.* Методическое и технологическое обеспечение имитационной модели дезинтеграции минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 63–77. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_63.

Methodological and technological support for a simulation model of mineral disintegration

R.M. Nikitin[1], A.S. Opalev[1], V.V. Birukov[2], A.S. Kitaeva[1], A.A. Kompanchenko[3]

[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e-mail: remnik@yandex.ru
[2] Apatity branch of Murmansk Arctic State University, Apatity, Russia
[3] Geological Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

© Р.М. Никитин, А.С. Опалев, В.В. Бирюков, А.С. Китаева, А.А. Компанченко. 2022.

Abstract: The study presents a research stage aimed at developing a simulation model of mineral disintegration. The work was performed on samples of ferruginous quartzite processed at Stoilensky GOK. The work is based on the algorithm of simulation modeling of minerals disintegration in reduction of mineral particle size, which allows considering dependence of disintegration result on the energy spent by estimating influence of such parameters as equipment capacity, Bond work index, and productivity. At the current stage the authors have analysed an approach to provide the simulation model of mineral disintegration with basic information, including discrete distribution of outputs of narrow mineral fractions in the feeding of mineral particle size reduction, specified in coordinates of size grades and classes of useful mineral content. The approach has required the development of prototypes of equipment for fractionation of mineral particles of individual size grades, which excluded the use of heavy liquids in the experiments and reduced the test time. To process the results of fractionation experiments, the authors have proposed a method of identifying continuous functions of the distribution of yields of content classes with estimation of the determination coefficient at the points of the corresponding discrete distributions. This has allowed establishing uniform boundaries of content classes for the whole range of particle sizes and presenting the material composition of feeding of particle size reduction as a rectangular matrix of yields of narrow mineral fractions.

Key words: mineral particle size reduction, mineral disintegration, simulation modeling, mineral fractionation, narrow mineral fraction, mineral particle size grade, useful mineral content class, useful mineral distribution, material composition of ore mass

For citation: Nikitin R. M., Opalev A. S., Birukov V. V., Kitaeva A. S., Kompanchenko A. A. Methodological and technological support for a simulation model of mineral disintegration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):63-77. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_63.

Введение

Эффективность разделительных процессов обогащения полезных ископаемых определяется контрастностью свойств минералов, которые должны быть специальным образом подготовлены в операциях дробления и измельчения. Необходимая для эффективного обогащения крупность измельчения определяется как выбранным способом переработки, так и текстурно-структурными особенностями руды. По различным оценкам до 30—40% потерь полезных компонентов со сростками обусловлено взаимным прорастанием минералов и наличием тонкой вкрапленности. При этом технологические схемы и технологии обогащения полезных ископаемых должны строиться исходя из того, что процесс рудоподготовки является самым энергозатратным и в значительной степени определяет себестоимость продукции горнорудного предприятия.

Полнота раскрытия минералов в процессах рудоподготовки, — дезинтеграции (mineral liberation), для получения концентратов их полезных компонентов связана с генезисом и морфологией руд. Однако даже в границах одного месторождения руд, породы, вмещающие одни и те же минералы, отличаются по их содержанию и текстуре. Поэтому проблема оптимального разделения минералов в рамках каждого конкретного обогатительного комбината в значительной мере состоит в поиске форм адаптивных статистических зависимостей, строящихся на постоянно обнов-

ляемых и уточняемых эмпирических данных о текущем составе подаваемых в переработку руд.

Актуальность этой проблемы обостряется с развитием объективно проявляющихся тенденций вовлечения в переработку обедненных руд и обострения конкуренции на мировых рынках минеральных ресурсов. Уже во второй половине прошлого столетия стала очевидной необходимость разработки алгоритмов и методик расчета и проектирования технологических схем обогащения полезных ископаемых, основанных на результатах лабораторных исследований с привлечением методов математического моделирования. Этим был вызван рост количества научных исследований в данном направлении.

Исследование возможностей математического моделирования обогатительных процессов широко и разносторонне представлено в зарубежной научной литературе [1—7]. Примерами использования приемов и методов математического моделирования в теории и практике обогащения полезных ископаемых сегодня также являются работы кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Баумана [8, 10], кафедры обогащения полезных ископаемых СПбГУ [11, 13], НПК «Механобртехника» [14, 15], кафедры обогащения полезных ископаемых НИТУ «МИСиС» [16, 17]. Интерес к исследованиям в области обогащения полезных ископаемых с применением математического моделирования находит поддержку в научных изданиях [18—20].

Имитационная модель дезинтеграции минералов призвана выполнять функцию прогноза преобразования вещественного состава рудной массы в операциях сокращения крупности, что позволяет оптимизировать состав и компоновку последующих сепарационных переделов и снизить энергоемкость обогатительного производства реализацией стадиального выделения продуктов обогащения [21]. Однако, как любая модель, она оперирует исходными данными, характеризующими особенности процесса и включающими данные о начальном состоянии объекта моделирования и его эволюции. Причем эти данные должны быть выражены на языке модели, т.е. таким образом, чтобы модель смогла их однозначно воспринимать, интерпретировать и обрабатывать. Поэтому результат моделирования зависит не только от правильности алгоритма и точности используемых в модели зависимостей, но и от методики обеспечения модели максимально точными исходными данными. В случае имитационной модели дезинтеграции минералов, это, прежде всего, данные о вещественном составе питания сокращения крупности.

Методы, использованные в работе

Формирование узких фракций минеральных частиц в классах крупности питания сокращения крупности

Вещественный состав питания сокращения крупности применительно к обеспечению имитационной модели дезинтеграции минералов можно представить как набор узких фракций минеральных частиц, отличающихся принадлежностью к разным классам крупности и к разным классам содержания полезного минерала [22, 23]. Представительство каждой такой узкой фракции характеризуется ее выходом и может быть показано в форме, приведенной в табл. 1. Для этого введем обозначения.

Пусть по результатам гранулометрического анализа выделено классов крупности питания сокращения крупности. Для обозначения номера каждого класса будем использовать индекс i, $1 \leqslant i \leqslant N$. Самые малые, т.н. тонкие, частицы име-

Таблица 1

Форма представления выходов узких фракций минеральных частиц в питании сокращения крупности

Presentation of the yields of narrow fractions of mineral particles in the size reduction feed

				Классы крупности			Выхода классов содержания	Полезного минерала в классах содержания ε_m
				1	i	N		
				$-d_1 + 0$	$-d_i + d_{i-1}$	$-d_N + d_{N-1}$		
				d_1^s	d_i^s	d_N^s		
Классы содержания	1	$1 \div \beta_2$	1	γ_{11}	γ_{1i}	γ_{1N}	$\sum_{i=1}^{N}\gamma_{1i}$	$\sum_{i=1}^{N}\beta_1^g\gamma_{1i}$
	m	$\beta_m \div \beta_{m+1}$	β_m^g	γ_{m1}	γ_{mi}	γ_{mN}	$\sum_{i=1}^{N}\gamma_{mi}$	$\sum_{i=1}^{N}\beta_m^g\gamma_{mi}$
	M	$\beta_M \div 0$	0	γ_{M1}	γ_{Mi}	γ_{MN}	$\sum_{i=1}^{N}\gamma_{Mi}$	$\sum_{i=1}^{N}\beta_M^g\gamma_{Mi}$
Выхода классов крупности				$\sum_{m=1}^{M}\gamma_{m1}$	$\sum_{m=1}^{M}\gamma_{mi}$	$\sum_{m=1}^{M}\gamma_{mN}$	$\sum_{i=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\gamma_{mi} = 1$	
Полезного минерала в классах крупности ε_i				$\sum_{m=1}^{M}\beta_m^g\gamma_{m1}$	$\sum_{m=1}^{M}\beta_m^g\gamma_{mi}$	$\sum_{m=1}^{M}\beta_m^g\gamma_{mN}$		$\sum_{i=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\beta_m^g\gamma_{mi} = \beta_0$

ют размеры в диапазоне $0 < d_1^s \leqslant d_1$, далее: $d_1 < d_2^s \leqslant d_2$, и так до $d_{N-1} < d_N^s \leqslant d_N$. Здесь d_i — величины границ классов крупности; d_i^s — конечные размеры частиц в классах крупности (математическое ожидание). Также, m, $1 \leqslant m \leqslant M$ — индекс класса содержания полезного минерала, M — количество классов содержания полезного минерала, β_m — величины границ классов содержания полезного минерала (доли единицы), β_m^g — конечные значения содержания полезного минерала в классах содержания (также математическое ожидание), γ_{mi} — выход узкой фракции (доли единицы).

Отметим, что в ходе дезинтеграции минералов минеральные частицы разрушаются и их масса перераспределяется в узкие фракции, принадлежащие к классам крупности частиц меньших размеров и к более широкому диапазону классов содержания полезного минерала. При этом и в питании, и, тем более, по завершении сокращения крупности в массе частиц присутствуют такие, в которых доля содержания полезного компонента равна единице, и такие, в которых она равна нулю. Поэтому при описании вещественного состава минеральных частиц, подвергающихся дезинтеграции, следует учитывать, что $\beta_1^g = 1$, а $\beta_M^g = 0$. Более детально с этим ограничением можно познакомится в известной работе [24].

Дезинтеграцию минералов следует рассматривать как условие задачи о готовности минерального сырья к селективным операциям. Также важно, что при дезинтеграции полное количество входящих в питание сокращения крупности минералов не изменяется, — это подготовительная операция, при которой сепарация не производится, а полное содержание полезного минерала β_0 в массе минеральных частиц по мере дезинтеграции не изменятся одновременно с тем, как перераспределение полезного минерала по классам крупности и классам содержания протекает непрерывно.

Растут значения выходов фракций в классах крупности тонких частиц, внутри этих классов по мере уменьшения размеров частиц наблюдается увеличение доли частиц богатых полезным минералом и частиц обедненных им.

Очевидно, что

$$\sum_{m=1}^{M}\gamma_{mi}=\gamma_i,\ \sum_{i=1}^{N}\gamma_{mi}=\gamma_m .$$

Это позволяет в соответствии с концепцией имитационного моделирования дезинтеграции минералов, обсуждаемой в [16], для каждого из *m* классов содержания полезного минерала получить функцию плотности распределения выходов классов крупности минеральных частиц после сокращения их крупности γ_{mi}^{sim}.

Для описания алгоритма формирования узких фракций минеральных частиц в классах крупности питания сокращения крупности введем понятие отбора из навески класса крупности. Форма, показанная в табл. 1, предполагает, что материал питания сокращения крупности распределен по классам содержания, имеющим заданные одинаковые для каждого класса крупности границы. Частицы материала, принадлежащие заданному классу крупности и заданному классу содержания, таким образом, формируют узкую фракцию, которая характеризуется массовой долей в общей массе материала питания сокращения крупности. В процессе сокращения крупности, в результате дезинтеграции минеральных частиц эта доля изменяется при том, что границы, идентифицирующие фракцию, ни по крупности, ни по содержанию полезного минерала меняться не должны. В отличие от узкой фракции, отбор имеет заданные границы соответственного класса крупности, что обеспечивается используемым набором сит, но выделение классов содержания с заданными границами и в одном классе крупности, и, тем более, во всем наборе классов крупности, при использовании рассматриваемых ниже сепараторов не обеспечивается. Поэтому здесь фракционирование есть результат обработки данных, полученных в опытах по разделению навесок классов крупности питания сокращения крупности на отборы методами статистического анализа с использованием ряда вероятностных распределений.

Обозначим количество отборов из навески класса крупности *K*, а для обозначения номера отбора используем индекс *j*, $1 \leqslant j \leqslant K$. Каждый отбор из навески класса крупности может быть представлен выходом (массовой долей) γ_{ji},

$$\sum_{j=1}^{K}\gamma_{ji}=1 .$$

С учетом результатов химического анализа распределение полезного минерала по содержанию β_{ji} в отборах можно представить в форме, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Форма представления распределения полезного минерала в отборах навески класса крупности питания сокращения крупности
Presentation of distribution of useful mineral in the selections of the test portion of feed size class of reduction in size

Содержание полезного минерала в отборах	0	β_{ij}, $j = 1, 2, \ldots, K$	1
Значение кумулятивной функции выходов отборов по результату опыта	0	$F_{ji}^{\gamma}=F_{j-1i}^{\gamma}+\gamma_{ji}$	1
Значение функции распределения выходов отборов	0	$\overline{F_{ji}^{\gamma}}\left(\beta_{ij}\right)$	1

Таблица 3

Форма представления результата фракционирования класса крупности питания сокращения крупности
Presentation of the result of fractionation of the size class of feed size reduction

Содержание полезного минерала в классах содержания	0	β_m^g, $m = 1, 2, \ldots, M$	1
Значение функции распределения выходов отборов	0	$\overline{F_{mi}^{\gamma}}\left(\beta_m^g\right)$	1
Выход узкой фракции	$\gamma_{mi} = \left(\overline{F_{mi}^{\gamma}} - \overline{F_{m-1i}^{\gamma}}\right) \cdot \gamma_i$		

Точность определения функции распределения выходов отборов устанавливается по коэффициенту детерминации R^2 в точках построения кумулятивной функции выходов отборов по результату опыта.

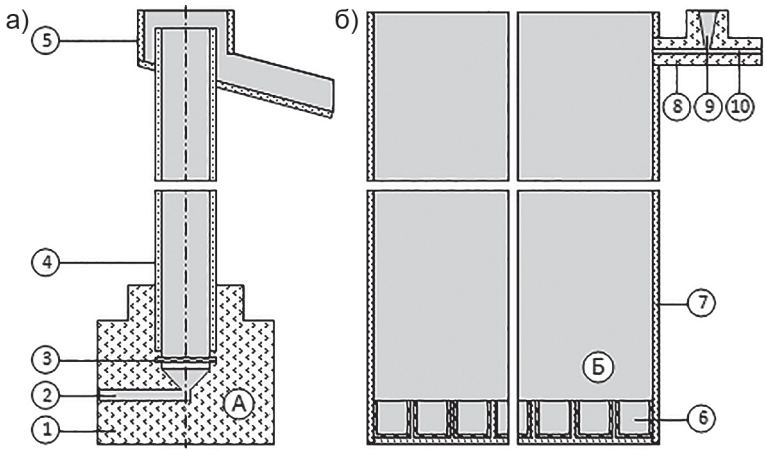
Определение функции распределения выходов отборов делает возможным фракционирование исследуемого класса крупности с тем условием, что выбранные для этого β_m — величины границ классов содержания полезного минерала ни по значению, ни по количеству не будут отличаться при фракционировании других классов крупности питания сокращения крупности. Тогда результат фракционирования класса крупности можно представить в форме, приведенной в табл. 3.

Прототипы гидравлического и пневматического сепараторов

Проба железистых кварцитов, используемая в лабораторных исследованиях, предварительно прошла операцию дробления в лабораторной щековой дробилке до 100% класса –3,15 мм. Ситовой анализ выполнялся согласно штатным методикам.

Задача выделения в каждом классе крупности классов содержания полезного минерала с заданными границами ставилась и решалась исходя из того, что разрабатываемая методика должна обеспечить быстродействие, воспроизводимость и простоту исполнения лабораторных практик, а также отказ от использования потенциально опасных, ядовитых, требующих специальных условий работы тяжелых жидкостей. Для этого были разработаны конструкции действующих прототипов гидравлического и пневматического сепараторов. Гидравлический сепаратор использовался для разделения более тонких классов крупности (не более 0,315 мм), пневматический сепаратор использовался для разделения более крупных классов. В основу принципа действия сепараторов была положена зависимость массы частиц железистых кварцитов от содержания в них железа. Принципиальные схемы прототипов сепараторов показаны на рис. 1.

Принцип действия гидравлического сепаратора состоит в следующем. Колонка *4*, представляющая собой трубку из оргстекла круглого сечения, через канал *2* заполняется водой. Подача воды прекращается. Через верхнее отверстие колонки в нее засыпается навеска класса крупности. Материал навески распределяется на металлической сетке. При отработанных заранее режимах возобновляется подача воды. Первично расход воды задается таким образом, чтобы навеска сформировала псевдоожиженный слой. Далее расход воды увеличивается, что приводит к выносу из колонки в контейнер сбора и слива отбора *5* наиболее легких, т.е. обедненных железом, частиц класса крупности. Расход воды поддерживается постоянным до тех пор, пока не прекратится вынос частиц. Частицы



1 – опора; 2 – канал подачи воды; 3 – металлическая сетка; 4 – колонка;
5 – контейнер сбора и слива отбора; 6 – контейнеры сбора рассева навески класса крупности;
7 – корпус; 8 – форсунка; 9 – канал подачи навески класса крупности; 10 – канал подачи воздуха

Рис. 1. Принципиальные схемы прототипов гидравлического (а) и пневматического (б) сепараторов:
Fig. 1. Schematic diagrams of prototypes of hydraulic (a) and pneumatic (b) separators

фильтруются тонким ситом и формируют первый отбор навески класса крупности по содержанию. Затем расход воды увеличивают и повторяют описанные действия. Количество отборов определяет точность выявления непрерывной кумулятивной функции распределения выходов классов содержания в классе крупности.

Для целей исследований в работе из каждой навески класса крупности выделяли семь отборов. Последний отбор выделялся как остаток после шестого отбора.

Принцип действия пневматического сепаратора состоит в следующем. Сепаратор по форме представляет собой полый прямоугольный параллелепипед из оргстекла *7* с размерами 1000×420×54. В донной части сепаратора расположены разгружаемые контейнеры сбора рассева навески класса крупности *6*. В форсунку *8* через канал *10* подается воздух магистрали лабораторного компрессора, через канал подачи навески класса крупности *9* с помощью лабораторного вибрационного дозатора подается материал навески. Предварительно для каждого класса крупности подбирается режим расхода (давление в магистрали) воздуха таким образом, чтобы рассев навески класса крупности охватывал максимальное количество контейнеров по длине сепаратора. Так же, как и в случае гидравлического сепаратора, из каждой навески класса крупности выделяли семь отборов. Однако, в пневматическом сепараторе это достигалось не изменением режима расхода воздуха, а сбором материала в каждый отбор из соседних контейнеров.

Химический и минералогический анализ проб

Полученные в лабораторных исследованиях отборы навесок классов крупности взвешивались и передавались на химический анализ для определения в них содержания железа и, соответственно, полезного минерала. В дополнение к химическому анализу, в ряде случаев проводился минералогический анализ отборов. Для минералогического анализа тонких и средних (–0,63 мм) классов изготавливались аншлифы на основе эпоксидной смолы. Изучение проводи-

лось в отраженном поляризованном свете на поляризационном микроскопе Zeiss Axioplan II. Более крупные классы (+0,63 мм) изучались с помощью стереомикроскопа Zeiss Stemi 1000. Агрегатное состояние минералов оценивалось оптическим методом подсчета около тысячи зерен минералов и агрегатов в каждом препарате, для обеспечения погрешности менее 1%.

Результаты

Характеристики проб отборов по результатам минералогического анализа

В продуктах наблюдались раскрытые зерна магнетита, кварца, силикатов, редкие и единичные зерна гематита, сульфидов и гидроокислов железа, а также различные сростки минералов (рис. 2). Наиболее часто встречаются различные сростки магнетита. Так, например, классы –0,071+0,04 мм (в большей степени) и –0,315+0,2 мм характеризуются присутствием в основном двухкомпонентных сростков двух типов: магнетита с кварцем и магнетита с силикатами.

В сростках магнетита с кварцем отмечается преобладание кварца (более 50%), магнетит чаще всего отмечен в виде тонкой вкрапленности (зерна менее 20 мкм).

Второй тип сростков отличается преобладанием магнетита в виде относи-

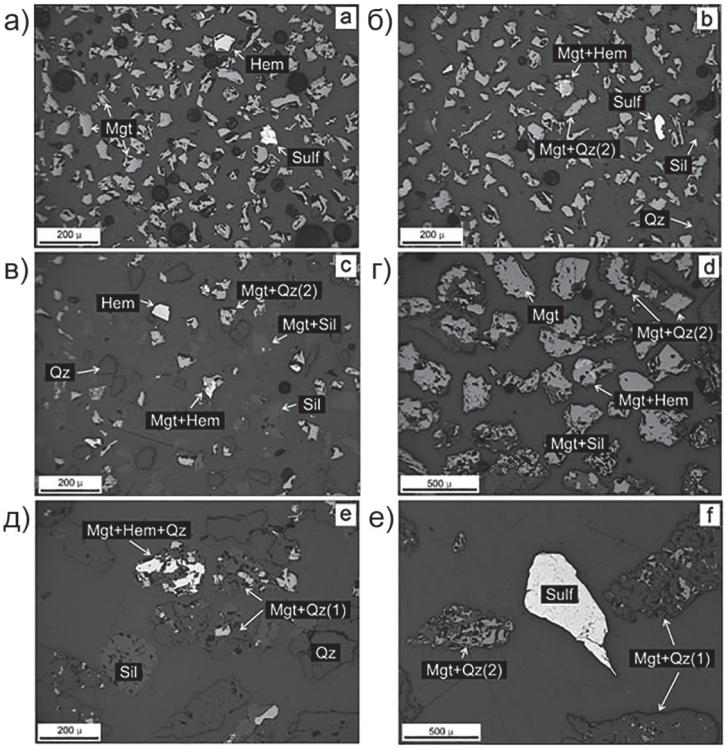


Рис. 2. Материалы исследуемых образцов отборов: класс –0,071+0,04 мм (а–в); класс –1,0+0,63 мм (г); класс –1,6+1,0 мм (д–е); раскрытые зерна: магнетита (Mgt), гематита (Hem), сульфидов (Sulf), кварца (Qz), силикатов (Sil) и их сростки (через «+»). Черные трещины и круги — дефекты при изготовлении препаратов

Fig. 2. Materials of the studied samples: class –0.071+0.04 mm (a–v); class –1.0+0.63 mm (g); class –1.6+1.0 mm (d–e); liberated grains of: magnetite (Mgt), hematite (Hem), sulfides (Sulf), quartz (Qz), silicates (Sil) and their intergrowths (through «+»). Black cracks and circles — defects in the production of preparations

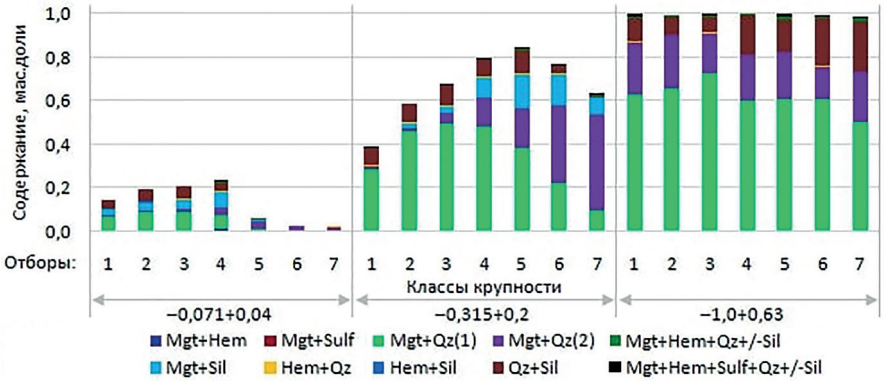


Рис. 3. Распределение сростков в классах крупности
Fig. 3. Distribution of intergrowths in size class

тельно крупных (более 50 мкм) частично раскрытых зерен.

Сростки в более крупных классах, например, –1,0+0,63 мм и –1,6+1,0 мм характеризуются в основном многокомпонентным составом. Главный рудный минерал сростков по-прежнему магнетит, который срастается с кварцем и силикатами, иногда присутствуют гематит и сульфиды. Магнетит также присутствует в виде крупных частично раскрытых зерен или тонкой вкрапленности в кварце и силикатах.

Основная масса материала представлена различными сростками (рис. 3), среди которых доминируют сростки магнетитов с кварцем (двух типов), силикатами, и кварца с силикатами. Заметно, что от отбора 1 к отбору 7 в навеске класса крупности –0,315+0,2 мм наблюдается постепенный переход от сростков магнетита с кварцем первого типа ко второму, сопровождающийся увеличением плотности и массы сростка. Волнообразное изменение содержания сростков магнетита, видимо, связано с присутствием сростков магнетита с кварцем первого типа.

Результаты исследования агрегатного состояния навесок классов крупности показали, что, как было ожидаемо, наибольшее количество раскрытых зерен наблюдается в тонких классах, где наибольшая зафиксированная доля сростков лишь незначительно превышает 20% (рис. 3. Отбор 4. Класс –0,071+0,04 мм).

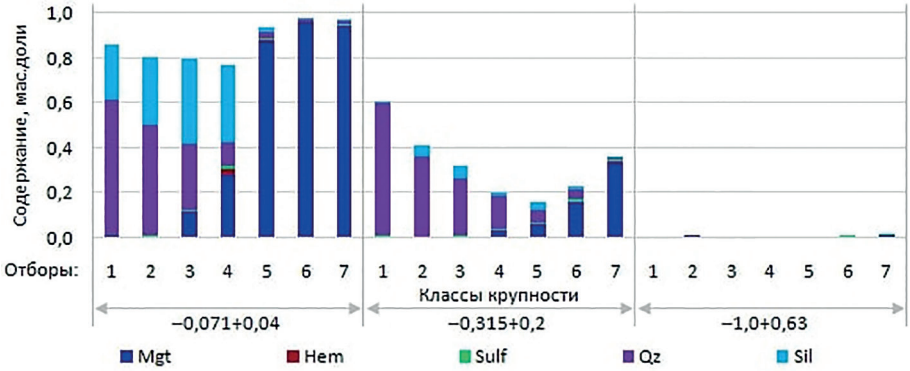


Рис. 4. Распределение раскрытых минералов в классах крупности
Fig. 4. Distribution of liberated minerals in size class

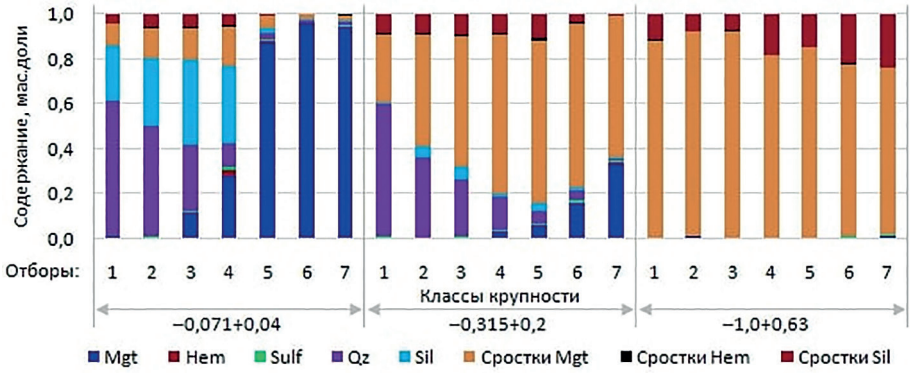


Рис. 5. Распределение раскрытых минералов и сростков в классах крупности
Fig. 5. Distribution of liberated minerals and intergrowths in size class

От отбора 7 к отбору 1 в классах крупности −0,071+0,04 мм и −0,315+0,2 мм соответственно, наблюдается повышение содержания раскрытого магнетита и уменьшение содержание кварца, силикатов и их сростков (рис. 4). Однако еще в отборах 1 и 2 класса −0,071+0,04 мм содержание раскрытого магнетита менее 1%, в сростках — не более 2%. Основная масса этих отборов представлена породообразующими нерудными минералами (кварц и силикаты). В классах крупности −1,0+0,63 мм и выше раскрытые зерна минералов практически отсутствуют.

Совместное рассмотрение распределения раскрытых минералов и сростков (рис. 5) показывает, что с укрупнением класса, не только пропадают раскрытые зерна, но и происходит размытие различий между отборами в навеске класса крупности. И если в классах −0,071+ +0,04 мм и −0,315+0,2 мм эти различия еще хорошо наблюдаемы, то в классе −1,0+0,63 мм они практически стираются, а в более крупных классах не наблюдаются вовсе. Отборы навесок крупных классов представлены сростками магнетита, кварца и силикатов, присутствует гематит и сульфиды.

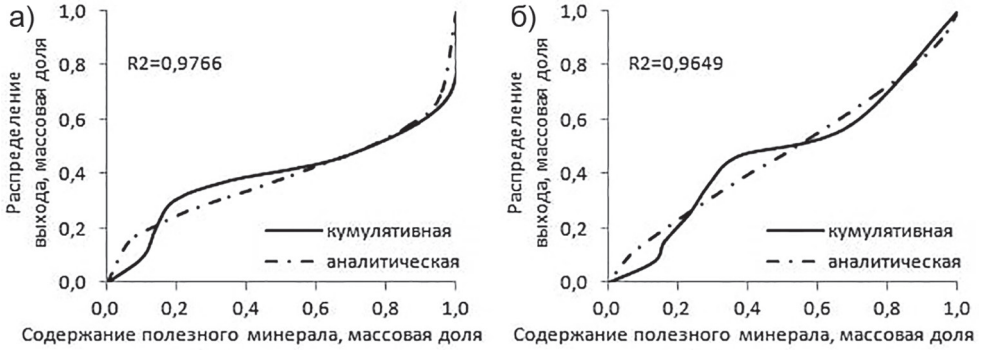


Рис. 6. Графики кумулятивной функции выходов отборов по результату опыта и функции распределения выходов отборов с оценкой коэффициента детерминации: класс крупности −0,1+0,071 мм (а); класс крупности −0,315+0,2 мм (б)

Fig. 6. Graphs of the cumulative function of selection yields based on the result of the experiment and the distribution function of selection yields with an estimate of the determination coefficient: size class −0.1 + 0.071 mm (a); size class −0.315 + 0.2 mm (b)

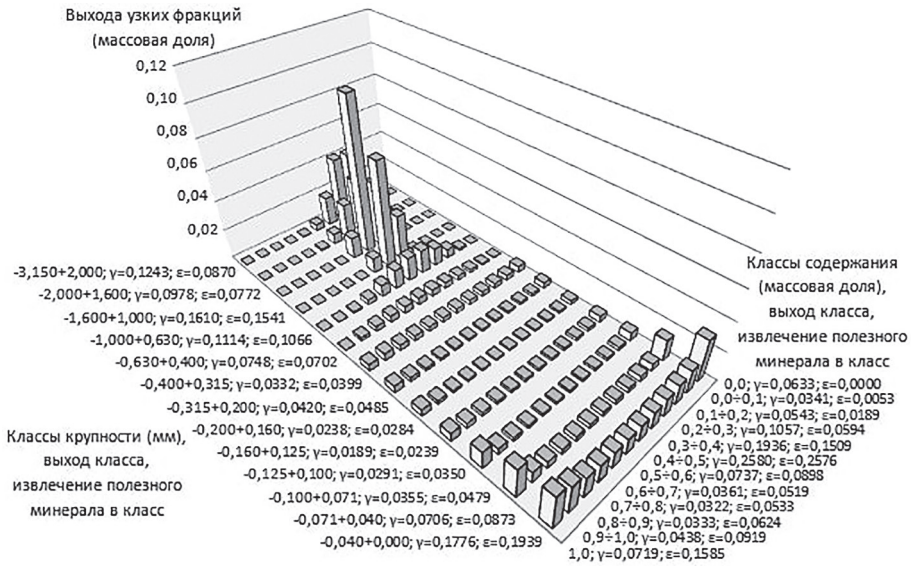


Рис. 7. Результат фракционирования пробы питания сокращения крупности
Fig. 7. The result of the fractionation of the feed sample size reduction

Вид кумулятивной функции выходов отборов и диаграмма раскрытия

В качестве примера, для двух из тринадцати классов крупности, приведем графики кумулятивной функции выходов отборов по результату опыта и функции распределения выходов отборов с оценкой коэффициента детерминации (см. рис. 6).

В заключении уместно интерпретировать результат фракционирования в виде трехмерной диаграммы (рис. 7).

Содержание диаграммы отвечает наполнению формы представления выходов узких фракций минеральных частиц в питании сокращения крупности (табл. 1) и включает величины границ классов крупности и классов содержания полезного минерала, выхода классов и исходное извлечение в них полезного минерала. Выхода узких фракций определяются по вертикальной шкале по длине столбцов диаграммы. Тем самым получено дискретное распределение выходов узких минеральных фракций в питании сокращения крупности для обеспечения имитационной модели дезинтеграции минералов.

Заключение

Обработкой данных о вещественном составе питания сокращения крупности, полученных в опытах по разделению навесок классов крупности на отборы с различным содержанием полезного минерала посредством гранулометрического, химического и минералогического исследований, методами статистического анализа выполнено фракционирование пробы железистых кварцитов, перерабатываемых на Стойленском ГОКе и прошедших операцию дробления в лабораторной щековой дробилке до 100% класса –3,15 мм. Опыты, проведенные с использованием разработанных прототипов гидравлического и пневматического сепараторов, позволили выявить функции распределения выходов отборов навесок классов крупности по содержанию полезного минерала. Тем самым была получена возможность аналитического разделения каждого класса крупности на узкие фракции границами

одинаковой величины содержания полезного минерала и представления результата фракционирования в форме приведенной в табл. 3.

Практически полученный результат является основой расчетного алгоритма имитационной модели дезинтеграции минералов и дает количественное и качественное представление о вещественном составе дробленой руды (на примере железистых кварцитов Стойленского ГОКа) в питании сокращения крупности минеральных частиц.

Авторы выражают благодарность специалистам лаборатории новых обогатительных приборов и аппаратов и лаборатории физико-химических и минералого-технологических методов контроля минерального сырья Горного института КНЦ РАН, принимавшим участие в выполнении этой работы.

Все приведенные в статье рисунки оригинальны и выполнены в ходе работы. Снимки выполнены А.А. Компанченко, использованы микроскоп Zeiss Axioplan II и стереомикроскоп Zeiss Stemi 1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gay S. L.* A liberation model for comminution based on probability theory // Minerals Engineering. 2004, vol. 17, no. 4, pp. 525 – 534. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.11.012.

2. *Leißner T., Mütze T., Bachmann K., Rode S., Gutzmer J., Peuker U. A.* Evaluation of mineral processing by assessment of liberation and upgrading // Minerals Engineering. 2013, vol. 53, pp. 171 – 173. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.018.

3. *Cisternas L. A., Lucay F. A., Botero Y. L.* Trends in modeling, design, and optimization of multiphase systems in minerals processing // Minerals. 2020, vol. 10, no. 1. DOI: 10.3390/min10010022.

4. *Guntoro P. I., Ghorbani Y., Rosenkranz J.* 3D ore characterization as a paradigm shift for process design and simulation in mineral processing // Berg Huettenmaenn Monatsh. 2021, vol. 166, no. 8, pp. 384 – 389. DOI: 10.1007/s00501-021-01135-w.

5. *Petrakis E., Komnitsas K.* Improved modeling of the grinding process through the combined use of matrix and population balance models // Minerals. 2017, vol. 7, no. 67. DOI: 10.3390/min7050067.

6. *Rashidi S., Rajamami R. K., Fuerstenau D. W.* A review of the modeling of high pressure grinding rolls // KONA Powder and Particle Journal. 2017, vol. 34, pp. 125 – 140. DOI: 10.14356/kona.2017017.

7. *Conger W., McIvor R. E., Weldum T. P.* Ball mill media optimization through functional performance modeling // Mining Engineering. 2018, vol. 70, no. 11, pp. 28 – 38.

8. *Ksenofontov B., Titov K., Firsova A.* Jordan-Gauss successive elimination method in solution of pneumohydraulic flotation water purification problems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 492, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/492/1/012009.

9. *Ksenofontov B. S., Titov K. V.* Flotation simulation model // AIP Conference Proceedings. 2019, vol. 2195, no. 1, article 020039. DOI: 10.1063/1.5140139.

10. *Ksenofontov B. S.* Flotation multistage and generalized models of the process harvesters of ksenofontov type and for special purpose. Academus Publishing, London, 2021. 299 p.

11. *Nikolaeva N. V., Aleksandrova T. N., Elbendari A. M.* Ore strength property evaluation in the design of ore preparation cycles / Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. 2018, vol. 1–2. Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 333 – 338.

12. *Nikolaeva N. V., Romashev A. O., Aleksandrova T. N.* Degree evaluation of grinding on fractional composition at destruction of polymineral raw materials / 29th International Mineral Processing Congress, IMPC 2018. Canada, 2019, pp. 474 – 480.

13. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V.* Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores // Minerals. 2021, vol. 11, no. 8. DOI: 10.3390/min11080851.

14. *Вайсберг Л. А.*, *Демидов И. В.*, *Иванов К. С.* Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования // Обогащение руд. — 2015. — № 4. — С. 21—31. DOI: 10.17580/or.2015.04.05.

15. *Белоглазов И. И.*, *Степанян А. С.*, *Феоктистов А. Ю.*, *Юсупов Г. А.* Моделирование процесса дезинтеграции в щековой дробилке со сложным качанием щек // Обогащение руд. — 2018. — № 2. — С. 3—8. DOI: 10.17580/or.2018.02.01.

16. *Юшин Т. И.*, *Чантури Е. Л.*, *Думо А. М.*, *Мяско А. В.* Современные тенденции в развитии технологий переработки железных руд // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 75—83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.

17. *Эрдэнэзул Жаргалсайхан*, *Морозов В. В.* Оптимизация крупности измельчения медно-молибденовых руд с использованием модель-ориентированных критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 8. — С. 176—183. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183.

18. *Мелехина К. А.*, *Ананьев П. П.*, *Плотникова А. В.*, *Тимофеев А. С.*, *Шестак С. А.* Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 95—105. DOI: 10.25018/0236_1493_2020_10_0_105.

19. *Матвеев И. А.*, *Яковлев Б. В.*, *Еремеева Н. Г.* Моделирование движения частиц в рабочей зоне крутонаклонного концентратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 7. — С. 146—153. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_146.

20. *Никитин Р. М.*, *Лукичев С. В.*, *Опалев А. С.*, *Бирюков В. В.* Имитационное моделирование сегмента секции обогащения железистых кварцитов // Обогащение руд. — 2022. — № 4. — С. 13—19. DOI: 10.17580/or.2022.04.03.

21. *Опалев А. С.*, *Бирюков В. В.*, *Щербаков А. В.* Стадиальное выделение магнетитового концентрата при разработке энергоресурсосберегающей технологии обогащения железистых кварцитов на ОАО «ОЛКОН» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11. — С. 60—62.

22. *Лукичев С. В.*, *Никитин Р. М.*, *Бирюков В. В.* Имитационная модель сокращения крупности минеральных частиц // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S37. — С. 514—522. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-514-522.

23. *Никитин Р. М.*, *Бирюков В. В.*, *Каменева Ю. С.*, *Вишнякова И. Н.* Применение имитационной модели сокращения крупности минеральных частиц при моделировании процессов дробления и измельчения // Обогащение руд. — 2020. — № 2. — С. 3—8. DOI: 10.17580/or.2020.02.01.

24. *King R. P.* Modeling and simulation of mineral processing systems. Department of Metallurgical Engineering University of Utah, USA. 2001. 403 p. ГИАБ

REFERENCES

1. Gay S. L. A liberation model for comminution based on probability theory. *Minerals Engineering*. 2004, vol. 17, no. 4, pp. 525—534. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.11.012.

2. Leißner T., Mütze T., Bachmann K., Rode S., Gutzmer J., Peuker U. A. Evaluation of mineral processing by assessment of liberation and upgrading. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 53, pp. 171—173. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.018.

3. Cisternas L. A., Lucay F. A.,Botero Y. L. Trends in modeling, design, and optimization of multiphase systems in minerals processing. *Minerals.* 2020, vol. 10, no. 1. DOI: 10.3390/min10010022.

4. Guntoro P. I., Ghorbani Y., Rosenkranz J. 3D ore characterization as a paradigm shift for process design and simulation in mineral processing. *Berg Huettenmaenn Monatsh*. 2021, vol. 166, no. 8, pp. 384—389. DOI: 10.1007/s00501-021-01135-w.

5. Petrakis E., Komnitsas K. Improved modeling of the grinding process through the combined use of matrix and population balance models. *Minerals*. 2017, vol. 7, no. 67. DOI: 10.3390/min7050067.

6. Rashidi S., Rajamami R. K., Fuerstenau D. W. A review of the modeling of high pressure grinding rolls. *KONA Powder and Particle Journal*. 2017, vol. 34, pp. 125—140. DOI: 10.14356/kona.2017017.

7. Conger W., McIvor R. E., Weldum T. P. Ball mill media optimization through functional performance modeling. *Mining Engineering*. 2018, vol. 70, no. 11, pp. 28—38.

8. Ksenofontov B., Titov K., Firsova A. Jordan-Gauss successive elimination method in solution of pneumohydraulic flotation water purification problems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 492, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/492/1/012009.

9. Ksenofontov B. S., Titov K. V. Flotation simulation model. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2195, no. 1, article 020039. DOI: 10.1063/1.5140139.

10. Ksenofontov B. S. *Flotation multistage and generalized models of the process harvesters of ksenofontov type and for special purpose*. Academus Publishing, London, 2021. 299 p.

11. Nikolaeva N. V., Aleksandrova T. N., Elbendari A. M. Ore strength property evaluation in the design of ore preparation cycles. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 2018, vol. 1–2. Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 333—338.

12. Nikolaeva N. V., Romashev A. O., Aleksandrova T. N. Degree evaluation of grinding on fractional composition at destruction of polymineral raw materials. *29th International Mineral Processing Congress, IMPC 2018*. Canada, 2019, pp. 474—480.

13. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 8. DOI: 10.3390/min11080851.

14. Vaisberg L. A., Demidov I. V., Ivanov K. S. Mechanics of granular media under vibration action: the methods of description and mathematical modeling. *Obogashchenie Rud*. 2015, no. 4, pp. 21—31. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2015.04.05.

15. Beloglazov I. I., Stepanyan A. S., Feoktistov A. Yu., Yusupov G. A. Disintegration process modeling for a jaw crusher with complex jaws swing. *Obogashchenie Rud*. 2018, no. 2, pp. 3—8. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.02.01.

16. Yushina T. I., Chantutia E. L., Dumov A. M., Myaskov A. V. Modern trends of technological advancement in iron ore processing. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 11, pp. 75—83. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.

17. Erdenesul Jargalsaikhan, Morozov V.V. Optimizing copper–molybdenum ore milling coarseness using model-oriented criteria. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 8, pp. 176—183. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183.

18. Melekhina K. A., Ananyev P. P., Plotnikova A. V., Timofeev A. S., Shestak S. A. Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 95—105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2020_10_0_105.

19. Matveev I. A., Yakovlev B. V., Eremeeva N. G. Modeling particle flow in active zone of large-angle concentrator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 7, pp. 146—153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_146.

20. Nikitin R. M., Lukichev S. V., Opalev A. S., Biryukov V. V. Simulation modeling of a section segment in the processing of ferruginous quartzites. *Obogashchenie Rud*. 2022, no. 4, pp. 13—19. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2022.04.03.

21. Opalev A. S., Birukov V. V., Scherbakov A. V. Stadial obtaining of the magnetite concentrate during the development of power resource-saving technology of benefication of ferruginous quartzites on JSC «Olcon». *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 11, pp. 60—62. [In Russ].

22. Lukichev S. V., Nikitin R. M., Birukov V. V. A simulation model of minerals' grade size reduction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S37, pp. 514—522. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-514-522.

23. Nikitin R. M., Biryukov V. V., Kameneva Yu. S., Vishnyakova I. N. The use of a simulation model for reducing the size of mineral particles in the modeling of crushing and grinding processes. *Obogashchenie Rud*. 2020, no. 2, pp. 3—8. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.02.01.

24. King R. P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Department of Metallurgical Engineering University of Utah, USA. 2001. 403 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитин Роман Михайлович[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: remnik@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9692-0383,
Опалев Александр Сергеевич[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: a.opalev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5120-7595,
Бирюков Валерий Валентинович — доцент,
Филиал Мурманского арктического
государственного университета в г. Апатиты,
e-mail: birukovval@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0495-2928,
Китаева Анна Сергеевна[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: 1990nuta2008@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8766-3119,
Компанченко Алёна Аркадьевна — канд. геол.-минерал. наук,
научный сотрудник, Геологический институт КНЦ РАН,
e-mail: komp-alena@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1240-7898,
[1] Горный институт Кольского научного центра РАН.
Для контактов: Никитин Р.М., e-mail: remnik@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.M. Nikitin[1], Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, e-mail: remnik@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9692-0383,
A.S. Opalev[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: a.opalev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5120-7595
V.V. Birukov, Assistant Professor,
Apatity branch of Murmansk Arctic State University,
184209, Apatity, Russia, e-mail: birukovval@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0495-2928,
A.S. Kitaeva[1], Junior Researcher,
e-mail: 1990nuta2008@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8766-3119,
A.A. Kompanchenko, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Researcher, Geological Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia,
e-mail: komp-alena@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1240-7898,
[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.
Corresponding author: R.M. Nikitin, e-mail: remnik@yandex.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 24.08.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 24.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.