

АПРОБИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ ДРОБЛЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД

А. И. Матвеев¹, Е. С. Львов¹

¹ Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук (ИГДС СО РАН), Якутск, Россия, e-mail: igds@ysn.ru

Аннотация: Приведена апробация методики определения степени дезинтеграции геоматериалов на примере ударного дробления кимберлитовых руд трубки «Зарница» в режиме сообщения многократных динамических воздействий, осуществлённого на дробилке ДКД-300. Методика предполагает по гранулометрическому составу продуктов дробления идентификацию двух процессов рудоподготовки: дезинтеграции и собственно механического разрушения. Методика основана на вычленении из общего гранулометрического состава продуктов дробления доли области их преимущественного накопления (моды), распределение частиц логнормальное, зависит от энергии механического воздействия и отвечающего за процесс непосредственного механического разрушения геоматериала. Степень дезинтеграции определяется долей материала, выделенного дезинтеграцией (самопроизвольной диспергацией) в процессе дробления и измельчения, которая определяется вычитанием из общей массы распределения гранулометрического состава доли геоматериала (в процентах), разрушаемого непосредственно механически. Расчёты показывают, что степень дезинтеграции для кимберлитовой руды при многократном ударном дроблении, осуществляемом на дробилке ДКД-300, достигает значения 0,74. Это интерпретируется так: кимберлитовые породы как объект рудоподготовки дроблением обладают более высокой степенью склонности к дезинтеграции в сравнении с более крепкими типами руд. Степень дезинтеграции может быть важной технологической характеристикой как объекта рудоподготовки – минерального сырья, так и аппарата дробления и измельчения, независимо от используемого способа и типоразмера.

Ключевые слова: дробление, дробилка, обогащение, рудоподготовка, дезинтеграция, гранулометрическая характеристика, кимберлит, алмазы, измельчение.

Для цитирования: Матвеев А.И., Львов Е.С. Апробирование методики определения степени дезинтеграции применительно к процессам дробления кимберлитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5–2. – С. 163–173. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_163.

Testing the methodology for determining the degree of disintegration to the processes of crushing kimberlite ores

A. I. Matveev¹, E. S. Lvov¹

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, RAS, Yakutsk, Russia, e-mail: igds@ysn.ru

Abstract: The article provides an approbation of the methodology for determining the degree of disintegration of geomaterials on the example of impact crushing of kimberlite ores from the Zarnitsa pipe in the mode of communication of multiple dynamic impacts carried out at the DKD-300 crusher. The technique involves the identification of two ore preparation processes by the granulometric composition of crushing products: disintegration and mechanical destruction proper. The technique is based on isolating from the general granulometric composition of the crushing products the share of the area of their predominant accumulation (mode), described in the form of a lognormal distribution that depends on the energy of mechanical action and is responsible for the process of direct mechanical destruction of the geomaterial. The degree of disintegration is determined by the proportion of material released by disintegration (spontaneous dispersion) in the process of crushing and grinding, which is determined by subtracting from the total distribution of the particle size distribution of the share of the destroyed geomaterial (in percent) of the reduced material directly by mechanical destruction. Calculations show that the degree of disintegration for kimberlite ore during multiple impact crushing carried out on the crusher DKD-300 reaches a value of 0.74. This is interpreted to mean that kimberlite rocks as an object of crushing have a high tendency to disintegrate. The degree of disintegration can be an important technological characteristic of both the object of ore preparation – mineral raw materials, and the crushing and grinding apparatus, regardless of the method and standard size used.

Key words: crushing, crusher, enrichment, ore preparation, disintegration, grading characteristics, kimberlite, diamonds, grinding.

For citation: Matveev A.I., Lvov E.S. Testing the methodology for determining the degree of disintegration to the processes of crushing kimberlite ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–2):163–173. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_163.

Введение

Исследования по изучению технологического-минералогической оценки минерального сырья показали, что до 35–40% потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки связано со сростками и 30–35% – с тонкими частицами (менее 10 мкм). Для того чтобы снизить эти потери при переработке тонковкрапленных руд без образования сростков и одновременно без излишнего переизмельчения, традиционные процессы дробления и измельчения в щековых, конусных дробилках и шаровых мельницах должны быть заменены процессом селективной дезинтеграции [1–5].

Классически под понятием дезинтеграции понимается процесс разъединения горной породы как сложного полиминерального комплекса под воздействием внешних усилий на отдельные составляющие фраг-

менты, естественно обусловленные ее геологическим происхождением, т. е. текстурно-структурными особенностями. Как правило, дезинтеграция происходит по наиболее слабым механическим связям, при этом «высвобождаются» отдельные фрагменты (гранулы), в том числе мономинеральные фазы и часто полезных компонентов. При этом дезинтеграция геоматериалов выступает как результат селективного (избирательного) разрушения разрыва слабых межминеральных и интергранулярных связей.

Известно, что все горные породы повержены в той или иной степени дезинтеграции в процессах дробления и измельчения. Эффективность процесса разрушения сводится к определению степени дробления и степени измельчения только по соотношению размеров исходного и конечного продуктов. Наиболее часто применяемый пока-

затель — это отношение средневзвешенного значения крупности определяемого по гранулометрическому составу исходного и разрушенного продуктов [6]. А степень дезинтеграции геоматериалов практически не идентифицируется.

В современных технологиях и производствах, связанных с переработкой и добычей полезных ископаемых, большое значение имеют методические подходы, новые показатели оценки, характеризующие эффективность протекающих процессов. При этом традиционные показатели оценки дополняются новыми — позволяющими количественно оценить те или иные составляющие и процессы в целом.

В данной статье представлены результаты апробации новой методики определения степени дезинтеграции [7] геоматериалов применительно к дроблению кимберлитовых руд на примере месторождения трубки «Зарница». Руды относятся к числу менее крепких горных пород, склонных к самопроизвольному разрушению (дезинтеграции) при длительном хранении на открытой поверхности под воздействием естественных природных факторов. Характерной особенностью кимберлита является его разнотельная структура — относительно крупные фрагменты породы или минерала заключены в мелкозернистую матрицу [8, 9].

Из всех известных способов механического разрушения геоматериалов наиболее эффективными с точки зрения дезинтеграции являются ударные динамические механические воздействия. Динамический характер процесса разрушения кусковых геоматериалов в режиме свободного высокоскоростного воздействия рабочими органами аппаратов дробления и измельчения способствует разрыву внутренних связей, характеризующихся наименьшим значением коэффициента σ_p , что является

неоспоримым преимуществом ударных способов, приводящих к селективности дезинтеграции [10–12].

Действительно, процесс разрушения твердого тела ударным способом, с точки зрения механики, момент сообщения динамических воздействий, сопровождается возникновением сложного поля напряжений и деформаций разной величины и направленности, что непременно является причиной активной дезинтеграции за счет самопроизвольной диспергации материала со слабыми механическими связями под внешним ударным воздействием. Это все более чётко проявляется при использовании способов многократного динамического воздействия в процессах рудоподготовки, реализованных, например, в дробилке ДКД-300.

Эффект дезинтеграции более чётко проявляется в данной дробилке при применении режима многократных динамических воздействий, при котором разрушение кусковых геоматериалов имеет характер объемной дезинтеграции.

В этих условиях и возникает вопрос количественного определения доли дезинтеграции в общей картине процесса разрушения.

Описание методики степени дезинтеграции

Нами предлагается методика определения степени (доли) дезинтеграции из распределения гранулометрического состава продуктов дробления, основанная на разделении спектра на две составляющих: дезинтеграция и собственно разрушение [13]. Спектр распределения гранулометрического состава продуктов дробления дезинтеграции всегда бывает разнообразным, но характеризуется наличием мод или накоплением материала в определённых классах крупности. При этом, как правило, всегда существует одна харак-

терная мода в области крупных классов. Формирование в определённом промежутке этой крупности зависит от энергии динамического воздействия, сообщаемой рабочими органами аппарата дробления, с одной стороны, и от механической прочности более крепкой и однородной части геоматериала, т. е. степени их сопротивляемости к механическим воздействиям, с другой. При увеличении энергии воздействия мода смещается в сторону диапазона мелких классов крупности, или наоборот. Методика определения степени дезинтеграции основана на допущении того, что данная мода подчиняется логнормальному закону распределения, имеющему место при разрушении более однородных и монолитных геоматериалов механическими воздействиями при известных способах дробления, например, в щековой дробилке. Но в большинстве случаев дробления реальных объектов горных пород распределение гранулометрического состава всегда смещено в сторону мелких классов крупности, что связано с дезинтеграцией. С учётом этого методика предусматривает определение степени дезинтеграции как разницы площади общего распределения гранулометрического

состава и той части, которая подчиняется логнормальному распределению. В этом случае действительно можно идентифицировать два одновременно происходящих процесса — собственно разрушение и селективная (избирательная) дезинтеграция. Графически методика расчёта степени дезинтеграции представлена на рис. 1, где гранулометрическая характеристика продуктов дробления имеет две моды, одна в области мелких классов и вторая в области крупных. Как было обусловлено, мода в области более крупных фракций имеет форму логнормального распределения, а заштрихованная часть представляет долю материала (зависит от текстурных особенностей), разрушенного вследствие дезинтеграции, т. е., самопроизвольной диспергации наиболее слабой части геоматериала. Таким образом, соотношение заштрихованной площади к общей массе дробленого материала представляет степень дезинтеграции, а расчёт степени дезинтеграции основан на определении доли продуктов в результате механического воздействия и вычлениении из общего гранулометрического состава продуктов дробления.

В теории расчетная часть методики выглядит следующим образом. Выявля-

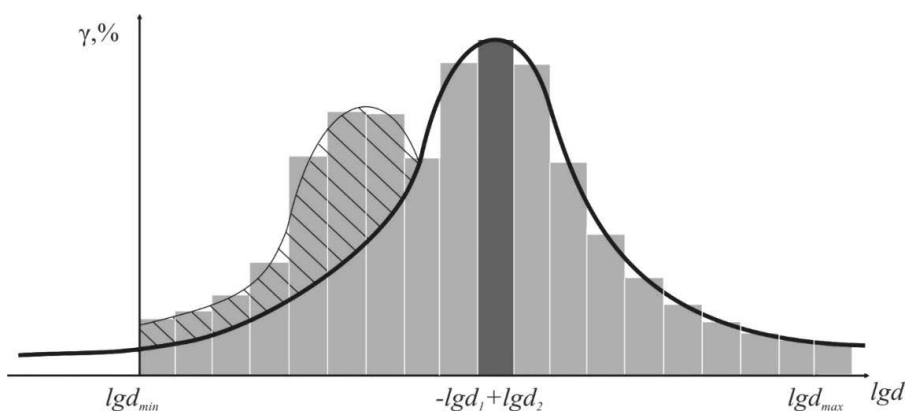


Рис. 1. К методике определения степени дезинтеграции
 Fig. 1. To the method of determining the degree of disintegration

ются параметры области моды в области крупных фракций, ограниченных $\lg d_1$ и $\lg d_2$, и значение выхода γ_{\max} . Определяется площадь.

$$S_0 = \int_{\lg d_1}^{\lg d_2} f(x) dx. \quad (1)$$

Из условия $S^l = f(x)$, приравненной к функции логарифмически нормального распределения

$$e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} = f(x); \quad (2)$$

$$e^{-\frac{\left(x - \frac{d_1+d_2}{2}\right)^2}{2\delta^2}} = f(x), \quad (3)$$

определяется значение δ , затем вычисляется площадь под функцией логарифмически нормального распределения:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{n_1}^{N_1} e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} dx. \quad (4)$$

Далее определяются степень дезинтеграции:

$$D = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{n_1}^{N_1} e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} dx. \quad (5)$$

Теоретически в формулах используется переменная δ , определить на практике её затруднительно, однако предлагается построить логнормальное распределение по характерным точкам кривой распределения гранулометрического состава в логарифмической шкале крупности с учетом его особенностей.

При этом значения, полученные в результате гранулометрического состава продуктов дробления дробилки ДКД-300, логарифмируются и строится область для определения площадей двух мод, где x_i — крупность материала в мм, ось абсцисс $x0_i$ — это натуральный логарифм крупности дробленого материала x , ось ординат —

отношение выхода продукта дробления (y) к его логарифмируемому значению крупности:

$$y0_i = \frac{y_i}{\ln x_i}. \quad (6)$$

Для определения моды, характеризующей разрушение материала в результате дезинтеграции, предполагая, что распределение частиц геоматериала, образуемых вследствие механического воздействия на куски геоматериала, подчиняется логарифмически нормальному распределению, выбираем три величины y , характеризующие выход продуктов дробления в области больших классов крупности, на основе которых определяем функцию логнормального распределения материала, попадающего под основную моду распределения.

Пиковое или максимальное значение y_2 по оси ординат в области крупных классов соответствует оси абсцисс со значением x_2 , величина y_3 следует за пиковым значением в сторону увеличения крупности материала по оси абсцисс в точке x_3 . Значение y_1 и точку x_1 принимаем по симметрии с точкой x_3 и y_3 в соответствии с гипотезой о логнормальном распределении, где графически описанная область представляет собой параболу с вершиной y_2 в точке x_2 . В итоге получаем следующие выражения:

$$A = 1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)(x_3^2 - x_2^2) - \ln\left(\frac{y_2}{y_3}\right)(x_2^2 - x_1^2)}{2 \left[\ln\left(\frac{y_2}{y_3}\right)(x_1 - x_2) - \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)(x_2 - x_3) \right]}; \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{\ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)} [(x_2 - A)^2 - (x_1 - A)^2]; \quad (8)$$

$$C = y_1 e^{-\frac{(x_1-A)^2}{B}}. \quad (9)$$

Определив значения величин А, В и С, найдем область, выраженную функцией (1), т. е. параметры моды логарифмически нормального распределения материала:

$$Y(X) = Ce^{-\frac{(X-A)^2}{B}}. \quad (10)$$

Далее вычисляем площадь кривой логарифмически нормального распределения:

$$S = \int_{-x_0}^{x_0} Y(X) dX. \quad (11)$$

Следовательно, степень дезинтеграции, согласно формулам, представленными выше, определяется как

$$D = 1 - S. \quad (12)$$

Один из способов идентификации параметров основной моды логнормального распределения дан в [7].

Результаты апробации методики степени дезинтеграции применительно к кимберлитовой руде

Проведённые ранее исследования по дезинтеграции кимберлитовых руд трубки «Зарница» показали возможность применения ударного метода дробления при рудоподготовке и переработке кимберлитовых руд с сохранностью алмазов, близкого к традиционной дезинтеграции кимберлитового сырья, применяемой в мельницах самоизмельчения. При этом расчёт степени дробления в зависимости от производительности дробилки многократного ударного действия ДКД-300 показал, что во всех случаях степень дробления выше, чем у роторной дробилки Nordberg NP-1007, испытанной в аналогичных условиях (степень дробления 3,3). В зависимости

от производительности степень дробления кимберлитовых руд для дробилки ДКД-300 составляет: при производительности 5,8; 12,2 и 15,2 т/ч — соответственно 6,6; 5,3 и 4,8. Наибольшая степень дробления достигается при наименьшей производительности дробилки 5,8 т/ч [14].

На рис. 2 приведены гранулометрические составы продуктов дробления аппаратов ударного действия, испытанных на алмазосодержащих кимберлитах.

Если проанализировать грансоставы продуктов дробления двух сравниваемых дробилок (рис. 2), видно, что принципиальное различие состоит в том, что на дробилке ДКД-300 наибольшее количество дроблёного продукта приходится на класс крупности $-5+1,6$ мм, который является, по сути, продуктивным классом, направляемый непосредственно на обогащение. А для продуктов дробления Nordberg NP-1007 характерен наибольший выход нераздробленных материалов класса $-20+10$ мм, который составляет основу формирующейся циркулирующей нагрузки в схеме рудоподготовки и соответственно его доли.

Были произведены расчёты определения степени дезинтеграции кимберлитовой руды трубки «Зарница» по методике, описанной выше, с использованием формул (6–12), результаты представлены в виде графика (рис. 3.), где пунктирной линией изображена предполагаемая мода, характеризующая разрушение кускового геоматериала непосредственно ударной нагрузкой от рабочих органов дробилки. Мы определили, что степень дезинтеграции при производительности дробилки ДКД-300 12,2 т/ч составляет 0,74, что означает, что руда в большей степени склонна к дезинтеграции, или доля объёмной дезинтеграции (диспергации) при дроблении достигает 74%.

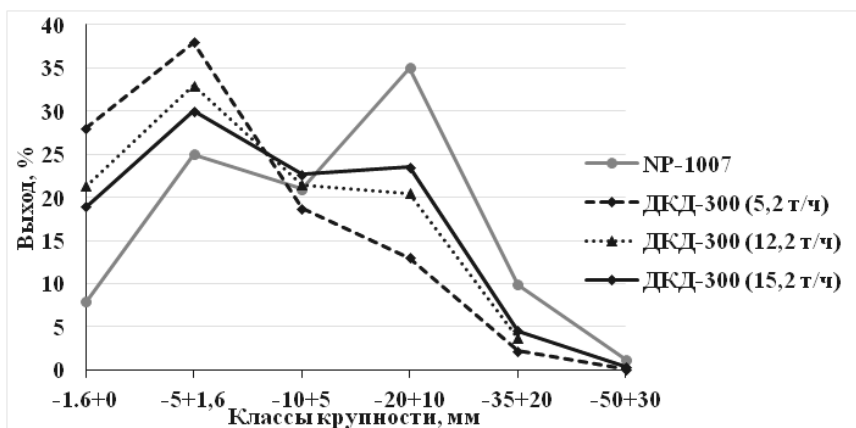


Рис. 2. Гранулометрические составы продуктов дробления кимберлитовой руды трубки «Зарница» дробилке ударного действия ДКД-300 и Nordberg NP-1007

Fig. 2. Granulometric compositions of kimberlite ore crushing products of the Zarnitsa tube of impact crushers DKD-300 and Nordberg NP-1007

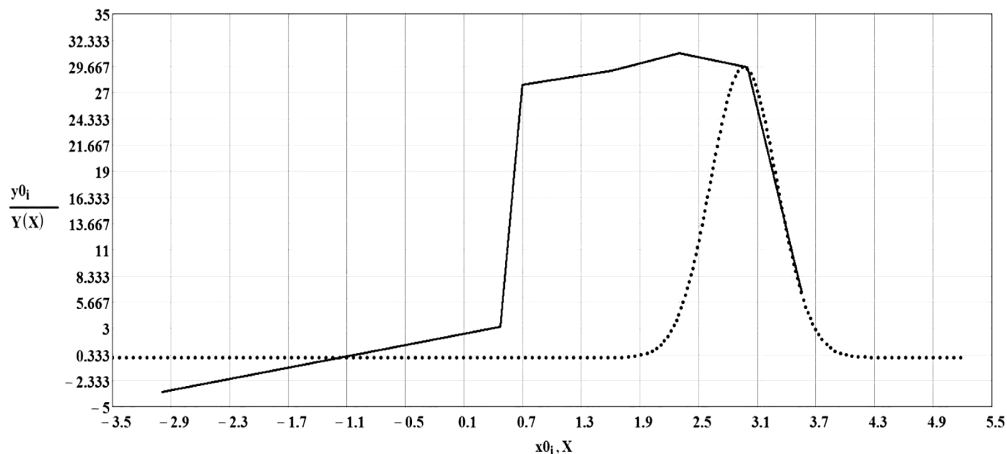


Рис. 3. Гранулометрическая характеристика продуктов дробления кимберлитов и доля логнормального распределения для определения степени дезинтеграции кимберлитовой руды трубки «Зарница» в дробилке ДКД-300 при производительности 12,2 т/ч

Fig. 3. Granulometric characteristics of kimberlite crushing products and the proportion of the lognormal distribution for determining the degree of disintegration of kimberlite ore of the Zarnitsa tube in the DKD-300 crusher at a capacity of 12.2 t/h

В таблице представлены результаты расчётов аналогичным способом степени дезинтеграции кимберлитовой руды, с применением ударного способа дробления, осуществляемого в аппарате ДКД-300 при разной производительности, и дробилки Nordberg NP-1007.

Обсуждение результатов

Из данных, представленных в таблице, можно видеть, что степень дезинтеграции зависит не только от текстуры и минерального состава геоматериала, как в проведенных ранее исследованиях на золотосодержащих кварцевых

Таблица

Степень дезинтеграции кимберлитовой руды трубки «Зарница» в дробилках ДКД-300 и Nordberg NP-1007

The degree of disintegration of kimberlite ore of the Zarnitsa tube in crushers DKD-300 and Nordberg NP-1007

№	Наименование дробилки	Степень дезинтеграции
1	Дробилка ДКД-300 производительностью 5,8 т/ч	0,85
2	Дробилка ДКД-300 производительностью 12,2 т/ч	0,74
3	Дробилка ДКД-300 производительностью 15,2 т/ч	0,71
4	Дробилка Nordberg NP-1007 производительностью 89 т/ч	0,54

рудах, но и от интенсивности дробления. Так, при дроблении на дробилке ДКД-300 получены наилучшие результаты при меньшей производительности; это объясняется тем, что при малой производительности куски руды находятся в рабочей зоне дробилки более длительное время, следовательно, получают больше многократных ударных импульсов в режиме одновременного воздействия роторов и самоизмельчения дробимых частиц за счёт контактов друг с другом, что сопровождается большей долей дезинтеграции. На основании полученных расчётных данных можно утверждать, что применение предложенной методики количественного определения степени дезинтеграции кусковых геоматериалов даёт адекватную характеристику процесса дробления руды не только с точки зрения механики разрушения, но и с учётом эффекта сопутствующей разрушению дезинтеграции вследствие саморазрушения, зависящей от особенностей рудной массы, в особенности от ее текстуры.

Заключение

Наряду с традиционным показателем степени дробления степень дезинтеграции даёт более точные данные по эффективности того или иного

способа дробления. Чем выше значение степени дезинтеграции, тем выше эффективность используемого оборудования. В данном случае показаны преимущества нового способа дробления, реализованного в дробилке ДКД-300, по сравнению с показателями роторной дробилки Nordberg NP-1007. В то же время определяется склонность кимберлитов к самопроизвольной дезинтеграции в тех или иных аппаратах дробления.

Таким образом, действительно степень дезинтеграции может дать дополнительную количественную характеристику процесса дробления и измельчения. Она может быть важной технологической характеристикой как объекта рудоподготовки — минерального сырья, так и аппарата дробления и измельчения, независимо от используемого способа и типоразмера.

Вклад авторов

Матвеев А. И. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, проведение исследований, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи.

Львов Е. С. — проведение исследований, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Козлов А. П. Развитие физико-химических основ и разработка инновационных технологий глубокой переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. — 2014. — № 7. — С. 79–84.
2. Чантурия В. А., Козлов А. П. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017). Материалы международной конференции. — 2017. — С. 3–6.
3. Чантурия В. А. Инновационные технологии комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2020). Материалы международной конференции. — 2020. — С. 3–4.
4. Gorain B. K. Physical Processing: Innovations in Mineral Processing // Innovative Process Development in Metallurgical Industry, Concept to Commission, Springer International Publishing Switzerland. 2016, pp. 9–65. DOI:10.1007/978-3-319-21599-0_2
5. Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M. S., Knights P. Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020, vol. 35, iss. 3, pp. 153–182.
6. Перов В. А., Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф. Дробление, измельчение, грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1990. — 300 с.
7. Матвеев А. И., Львов Е. С. Разработка методики определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе многократного ударного дробления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 2. — С. 137–143. <https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1782573>
8. Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., and McHugh L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit // J. Min. Eng. 2015, vol. 91, pp. 92–99.
9. Бобреевич А. П., Бондаренко М. Н., Гневушев М. А. Алмазные месторождения Якутии. — М.: Госгеолтехиздат, 1959. — 528 с.
10. Юсупов Т. С. Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков при освоении труднообогатимых объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 3. — С. 143–149.
11. Gong D., Nadolski S., Sun C., Klein B., and Kou J. The effect of strain rate on particle breakage characteristics // Powder Technology. 2018, vol. 339, pp. 595–605. DOI: 10.1016/j.powtec. 2018.08.020.
12. Мамонов С. В., Закирничный В. Н., Метелев А. А., Дресвянкина Т. П., Волкова С. В., Кузнецов В. А., Зиятдинов С. В. Перспективные технологии раскрытия минерального сырья при подготовке к флотационному обогащению // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 5. — С. 158–169.
13. Матвеев А. И., Львов Е. С. Дезинтеграция геоматериалов при рудоподготовке — роль и значение // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019 — Т. 6. — № 3. — С. 301–307.
14. Матвеев А. И., Львов Е. С., Осипов Д. А. Обоснование применения дробилки комбинированного ударного действия ДКД-300 в схеме сухого обогащения кимберлитовых руд трубки «Зарница» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 4. — С. 107–115. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Chanturia V. A., Kozlov A. P. Development of physical and chemical foundations and development of innovative technologies for deep processing of technogenic mineral raw materials. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 7, pp. 79–84. [In Russ].
2. Chanturia V. A., Kozlov A. P. Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials. *Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksin' readings 2017)*. *Materials of the international conference*. 2017, pp. 3–6. [In Russ].
3. Chanturia V. A. Innovative technologies for complex and deep processing of mineral raw materials of complex material composition. *Innovative processes for complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin' readings 2020)*. *Materials of the international conference*. 2020, pp. 3–4. [In Russ].
4. Gorain B. K. Physical Processing: Innovations in Mineral Processing. Innovative Process Development in Metallurgical Industry, Concept to Commission. Springer International Publishing, Switzerland. 2016, pp. 9–65. DOI:10.1007/978-3-319-21599-0_2.
5. Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M. S., Knights P. Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020, vol. 35, iss. 3, pp. 153–182.
6. Perov V. A., Andreev E. E., Bilenko L. F. Crushing, grinding, screening of minerals. Moscow, Nedra. 1990, 300 p. [In Russ].
7. Matveev A. I., Lvov E. S. Disintegration of geomaterials during ore preparation the role and significance. *Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences*. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 301–307. [In Russ]. <https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1782573>.
8. Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., and McHugh L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. *J. Min. Eng.* 2015, vol. 91, pp. 92–99.
9. Bobrievich A. P., Bondarenko M. N., Gnevushev M. A. Diamond deposits of Yakutia. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1959, 528 p. [In Russ].
10. Yusupov T. S. Improving the processes of opening mineral aggregates during the development of refractory objects. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 3, pp. 143–149. [In Russ].
11. Gong D., Nadolski S., Sun C., Klein B., and Kou J. The effect of strain rate on particle breakage characteristics. *Powder Technology*. 2018, vol. 339, pp. 595–605. DOI: 10.1016/j.powtec. 2018.08.020.
12. Mamonov S. V., Zakirnichny V. N., Metelev A. A., Dresvyankina T. P., Volkova S. V., Kuznetsov V. A., Ziyatdinov S. V. Advanced technologies for the disclosure of mineral raw materials in preparation to flotation enrichment. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no. 5, pp. 158–169. [In Russ].
13. Matveev A. I., Lvov E. S. Development of a method for determining the degree of disintegration of geomaterials in the process of multiple impact crushing. *Physical and technical problems of the development of useful minerals*. 2020, no. 2, pp. 137–143. [In Russ].
14. Matveev A. I., Lvov E. S., Osipov D. A. Justification of the use of a combined impact crusher DKD-300 in the scheme of dry dressing of kimberlite ores of the Zarnitsa pipe. *Physical and technical problems of the development of useful minerals*. 2013, no. 4, pp. 107–115. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Матвеев Андрей Иннокентьевич*¹ — докт. техн. наук, г. н. с. и. о. зав лаб. ОПИ, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, andrei.mati@yandex.ru;

*Львов Евгений Степанович*¹ — м. н. с. лаб. ОПИ, <https://orcid.org/0000-0002-3843-0714>, lvoves@bk.ru;

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук (ИГДС СО РАН), Республика Саха (Якутия) г. Якутск, пр. Ленина 43, 677980, г Якутск, Россия.

Для контактов: *Матвеев А. И.*, e-mail: andrei.mati@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Matveev A. I.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, acting laboratory manager, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, andrei.mati@yandex.ru;

*Lvov E. S.*¹, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3843-0714>, lvoves@bk.ru;

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, RAS, Republic of Sakha (Yakutia) Yakutsk, Lenin ave. 43, 677980, Russia.

For contacts: *Matveev A. I.*, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

Получена редакцией 01.10.2021; получена после рецензии 10.03.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 01.10.2021; received after the review 10.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.

