

К КОНЦЕПЦИИ ДРОБЛЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В МЕЛЬНИЦАХ

Ю. В. Дмитрак^{1✉}, В. И. Голик²

¹ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

²Геофизический институт Владикавказского научного центра, г. Владикавказ, Российская Федерация

✉ dmitrak@yandex.ru

Аннотация: Приведены результаты многофакторного анализа основных операций процесса измельчения минерального сырья в шаровых, вибрационных и планетарных мельницах, актуальность которых возрастает по мере изменения демографических, экономических и прочих условий в странах мира. Параметры измельчения исследовались в лабораторных и промышленных мельницах, функционирующих на горно-обогатительных фабриках и в других цехах подготовки минерального сырья, путем сопоставления проб исходного сырья и разгрузки мельницы с использованием контрольных сит. Тонина помола исследовалась в барабанной мельнице. Прочие параметры исследовались с использованием общепризнанных методов. Установлено, что наличие многочисленных факторов и эмпирический характер используемых величин не позволяют применять имеющуюся исследовательскую базу для решения задач механического дробления и измельчения. Рекомендовано в качестве критериев динамического разрушения хрупких сред при производстве технологических процессов использовать критерий критического напряжения при ударе, скорость упругих волн и значение динамической вязкости. Показано, что между коэффициентом разрушения и размерами поверхностей раскола при хрупком разрушении горных пород в результате удара существует устойчивая корреляция. Выявлено, что новая концепция рудоподготовки должна основываться на фазово-структурных свойствах сырья, возможности процессов раскрытия и параметрах оборудования. Такая концепция в большей мере будет отвечать принципам гуманизации отношений в системе «Природа – человек». Результаты выполненных многофакторных исследований могут быть востребованы при разработке действующих модернизируемых и строящихся месторождений твердых полезных ископаемых в горнодобывающих отраслях, а также при подготовке кадров высшей квалификации в высших учебных заведениях.

Ключевые слова: минеральное сырье, измельчение, мельница, концепция, технология, динамическое разрушение, анализ

Для цитирования: Дмитрак ЮВ, Голик ВИ. К концепции дробления и измельчения минерального сырья в мельницах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):59-64. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-59-64>.

TOWARDS THE CONCEPT OF CRUSHING AND GRINDING OF MINERAL RAW MATERIALS IN MILLS

Yu. V. Dmitrak^{1✉}, V. I. Golik²

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

²Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

✉ dmitrak@yandex.ru

Abstract: The article presents the results of a multifactorial analysis of the main operations of the technological process of grinding mineral raw materials in ball, vibration and planetary mills, the relevance of which will increase as demographic, economic and other conditions change in the countries of the world. The grinding parameters are studied in laboratory and industrial mills operating in mining and processing plants and other workshops for the preparation of mineral raw materials by comparing samples of raw materials and unloading the mill using control sieves. The fineness of the grinding is carried out in a drum mill. Other parameters are investigated using generally accepted methods. It is established that the presence of numerous factors and the empirical nature of the quantities used do not allow the use of the available research base for solving problems of mechanical crushing and grinding. It is recommended to

use the criterion of critical stress at impact, the velocity of elastic waves and the value of dynamic viscosity as criteria for the dynamic destruction of brittle media in the production of technological processes. It is shown that there is a stable correlation between the fracture coefficient and the size of the split surfaces during brittle fracture of rocks as a result of impact. It was revealed that the new concept of ore preparation should be based on the phase-structural properties of raw materials, the possibility of disclosure processes, and equipment parameters. Such a concept will be more consistent with the principles of humanization of relations in the «Nature – Man» system. The results of the completed multifactorial studies can be in demand in the development of existing modernized and under construction deposits of solid minerals in the mining industries, as well as in the training of highly qualified personnel in higher educational institutions.

Keywords: mineral raw materials, grinding, mill, concept, technology, dynamic destruction, analysis

For citation: Dmitrak YuV, Golik VI. Towards the concept of crushing and grinding of mineral raw materials in mills. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-59-64>.

Введение

Актуальность проблемы разрушения различных материалов при динамическом нагружении связана с практическим применением интенсивных нагрузок в процессах дробления и измельчения горных пород. Исследования механизма измельчения минеральных сред и полезных ископаемых основываются на изучении распада исходной частицы под действием разрушающей силы, исходя из того, что свойства исследуемого процесса не зависят от взаимодействия между участвующими в процессе частицами [1].

Целью многочисленных исследований является построение алгоритма разрушения частицы свободным ударом в измельчающем устройстве. Этот алгоритм состоит из моделирования механического воздействия и разрушения частицы и моделирования гранулометрического состава продукта разрушения. Крупность дробления и измельчения оценивается с точки зрения обеспечения технологического вскрытия руд [2–4].

К основным вопросам проблемы относятся определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов и определение коэффициента демпфирования ударного импульса при измельчении пород [5–6].

Параметры ресурсосберегающих технологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых определяются в результате комплексного анализа условий устойчивого развития природно-технической системы, важное место среди которых занимают вопросы дробления и измельчения сырья [7–10].

Возможность создания условий для инфильтрации растворов выщелачивания является основным критерием применения геотехнологии при добыче технологически вскрываемых руд [11–14].

Экологические и горнотехнические аспекты безопасности разработки месторождений определяются с применением методов моделирования и геоинформационных технологий [15–17].

Вопросы совершенствования технологии добычи и переработки руд (современные вызовы, устойчивое развитие и переход к новой технологической парадигме) рассмотрены в работах [18–20].

Цель статьи: анализ основных операций технологического процесса измельчения минерального сырья в шаровых, вибрационных и планетарных мельницах.

Методика исследований

При обосновании производительности мельницы исследовались пробы исходной породы и разгрузки мельницы, в

которых определялся гранулометрический состав остатка на контрольном сите.

Для анализа влияния времени измельчения на гранулометрический состав образуемых зерен исследовались пробы одинаковой крупности с одинаковой скоростью для сравниваемых руд.

Тонина помола исследовалась в барабанной мельнице. Параметры изменялись в равном диапазоне: крупность мелющих шаров – 15...50 мм; степень заполнения барабана мелющими телами – 0,26...0,9; частота вращения барабана – 0,6...0,9 от критической.

Результаты исследований

Модели ударного разрушения горных пород

Вероятность разрушения пород подчиняется нормальному закону:

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

где t – время,

$$t = 1.09 \ln \left(v / v_{кр} \right),$$

здесь $v_{кр}$ – критическая скорость разрушения частицы.

В условиях ударного нагружения частиц:

$$v_{кр} = \frac{1.9 (\tau_{ср} / \rho \cdot 10^{-4} + 1)}{x_{исх}^{0.4}},$$

где $\tau_{ср}$ – предел прочности материала на срез, МПа;

ρ – плотность, г/см³;

$x_{исх}$ – размер частицы, мм.

Минерал разрушается при условии

$$0 \leq \rho^x \leq \rho,$$

где ρ^x – случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Математическое ожидание числа крупных осколков от разрушения исходной частицы:

$$M = \operatorname{int} \left[B (v / v_{кр})^l \right] + 2,$$

где B – вероятное число крупных частиц-осколков, уменьшенное на 2, от разрушения исходной частицы материала при скорости воздействия $v_{кр}$;

1 – коэффициент.

Трудности учета многочисленных факторов и несовпадения с практикой применения, а также эмпирический характер используемых величин не позволяют применить имеющуюся базу для построения универсальной теории разрушения (раскрытия) зерен.

Процесс разрушения твердых тел происходит за счет волн напряжений, поэтому многие методики не предусматривают определение гранулометрического состава.

Энергия разрушения расходуется на образование новой поверхности, поэтому распределение масс осколков определяют исходя из максимальной энтропии при сохранении одной и той же суммарной массы осколков.

В качестве критериев динамического разрушения хрупких сред в работе рекомендуется использовать критерий критического напряжения в материале при ударе, скорости продольной и поперечной упругих волн и значения динамической вязкости материала.

Влияние свойств породы на их дробимость

Разрушение включает в себя деформацию структурных элементов различного состава: микродефекты, макротрещины и т.п.

Динамическое нагружение горных пород изменяет их напряженно-деформированное состояние. Высокая интенсивность возникающих напряжений в горной породе приводит к новым явлениям по сравнению со статической нагрузкой.

При нагрузке образца породы ее деформация не достигает конечного значения, а растет со временем и уменьшается при снятии нагрузки. С ростом скорости деформации прочностные показатели увеличиваются, особенно при переходе от квазистатических нагрузок к динамическим.

Для каждого типа горной породы существует напряжение, которое соответствует раскрытию и росту микротрещин, не зависящее от скорости деформации и превышающее на 10–40 % стандартную прочность на сжатие.

Показатель прочности образца горной породы или минеральной среды на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ зависит от размера разрушаемого образца. При достижении предельно допустимого значения напряжения растяжения в устье трещины $\sigma_{р.т}$ начинается процесс роста трещины. Из-за возникновения в контакте зоны всестороннего сжатия конической формы происходит раскол образца.

Между коэффициентом интеркристаллитного разрушения и фрактальными свойствами поверхностей раскола при хрупком разрушении горных пород существует корреляция.

Закон деформирования материала имеет вид:

$$s = eE \text{ при } \sigma \leq \sigma_0$$

или

$$s = s_0 + K (e - s_0 E) \text{ при } \sigma > \sigma_0$$

где K – модуль упрочнения;

σ_0 – предел упругости материала.

Кинетика и энергозатратность измельчения

С целью изучения кинетики тонкого измельчения руд и выбора параметров барабанных мельниц определялись кинетические константы измельчения тонких узких классов крупности при разных режимах и условиях работы лабораторной мельницы.

Энергонасыщенность процесса измельчения определяет характер связи между массой крупного остатка в рабочем пространстве измельчителя и скоростью убывания этой массы показателя степени n в уравнении:

$$dR/dt = -kR^n,$$

где R – масса крупного остатка.

Коэффициент скорости измельчения k зависит от количества расходуемой энергии при постоянном значении n :

$$k = k_0 e^{-E_0/E},$$

где k_0 – коэффициент, определяемый экспериментально;

E_0 – энергия, которую необходимо подвести к единице объема материала в единицу времени, чтобы соблюдалось условие $k_0 = k$;

E – энергия, подводимая к измельчаемому материалу.

Одним из направлений совершенствования дробильно-измельчающих машин является снижение энергоемкости процесса измельчения.

Работа разрушения описывается законом П. А. Ребиндера:

$$A = A_v + A_s,$$

где A_v – работа деформации;

A_s – работа на образование новой поверхности.

В барабанных мельницах кинетическая энергия разрушаемых материалов передается через их поверхность и превращается в работу образования новой поверхности и теплоту. Распределение затрат энергии пропорционально прочности и массовой доле данного материала.

Прочностные параметры пород приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Прочностные параметры руд и пород / Strength parameters of ores and rocks

Минерал	Плотность, кг/м ³ ·10 ³	Модуль упругости, Па·10 ¹⁰	Предел прочности, Па·10 ⁵		Работа разрушения, Дж/м ³ ·10 ⁵	Мощность, кВт·ч/т·10 ⁻²
			$\sigma_{сж}$	σ_p		
Мартит	3,58	5,3	2 370	174	14,1	10,95
Пирротин	4,58	4,5	2 610	272	20,1	12,2
Гематит	5,1	21,2	600	60	0,226	0,123
Кварц	2,78	8,3	4 000	210	25,64	26,64
Магнетит	4,7	10,5	520	140	0,342	0,2
Корунд	4,03	43,86	5 000	200	7,581	5,23
Пирит	5,0	14,0	1 280	160	1,56	0,87
Магнетит	3,87	7,0	1 440	102	3,94	2,83

Затраты энергии при дроблении составляют 10...20 % общего расхода, а для измельчения руд они составили 56...82 % от общих затрат энергии.

Результаты вычислений энергозатрат при грубом измельчении приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Затраты энергии при грубом измельчении /
Energy consumption during coarse grinding**

Минерал	Конечная крупность, мм					
	1,0	0,7	0,5	0,2	0,1	0,075
	Расход энергии, кВт·ч/т					
	1,0	0,7	0,5	0,2	0,1	0,075
Кальцит	1,14	1,35	1,64	2,37	8,46	13,29
Апатит	2,71	3,90	5,10	7,43	18,61	23,98
Кварц	6,07	6,71	7,41	8,67	14,08	17,10

Перспективы применения мельниц

Процессы дробления и измельчения материалов являются определяющими во многих технологических процессах. В их основе заложены удар, раздавливание и истирание. Выбор способа разрушения зависит от физико-механических свойств измельчаемого материала, начальной величины разрушаемых кусков, требуемой крупности и ряда других факторов.

Совершенствование дробильно-измельчающих машин развивается в направлении снижения энергоемкости процесса измельчения, что достигается использованием таких механизмов разрушения, при которых в измельчаемом материале формируется сложное напряженное состояние с упругими деформациями.

Достаточно широкое применение для измельчения получили шаровые мельницы, в которых реализуется сухое и мокрое измельчение. Преимуществами шаровых мельниц являются легкость регулировки и эксплуатации, возможность изменения режима измельчения, получение тонкого продукта при различной крупности питания. К недостаткам шаровых мельниц можно отнести высокую энергоемкость и высокий износ футеровок и мелющих шаров.

Конструктивная особенность планетарной мельницы состоит в том, что она имеет три или четыре барабана, которые вращаются вокруг центральной и собственных осей одновременно. Характер движения мелющей среды для планетарных мельниц с коротким водилом отличается от шаровых мельниц. При уменьшении длины водила планетарная мельница превращается в вибрационную мельницу. Для определения зависимости границ основных режимов загрузки в планетарно-центробежной мельнице с вертикальными осями от коэффициента загрузки используют математическую модель водопадного режима загрузки.

Более трех десятилетий работают вибромельницы, где высокая степень измельчения достигается за счет удара с истиранием, а вибрация позволяет вести процесс измельчения без сцепления частиц. Для высокопроизводительных вибромельниц перспективны режимы с большой амплитудой колебаний помольного барабана, которые описываются

моделью динамической обработки мелющей среды. На начальном этапе измельчения наиболее эффективной является максимальная скорость нагружения. Высокие скорости нагружения становятся неэффективными по затратам энергии на процесс. Если измельчение переходит в область частиц микронных размеров, предпочтительнее оказываются планетарно-центробежные мельницы с переменной структурой и управлением. Конструкция вибромашины должна допускать возможность изменения частоты и амплитуды вибрирующего органа в рабочем режиме.

Математическая модель вибромельницы базируется на дифференциальном уравнении вынужденных колебаний массы трубы с шарами, опирающейся на пружину и поршневой демпфер. Число оборотов мельницы является решающим фактором для определения производительности, расхода энергии и других технико-экономических показателей.

Заключение

1. Теоретически обоснованы новые технологические режимы измельчения, которые соответствуют повышенным угловым скоростям вращения барабана мельницы и пониженным значениям заполнения мельницы. Анализ показал, что удельный расход электроэнергии на тонину измельченного материала можно снизить в 1,5...2,0 раза за счет передачи энергии от внутренней поверхности барабана мельницы малоподвижному ядру через более тонкий слой сырья.

2. Мелющее тело в процессе движения испытывает последовательность соударений с футеровкой или мелющими телами; в промежутках между соударениями мелющие тела движутся под действием силы тяжести по параболическим траекториям; соударения представляются как мгновенные изменения скоростей. За критерий периодичности принята повторяемость контролируемых переменных.

3. Новое аналитическое направление рудоподготовки характеризуется как создание технологических схем, базирующихся на фазово-структурных свойствах сырья, параметров процессов раскрытия, концентрации и оборудования.

4. Модели массопереноса отличаются критерием результатов переработки сырья по грансоставу и доле вскрытых минералов. Математический метод описания схем обогащения позволяет разработать программу компьютерного выбора технологических схем. Метод получил название – фазово-структурный метод синтеза технологических схем.

Выводы

1. Многочисленность и эмпирический характер учитываемых факторов затрудняет решение задач дробления и измельчения минерального сырья.

2. В качестве критериев разрушения минералов целесообразно использовать критическое напряжение удара, скорость упругих волн и динамическую вязкость.

3. Параметры разрушения и размеры поверхностей раскола при хрупком разрушении горных пород в результате удара коррелятивно связаны.

4. Концепция рудоподготовки должна основываться на свойствах и возможности раскрытия минералов и возможностях оборудования.

5. Результаты исследования могут быть использованы при разработке месторождений твердых полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Земсков ЕП, Зайцев АИ, Васильев ВА и др. Теоретическое исследование процесса высокодисперсного ударного разрушения одиночной частицы. *Интенсивная механическая технология сыпучих материалов*. Иваново, 1990: 38-42. [Zemskov EP, Zaitsev AI, Vasiliev VA, et al. Theoretical investigation of the process of highly dispersed shock destruction of a single particle. *Intensive mechanical technology of bulk materials*. Ivanovo, 1990: 38-42. (In Russ.)].
2. Голик ВИ, Клюев РВ, Мартюшев НВ и др. Технология безотходной утилизации хвостов Мизурского горно-обогатительного комбината. *Металлург*. 2023; 66 (11-12): 1476-1480. [Golik VI, Klyuyev RV, Martyshev NV, et al. Technology of waste-free disposal of tailings of the Mizur mining and processing combine. *Metallurgist*. 2023; 66 (11-12): 1476-1480. (In Russ.)]. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
3. Бригада ВС, Голик ВИ, Клюев РВ и др. Повышение эффективности использования активированных хвостохранилищ при подземной добыче полезных ископаемых. *Металлург*. 2023; 67 (3-4). [Brigida VS, Golik VI, Klyuev RV, et al. Improving the efficiency of using activated tailings storage facilities in underground mining. *Metallurgist*. 2023; 67 (3-4) (In Russ.)]. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
4. Голик ВИ, Клюев РВ, Мартюшев НВ и др. Повторное использование и механохимическая переработка хвостов обогащения, используемых для извлечения Pb и Zn. *Материалы*. 2023; 16: 7004. [Golik VI, Klyuev RV, Martyshev NV, et al. Reuse and mechanochemical processing of enrichment tailings used to extract Pb and Zn. *Materials*. 2023; 16: 7004. (In Russ.)]. DOI: 10.3390/MA16217004.
5. Дмитрак ЮВ, Атрушкевич ВА, Кубрин СС и др. Определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022; 14, 3 (53): 468-478. [Dmitrak YuV, Atrushkevich VA, Kubrin SS, et al. Determination of the energy of shock pulses in the process of crushing rocks for mills of various types. *Sustainable development of mountain territories*. 2022. 14, 3 (53): 468-478. (In Russ.)].
6. Дмитрак ЮВ, Атрушкевич ВА, Адамова ЛС. Определение коэффициента демпфирования ударного импульса при измельчении горных пород. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022; 14, 4 (54): 702-710. [Dmitrak YuV, Atrushkevich VA, Adamova LS. Determination of the shock pulse damping coefficient during rock crushing. *Sustainable development of mountain territories*. 2022. 14, 4 (54): 702-710. (In Russ.)].
7. Рыбак Я, Хайрутдинов ММ, Конгар-Сюрюн ЧБ и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13, 3 (49): 405-415. [Rybak Ya, Khairutdinov MM, Kongar-Suryun ChB, et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountain territories*. 2021; 13, 3 (49): 405-415. (In Russ.)].
8. Hoek E, Brown ET. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019; 11 (3): 445-463.
9. Масленников СА. Оценка влияния температуры на скорость набора прочности бетоном. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010; 9: 309-312. [Maslennikov SA. Assessment of the influence of temperature on the rate of concrete strength gain. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and Technical journal)*. 2010; 9: 309-312. (In Russ.)].
10. Рыбак Ю, Горбатюк С, Буяновна-Сюрюн К и др. Утилизация минеральных отходов: способ расширения минерально-сырьевой базы горно-металлургического предприятия. *Металлург*. 2021; 64: 851-861. [Rybak Yu, Gorbatyuk S, Buyanovna-Syuryun K, et al. Utilization of mineral waste: a way to expand the mineral resource base of a mining and metallurgical enterprise. *Metallurgist*. 2021; 64: 851-861. (In Russ.)].
11. Bloodworth A, Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
12. Соколов ИВ, Антипин ЮГ, Никитин ИВ. Методология выбора подземной геотехнологии при гибридной добыче руды. Екатеринбург, 2021: 340. [Sokolov IV, Antipin YuG, Nikitin IV. Methodology of choosing underground geotechnology for hybrid ore mining. Yekaterinburg, 2021: 340. (In Russ.)].
13. Chen G, Chen J, Peng J. Effect of mechanical activation on structural and micro-wave absorbing characteristics of high titanium slag. *Powder Technology*. 2015; 286: 218-222. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.08.021.
14. Palaniandy S. Impact of mechanochemical effect on chalcopyrite leaching. *International Journal of Mineral Processing*. 2015; 136: 56-65.
15. Löföw J, Abrahamsson L, Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019; 36 (4): 701-707.
16. Ляшенко ВИ, Воробьев АЕ, Хоменко ОЕ и др. Экологическая и горнотехническая безопасность разработки месторождений в энергонарушенных горных массивах: проблемы и перспективы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021; 3 (113): 43-55. [Lyashenko VI, Vorobyov AE, Khomenko OE, et al. Environmental and mining safety of field development in energy-damaged mountain ranges: problems and prospects. *Surveying and Subsoil use*. 2021; 3 (113): 43-55. (In Russ.)].
17. Трофимов АВ, Киркин АП, Румянцев АЕ и др. Применение численного моделирования для определения оптимальных параметров метода полной разгрузки керна при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород. *Цветные металлы*. 2020; 12: 22-27. [Trofimov AV, Kirkin AP, Rumyantsev AE, et al. Application of numerical modeling to determine the optimal parameters of the method of complete core unloading when evaluating the stress-strain state of a rock mass. *Non-ferrous metals*. 2020; 12: 22-27. (In Russ.)]. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03.
18. Яицкая НА, Бригада ВС. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2022; 12 (1): 162-173. [Yaitskaya NA, Brigida VS. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoecological problems: spatial data interpolation. *Geography and geophysics of the South of Russia*. 2022. 12 (1): 162-173. (In Russ.)]. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.
19. Гембицкая ИМ, Гвоздецкая МВ. Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков. *Записки Горного института*. 2021; 249: 401-407. [Gembitskaya IM, Gvozdetskaya MV. Transformation of grains of technological raw materials in the production of fine powders. *Notes of the Mining Institute*. 2021; 249: 401-407. (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.
20. Каплунов ДР, Айнбиндер ИИ, Федотенко ВС и др. Технологии подземной добычи руды: современные вызовы, устойчивое развитие и переход к новой технологической парадигме. *Горный журнал*. 2021; 9: 4-11. [Kaplunov DR, Einbinder II, Fedotenko VS, et al. Technologies of underground ore mining: modern challenges, sustainable development and transition to a new technological paradigm. *Mining Journal*. 2021; 9: 4-11. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрак Юрий Витальевич –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник,
начальник отдела моделирования и управления
горнотехническими системами. Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем комплексного освоения недр им. академика
Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: dmitrak@yandex.ru

Владимир Иванович Голик –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник.
Геофизический институт Владикавказского научного
центра, г. Владикавказ, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Yuri V. Dmitrak –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the
Department of Modeling and Management of Mining Systems,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian
Federation, e-mail: dmitrak@yandex.ru

Vladimir I. Golik –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center, Vladikavkaz,
Russian Federation

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.08.2025.

Поступила после рецензирования: 14.08.2025.

Принята к публикации: 02.09.2025.

Article info

Received: 01.08.2025.

Revised: 14.08.2025.

Accepted: 02.09.2025.