

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## MINING

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

УДК 622.235:622.732.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14



## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ

Доможиров Д.В.

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

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). В статье предлагается концепция селективной подготовки минерального сырья путем управления параметрами буровзрывных работ с учетом требований к качеству на стадиях добычи и переработки. Требования к качеству подготовки к выемке рассматриваются с трех основных позиций: с точки зрения геометрии приемных отверстий, требований к качеству минерального сырья и видам товарной продукции и обеспечения безопасности ведения взрывных работ. Определены параметры буровзрывных работ на основе цикличности преобразования продуктов дезинтеграции в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке. В работе под *дезинтеграцией* понимается селективное разрушение (разупрочнение) массива (структурной отдельности) на отдельные частицы (фрагменты) или куски с сформированными контрастными структурными элементами раскрытия и разделения. **Цель работы.** Обоснование параметров буровзрывных работ для дезинтеграции минерального сырья с соблюдением принципа избирательного формирования контрастного структурного элемента раскрытия и разделения для каждого процесса подготовки открытой геотехнологии и обогатительного передела. **Используемые методы.** Использован комплексный подход, который позволил достичь поставленной цели. Комплексный подход в рамках исследования включает методы научного анализа опубликованных ранее отечественных и зарубежных исследований, анализ аналитических и эмпирических зависимостей на предмет сопоставления с результатами практических исследований. **Результат.** Предлагаемая концепция селективной подготовки позволяет повысить эффективность добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ.

**Ключевые слова:** минеральное сырье, подготовка, буровзрывные работы, дезинтеграция, текстура, структура, добыча, переработка, показатели качества

© Доможиров Д.В., 2023

### Для цитирования

Доможиров Д.В. К вопросу повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ для достижения требований к качеству // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14>



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

# ON THE ISSUE OF INCREASING EFFICIENCY OF MINING AND PROCESSING OF MINERAL RAW MATERIALS BY CONTROLLING THE PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS TO ACHIEVE QUALITY REQUIREMENTS

Domozhirov D.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The article proposes the concept of a selective preparation of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations, taking into account the quality requirements at the stages of extraction and processing. The requirements for the quality of the preparation for excavation are considered from three main positions: geometry of receiving openings, requirements for the quality of mineral raw materials and types of commercial products, and safety of blasting operations. The parameters of drilling and blasting operations are determined based on the cyclic transformation of disintegration products in the processes of preparation of mineral raw materials during extraction and processing. Disintegration is understood in this research as the selective destruction (softening) of an array (structural parting) into individual particles (fragments) or lumps with formed contrasting structural elements of exposure and separation. **Objectives.** The article is aimed at providing a rationale for the parameters of drilling and blasting operations used to disintegrate mineral raw materials in compliance with the principle of the selective formation of a contrasting structural element of exposure and separation for every process of the preparation of open geotechnology and the dressing stage. **Methods Applied.** An integrated approach was used to achieve this objective. Such integrated approach within the framework of the study includes methods of scientific analysis of published Russian and foreign studies, analysis of analytical and empirical dependencies for comparison with the results of practical research. **Result.** The proposed concept of the selective preparation contributes to increasing efficiency of extraction and processing of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations.

**Keywords:** mineral raw materials, preparation, drilling and blasting operations, disintegration, texture, structure, extraction, processing, quality parameters

## For citation

Domozhirov D.V. On the Issue of Increasing Efficiency of Mining and Processing of Mineral Raw Materials by Controlling the Parameters of Drilling and Blasting Operations to Achieve Quality Requirements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14>

## Введение

В современных условиях показатели качества процесса подготовки горных пород к выемке (выход негабарита, средний размер куска) определяются лишь геометризацией приемных емкостей горнотранспортного оборудования и приемных отверстий перерабатывающих комплексов. Подготовка минерального сырья на стадии переработки (дробление, разупрочнение и дезинтеграция) является наиболее энергоемким процессом и имеет низкие показателями полноты и комплексности освоения запасов. Это связано с недостаточностью проработки вопроса селективного разрушения (дезинтеграции) при подготовке минерального сырья на стадии добычи. Так, текстура (структура) полезного ископаемого, форма полезных компонентов, свойства минералов оказывают важное влияние на эффективность раскрытия поверхности минералов и всего обогатительного передела. Таким образом,

при организации комплексной переработки минерального и техногенного сырья с точки зрения рациональной подготовки полезного ископаемого не соблюдается традиционный подход технологов-обогатителей «не дробить и не обогащать ничего лишнего», что является следствием повышенной энергоемкости и неэффективного процесса подготовки для дальнейшего обогащения [1, 2]. Поэтому актуальным является необходимость применения на начальных стадиях добычи и переработки селективной подготовки минерального сырья.

В последнее десятилетие в теории и практике взрывного дела активно используется термин «дезинтеграция». В рамках данной научно-исследовательской работы под *дезинтеграцией* понимается селективное разрушение (разупрочнение) массива (структурной отдельности) на отдельные частицы (фрагменты) или куски с сформированными контрастными структурными элементами раскрытия и разделения.

Подготовка минерального сырья в современных условиях – это процесс, обеспечивающий селективную дезинтеграцию за счет формирования фрагментов (кусков) с контрастными структурными элементами раскрытия и разделения при добыче и переработке. То есть селективная дезинтеграция – это группирование структурных элементов разделения для следующего этапа дезинтеграции с учетом соответствующей техники (механизмов) и технологии. Такое последовательное группирование структурных элементов раскрытия и разделения на всех этапах подготовки при открытой геотехнологии и обогатительного передела позволяет комплексно осваивать минеральное сырье за счет расширения спектра горной продукции горного производства. Получаем, что для разной товарной продукции соответствующий состав и размеры структурных элементов. То есть определение параметров буровзрывных работ (БВР) в современных условиях предполагает цикличность преобразования продуктов дезинтеграции в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке (**рис. 1**).

Так, уровень иерархии I – это подготовка минерального сырья к выемке с помощью БВР (первый технологический процесс открытой геотехнологии), где формирование структурных элементов начинается с физико-механических свойств горной массы и текстурно-структурных характеристик массива и заканчивается с усреднением в группы по разрушаемому объему.

При увеличении числа товарных групп при дезинтеграции на стадиях добычи и переработки возрастает роль текстурно-структурных характеристик минерального сырья и отдельных минералов за счет уменьшения размеров отдельных фрагментов, что ведет к необходимости обоснования техники (механизмов) и режимов технологии дробления на всех этапах разрушения. Получаем, что подготовка при добыче и переработке минерального сырья – это цикличность последовательных преобразований контрастных структурных элементов раскрытия (массив со своей текстурой и структурой) в структурные элементы разделения (раздробленные куски, отдельные фрагменты), и далее структурные элементы разделения – это контрастные структурные элементы раскрытия следующего цикла и т.д. до всех видов товарной продукции (предконцентрационные продукты).

Таким образом, при сложной структуре минерального сырья и неравномерности физико-механических свойств подготовку полезного ископаемого к переработке следует начинать с начальной стадии дезинтеграции, то есть с процесса подготовки горной породы к выемке с помощью БВР.

В предлагаемой концепции качественная подготовка к выемке с помощью селективного разрушения (дезинтеграции) массива является основным направлением повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья.

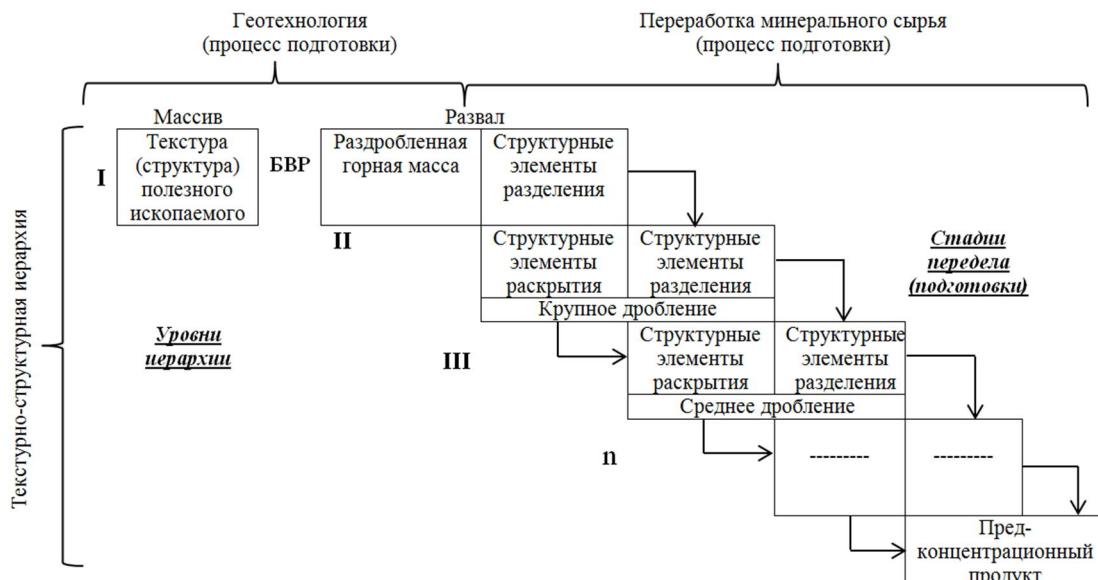


Рис. 1. Цикличность преобразования продуктов селективного разрушения (дезинтеграции) и иерархия в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке

Fig. 1. Cyclic transformation of products of the selective destruction (disintegration) and hierarchy in the processes of preparation of mineral raw materials during extraction and processing

## Методология исследования

В современных условиях буровзрывная подготовка пород к выемке при открытой геотехнологии является основным способом подготовки скальных и полускальных горных пород к выемке. Данный способ объемного высокоэнергетического воздействия на массив горной породы способствует возникновению и развитию макро- и микроразрушений до отдельностей от долей метра до долей миллиметра на всех текстурно-структурных уровнях иерархии. Энергоемкость взрывной подготовки в несколько раз ниже энергоемкости процессов дробления при переработке, несмотря на значительную разницу в стоимости электроэнергии и энергии химического превращения взрывчатых веществ [3, 4]. Получаем, что селективное разрушающее воздействие на стадии взрывной подготовки является актуальной задачей для оптимизации суммарных энергозатрат процессов подготовки и переработки минерального сырья.

Оптимизацией параметров БВР для достижения качественных показателей добычи минераль-

ного сырья и снижения энергоемкости процесса переработки занимались многие ученые XX и XXI веков [5-8]. Однако в данных исследованиях не в полной мере рассмотрена концепция комплексного освоения недр, где в основе заложены технологические принципы в совокупности с технико-экономическими моделями. При этом доказано, что БВР являются самым объемным и высокоэнергетическим воздействием на горный массив процесса подготовки к выемке, который способен снижать суммарную энергоемкость на всех последующих процессах дезинтеграции.

Предлагаемая концепция селективной подготовки минерального сырья при открытой геотехнологии с помощью БВР ставит задачу не только отделения от массива, выполнение геометрических условий, но и селективное разрушение (дезинтеграция) скального и полускального массива на заданные отдельные куски (грансостав определенных фракций) согласно текстурному (структурному) строению и требованиям к качеству (табл. 1).

Таблица 1. Корреляция показателей качества минерального сырья в процессах подготовки при добыче и переработке

Table 1. Correlation between the quality parameters of mineral raw materials in the preparation processes during extraction and processing

Показатели качества минерального сырья процесса подготовки к выемке (добыча)		Показатели качества минерального сырья на стадиях дробления и измельчения (переработка)								
		Рудные полезные ископаемые		Нерудные полезные ископаемые		Месторождения				
Ограничивающие условия	Показатели	Ограничивающие условия	Показатели	Ограничивающие условия	Показатели	Месторождения				
<u>Геометрические условия</u> (геометризация приемных емкостей горнотранспортного оборудования и отверстий перерабатывающих комплексов)	– кондиционный размер куска	– содержание полезного компонента – содержание вредных примесей – степень дробления – переизмельчение – гранулометрический состав	– содержание полезного компонента	Кондиции, товарная продукция (сортность)	– зольность	Угольные				
	– средний размер куска		– содержание вредных примесей		– лещадность	Строительного камня (щебень)				
	– выход негабарита		– степень дробления		– белизна	Белого мрамора				
	– переизмельчение		– переизмельчение		– вредные (кварцевые) включения					
	– степень дробления		– гранулометрический состав		– глинизация	Кровельных сланцев				
	– гранулометрический состав		– потери		– степень дробления					
	<u>Качественные условия</u> (отработка контактных зон сложно-структурных месторождений)		– Структурные элементы раскрытия и разделения		– переизмельчение	Для всех типов месторождения				
			– разубоживание		– гранулометрический состав					
			– выход продукта		– потери					
			– извлечение полезного компонента		– разубоживание					

Примечание. Области корреляции показателей качества минерального сырья в процессах подготовки при добыче и переработке:

- [] – геометрические условия (в большей степени для ОГР, чем для ОПИ);
- [] – геометрические условия (в большей степени для ОПИ, чем для ОГР);
- [] – качественные условия (технологические);
- [] – качественные условия (текстурно-структурные).

Идея исследования основывается на том, что текстурно-структурное строение горных пород связано с распределением разных видов минерального сырья (полезных компонентов и сортов) в объеме разрушающегося массива. БВР при объемном воздействии на массив вызывает дезинтеграцию на отдельные элементы (фрагменты) с некоторой укрупненной совокупностью объединяющих признаков в крупных кусках продуктов взрыва, таких как:

- сортность полезного ископаемого, содержание полезных компонентов (извлекаемых минералов) и их групп;
- содержание вредных включений (примесей) и их групп.

Основным фактором, влияющим на дезинтеграцию по слагающим текстурным блокам массива с различными акустическими жесткостями, является трещиноватость (блочность), а также механизмы динамической и волновой теории взрыва. Так, поршневое давление газообразных продуктов взрыва оказывает основное разрушающее действие в мелкотрещиноватых горных породах, а в средне- и крупноблочных породах разрушение происходит как за счет волн напряжений, распространяющихся от заряда в сторону свободной поверхности и во все стороны, так и за счет волны, отраженной от свободной поверхности [9-11].

Напряжения, генерируемые взрывом скважинного заряда, пропорциональны скорости смещения в рассматриваемых точках массива и акустической жесткости:

$$\sigma_{\text{сж(p)}} = \rho_0 C_p V_{\text{сж(p)}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{сж(p)}}$  – действующие сжимающие (растягивающие) напряжения, Па;  $\rho_0$  – удельная масса горной породы, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – скорость распространения продольной упругой волны в массиве (образце), м/с;  $V_{\text{сж(p)}}$  – скорость смещения массива при действии сжимающих (растягивающих) напряжений, м/с.

Критическая скорость смещения среды связана с действующим напряжением посредством следующей зависимости [12, 13]:

$$V_{\text{кр}}^{\text{сж(p)}} = \frac{\sigma_{\text{сж(p)}}}{\rho_0 C_p} K_d, \quad (2)$$

где  $K_d$  – коэффициент динамичности.

Условием селективного разрушения среды, отделение от массива и перемещения является равенство или превышение возникающих при взрывном нагружении массива скоростей смещения критическим значениям:

$$V_{\text{сж(p)}} \geq V_{\text{кр}}^{\text{сж(p)}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{сж(p)}}$  – скорость смещения среды при воздействии сжимающих (растягивающих) динамических напряжений, м/с;  $V_{\text{кр}}^{\text{сж(p)}}$  – минимальные (критические) значения скорости смещения массива, при которой происходит разрушение за счет сжимающих (растягивающих) напряжений, м/с.

Возникающие при взрыве скорости смещения массива в данной точке [14, 15] определяются как

$$V_{\text{сж(p)}} = k_v \bar{r}^{-v}, \quad (4)$$

где  $k_v$  – сейсмический коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих параметров разрушаемых горных пород [3],

$$k_v = \sqrt[3]{\frac{C_p}{9\rho_0} \left( \frac{1+\mu}{1-\mu} \right)^2} = \sqrt[3]{\frac{C_p}{\rho_0} \left( 1 - \frac{4C_p^2}{3C_p^2} \right)^2}, \quad (5)$$

$\mu$  – коэффициент Пуассона;  $v = 2,25$  – показатель степени;  $\bar{r}$  – эквивалентное приведенное расстояние, м/кг<sup>1/3</sup>.

Эквивалентное приведенное расстояние [4]

$$\bar{r} = \frac{r_n}{\sqrt[3]{Q_{\text{экв}}}}, \quad (6)$$

где  $r_n$  – расстояние от исследуемой точки до центра тяжести эквивалентного заряда, м;  $Q_{\text{экв}}$  – эквивалентная масса заряда, кг.

Получаем, что при подготовке горной породы к выемке путем БВР размеры текстурно-структурных отдельностей соизмеримы с длинами упругих волн, распространяющихся в неоднородных и трещиноватых минеральных средах. Поэтому при проявлении резонансных явлений в отдельностях структурной неоднородности соответствующего масштаба механизм разрушения волновой теории является основным, способным усилить эффект селективной дезинтеграции массива. Таким образом, согласно волновой теории взрывного разрушения в массиве создается сгене-

рированная упругая волна различной длины, регулированная параметрами взрывного импульса и в целом буровзрывными работами:

- масса заряда взрывчатых веществ;
- типы взрывчатых веществ и конструкция их зарядов;
- геометрия сетки скважин;
- номиналы интервалов замедления и число ступеней замедления.

То есть в результате взрывного воздействия на массив возможно получить гранулометрический состав с фракциями кусков не в виде хаотичного распределения групп, а с размерами ряда, соответствующего текстурно-структурным неоднородностям в массиве для последующей переработки.

Таким образом, селективное разрушение (дезинтеграция) при БВР – это не только качественный процесс отделения от массива, но и управление качеством минерального сырья и энергозатратами на стадиях добычи и переработки путем формирования текстурных элементов разделения, пригодных для первичной стадии переработки минерального сырья по требуемым характеристикам (признакам) качества.

Так, на первой стадии подготовки полезного ископаемого к выемке из взорванной горной массы выделяются куски или так называемые текстурно-структурные блоки размером от 500 мм и ниже с селективно сконцентрированными разделительными характеристиками (признаками). БВР кроме разупрочнения массива параллельно решают задачу увеличения микротрещин (микронарушений), то есть дополнительного избирательного разупрочнения уже среди минеральных групп на более низком структурном уровне, что позволяет снизить энергоемкость последующих стадий переработки – мелкого дробления и измельчения.

Современные подходы и методики в теории и практике БВР позволяют оценивать макро-свойства горных пород (трещиноватость), описывать и идентифицировать неоднородность как в массиве, так и в развале и имеют все предпосылки для селективной добычи и переработки минерального сырья. А современные геологические и геомеханические модели массива позволяют определять дополненные параметры неоднородности по текстурным характеристикам распределения минералов и минеральных комплексов по различным структурным элементам неоднородности и их физико-механическим свойствам. Таким образом, совершенствование технологии и определение рациональных параметров БВР по критерию текстурно-структурной неоднородности является основной задачей се-

лективного разрушения (дезинтеграции) по текстурным характеристикам с генерацией микротрещин на структурном уровне.

Для многосортовых (многокомпонентных) полезных ископаемых предлагаемый подход позволяет уже на стадии подготовки с помощью БВР получать задаваемую совокупность продуктов, пригодных для формирования разных концентрированно-усредненных в пределах разделяемых кусков горной массы по сортам, содержанию извлекаемых полезных компонентов, минералов и минеральных комплексов. Данный подход реализуем также и для однокомпонентных месторождений, то есть с однородной текстурой и структурой. При этом это может быть макроструктурная текстурная неоднородность в массиве за счет вредных примесей и включений [16], которая во многом определяет качественные свойства сортов полезного ископаемого и является фактором селективной подготовки минерального сырья на этапе БВР. Так, текстурно-структурные характеристики полезного ископаемого, влияющие на процесс обогатительного передела, являются критерием селективного выделения их в массиве при взрывной подготовке. При этом оптимизация энергоемкости процессов дальнейшей дезинтеграции должна осуществляться по эффективным режимам дробления и измельчения в зависимости от селективно отобранных групп с соответствующими характеристиками.

Таким образом, селективную подготовку полезного ископаемого необходимо рассматривать как иерархию структур и процессов разрушения при добыче и переработке, где БВР имеют более высокий масштабный уровень (см. **рис. 1**). То есть селективная подготовка полезного ископаемого рассматривается как совокупность технологий добычи и переработки минерального сырья с учетом стадийности селективной дезинтеграции по широкому спектру разделительных характеристик (текстурным, структурным и физико-механическим свойствам), формирующих различные группы горной массы на всех стадиях, начиная с БВР. Поэтому на этапе проектной документации для определения рациональных параметров БВР необходимо выполнять районирование карьерного поля по геологическим данным (свойства и характеристики залегания полезного ископаемого).

Селективное разрушение при добыче и переработке необходимо рассматривать не только с технологической точки зрения, но и с технико-экономической, с увязкой буровзрывной подготовки в единую экономическую модель перес-

пределения затрат (материальных, трудовых, энергетических, финансовых и организационных), предполагающую широкий спектр товарной продукции. При этом повышение затрат на качественное проведение БВР ведет к снижению затрат на дальнейших переделах дезинтеграции и, как следствие, к повышению экономической эффективности переработки минерального сырья. Данная модель совокупности всего цикла переработки полезного ископаемого позволит перераспределить ресурсы по различным переделам и создать оптимальную технологию добычи и переработки по технико-экономическим критериям. Математическая запись предлагаемой модели с целевой функцией и системой ограничений имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}_{\text{подр}} = f(\Phi M, K, T, C_{\text{комп}}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Phi M = f(\text{трещиноватость, крепость}); \\ K = f(\text{текстура (структура), содержание (п.к., примеси), потери, засорение}); \\ T = f(\text{БВР, МП(ОГР), МП(ОПИ)}); \\ C_{\text{комп}} = f(\text{продукция, сортность, цена}). \end{cases}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{подр}}$  – эффект за счет селективной подготовки минерального сырья;  $\Phi M$  – физико-механические свойства горных пород (трещиноватость и блочность, крепость) в массиве, определяющие вид товарной продукции минерального сырья;  $T$  – технология подготовки минерального сырья при добыче и переработке; БВР – буро-взрывная подготовка к выемке минерального сырья; МП(ОГР) – механическая подготовка минерального сырья при открытой геотехнологии; МП(ОПИ) – механическая подготовка минерального сырья при обогатительном переделе;  $C_{\text{комп}}$  – совокупная ценность товарной продукции.

Для определения суммарной ценности всех видов товарной продукции предложена методика расчета, основанная на интегрировании видов (сортов) товарной продукции минерального сырья и фракционности щебня (вмещающие породы), поступающего на переработку:

$$C_{\text{комп}} = V_m \sum_{i=1}^{n=i} \left( \Delta_i \Pi_i + \Delta_j \Pi_j \right), \quad (8)$$

$$\text{при этом } \left( \sum_{i=1}^m \Delta_i + \sum_{j=1}^n \Delta_j \right) \leq 1, \quad (9)$$

$$1 - \left( \sum_{i=1}^m \Delta_i + \sum_{j=1}^n \Delta_j \right) = \Pi, \quad (10)$$

где  $V_m$  – балансовые запасы, т ( $m^3$ );  $\Delta_i$  – доля объема  $i$ -го вида (сорта) товарной продукции;  $\Pi_i$  – стоимость единицы  $i$ -го вида (сорта) товарной продукции;  $\Delta_j$  – доля объема  $j$ -го фракционного состава в общем объеме вмещающих пород;  $\Pi_j$  – стоимость единицы  $j$ -й фракции, руб./т( $m^3$ );  $n$  – число фракций в объеме вмещающих пород;  $\Pi$  – потери, доли ед.

Процедура выбора технологии подготовки минерального сырья при добыче и переработке выполняется с учетом минимальных удельных затрат:

$$\begin{aligned} Z_y = & (Z_{\text{БВР}} + Z_{\text{МП(ОГР)}} + Z_{\text{В-П}} + \\ & + Z_{\text{тр-т}} + Z_{\text{МП(ОПИ)}}) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $Z_{\text{БВР}}$  – удельные затраты при технологии подготовки минерального сырья к выемке с использованием БВР, руб./т( $m^3$ );  $Z_{\text{МП(ОГР)}}$  – удельные затраты при технологии механической подготовки минерального сырья к выемке, руб./т( $m^3$ );  $Z_{\text{В-П}}$  – удельные затраты при выемочно-погрузочных работах, руб./т( $m^3$ );  $Z_{\text{тр-т}}$  – удельные затраты на транспортирование (логистика), руб./т( $m^3$ );  $Z_{\text{МП(ОПИ)}}$  – удельные затраты на стадии технологии подготовки при переработке минерального сырья, руб./т( $m^3$ ).

### Полученные результаты и их обсуждение

Таким образом, в настоящее время все виды минерального сырья, обладающие потребительской ценностью, имеют соответствующие технологии и технико-экономические модели их добычи и переработки, что соответствует современному варианту комплексной отработки месторождения, когда вмещающие породы и низкосортное сырье являются основой для производства материалов дорожной и строительной отрасли и это дополняет важность развития системы рационального недропользования в России. В связи с этим селективная подготовка при добыче и переработке минерального сырья с точки зрения селективной дезинтеграции на всех стадиях передала – это один из основных аспектов использования его в качестве инструмента рационального и комплексного недропользования. Дезинтеграция минерального сырья в процессах подготовки при добыче и переработке (рис. 2) состоит в следующем:

- на первом уровне текстурно-структурной иерархии дезинтеграции массива горной породы определяются рациональные параметры БВР, в результате которых в грансоставе разрушенной горной массы выделяются различные группы, сконцентрированные по сортам и минеральным комплексам крупностью до 500 мм (селективными параметрами структурных элементов разделения);
- из продуктов стадии буровзрывной подготовки для каждой сконцентрированной группы выбирается технология подготовки при переработке, определяется режим дезинтеграции в соответствии с их индивидуальными текстурно-структурными характеристиками;
- на втором уровне из продуктов первичной дезинтеграции (БВР) формируются вторичные группы с более высоким уровнем концентрирования извлекаемых полезных компонентов, минералов или минеральных комплексов, а также сор-

тов полезного ископаемого, которые являются новой совокупностью структурных элементов раскрытия на следующих стадиях дезинтеграции;

- на каждом последующем уровне формируются группы с меньшей дисперсией параметров структуры и разделительных признаков, своя технология и устройства подготовки, режим дезинтеграции в зависимости от структуры элемента раскрытия и соотношения физико-механических свойств слагающих минералов и сортов полезного ископаемого;
- цикличность процедур подготовки на стадии обогатительного передела до заданного спектра товарной продукции определяется качеством селективной подготовки на стадии добычи, то есть на первом уровне текстурно-структурной иерархии дезинтеграции за счет определения технологии и рациональных параметров БВР.

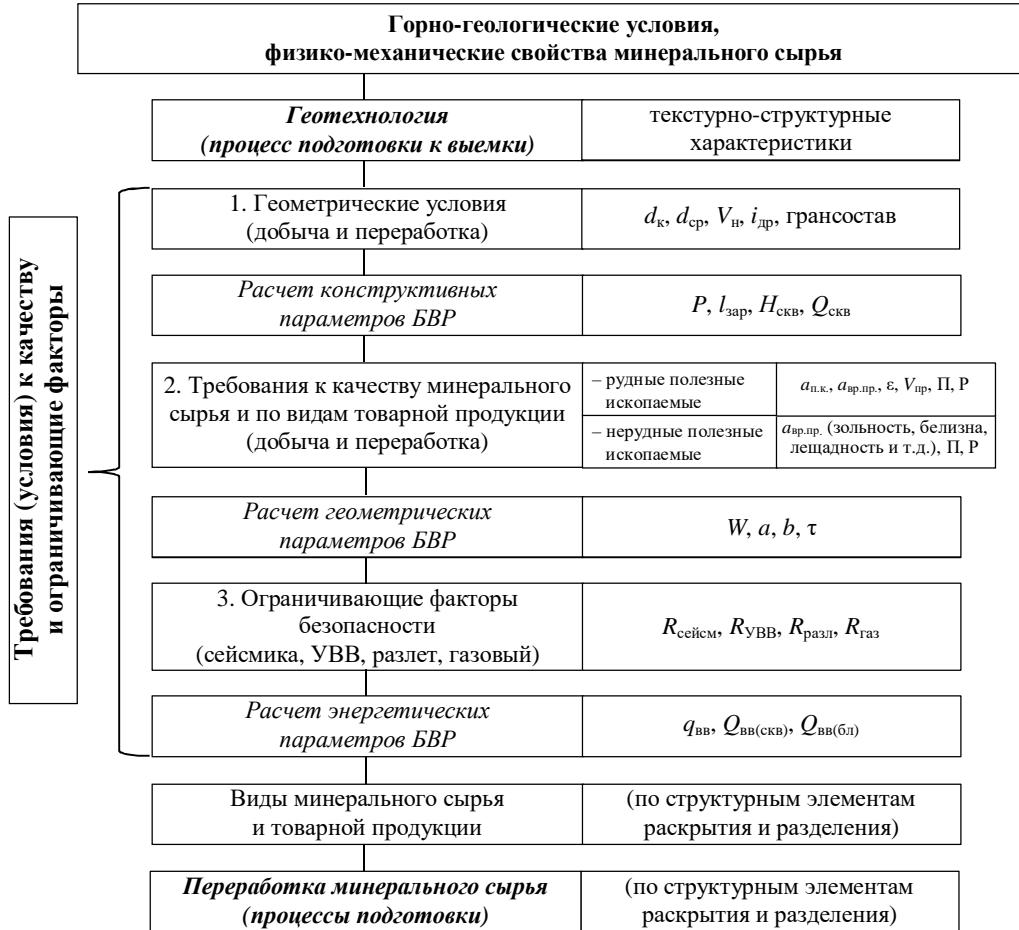


Рис. 2. Методика селективного разрушения (дезинтеграции) в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке за счет управления параметрами буровзрывных работ при достижении требований к качеству

Fig. 2. The method of the selective destruction (disintegration) in the processes of the preparation of mineral raw materials during extraction and processing by controlling the parameters of drilling and blasting operations, while achieving quality requirements

## Заключение

Таким образом, предлагаемая концепция селективной подготовки минерального сырья позволяет повысить эффективность добычи и переработки за счет обоснования рациональных параметров БВР, формирующих минеральные комплексы с заданной крупностью и селективными параметрами (признаками) структурных элементов разделения (по текстурно-структурным и физико-механическим характеристикам) в совокупность ценных товарных продуктов для выбора технологических схем, оборудования и режимов на следующих стадиях дезинтеграции.

## Список источников

1. Хопунов Э.А. Новые аспекты избирательного разрушения минерального сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 6. С. 130-138.
2. Козин В.З. Безотходные технологии горного производства // Известия вузов. Горный журнал. 2001. № 4/5. С. 169-190.
3. Обеспечение высокого качества взрывной подготовки пород к выемке при открытом способе добычи в сложных горно-геологических условиях и существенном росте масштабов работ / Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Угольников Н.В., Прохоров А.А., Пронин В.В. // Маркшейдерский вестник. 2021. № 5-6 (144-145). С. 116-121.
4. Способ повышения качества подготовки пород к выемке при использовании эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах с высокими уступами / Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Швабенланд Е.Е., Прохоров А.А., Пронин В.В. // Маркшейдерский вестник. 2021. № 6 (145). С. 62-67.
5. Маляров И.П. Энергоемкость процессов разрушения горных пород при взрывании и механическом дроблении в горно-обогатительном производстве: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.11, 05.15.03 / АН СССР. Институт угля. Кемерово, 1990. 46 с.
6. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986.
7. Падуков В.А., Маляров И.П. Механика разрушения горных пород при взрыве. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1985. 128 с.
8. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ: учебник для вузов. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. 2-е изд., стер. М.: Горная книга, 2009. 471 с.
9. Improving the production technology of drilling and blasting operations by blasting of high ledges / N.V. Ugolnikov, D.V. Domozhirov, N.G. Karaulov, A.A. Prochorov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 15, Nizhny Tagil, 18-19 июня 2020 года. Nizhny Tagil, 2020. P. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012022. EDN QXPNUD.
10. Угольников Н.В., Доможиров Д.В. Обоснование рациональных параметров расположения парно-ближенных скважин на карьерах нерудных строительных материалов // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: сб. ст. по результатам Международной конференции. Магнитогорск, 2019. С. 361-369.
11. Повышение качества дробления и оптимизация параметров буровзрывных работ при применении эмульсионных ВВ и высокоуступной технологии добычи на рудных месторождениях / Доможиров Д.В., Пыталев И.А., Носов И.И., Носов В.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S36. С. 35-42.
12. Пергамент В.Х. Учёт пространственной рассредоточенности заряда ВВ в задачах взрывного дела // Инженерные методы управления действием взрыва: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1971. Вып. 89. С. 3-14.
13. Пергамент В.Х. Критические скорости и параметры буровзрывных работ // Инженерные методы управления действием взрыва: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1971. Вып. 89. С. 40-48.
14. Pergament V., Malarov I., Firstov P., Gitterman Y. Experimental evaluation of near-source seismic effects of quarry blasts // XXVI General Assambley of the Evropen Seismological Commission (ESC). TEL AVIV, 1998, p. 29.
15. Pergament V., Melnikov Iv., Suraev V., Melnikov I., Vassiliev K., Kotik M., Shevtsov N. Ensuring seismic safety of the explosive works and evaluation of the consequences related to technogenic and natural seismic events // Minno delo i Geologia. Bulgaria, 1000 Sofia. 2014, no. 1-2, pp. 57-63.
16. Прохоров А.А. Обоснование параметров открытой геотехнологии для комплексного освоения месторождений белого мрамора: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2022. 22 с.

## References

1. Khopunov E.A. New aspects of the selective destruction of mineral raw materials. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2013;(6):130-138. (In Russ.)
2. Kozin V.Z. Waste-free mining technologies. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2001;(4/5):169-190. (In Russ.)
3. Pytalev I.A., Domozhirov D.V., Ugolnikov N.V., Prokhorov A.A., Pronin V.V. Ensuring a high quality of the blasting preparation of rocks for excavation with an open mining method in difficult mining and geological conditions and a significant increase in the scale of operations. *Marksheiderski vestnik* [Mine Surveying Bulletin]. 2021;(5-6(144-145)):116-121. (In Russ.)
4. Pytalev I.A., Domozhirov D.V., Shvabenland E.E., Prokhorov A.A., Pronin V.V. Method of improving

- the quality of the preparation of rocks for excavation when using emulsion explosives in quarries with high ledges. *Marksheiderski vestnik* [Mine Surveying Bulletin]. 2021;(6(145)):62-67. (In Russ.)
5. Malyarov I.P. Energy intensity of the rock destruction processes during blasting and mechanical crushing in mining and processing: abstract of the thesis of doctor of engineering sciences. Kemerovo: The USSR Academy of Sciences. Coal Institute; 1990. 46 p. (In Russ.)
6. Tangaev I.A. Energy intensity of mining and processing of minerals. Moscow: Nedra, 1986. (In Russ.)
7. Padukov V.A., Malyarov I.P. Mechanics of rock destruction during explosion. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State University; 1985. 128 p. (In Russ.)
8. Kutuzov B.N. Methods of blasting operations: university textbook. Part 1. Destruction of rocks by blasting. Moscow: Gornaya kniga; 2009. 471 p. (In Russ.)
9. Ugonikov N.V., Domozhirov D.V., Karaulov N.G., Prokhorov A.A. Improving the production technology of drilling and blasting operations by blasting of high ledges. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 15, Nizhny Tagil, 18-19 June 2020. Nizhny Tagil;2020:012022. DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012022.
10. Ugonikov N.V., Domozhirov D.V. Providing a rationale for reasonable parameters of the location of paired-contiguous wells in quarries of non-metallic building materials. Combined Geotechnology: Transition to a New Technological Paradigm. Collection of articles of the International Conference. Magnitogorsk; 2019;361-369. (In Russ.)
11. Domozhirov D.V., Pytalev I.A., Nosov I.I., Nosov V.I. Improving the quality of crushing and optimizing the parameters of drilling and blasting operations when using emulsion explosives and high-ledge mining technology at ore deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2016;(S36):35-42. (In Russ.)
12. Pergament V.Kh. Factoring into the spatial dispersion of the explosive charge in blasting. Engineering methods of explosion control: proceedings. Magnitogorsk: Magnitogorsk Institute of Mining and Metallurgy; 1971;(89):3-14. (In Russ.)
13. Pergament V.Kh. Critical speeds and parameters of drilling and blasting operations. Engineering methods of explosion control: proceedings. Magnitogorsk: Magnitogorsk Institute of Mining and Metallurgy; 1971;(89):40-48. (In Russ.)
14. Pergament V., Malarov I., Firstov P., Gitterman Y. Experimental evaluation of near-source seismic effects of quarry blasts. The 26<sup>th</sup> General Assembly of the European Seismological Commission (ESC). Tel Aviv; 1998;29.
15. Pergament V., Melnikov Iv., Suraev V., Melnikov I., Vassiliev K., Kotik M., Shevtsov N. Ensuring seismic safety of the explosive works and evaluation of the consequences related to technogenic and natural seismic events. Minno delo i Geologia. Bulgaria, Sofia; 2014;(1-2):57-63.
16. Prokhorov A.A. Providing a rationale for parameters of open geotechnology for integrated development of white marble deposits: abstract of the thesis of PhD in engineering sciences. Magnitogorsk; 2022. 22 p. (In Russ.)

Поступила 01.03.2023; принята к публикации 15.03.2023; опубликована 27.03.2023  
Submitted 01/03/2023; revised 15/03/2023; published 27/03/2023

**Доможиров Дмитрий Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: dvd1975@mail.ru. ORCID 0000-0001-9904-5820

**Dmitry V. Domozhirov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
E-mail: dvd1975@mail.ru. ORCID 0000-0001-9904-5820