

К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород

А.В. Дремин¹, В.С. Великанов^{1,2}✉

¹ ООО «ДАВТЕХ», г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ v.s.velikanov@urfu.ru

Резюме: Снижение содержания полезного компонента в руде и увеличение глубины карьеров обуславливают необходимость разработки эффективных решений процесса взаимодействия в рамках концепции «mine-to-mill», которые должны быть адаптированы под каждое конкретное горное предприятие и позволят оптимизировать производственные затраты. Целью исследования явилась разработка методологического подхода оценки гранулометрического состава материала в системе взаимодействия «рудник – фабрика». В исследовании использовался комплексный подход, который включает научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований. Методологическую основу исследований составляют методы системного анализа, а также использование информационных технологий. Сделан вывод, что необходимы создание и реализация математического аппарата, который позволил бы формализовать характер статистических данных по гранулометрическому составу. Решение данной задачи имеет исключительную важность, так как большинство данных имеют различный формат представления для получения временного ряда, описывающего динамику процесса с течением времени. Перспективным авторы видят использование предиктивной аналитики – инструмента для анализа статистически значимых и объективных данных, который помогает строить точные прогнозы для принятия решений.

Ключевые слова: полезное ископаемое, гранулометрический состав, открытый способ добычи

Для цитирования: Дремин А.В., Великанов В.С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород. *Горная промышленность*. 2023;(4):73–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>

Regarding the particle-size composition of blasted rocks

A.V. Dremin¹, V.S. Velikanov^{1,2}✉

¹ DAVTECH LLC, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ v.s.velikanov@urfu.ru

Abstract: Decreasing ore grades combined with increasing pit depths call for the development of solutions to ensure efficient interaction within the mine-to-mill concept, which should be adapted to each specific mining operation and will optimize the production costs. The aim of the study was to develop a methodological approach to assess the particle size distribution of material within the mine-to-mill process. The study applied a comprehensive approach, which includes scientific analysis and generalization of previously published research results. From the methodological point of view, the study was based on the system analysis methods, as well as on the use of information technologies. A conclusion is made that a mathematical apparatus needs to be created and implemented, which would allow formalizing the nature of statistical data on the particle size distribution. The solution of this problem is extremely important to obtain a time series describing the dynamics of the process over time, since most of the data have a different format of representation. The authors believe that a promising approach is to use predictive analytics, i.e. a tool for analyzing statistically significant and objective data, which helps to make accurate forecasts for decision-making.

Keywords: useful mineral, particle size distribution, open pit mining

For citation: Dremin A.V., Velikanov V.S. Regarding the particle-size composition of blasted rocks. *Russian Mining Industry*. 2023;(4):73–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>

Введение

Данная публикация открывает цикл работ, посвященных исследованиям гранулометрического состава взорванных скальных пород. На протяжении столетий человечество осуществляет добычу и переработку минерально-сырьевых ресурсов, причем наиболее распространенный способ извлечения горных пород, это открытый способ. Удельный вес открытых горных работ в общем объеме добычи по-

лезных ископаемых, по оценкам экспертов, составляет в мире 72–73%, в США – 83%, в Российской Федерации (РФ) и странах СНГ – порядка 70%. Современное состояние открытой добычи полезных ископаемых на данном этапе развития открытой геотехнологии характеризуется увеличением глубины карьеров, повышением коэффициента вскрыши и чаще всего снижением содержания полезных компонентов. Необходимо заметить, что общая глубина

многих крупных карьеров превышает 200 м, в то время как проектная глубина разработок часто достигает и 700–1000 м [1]. Очевиден и тот факт, что влияние научно-технического прогресса определяет стремительное развитие техники и современных технологий во всех технологических процессах добычи и переработки полезных минералов. Горнодобывающее оборудование становится все более мощным и производительным, меняются принципы и подходы в управлении сложной техникой, причем перспектива использования безлюдных горных технологий не так уж призрачна. Достаточно обратиться к следующим статистическим данным: к 01.05.2022 г. количество беспилотных карьерных самосвалов, находящихся в эксплуатации во всем мире, составляло 1068 ед. (01.05.2021 г. – 769), прирост на 39%, к концу 2025 г. эта цифра превысит 1800 единиц [2].

Известно, что основная задача горного производства – оптимизировать всю технологическую цепочку этапов добычи и переработки полезных ископаемых, при этом в рамках решения задачи необходимо рассматривать каждый технологический процесс как отдельно, так и в комплексе [3]. Зарубежные исследователи процесс оптимизации добычи и дальнейшей переработки характеризуют как «mine-to-mill» (M2M). «Mine-to-Mill», как следует из названия, представляет собой целостный подход к добыче и переработке полезных ископаемых. В трактовке компании Motion Metrics – это подход к минимизации энергетических и эксплуатационных затрат при переработке полезного ископаемого с учетом оптимизации всех стадий процесса измельчения. Так, например, в работе [3] отмечается, что оптимизация «от рудника к фабрике» успешно применяется при добыче твердых полезных ископаемых, а именно золота, меди и свинца/цинка и других полезных минералов, увеличивает пропускную способность от 5 до 18% и снижает затраты на 10%. Исследования консалтинговой компании Esen Mining Consulting под руководством S. Esen [4–6], Hatch и Metso PTI под руководством W. Valery et al. [7–9] показали следующие результаты по оптимизации процессов золотодобывающего предприятия в рамках концепции M2M: снижение на 7–22% общих затрат на бурение и взрывание; увеличение на 10–30% производительности дробильно-сортировочного комплекса; снижению на 17–31% себестоимости тонны руды. Таким образом, реализация стратегии M2M в условиях российских горнодобывающих предприятий определит не только конкурентное технологическое преимущество, но и обеспечит им минимизацию себестоимости на каждой производственной технологической операции (рис. 1).

Буровзрывные работы (БВР) – это основа горного передела. БВР на карьерах проводятся с целью отбойки и дробления горной массы до требуемой кусковатости. Качество выполнения БВР определяет затраты на механическое дробление и измельчение, которые, как известно, являются наиболее энергозатратными операциями горно-обогатительного производства. Высказывание производителей «не дробить ничего лишнего» определяет в итоге основные подходы в комплектовании не только комплекса технологического оборудования обогатительной фабрики, но и научно обоснованных решений в области буровзрывных работ в целом. Качество дробления горной массы в условиях открытых разработок до сих пор оценивается экспертным путем, в терминах и подходах нечеткой логики. Нередко на производстве можно услышать: «хорошо раздроблено», «плохо раздроблено», «нормальный развал»

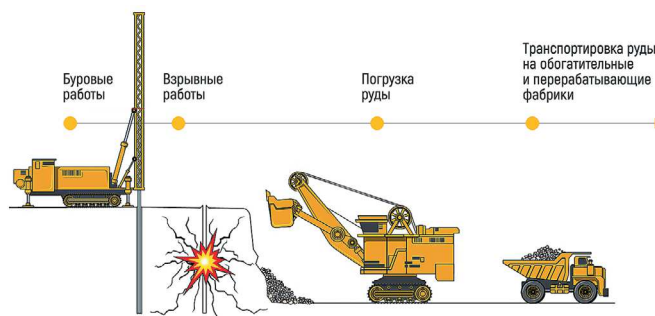


Рис. 1
Этапы добычи полезных минералов

Fig. 1
Stages of the mineral mining process

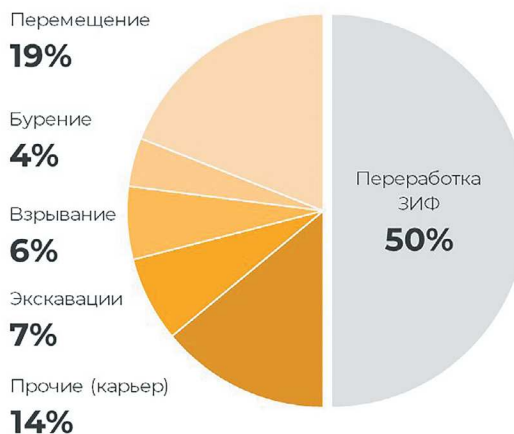


Рис. 2
Удельные затраты по основным технологическим операциям в системе «рудник – фабрика» на 1 м³ рудной массы
Источник: [3]

Fig. 2
Specific costs of the main technological operations in the 'mine-to-mill' system per 1 m³ of mined ore
Source: [3]

и им подобными, или выход негабарита, обмер которого также осуществляют на месте, либо вообще косвенным способом – установлением количества средств взрывания на вторичное дробление.

Максимальный линейный размер кусков пород в развале редко превышает 1,4 м, их с шагом 0,2 м обычно подразделяют на 7 классов. К первому классу относят куски размером до 0,2 м, ко второму – 0,21–0,4 м, к третьему – 0,41–0,6 м и т. д. до седьмого класса, к которому относят куски размером более 1,21 м [10; 11].

В настоящее время усредненная доля затрат для горнодобывающих предприятий РФ, приходящихся на отбойку горной массы, в зависимости от крепости горных пород находится в пределах 20–35%, причем каждое предприятие устанавливает свои собственные требования к кондиционному куску и, как следствие, к размеру негабарита. На эту величину оказывают влияние следующие факторы: тип применяемого горного и дробильного оборудования (по габаритам технологического оборудования), используемое ВВ, тип и физико-механические свойства полезного ископаемого и т.д. Так, например, в работе [12] доказано изменение производительности от размера куска в забое. Установлено, что при увеличении доли фракций 0–200 мм в два раза производительность драглайна увеличивается в три раза, также в три раза производительность снижается

при увеличении доли фракций 401–800 мм в 5 раз и фракций 301–400 мм в 1,4 раза. Данное обстоятельство характерно и для подземной добычи полезных ископаемых, так, в исследованиях [13] установлено влияние выхода негабаритов на производительность погрузочно-доставочных машин (ПДМ) на подземных рудниках Норильского промышленного района. Определено, что в диапазоне 0–10% выхода негабаритов относительная производительность ПДМ снижается в среднем на 0,35% на один процент выхода негабаритов, а в диапазоне 15–20% выхода негабаритов относительная производительность ПДМ снижается в среднем на 0,64% на каждый процент выхода негабаритов.

Материалы и методы

Наиболее полной характеристикой качества дробления горных пород взрывом является гранулометрический состав раздробленной породы. Острой необходимости погружения в теорию взрыва и свойств горных пород в массиве в рамках данной публикации нет, решению этих исследовательских вопросов посвящено много научных работ. Большой вклад в теорию и практику взрывных работ внесли: Н.В. Мельников, К.Н. Трубецкой, Г.П. Демидюк, В.В. Ржевский, В.В. Адушкин, М.А. Садовский, М.А. Лаврентьев, Е.И. Шемякин, С.Д. Викторов, Н.Н. Казаков, В.Л. Барон, В.М. Закалинский, В.Н. Родионов, Б.Н. Кутузов, В.А. Белин, Г.М. Крюков, С.К. Мангуш и другие видные ученые. Большой вклад в разработку компьютерных технологий для описания процессов воздействия взрыва на горные породы внесли: С.Д. Викторов, Н.Н. Казаков, С.В. Лукичев, В.Л. Барон, С.В. Копылов, М.Г. Горбонос и другие исследователи.

Существует достаточное количество методов измерения гранулометрического состава после взрыва. Общеизвестны следующие: ситовый анализ; поштучный обмер (учет); планиметрический (фотопланиметрический), линейный (фотолинейный) и точечный. Наиболее предпочтительным является метод, основанный на компьютерной обработке группы фотопланграмм, разработанный в УРАН ИПКОН РАН под руководством С.Д. Викторова [14]. Некоторыми авторами для оценки качества взорванной горной массы используется всем известная модель распределения гранулометрического состава кусков горной породы Kuz-Ram одноименных авторов Кузнецова и Розин-Рамблера [15]. Другие авторы пытаются дать прогноз грансостава взорванной горной массы на основе использования нейронных сетей. Для определения внутренней структуры развала пород предлагается использование тензорного исчисления [15].

В работах [15; 16] были определены два направления. Первое – это исследования по оптимизации и автоматизации определения гранулометрического состава взорванных пород по их снимкам на месторождениях. Второе – прогнозирование гранулометрического состава исходя из условий и параметров БВР. В обоих случаях используются разные подходы от регрессионного анализа до нейронных сетей.

Анализ большого объема научно-технической литературы показал, что актуальность рассматриваемого вопроса несомненна, объем научных публикаций отечественных и зарубежных исследователей увеличивается ежегодно, причем в зависимости от конкретной научной школы специфичны и подходы в реализации методов и методик исследования грансостава. Однако к настоящему времени можно констатировать следующее: «Нет единого общепризнанного представления о физическом процессе формирования развала горной массы при взрывании скважин-

ных зарядов на карьерах. Предпринимавшиеся попытки теоретического решения этой задачи в увязке со сложной проблемой дробления горных пород взрывом не привели к разработке пригодных для практики расчетных методов прогнозирования параметров развала» [17; 18].

Процесс цифровизации активно реализуется и на горнодобывающих предприятиях. Внедрение передовых цифровых и информационных технологий в систему работы предприятий горной промышленности обеспечивает переход к непрерывному мониторингу производственных процессов, позволяет повысить уровень безопасности выполнения горных работ, способствует более оптимальному использованию ресурсов и увеличивает конкурентоспособность компаний. Все это вносит значительные изменения в методы работы и процессы управления предприятиями, а также создает хорошие условия для внедрения инноваций [19]. Вводятся в эксплуатацию современные интеллектуальные системы, направленные на комплексную автоматизацию технологических процессов в системе взаимодействия «от рудника к фабрике». Рынок программных продуктов начал активно формироваться более 40 лет назад, применяются горно-геологические информационные системы, представляющие из себя многофункциональное программное обеспечение, направленное на решение задач автоматизированного проектирования (CAD), автоматизированного производства (CAM) и автоматизированной разработки или конструирования (CAE) в горном деле, например, Geomix, K-Mine, Micromine, Mineframe, Vulcan, Datamine и множество других разработок [14]. Например, используя данные аэрофотосъемки с БПЛА: по снимку развала в Agisoft Metashape можно точно измерить параметры одного куска, а затем произвести обработку для остальных кусков в специализированных программах, таких как WipFrag, PowerSieve и др.

Из числа российских разработок, обеспечивающих решение отдельных геологических, маркшейдерских и технологических задач, можно отметить: систему «Геомарк», предназначенную для решения широкого круга задач применительно к открытой системе разработки; систему автоматизированного проектирования БВР для открытых горных работ, созданную в Институте горного дела УрО РАН. В качестве платформы для реализации функций системы использован AutoCAD – программный комплекс проектирования БВР для подземного рудника «ПК БВР (n)». В основу комплекса положена система AutoCAD. «ПК БВР (n)» позволяет строить планы, разрезы, производить расчет скважин и паспортов БВР, определять объемы обрабатываемых блоков, формировать базу данных [14].

Чаще всего для автоматизации процесса измерения гранулометрического состава больших объемов разрушенных пород используется достаточно подробно изученный и описанный метод, а именно планиметрический анализ (фотопланиметрический), заключающийся в измерении размеров кусков на поверхности развала горной массы по фотографиям поверхности (рис. 3).

В основу алгоритмов обработки изображений положены в основном интегральные преобразования, такие как свёртка, преобразование Фурье и др. Также используются статистические методы.

Методы обработки изображений группируют по количеству пикселей, участвующих в одном шаге преобразования:

– поточечные методы: преобразование значения в точке $a(m, n)$ в значение $b(m, n)$ независимо от соседних точек;

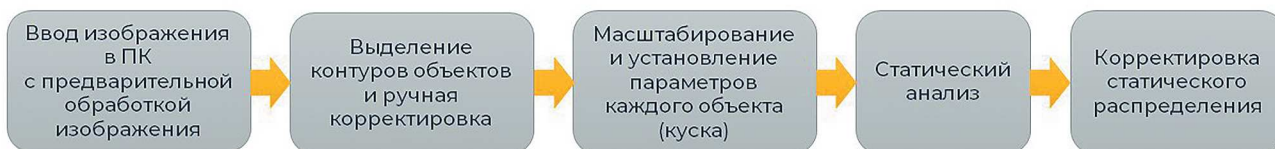


Рис. 3
Процесс автоматизации фотопланиметрического метода гранулометрического анализа

Fig. 3
Automation of the photoplanimetric method of particle size analysis

– локальные (окрестностные) методы: используют значения соседних точек в окрестности $a(m, n)$, чтобы вычислить значение $b(m, n)$;

– глобальные методы: на основе всех значений исходного изображения $a(m, n)$ определяют значение $b(m, n)$.

Работа с двуцветными изображениями обладает существенным преимуществом, а именно достаточно простыми алгоритмами, и если удастся решить какую-то часть задачи с помощью бинарного изображения, то такая методика является предпочтительней по сравнению с другими подходами. Получение бинарного изображения можно выполнить по цветному или полутоновому изображению. В зависимости от решаемой задачи может выбираться и алгоритм перевода исходного изображения в черно-белое. Наиболее распространен метод пороговой бинаризации. В этом случае определяется некоторый порог (диапазон) яркости или цвета, в соответствии с которым каждый пиксель переводится в значение 0 или 1. При обработке или анализе изображений рассматривают не только обрабатываемый пиксель, но и соседние с ним пиксели. Здесь возможны два варианта соседних пикселей, определяемых связностью рассматриваемых областей. В этом смысле области могут быть 4- или 8-связными [20].

Результаты

На рис. 4 представлен принцип реализации гранулометрического анализа развала горной массы с использованием разработки ООО «Давтех».

Один из подходов, который был уже реализован в работе [20], – обработка изображений с использованием пакета MatLab – предоставляет удобные средства для разработки алгоритмов, включая высокоуровневые с использованием принципов объектно-ориентированного программирования. В нем имеются все необходимые средства интегрированной среды разработки, включая отладчик и профайлер. Функции для работы с целыми типами данных облегчают создание алгоритмов для микроконтроллеров и других приложений, где это необходимо.

В качестве исходных данных для исследований используются сканированные и оцифрованные изображения развала горной массы. Сканирование фотографии производилось с разрешением 600 dpi, что позволяло в дальнейшем четко просматривать в рабочей зоне программы MatLab куски размером более 0,01 м. После импорта изображения в область MatLab производилось его масштабирование таким образом, чтобы оно соответствовало размерам стандартной фотографии (рис. 5).

Таким образом, результаты цифровой обработки изображений развалов горной массы в условиях конкретного горнодобывающего предприятия позволят сформировать

Разработки ООО «Давтех»

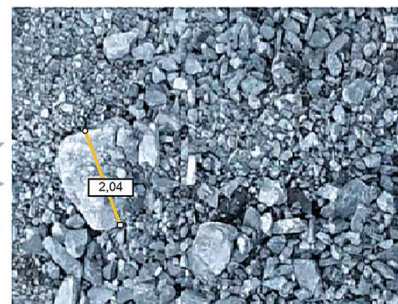
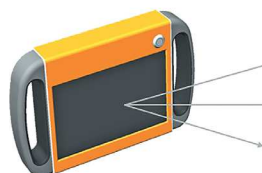


Рис. 4
Принцип реализации гранулометрического анализа развала горной массы

Fig. 4
Implementation principle of the muck pile particle size analysis

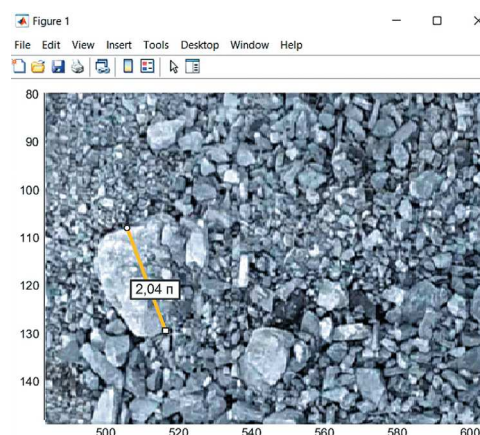


Рис. 5
Фрагмент компьютерной оценки гранулометрического состава взорванных горных пород с использованием программы MatLab

Fig. 5
An extract of computer-based assessment of the particle size distribution of blasted rocks using the MatLab software

базу статистических данных с результатами мониторинга гранулометрического состава, с учетом по предприятию таких показателей, как физико-механические свойства массива, тип применяемого взрывчатого вещества, диаметр заряда, конструкция заряда, место инициирования заряда, длина и величина недозаряда, длина и качество забойки, взаимодействие одновременно взрывааемых зарядов и др.

Направления дальнейших исследований

В развитии дальнейших исследований для решения задачи прогнозирования гранулометрического состава взорванных горных пород и получения конкретных прогнозных данных необходима разработка универсального подхода, позволяющего оперативно обрабатывать большие объемы статистических данных, полученных в ходе исследований на горных предприятиях и находящихся в открытом доступе, и пригодных для представления их

в виде временных рядов. В этой связи перспективным, по нашему мнению, видится использование предиктивной аналитики – инструмента для анализа статистически значимых и объективных данных, который помогает строить точные прогнозы для принятия решений.

Заключение

Таким образом, позиция, что гранулометрический состав отбитой горной массы можно спрогнозировать, яв-

ляется достаточно приемлемой, поэтому необходимы создание и реализация математического аппарата, который позволил бы формализовать характер статистических данных по грансоставу. Решение данной задачи имеет исключительную важность, так как большинство данных, как правило, имеют различный формат представления для получения временного ряда, описывающего динамику процесса с течением времени.

Список литературы

1. Великанов В.С., Дерина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В. Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2022;20(4):5–14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>
2. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е., Сыркин И.С., Назаренко С.В., Юнусов И.Ф. Обзор систем безлюдных грузовых перевозок на карьерах. *Уголь*. 2022;(S12):30–36. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>
3. Маринин М.А., Евграфов М.В., Должиков В.В. Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции «mine-to-mill»: современное состояние и перспективы. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(7):65–74. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3264>
4. Esen S. Fragmentation modelling and the effects of ROM fragmentation on comminution circuits. In: *23rd International Mining Congress & Exhibition*. Turkey; 2013, pp. 252–260. Available at: https://uploads-ssl.webflow.com/638683efb4d9f836cb5f3ae8/638683efb4d9f8f9bd5f3b25_paper2.pdf
5. Esen S. Evaluating the fragmentation data from copper and gold mines. In: *43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*. Florida; 2017, pp. 1–13. Available at: https://www.researchgate.net/publication/316281550_Evaluating_the_Fragmentation_Data_from_Copper_and_Gold_Mines
6. Bachramov B., Myrzakasyimov B., Kalmatayev A., Esen S. Improving final wall and waste blasting results at altynalmas pustynnoye gold mine. In: *IMCET 2019 – Proceedings of the 26th International Mining Congress and Exhibition, Antalya, April 16–19, 2019*. Turkey: TMMOB Maden Mühendisleri Odası; 2019, pp. 391–398.
7. Reple A., Chierigati A.C., Valery W., Prati F. Bulk ore sorting cut-off estimation methodology: Phu Kham Mine case study. *Minerals Engineering*. 2020;149:105498. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.006>
8. Valery W., Duffy K., Holtham P., Reple A., Walker P., Rosario P. Techno-economic evaluation of bulk ore sorting for copper ore at the PanAust Phu Kham operation. In: *IMPC 2016 – 28th International Mineral Processing Congress*. Canada; 2016, pp. 1–11. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309722265_Techno-economic_evaluation_of_bulk_ore_sorting_for_copper_ore_at_the_PanAust_Phu_Kham_Operation
9. Valery W., Rybinski E. Optimization process at Antamina boosts production and energy efficiency. *Engineering and Mining Journal*. 2015;213:116–120. Available at: <https://www.e-mj.com/features/optimization-process-at-antamina-boosts-production-and-energy-efficiency/>
10. Rakishev B.R., Auezova A.M., Rakisheva Z.B. The specification of granulometric composition of natural jointing in the rock massif by their average size. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. Beijing; 2014, pp. 274–282.
11. Rakishev B.R., Rakisheva Z.B. Theoretical estimation of granulometric structure of exploded mining rocks at the quarries. In: *Proceedings of the Siksteenth international Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. (MPES 2007) and the Tenth International Symposium on 1 Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2007). Bangkok; 2007. Vol. 1, pp. 908–912.
12. Панишев С.В., Ермаков С.А., Алькова Е.Л. О влиянии гранулометрии взорванного массива многолетнемерзлых пород на производительность драглайна. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(9):93–98. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2011/9/Panishev_2011_9.pdf
13. Вохмин С.А., Кирсанов А. К., Курчин Г.С., Шевнина Е.В. Влияние выхода негабаритов на производительность ПДМ на подземных рудниках Норильского промышленного района. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(4):284–294. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-284-294>
14. Казаков Н.Н., Викторов С.Д., Шляпин А.В., Лапиков И.Н. *Дробление горных пород взрывом в карьерах*. М.: РАН; 2020. 520 с.
15. Орынбай А.А. *Разработка инновационных методов автоматизированного определения структурных характеристик взорванных горных пород на основе информационных технологий: дис. ... д-ра философии (PhD)*. Алматы; 2022. 130 с.
16. Ракишев Б.Р., Орынбай А.А., Ауэзова А.М., Куттыбаев А.Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):83–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
17. Парамонов Г.П., Лисевич В.В. Прогнозирование параметров развала горной массы при производстве взрывных работ. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;(4):100–103. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.46.025>
18. Угольников В.К., Симонов П.С., Угольников Н.В. Прогнозирование гранулометрического состава взорванной горной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(S7):63–70. Режим доступа: <https://elibrary.ru/kuqqy>
19. Балашов А.М. Тенденции цифровизации производственных процессов в горном деле. *Горная промышленность*. 2023;(3):134–137. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-134-137>
20. Великанов В.С., Бочков В.С., Дерина Н.В., Бочкова К.В. Оценка технического состояния футеровочной брони конусных дробилок на основе цифровой диагностики их поверхностей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11-2):159–168. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_112_0_159

References

1. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Yu.V., Mamay N.V., Logunova T.V. The Brachistochrone problem applied in the study on a conveyance descending trajectory in open pit mining. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2022;20(4):5–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>

2. Voronov A.Yu., Voronov Yu.E., Syrkin I.S., Nazarenko S.V., Yunusov I.F. A review of unmanned haulage systems at open-pit mines. *Ugol'*. 2022;(S12):30–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>
3. Marinin M.A., Evgrafov M.V., Dolzhikov V.V. Production of blasting operations for a given granulometric composition of ore within the framework of the «mine-to-mill» concept: current state and prospects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(7):65–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3264>
4. Esen S. Fragmentation modelling and the effects of ROM fragmentation on comminution circuits. In: *23rd International Mining Congress & Exhibition*. Turkey; 2013, pp. 252–260. Available at: https://uploads-ssl.webflow.com/638683efb4d9f836cb5f3ae8/638683efb4d9f8f9bd-5f3b25_paper2.pdf
5. Esen S. Evaluating the fragmentation data from copper and gold mines. In: *43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*. Florida; 2017, pp. 1–13. Available at: https://www.researchgate.net/publication/316281550_Evaluating_the_Fragmentation_Data_from_Copper_and_Gold_Mines
6. Bachramov B., Myrzakasyrov B., Kalmatayev A., Esen S. Improving final wall and waste blasting results at altynalmas pustynnoye gold mine. In: *IMCET 2019 – Proceedings of the 26th International Mining Congress and Exhibition, Antalya, April 16–19, 2019*. Turkey: TMMOB Maden Mühendisleri Odası; 2019, pp. 391–398.
7. Reple A., Chieregati A.C., Valery W., Prati F. Bulk ore sorting cut-off estimation methodology: Phu Kham Mine case study. *Minerals Engineering*. 2020;149:105498. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.006>
8. Valery W., Duffy K., Holtham P., Reple A., Walker P., Rosario P. Techno-economic evaluation of bulk ore sorting for copper ore at the PanAust Phu Kham operation. In: *IMPC 2016 – 28th International Mineral Processing Congress*. Canada; 2016, pp. 1–11. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309722265_Techno-economic_evaluation_of_bulk_ore_sorting_for_copper_ore_at_the_PanAust_Phu_Kham_Operation
9. Valery W., Rybinski E. Optimization process at Antamina boosts production and energy efficiency. *Engineering and Mining Journal*. 2015;213:116–120. Available at: <https://www.e-mj.com/features/optimization-process-at-antamina-boosts-production-and-energy-efficiency/>
10. Rakishev B.R., Auezova A.M., Rakisheva Z.B. The specification of granulometric composition of natural jointing in the rock massif by their average size. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. Beijing; 2014, pp. 274–282.
11. Rakishev B.R., Rakisheva Z.B. Theoretical estimation of granulometric structure of exploded mining rocks at the quarries. In: *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. (MPES 2007) and the Tenth International Symposium on 1 Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2007). Bangkok; 2007. Vol. 1, pp. 908–912.
12. Panishev S.V., Ermakov S.A., Alkova E.L. About influence of grading of the blasted rock mass in permafrost for productivity of draglin. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(9):93–98. (In Russ.). Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2011/9/Panishev_2011_9.pdf
13. Vohmin S.A., Kirsanov A.K., Kurchin G.S., Shevnina E.V. Influence of oversize yield for the productivity of loaders. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):284–294. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-284-294>
14. Kazakov N.N., Viktorov S.D., Shlyapin A.V., Lapikov I.N. *Blast crushing of rocks in open-pit mines*. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2020. 520 p. (In Russ.).
15. Orynbay A.A. *Development of innovative methods for automated determination of blast rock structural characteristics using information technologies [PhD diss.]*. Almaty; 2022. 130 p. (In Russ.).
16. Rakishev B.R., Orynbay A.A., Auezova A.M., Kuttybaev A.E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):83–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
17. Paramonov G.P., Lisevich V.V. Forecasting of parameters of a rock mass collapse when blasting work. *International Research Journal*. 2016;(4):100–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.46.025>
18. Ugolnikov V.K., Simonov P.S., Ugolnikov N.V. Forecasting of particle size distribution of blasted rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(S7):63–70. Available at: <https://elibrary.ru/kyqqyj>
19. Balashov A.M. Trends in digitalization of production processes in mining. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):134–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-134-137>
20. Velikanov V.S., Bochkov V.S., Dyorina N.V., Bochkova K.V. Digital image processing for assessing the liner armor condition of cone crushers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11-2):159–168. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_112_0_159

Информация об авторах

Дремин Александр Владимирович – генеральный директор, ООО «ДАВТЕХ», г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: info@davtech.ru

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, научный консультант, ООО «ДАВТЕХ», профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация, профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий, уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Information about the authors

Aleksandr V. Dremin – Director General, DAVTECH LLC, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: info@davtech.ru

Vladimir S. Velikanov – Dr. Sci. (Eng.), Academic Adviser, DAVTECH LLC, Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation, Professor, Department of Automatics and Computer Technologies, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Article info

Received: 03.07.2023

Revised: 24.07.2023

Accepted: 24.07.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.07.2023

Поступила после рецензирования: 24.07.2023

Принята к публикации: 24.07.2023