

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДРОБЛЕНИЯ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

А.О. Брухавецкая

Горный институт, НИТУ «МИСиС», Москва, Россия,
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com

Аннотация: Проведен анализ современных мировых и отечественных практик, которые применяются для оценки качества дробления горной массы. Показатель гранулометрического состава взорванной горной массы используется как критерий оценки качества произведенных буровзрывных работ, поэтому важно, чтобы результаты анализа фрагментации были точными и отражали действительную картину. Для этого необходима система оценки качества дезинтеграции кусков породы, способная корректно отражать результаты дробления горного массива. Данное исследование направлено на проведение сравнительного анализа иностранных и российских разработок в области оценки качества дробления горной массы, выявление мировых тенденций в развитии программных продуктов для оценки качества фрагментации, а также возможное перенимание опыта в рамках российских разработок. Актуальность данного исследования обосновывается обострившимися проблемами обеспечения российских горнодобывающих предприятий программным обеспечением иностранного производства в связи с приостановкой деятельности некоторых иностранных компаний на территории России, возникновением сложностей с лицензионной и сервисной поддержкой программных продуктов и ограничением поставок. Основываясь на этих доводах, сделано заключение о том, что необходимо развивать собственные программные продукты в области оценки качества фрагментации, чтобы достичь автономности и независимости от иностранных аналогов. В рамках статьи предложен комплекс рекомендательных мер разработчикам программного обеспечения, горнодобывающим предприятиям, а также инженерно-техническим работникам.

Ключевые слова: открытые горные работы, буровзрывные работы, взорванная горная масса, оценка качества дробления горной массы, гранулометрический состава, фотопланиметрический метод, стереометрический метод.

Для цитирования: Брухавецкая А. О. Анализ современных разработок в области оценки качества дробления взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 18–31. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_18.

Current achievements in blasted rock fragmentation quality assessment: Review

A.O. Brukhavetskaya

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com

Abstract: The article gives a review of the foreign and domestic practices in application in assessment of blasted rock fragmentation quality. The grain size composition of blasted rocks serves a criterion of the drilling and blasting quality, for this reason, it is important that the data on blasted rock fragmentation are accurate and reflect the real-life picture. To this effect, it is required to have a system of the blasted rock fragmentation quality assessment such that is capable to provide a correct picture of rock fragmentation by blasting. This research aims to compare the foreign and Russian achievements in the sphere of blasted rock fragmentation quality assessment, to reveal the global trends in development of program products for the fragmentation quality assessment, as well as to examine the feasibility of adopting the foreign experience in Russia. The relevance of this research is governed by the aggravated problems connected with supply of the Russian mining companies with foreign software products because of cessation of business activity of some foreign companies in Russia, complicated licensing and servicing of software products and limited supplies. On this basis, it has been concluded on the necessity to develop proprietary program products in the sphere of the blasted rock fragmentation quality assessment toward self-sufficiency and independence from foreign analogs. The article offers a set of recommendation for software designers, companies and engineers in mining.

Key words: open pit mining drilling and blasting, blasted rocks, rock fragmentation quality, gran size composition, photo-planimetry, stereometry.

For citation: Brukhavetskaya A. O. Current achievements in blasted rock fragmentation quality assessment: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5):18-31. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_18.

Введение

Вопрос оценки качества дробления взорванной горной породы является важным параметром в рамках ведения комплекса буровзрывных работ (БВР). В зависимости от гранулометрического состава взорванной горной массы можно судить, насколько произведенный взрыв был управляемым, то есть насколько ожидаемые параметры гранулометрического состава совпали с фактическими, а также определять влияние различных факторов на качество фрагментации, анализируя результаты степени дезинтеграции породы [1]. Автор исследования [2, с. 74] отмечает тот факт, что неоднородная фрагментация негативно сказывается на последующих технологических процессах выемки, погрузки, транспортировки, дробления и обогащения.

Поэтому целью данного исследования является обзор современных систем ана-

лиза гранулометрического состава российского и иностранного производства для выяснения уровня развития данного направления в России и за рубежом.

Актуальность изучения этой тематики обуславливается тем, что не все горнодобывающие предприятия используют специализированное программное обеспечение для решения горно-геологических задач [3], в том числе и программы для анализа гранулометрического состава, а если и используют, то в основном иностранного производства [4]. В этом случае возникает ряд проблем, связанных с ограничениями в связи со сложившейся сложной геополитической ситуацией, а именно невозможностью полноценного обеспечения лицензионной, сервисной поддержки, ограничением поставок оборудования, приостановкой деятельности иностранных компаний на территории Российской Федерации.

Проведение исследования позволит: оценить уровень развития систем анализа фрагментации в России; выявить возможности отечественных программ к импортозамещению, что в свою очередь будет толчком для развития потенциала, улучшения текущих разработок или развития новых направлений, касающихся анализа гранулометрического состава взорванной горной массы.

Существующие способы оценки гранулометрического состава, иностранные и отечественные разработки

Вопрос оценки качества гранулометрического состава не является новым. Проанализировав научные источники [5–8], стоит выделить несколько способов оценки гранулометрического состава. Автор [5] выделяет пять способов оценки фрагментации. Из них методы, которые осуществляются вручную: ситовой анализ (метод определения гранулометрического состава путем рассеивания проб на фракции с помощью специального набора сит с последующим определением массы и процентного содержания каждой фракции [8]), поштучный обмер (обмер негабаритных кусков по трем взаимно перпендикулярным направлениям), точечный метод (заключается в подсчете суммарных элементарных площадей, занимаемых кусками различной крупности), а также методы с использованием фотосъемки [6] — планиметрический (фотопланиметрический), линейный (фотолинейный) (замер производится путем наложения мерной ленты на развал, по фото определяют количество и длину кусков по линии их пересечения с мерной лентой [9]). Данные способы оценки, перечисленные выше, относятся к прямым методам оценки гранулометрического состава, то есть измерение происходит по натуре. Стоит отметить о стереометрическом (объемном) способе

оценки гранулометрического состава горной массы. Данный способ не распространен в России, но известен в иностранных источниках. Основной принцип лежит в анализе трехмерных данных, полученных со стереоизображений, или анализа трехмерной информации об объекте, полученной при сканировании объекта из облака точек [7, 10]. Также существуют косвенные методы, но в данном исследовании речь о них не пойдет.

На рынке программного обеспечения для оценки грансостава имеется достаточно предложений с различными программными комплексами отечественного и иностранного происхождения.

Для того чтобы корректно подобрать систему оценки качества гранулометрического состава, рекомендуется обратить внимание на критерии, которые характеризуют систему. Рассмотрим несколько критериев. Погрешность измерения — это расхождение между размерами реального объекта и полученными результатами, разница между значениями должна быть минимальной. Информативность полученных данных — расчет и определение показателей, согласно которым можно оценить результаты массового взрыва, выход классов крупности в процентах. Скорость обработки данных — чем быстрее происходит обработка данных, тем оперативнее оценивается качество взрывных работ, это позволяет при получении отрицательных результатов быстро вносить корректировки в последующие проекты. Ресурсы персонала — данный показатель отражает сколько человек задействовано в процессе. Визуализация полученных результатов — представление обработанных данных в виде таблиц, графиков, диаграмм, данная опция помогает наглядно и быстро оценить результаты производимых работ. Совместимость с другими программами — обособленность программы или возможность интеграции в более крупные системы.

Для понимания тенденции развития программного обеспечения с целью анализа гранулометрического состава необходимо обратиться к исследованиям в смежной отрасли, например, рассмотреть горно-геологические информационные системы (ГГИС). Программные комплексы для горнодобывающих предприятий активно внедряются в России для решения горно-геологических задач. Были проведены исследования касательно распространения горно-геологических систем в России. На данный момент не многие горнодобывающие предприятия используют специализированные продукты ГГИС. Из исследований [3, 4, 11] видно: авторы сходятся в едином мнении, что большинство российских горных предприятий в той или иной степени используют программные модули AutoCad как для выполнения специализированных горно-геологических операций, так и сопутствующих задач, несмотря на то, что данная программа не является профильным продуктом для решения горно-геологических задач.

Использование специализированных продуктов выводит предприятия на качественно новый уровень, повышается эффективность производимых работ, увеличивается автоматизация процессов, тем самым снижается влияние человеческого фактора, это положительно сказывается на безопасности производимых работ.

Начнем с рассмотрения международного опыта применения метода двумерного анализа.

В мировой практике разработки программного обеспечения для анализа фрагментации данный метод имеет широкое распространение, и используется порядка 30 лет. Имеется достаточно много коммерческих разработок в виде программ по анализу фрагментации в различных странах, такие как: Wipfrag (Канада), Split и Cias (США), Iprac и Kth (Швеция), Fragscan (Франция), Tuscips (Герма-

ния), Power Sieve (Австралия), Fragalyst 3.0 Индия [12].

При рассмотрении анализа двумерных изображений сузим диапазон методов до фотопланиметрического.

Сущность фотопланиметрического метода заключается в определении количественных соотношений фракции различной крупности по поверхности, в предположении, что это соотношение характерно для всего объема.

Принцип работы данного метода анализа фрагментации описан подробно и рассмотрен автором статьи [13]. В исследовании описана последовательность действий при обработке фотоматериала. На сегодняшний момент принцип действия схожих программных продуктов аналогичный, с возможным пропуском нескольких шагов, связанных с автоматизацией некоторых процессов. Порядок следующий: загрузка изображения на персональный компьютер (ПК), предварительная обработка изображений, выделение контуров объектов, ручная корректировка, масштабирование, вычисление параметров каждого объекта, статический анализ, корректировка статического распределения.

Рассмотрим, как применяют данный метод на примере нескольких иностранных и российских программных продуктов.

Начнем обзор с программного продукта PowerSieve (разработка компании Orica, Австралия). В алгоритме анализа изображения предусматривается двухцветный вариант, на котором белый цвет характеризует породу, черный отражает пустоты. Размер куска определяется как расстояние между черными пикселями, которые необходимо предварительно удалить с поверхности куска породы при обработке фото. Программа не позволяет задавать масштаб автоматически, поэтому перед подготовкой к съемке необходимо иметь откалиброванный фотоаппа-

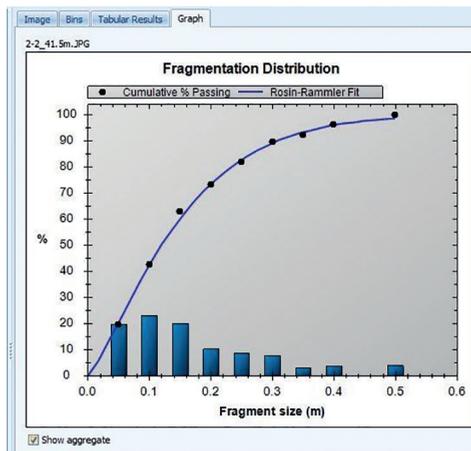


Рис. 1 Визуализация распределения гранулометрического состава в виде графика и гистограммы в программе PowerSieve

Fig. 1. Visualization of grain size composition by ways of plot and bar chart in PowerSieve

рат или производить фотографирование с предметом, размер которого известен заранее. Также важно соблюдать угол фотографирования, он должен быть близок к значениям 90° , в противном случае размер кусков породы будет определен с погрешностью. На рис. 1 представлен график распределения крупности в программе PowerSieve.

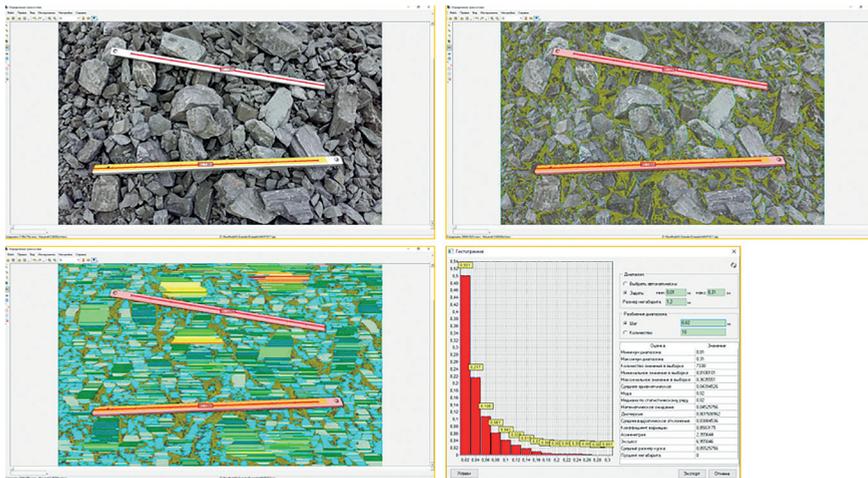
Рассмотрим аналогичный программный модуль для анализа гранулометрического состава K-Granules, входящий в геоинформационную систему (ГИС) K-Mine (Украина). Разработчиками системы является группа компании KAI, которая занимается разработкой программного обеспечения для горного производства уже 27 лет. Программный продукт характеризуется большим перечнем модулей, направленных на решение горно-геологических задач [14] и имеет широкое распространение на горных предприятиях в странах СНГ. Один из программных модулей K-Mine — это модуль «Гранулометрический состав», который и будет рассмотрен более подробно. Подготовительные процессы стандартны для фотопланометрического метода [15, с. 204]. Фотографирование осуществляется с

помощью откалиброванного фотоаппарата или путем размещения на развале взорванной горной массы предмета с известным размером (мерная рейка). Возможна обработка фотоматериала, сделанного в забое, в кузове самосвала и на конвейерной ленте в статическом положении.

На рис. 2 представлен этап обработки фото в программе «Гранулометрический состав» K-Mine. В результате обработки снимков получают графики распределения взорванной горной массы и таблицы с дальнейшей возможностью формирования отчетности и расчетом среднестатистических показателей фрагментации по анализируемому блоку [16, с. 61].

Перейдем к рассмотрению отечественных программ для оценки качества гранулометрического состава, основанных на фотопланометрическом методе.

Стоит отметить, что фотопланометрический метод имеет широкое распространение среди представленных программ и методов оценки гранулометрического состава. Начнем обзор с патента [17]. Авторы предлагают оценивать гранулометрический состав по заранее подготовленным эталонным фотопланограм-



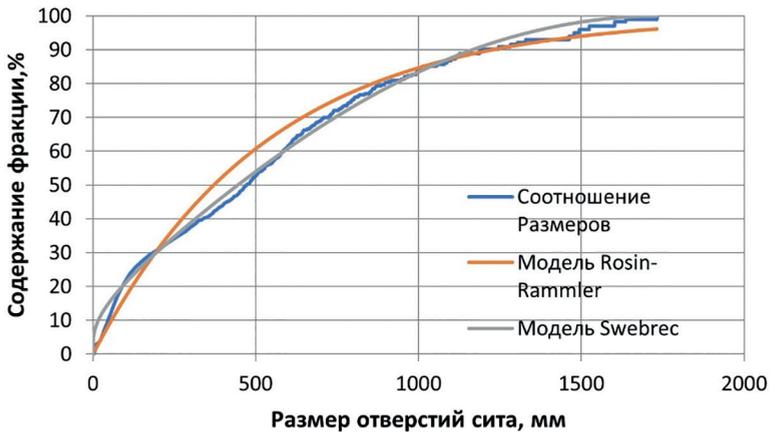


Рис. 3. График распределения крупности в выгруженном отчете с устройства PortaMetrics
 Fig. 3. Size distribution graph in downloaded report from PortaMetrics

тем, что с его помощью можно как фотографировать, так и анализировать. Полуавтоматическая обработка фотографий ускоряет процесс обработки, при этом существует возможность корректировки граней кусков породы в ручном режиме. Преимущество прибора PortaMetrics перед фотоаппаратами следующие: отображение угла уклона фото, расстояния от забоя, а также отображение на фото метки с координатами места съемки, что в последующем облегчает процесс определения места экскавации забоя. В результате проведенных операций формируется отчет графика распределения крупности взорванной горной массы с применением функции Swebrec Розина-Раммлера, как показано на рис. 3. Данную систему используют повсеместно для оценки результатов опытно-промышленных взрывов [21, 22], как и для постоянного мониторинга качества взрывных работ.

Отметим еще несколько продуктов разработчика Weir Motion Metrics, основанных на стереометрическом методе анализа фрагментации. Порядок последовательности выполняемых операций при использовании данного метода описан автором в исследовании [23], посвященном изучению анализа грануломет-

рического состава с помощью 3D стереометрии, и он состоит из следующих этапов:

- получение стереоизображения путем использования стереокамеры;
- калибровка камеры и объектива с целью избежать искажений камеры и объектива;
- соотнесение фотографий между собой для определения относительного расположения между изображениями — масштабирование с применением привязок и 3D-моделирование;
- анализ и выгрузка результатов анализа.

Система TruckMetrics представляет собой П-образную раму, на которую устанавливается 3D-стереокамера, которая непрерывно анализирует данные о гранулометрическом составе проезжающих сквозь нее самосвалов, при этом имеется функция обнаружения и оповещения о негабаритных кусках породы. Система BeltMetrics основана также на объемном (при использовании 3D-стереокамеры) методе, только в этом случае камера фиксируется над конвейерной лентой, осуществляет круглосуточный контроль фрагментации и фиксации пустых мест на конвейере и негабаритных кусков породы.

Программный продукт Wip Frag – разработка компании Wirware Inc (Канада) представлен в виде приложения, которое можно установить на гаджет или планшет, алгоритм анализа схож с описанными выше программными продуктами, в основе которых лежит фотопланометрический метод. Авторы [24] выделяют такие преимущества использования системы Wip Frag, как: обработка фото, полученных различными источниками; использование автоматических алгоритмов для создания контурной сети; анализируемый развал горной массы преобразуется в численные значения объема и веса, в результате на основе полученных данных строятся графики.

Рассмотрим еще несколько систем для анализа фрагментации, разработанных компанией Wirware Inc. Это продукты Reflex™ – установка стереометрической камеры над первичной дробилкой для обнаружения и предупреждения о негабаритных кусках породы и анализа гранулометрического состава породы, подаваемой на дробление, а также система Solo™, предусматривающая мониторинг крупности кусков породы над

конвейерной лентой с использованием стереометрического метода.

Вернемся к еще одному продукту компании Orica (Австралия), при помощи которого возможно производить анализ фрагментации по стереоизображениям. Система FRAGTrack™ представляет собой устройство со встроенной бинокулярной камерой, которое можно установить на работающий в забое экскаватор и над движущейся конвейерной лентой. Стереометрический способ оценки данных о фрагментации реализуется с помощью получения трехмерных данных, тем самым точность определения габаритов фрагментов горной массы повышается за счет получения информации о трехмерных данных и точных пространственных координатах. Авторами статьи [25] также отмечается преимущество FRAGTrack™ в способности мониторинга фрагментации каждого погруженного ковша, что позволяет оперативно определять недостатки взрывных работ на каждом этапе и своевременно устранять их.

Исследования, проведенные компанией Orica, показали (рис. 4), что с применением стереометрического метода оп-

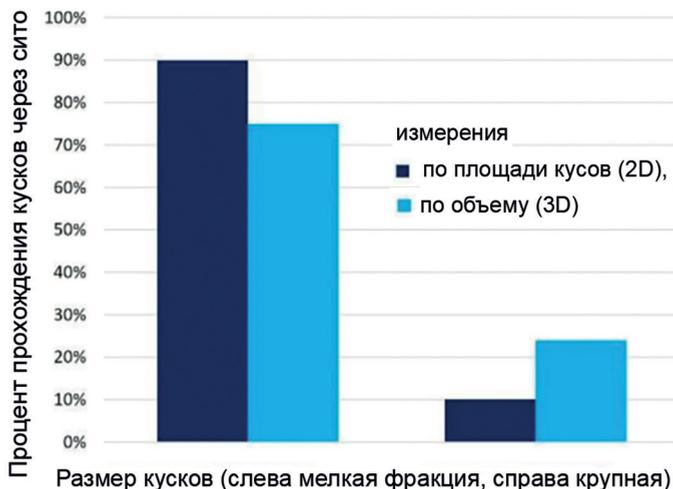


Рис. 4. Сопоставление метода 2D и 3D анализа

Fig. 4. Comparison of 2D and 3D analyses

ределение крупных кусков в развале определяется точнее, чем с применением фотометрического метода, это происходит по причине того, что при методе 3D оценки определяется объем частицы, а при 2D методе — только площадь куска, при этом действительный размер крупного куска может быть недооценен в случае, если он скрыт под мелкими кусками.

Среди российских программ для анализа гранулометрического состава еще не такое большое количество адаптированных портативных устройств, которые возможно использовать для осуществления съемки в динамичных условиях (во время погрузки или при транспортировании на конвейерной ленте горной массы), но вектор развития в данном направлении уже намечается, например, рассмотрим отечественную разработку программно-аппаратного комплекса. Система автоматического гранулометрического анализа (САГА) — разработка компании «ДАТА-ЦЕНТР Автоматика». Данный программный комплекс осуществляет автоматический анализ гранулометрического состава с помощью видеокамеры, передавая видеоматериал на компьютер. Встроенные контроллеры отвечают за получение данных с движущегося конвейера. По результатам анализа формируются графики и таблицы с классификацией кусков породы по классам крупности. В данном способе видеоматериалы, полученные при съемке, анализируются с применением фотопланометрического метода.

Стоит отметить, что на сегодняшний день для анализа гранулометрического состава активно внедряется использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), и это не случайно, так как данный способ имеет ряд преимуществ, одно из самых важных — это то, что человек не задействован в опасной зоне ведения работ, а также тот факт, что съемка с по-

мощью БПЛА может проводиться с труднодоступных ракурсов, которые могли быть не учтены при ручной съемке. В этом контексте некоторые программные продукты расширили свою область применения, и могут быть использованы совместно с БПЛА для обработки полученных снимков с воздуха. Например, это такие системы анализа грансостава: PoverSieve, Wip Frag, ГИС Геомикс Granulometric (Грансостав).

Обсуждение

На основании проведенного обзора отметим основные преимущества и недостатки методов оценки гранулометрического состава.

В первую очередь отметим основные особенности фотопланометрического метода, преимуществами которого являются:

- отсутствие необходимости закупать специализированное оборудование для съемки развала взорванной горной массы, так как для этих целей можно использовать фотоаппарат;
- привычная последовательность действий, так как работа по данному методу ведется долгое время.

Недостатки фотопланометрического метода:

- существует опасность нахождения человека в активном забое;
- необходима специальная настройка оборудования, наличие дальномера;
- погрешность измерения из-за возможного захвата одной и той же области съемки;
- полуавтоматическая обработка фотографий с уточнением граней кусков в ручном режиме;
- затрачивается больше времени на обработку фото, чем при автоматическом наложении сетки.

Рассмотрим программные продукты, применение которых предполагает использование специализированных уст-

ройств в совокупности с программным обеспечением, в основе которых лежит фотопланиметрический метод оценки гранулометрического состава.

Из преимуществ можно отметить:

- отображение информации об угле уклона фото, расстоянии от забоя, отображение метки с координатами фото;
- автоматическое масштабирование;
- автоматическая привязка к месту съемки.

Недостатки следующие:

- все еще есть опасность присутствия человека в опасной зоне;
- полуавтоматическая обработка фотографий с уточнением граней кусков в ручном режиме.

Применение стереометрического метода оценки гранулометрического состава в условиях расположения стереометрической камеры на карьерном транспорте, над самосвалами (П-образная рама), над конвейерной лентой.

Выделяются следующие преимущества:

- непрерывность процесса, получение информации о гранулометрическом составе круглосуточно, в режиме реального времени;
- точность измерения;
- нет необходимости настройки масштаба;
- безопасность — человек не работает в опасной зоне;
- использование искусственного интеллекта для объемного анализа методом 3D;
- возможность удаленного доступа к данным;
- исключается возможность повторения фото одного и того же участка;
- оперативное получение данных, что позволяет быстро принимать решения для корректировки последующих проектов.

Основные недостатки данного способа оценки фрагментации:

- высокая стоимость;
- программные продукты представлены иностранными компаниями.

Заключение

Были рассмотрены основные способы анализа гранулометрического состава в международной практике: фотопланиметрический метод, анализ с применением специализированного оборудования (планшет), система анализа на транспорте, система анализа на конвейере, БПЛА. Разнообразие систем показывает, что данное направление динамично развивается с применением инновационных технологий таких как: компьютерное зрение, искусственный интеллект, БПЛА.

Автоматизируется процесс получения данных, увеличивается качество, достоверность данных о фрагментации, что позволяет корректировать проект БВР при обнаружении некачественных результатов, увеличивается безопасность проведения работ, так как человек не присутствует в забое.

Исходя из произведенного обзора отечественных систем анализа гранулометрического состава, на данный момент наибольшее распространение имеет фотопланиметрический метод, но также имеются аналоги международных систем анализа фрагментации на конвейере. Это свидетельствует о том, что данное направление развивается, только не так интенсивно, как за рубежом. Возможно, это происходило из-за обширного выбора систем иностранного производства, и сейчас системы анализа гранулометрического состава взорванной горной массы в России необходимо динамично развивать.

Пока не представляется возможным полностью уйти от применения программного обеспечения иностранного производства, так как выбор программных продуктов отечественного производства для анализа фрагментации значительно меньше.

Исходя из вышесказанного, рекомендуется применять системы анализа гранулометрического состава, используемые на данный момент на предприятии, в случае отсутствия лицензированной поддержки следует перейти на аналоги российского производства с наиболее близким функционалом во избежание

снижения безопасности и качества выполнения работ.

Отечественным разработчикам программ необходимо развивать направление, связанное с анализом гранулометрического состава наряду с ГГИС, а также внедрять технологии искусственного интеллекта и алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coello-Velázquez A. L., Arteaga V. Q., Menéndez-Aguado J. M., Pole F. M., Llorente L. Use of the swabrec function to model particle size distribution in an industrial-scale Ni-Co ore grinding circuit // *Metals*. 2019, vol. 9, no. 8, article 882. DOI: 10.3390/met9080882.

2. Ефремовцев Н. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлинённого заряда // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 8. — С. 73—85. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-73-85.

3. Ческидов В. В., Яницкий Е. Б. Анализ информационных систем в горнодобывающей промышленности // *Исследовано в России: Золото и технологии*. — 2021. — № 3. URL: https://zolteh.ru/technic/analiz_informatsionnykh_sistem_v_gornodobyvayushchey_promyshlennosti/ (дата обращения: 30.10.2022).

4. Черпинская Л. А. Практика применения специализированного ПО в горной промышленности // *Исследовано в России: Золото и технологии*. — 2017. — № 3. URL: https://zolteh.ru/technic/praktika_primeneniya_spetsializirovannogo_po_v_gornoy_promyshlennosti/ (дата обращения: 02.11.2022).

5. Симонов П. С. Особенности определения размера среднего куска и выхода негабарита при взрывных работах на карьерах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 4. — С. 320—327.

6. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Баженова А. В., Соколов С. Т. Методические принципы измерения кусковатости горной массы // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2020. — № 3. — С. 112—123.

7. Liu Q., Shi F., Wang X., Zhao M. Statistical estimation of blast fragmentation by applying 3D laser scanning to muck pile // *Shock and Vibration*. 2022, vol. 15, pp. 1—15. DOI: 10.1155/2022/3757561.

8. Sanchidrián J. A., Segarra P., Ouchterlony F., Gómez S. The influential role of powder factor vs. delay in full-scale blasting: a perspective through the fragment size-energy fan // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 5, pp. 4209—4236. DOI: 10.1007/s00603-022-02856-1.

9. Галушко Ф. И., Комягин А. О., Мусатов И. Н. Управление качеством взрывной подготовки горной массы на основе оптимизации параметров БВР // *Горная промышленность*. — 2017. — № 5. — С. 65—68.

10. Jang H., Kitahara I., Kawamura Y., Endo Y., Topal E., Degawa R., Mazara S. Development of 3D rock fragmentation measurement system using photogrammetry // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019, vol. 34, pp. 294—305. DOI: 10.1080/17480930.2019.1585597.

11. Жданев О. В., Оленева О. Н. Приоритетные направления развития российского программного обеспечения для угольной промышленности. Ч. 1 // *Уголь*. — 2021. — № 6. — С. 18—22. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-18-22.

12. Guo Q., Wang Y., Yang S., Xiang Z. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm // *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, no. 1, article 7143. DOI: 10.1038/s41598-022-11351-0.

13. Шустерман С. А. Автоматический анализ гранулометрического состава взорванной горной массы по фотографиям // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2007. – С. 67–73.

14. Назаренко В. М., Назаренко М. В., Хоменко С. А. Новые подходы при создании автоматизированных систем управления горными работами на базе геоинформационной системы K-MINE // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 6. – С. 155–168.

15. Винивитин Д. В. Автоматизированная система управления горными работами ОАО «Полтавский ГОК» / Использование геоинформационной системы K-MINE в различных сферах деятельности: Сборник докладов II Международного научно-практического семинара «SVIT GIS-2012». – Кривой Рог: Дионис, 2012. – С. 194–205.

16. Наговицын О. В. Концепция и методы формирования горно– геологической информационной системы (ГГИС MINEFRAME): Автореф. дис. на соискателя ученой степени докт. техн. наук. – Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2018. – 44 с.

17. Исайченко А. Б., Фидотенко В. С., Сигарев М. Ю., Кононенко Е. А. Патент РФ № 2014138906/28, 25.09.2014. Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации. 2014. Бюл. № 34.

18. Казаков Н. Н., Шляпин А. В., Лапиков И. Н., Молодчинина Л. И. Выбор классов крупности при измерении и расчетах грансостава в верхней зоне карьерного уступа // *Взрывное дело*. – 2022. – № 136/93. – С. 99–110.

19. Шляпин А. В., Лапиков И. Н. Прогнозирование крупности дробления горных пород взрывом скважинных зарядов промышленного ВВ // *Современные ресурсо-энергосберегающие технологии горного производства*. – 2011. – № 5. – С. 55–61.

20. Игнатенко И. М., Дунаев В. А., Тюпин В. Н. Совершенствование методики предпроектной оценки взрываемости массивов скальных горных пород в карьерах // *Горный журнал*. – 2019. – № 1. – С. 46–50. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10.

21. Аленичев И. А., Рахманов Р. А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 249. – С. 334–341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

22. Брухавецкая А. О. Анализ влияния параметров БВР на качество дробления горной массы // *Взрывное дело*. – 2022. – № 136/93. – С. 111–128.

23. Jeong-Hun Han, Jae-Joon Song Statistical estimation of blast fragmentation by applying stereophotogrammetry to block piles // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, vol. 68, pp. 150–158. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.02.010.

24. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 257. – С. 822–832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

25. Оверченко М. Н., Толстунов С. А., Мозер С. П., Белин В. А. Определение оптимальных параметров Технологических процессов при взрывании скважинных зарядов с воздушными промежутками // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 4. – С. 87–99. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_87. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Coello-Velázquez A. L., Arteaga V. Q., Menéndez-Aguado J. M., Pole F. M., Llorente L. Use of the swebrec function to model particle size distribution in an industrial-scale Ni-Co ore grinding circuit. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 8, article 882. DOI: 10.3390/met9080882.

2. Efremovtsev N. N., Trofimov V. A., Shipovskii I. E. Strain concentration in wave field generated by blasting in elongated boreholes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 8, pp. 73–85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-73-85.

3. Cheskidov V. V., Yanitsky E. B. Analysis of information systems in the mining industry. *Issledovano v Rossii: Zoloto i tekhnologii.* 2021, no. 3. [In Russ], available at: https://zolteh.ru/technic/analiz_informatsionnykh_sistem_v_gornodobyvayushchey_promyshlennosti/ (accessed 30.10.2022).

4. Cherpinskaya L. A. The practice of using specialized software in the mining industry. *Issledovano v Rossii: Zoloto i tekhnologii.* 2017, no. 3. [In Russ], available at: https://zolteh.ru/technic/praktika_primeneniya_spetsializirovannogo_po_v_gornoy_promyshlennosti/ (accessed 02.11.2022).

5. Simonov P. S. Features of determining average dimension and yield of oversizes under blasting in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 4, pp. 320–327. [In Russ].

6. Vinogradov Y. I., Khokhlov S. V., Bazhenova A. V., Sokolov S. T. Methodological principles of measuring lumpiness of rock mass. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2020, no. 3, pp. 112–123. [In Russ].

7. Liu Q., Shi F., Wang X., Zhao M. Statistical estimation of blast fragmentation by applying 3D laser scanning to muck pile. *Shock and Vibration.* 2022, vol. 15, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2022/3757561.

8. Sanchidrián J. A., Segarra P., Ouchterlony F., Gómez S. The influential role of powder factor vs. delay in full-scale blasting: a perspective through the fragment size-energy fan. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2022, vol. 55, no. 5, pp. 4209–4236. DOI: 10.1007/s00603-022-02856-1.

9. Galushko F. I., Komiagin A. O., Musatov I. N. Quality management of explosive preparation of rock mass on the basis of optimization of parameters of drilling and blasting operations. *Russian Mining Industry.* 2017, no. 5, pp. 65–68. [In Russ].

10. Jang H., Kitahara I., Kawamura Y., Endo Y., Topal E., Degawa R., Mazara S. Development of 3D rock fragmentation measurement system using photogrammetry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment.* 2019, vol. 34, pp. 294–305. DOI: 10.1080/17480930.2019.1585597.

11. Zhdaneev O. V., Oleneva O. N. Priority trends in the development of russian software for the coal industry. Part 1. *Ugol'.* 2021, no. 6, pp. 18–22. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-18-22.

12. Guo Q., Wang Y., Yang S., Xiang Z. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. *Scientific Reports.* 2022, vol. 12, no. 1, article 7143. DOI: 10.1038/s41598-022-11351-0.

13. Shusterman S. A. Automatic analysis of the granulometric composition of the blasted rock mass by photographs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, pp. 67–73. [In Russ].

14. Nazarenko V. M., Nazarenko M. V., Khomenko S. A. New approaches in the creation of automated control systems of mining works on the basis of geoinformation system K-MINE. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 6, pp. 155–168. [In Russ].

15. Vinivitin D. V. Automated control system of mining works of «Poltava Mining and Processing Plant». *Ispol'zovanie geoinformatsionnoy sistemy K-MINE v razlichnykh sferakh deyatelnosti: Sbornik dokladov II Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminara «SVIT GIS-2012»* [The use of the geographic information system K-MINE in various fields of activity: Collection of reports of the II International Scientific and Practical Seminar SVIT GIS-2012], Krivoy Rog, Dionis, 2012, pp. 194–205. [In Russ].

16. Nagovitsyn O. V. *Kontseptsiya i metody formirovaniya gorno – geologicheskoy informatsionnoy sistemy (GGIS MINEFRAME)* [The concept and methods of formation of mining-

geological information system (GGIS MINEFRAME)], Doctor's thesis, Apatity, GI KNTS RAN, 2018, 44 p.

17. Isaychenko A. B., Fidotenko V. S., Sigarev M. Yu., Kononenko E. A. Patent RU 2014138906/28, 25.09.2014. [In Russ].

18. Kazakov N. N., Shlyapin A. V., Lapikov I. N., Molodchinina L. I. Selection of size classes for measuring and calculating granulometric composition in the upper zone of the quarry block. *Explosion technology*. 2022, no. 136/93, pp. 99–110. [In Russ].

19. Shlyapin A. V., Lyapikov I. N. Predicting crushing size of rocks by explosion of borehole charges of industrial explosives. *Sovremennye resurso-energoberegayushchie tekhnologii gornogo proizvodstva*. 2011, no. 5, pp. 55–61. [In Russ].

20. Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Tyupin V. N., Improving procedure of preproject assessment of hard rock blastability in open pit mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 46–50. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10.

21. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Study of empirical laws of rock mass dumping by explosion on free surface of quarry ledge. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 334–341. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

22. Brukhavetskaya A. O. Analysis of the influence of drilling and blasting parameters on the quality of rock crushing. *Explosion technology*. 2022, no. 136/93, pp. 111–128. [In Russ].

23. Jeong-Hun Han, Jae-Joon Song Statistical estimation of blast fragmentation by applying stereophotogrammetry to block piles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, vol. 68, pp. 150–158. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.02.010.

24. Saadon A., Frege M., Boukarm R., Haji R. Crush analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822–832. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

25. Overchenko M. N., Tolstunov S. A., Mozer S. P., Belin V. A. Optimal parameters of process flows in air-decoupling blasting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 87–99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_87.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Брухавецкая Алина Олеговна — аспирант,
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com,
Горный институт, НИТУ «МИСиС»,
Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.O. Brukhavetskaya, Graduate Student,
e-mail: bruhavetskaya@gmail.com,
Mining Institute, National University
of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 19.02.2023; получена после рецензии 28.03.2023; принята к печати 10.04.2023.
Received by the editors 19.02.2023; received after the review 28.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.

