

11. Bondarev E. A., Rozhin I. I., Popov V. V., Argunova K. K. Assessment of possibility of natural gas hydrates underground storage in permafrost regions. *Earth's Cryosphere*. 2015. Vol. 19, No. 4. pp. 58–67.
12. Bondarchuk I. B., Shenderova I. V. Classification of hydraulic borehole mining technological processes during pay zone development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2015. Vol. 24. DOI: 10.1088/1755-1315/24/1/012004
13. Positive Preliminary Evaluation of Borehole Mining at the Hansen Uranium Deposit. 2012. Available at: <https://www.asx.com.au/asxpdf/20120213/pdf/424914sksgk96.pdf> (accessed: 19.04.2018).

14. Technical Parameters of Jet Mining. Kinley Exploration. Available at: <http://www.hydraulicboreholemining.com/technical-parameters-of-jet-mining> (accessed: 19.04.2018).
15. Jet Boring/Borehole Mining. RCS Group of Companies, 2018. Available at: <http://rcsenergy.ca/jet-boring-borehole-mining> (accessed: 19.04.2018).
16. Rukovich A. V., Rochev V. F. Using the method of hydraulic borehole mining for placer gold deposits in Southern Yakutia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017. No. 10. pp. 101–106.

УДК 622.831:622.235

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРЕДПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ ВЗРЫВАЕМОСТИ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В КАРЬЕРАХ

И. М. ИГНАТЕНКО, директор Института наук о Земле, канд. техн. наук
В. А. ДУНАЕВ, проф., д-р геол.-минерал. наук
В. Н. ТЮПИН, проф., д-р техн. наук, tyurinvp@mail.ru

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Введение

Эффективность работы карьеров по добыче полезных ископаемых в массивах скальных пород во многом определяется качеством выполнения взрывных работ, а качество взрывной подготовки горной массы зависит от естественной трещиноватости (блочности), крепости горных пород и параметров буровзрывных работ (БВР) [1–12]. Учитывая это, специалистами ОАО «ВЮГЕМ» с участием авторов данной статьи была разработана и опробована в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» методика районирования карьерного поля по взрываемости горных пород и создания интерактивной карты взрываемости. Последняя отображает пространственное размещение в карьере участков породного массива, различающихся свойствами и условиями залегания горных пород [13]. Разработанная компьютерная технология на основе интерактивной карты позволяет оперативно, в режиме «онлайн», рассчитать параметры БВР, при которых достигается заданное качество взорванной горной массы [14]. Вместе с тем математическая модель расчета основывалась на эмпирической зависимости параметров БВР и размера среднего куска взорванной горной массы от условий взрывания блока, содержала множество поправочных коэффициентов, что предопределяло необходимость выполнения большого объема натурных исследований для адаптации математической модели на различных карьерах, ведущих добычу полезных ископаемых с применением БВР.

В настоящей статье с использованием современных методов дистанционной фиксации первичной информации, необходимой для оценки блочности горных пород в откосах уступов карьера, и разработанной авторами универсальной модели расчета технологических параметров взрывания породных блоков на основе закона сохранения энергии изложена усовершенствованная

Предложенная методика основана на применении современных технических средств и дистанционных способов фиксации первичной геолого-структурной информации на уступах карьера, а также на авторской математической модели прогнозной оценки кусковатости взорванной горной массы с учетом закона сохранения энергии и естественных свойств породного массива в границах предназначенного к взрыву блока.

Ключевые слова: карьер, блочность и крепость пород, интерактивная карта, взрываемость, трещиноватость, параметры буровзрывных работ, средний размер куска.

DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10

методика предпроектной оценки взрываемости породных блоков, реализованная на примере карьера «Восточный» АО «Полюс».

Методика и результаты исследования

Главными природными факторами, определяющими категорию взрываемости породного массива, являются блочность и крепость слагающих его горных пород. Оценка крепости пород различных типов в границах действующего карьера достигается лабораторными испытаниями представительного числа образцов и в методическом плане не вызывает осложнений. А вот блочность пород даже одного типа, как правило, изменчива, поскольку обусловлена особенностями проявления разрывной тектоники на том или ином участке карьерного поля. Это обстоятельство делает необходимой оценку блочности пород непосредственно в откосах уступов.

В настоящее время натурное изучение блочности породного массива на уступах выполняют главным образом путем дистанционного фотометрического определения размера отдельности в рамках помаршрутной геологической съемки уступов. Авторы предлагают более эффективный вариант этой методики, включающий использование текстурированной 3D-модели актуальной поверхности карьера, построенной по данным аэрофотосъемки откосов уступов беспилотными летательными аппаратами (**рис. 1**) или путем лазерного сканирования откосов.

После создания объемной модели карьерного поля осуществляют ее координатную привязку по опорным точкам, в качестве

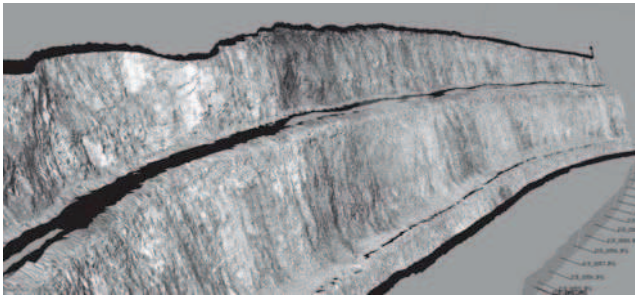


Рис. 1. Текстурированная 3D-модель поверхности уступов, построенная по данным аэрофотосъемки откосов уступов беспилотным летательным аппаратом

которых чаще всего используют базовые пункты маркшейдерского обоснования или стационарные наземные объекты с известными координатами. Далее на пространственно ориентированную модель карьера выносят трассы геологических маршрутов. Для этого на маркшейдерском плане карьера в геологоструктурном модуле ГИС ГЕОМИКС (разработка ОАО «ВЮГЕМ») задают траектории маршрутов, а в базе данных в автоматическом режиме формируется каталог координат пикетов, ограничивающих 20-метровые интервалы маршрутов. Каталог координат пикетов подгружают в модель карьера и настраивают режим отображения пикетов.

Использование для оценки блочности пород объемной пространственно ориентированной модели поверхности карьера значительно повышает возможности фотометрического метода: минимизирует перспективные искажения фотоснимков, обеспечивает оптимальный выбор ракурса просмотра изображения и (как следствие этого) более точную фрагментацию отдельностей пород. Применение беспилотников позволяет получать снимки высокого разрешения на большом (до 20 км) удалении от оператора (оптическими объективами это возможно на расстоянии не более 4–5 км). Ввиду того, что фотографирование откоса осуществляется в непосредственной близости от поверхности уступа, нет необходимости применять дорогостоящие летательные аппараты с камерами самого высокого разрешения. Вполне достаточно полупрофессионального квадрокоптера российского производства типа Mavic-Pro, Геоскан 401, Zala 421-21, Грифон 41 и камеры с разрешением 20 мегапикселей. Данное обстоятельство делает аэрофотометрические комплексы более экономически выгодными в сравнении с традиционными зеркальными фотокамерами и телеобъективами.

Кроме того, трехмерная цветная модель породного массива позволяет достоверно проследить на сводном геологическом плане карьера подошву коры выветривания и подстилающие ее зоны гипергенной дезинтеграции пород, уточнить положение границ различных петрографических разностей пород.

Следует отметить, что процесс получения объемной модели поверхности карьера предъявляет высокие системные требования к компьютерам, которые используют для обработки данных аэрофотосъемки. После выбора необходимого ракурса изображения осуществляли кадрирование панорамы уступа по каждому интервалу. В программном модуле Granulometric ГИС ГЕОМИКС

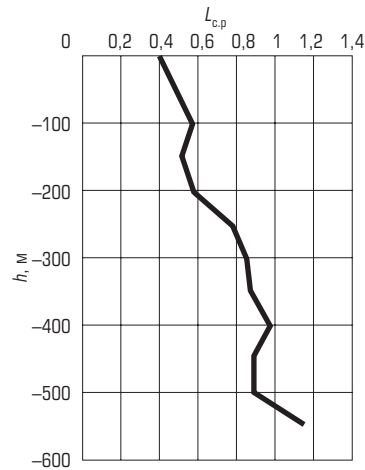


Рис. 2. График изменения среднего размера отдельности пород $L_{с.р}$ с глубиной (по координате h за нуль взята отметка +750 м)

Таблица 1. Статистические характеристики размера отдельности пород карьера «Восточный»

P	\bar{X}	m_x	μ	σ	u	A	E	N
2,02	0,76	0,76	0,87	0,27	35,72	0,34	1,20	1608

Примечание: P – размах; \bar{X} – среднее, m_x – математическое ожидание, μ – мода, σ – среднеквадратичное отклонение; u – коэффициент вариации; A – коэффициент асимметрии; E – эксцесс; N – число станций измерений.

по апробированной методике [15] выполняли обработку изображений и их фрагментацию с последующей оценкой блочности пород.

С использованием 3D-модели выполнена оценка блочности пород карьера «Восточный» АО «Полус». Всего было сделано 808319 измерений блочности пород по 63 маршрутам общей протяженностью 36570 м. Натурное изучение блочности породного массива в карьере позволило определить средние значения размера отдельности пород различных петрографических типов, рассчитать их статистические характеристики, выявить закономерности изменения блочности пород с глубиной.

Установлен диапазон размера отдельности пород (0,11–2,13 м) и среднего размера отдельности в каждом петрографическом типе (от 0,36 м в кварц-биотитовых сланцах до 0,91 м в кварц-карбонатных породах). Распределение отдельностей различного размера в массиве пород подчиняется логнормальному закону. Статистические характеристики этого распределения представлены в табл. 1.

В диапазоне от +750 до +230 м, т. е. не менее 520 м по вертикали, установлена тенденция к увеличению с глубиной h блочности породного массива $L_{с.р}$ в пределах карьерного поля (рис. 2). Значения среднего размера отдельности определены по каждому 50-метровому интервалу.

Районирование карьерного поля по блочности горных пород выполнено на маркшейдерском плане карьера следующим образом. По каждому 20-метровому интервалу геологических маршрутов был рассчитан средний размер отдельности горных пород. Далее в соответствии с критериальными значениями среднего размера отдельности для различных категорий блочности в электронной базе данных каждому интервалу автоматически присваивалась категория блочности.

Оконтуривание участков пород различной блочности осуществлялось путем увязки границ интервалов одной категории блочности между смежными задокументированными уступами. При этом учитывали факторы, влияющие на размер отдельности (минерально-петрографические типы пород, разрывные нарушения, зоны дезинтеграции пород).

Далее на сводном геологическом плане карьера каждой петрографической разности горных пород присваивали значение крепости, а путем совмещения карты блочности и сводного геологического плана, с учетом критериев действующей на предприятии классификации по взрываемости горных пород, осуществляли построение интерактивной карты взрываемости пород карьерного поля.

Следующим шагом явилась разработка математической модели расчета необходимых технологических параметров взрывания в зависимости от естественных показателей породного массива и основанной на этой модели компьютерной технологии расчета параметров БВР.

Качество взрывной подготовки горной массы характеризуется гранулометрическим составом взорванного блока. Оценка кусковатости взорванной горной массы может осуществляться по данным лазерного сканирования или текстурированной 3D-модели, полученной с помощью аэрофотосъемки поверхности взорванного блока в целом по той же методике, что и оценка блочности в откосах уступов, но с некоторыми дополнениями, разработанными авторами настоящей статьи в работе [15].

Перед фотографированием развала взорванного блока на его поверхности параллельно выкладывали две маркшейдерские рейки на некотором удалении друг от друга (рис. 3). Они необходимы для последующего масштабирования фотоснимка и его обработки по предложенной авторами методике, основанной на применении алгоритма маркерного водораздела [13].

Сравнительный анализ оценки среднего размера куска $d_{c,p}$ во взорванной горной массе по результатам ручных измерений (взяты за эталон) и полученного путем фрагментации фотоснимка с использованием указанного выше алгоритма показал, что среднее отклонение от эталона составило 5 см в диапазоне колебаний 2–9 см, тогда как при использовании традиционных методов фрагментации фотоснимка посредством стандартных графических фильтров (медианный фильтр размытия и уровень контраста) среднее отклонение от эталона составляет в среднем 9 см при колебании в интервале 4–15 см [15]. Натурное изучение кусковатости взорванной горной массы выполнено по 16 буровзрывным блокам (суммарно по 175 станциям наблюдений с фиксацией размеров 122599 кусков взорванных пород).

По результатам оценки гранулометрического состава взорванной горной массы была разработана математическая модель расчета технологических параметров взрывания, в основу которой положен закон сохранения энергии, что позволило усовершенствовать предыдущую аналогичную модель. Согласно закону сохранения энергии, удельная энергия взрыва W_0 скважинного заряда взрывчатого вещества (ВВ) распределяется на упруго-пластические деформации (разрушение) трещиноватого горного

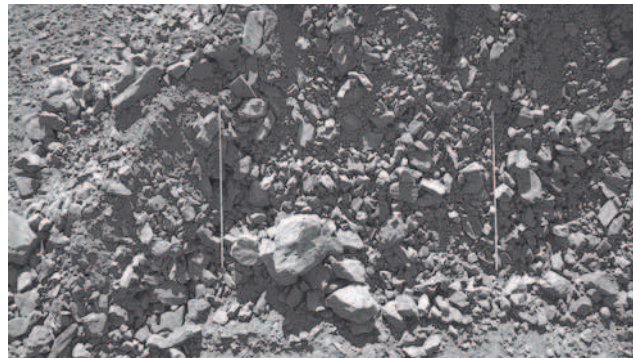


Рис. 3. Фотоснимок поверхности развала взорванной горной массы, полученный при помощи квадрокоптера MAVIC PRO

массива W_{yn} и выброс разрушенной породы W_B с преодолением сил трения при ее перемещении

$$W_0 = W_{yn} + W_B. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) позволило получить инженерную формулу для определения расчетного удельного расхода ВВ:

$$q_n = d_e \Phi f 10^4 / (4,56 Q_T K_n d_{c,p}) + 8,77 d_3^2 10^6 / Q_T, \quad (2)$$

где d_e , Φ – размер отдельности и показатель трещиноватости массива; f – коэффициент крепости породы по М. М. Протодьяконову; Q_T – теплота взрыва; $d_{c,p}$ – требуемый средний размер куска; d_3 – диаметр заряда ВВ; K_n – коэффициент пересчета (получен эмпирически по результатам замера гранулометрического состава на карьере «Восточный»), его величина составляет 2,87 для вскрышных пород и 2,56 – для рудного массива.

Качество взрывной подготовки горной массы характеризуется средним размером куска во взорванном блоке горных пород. Определение среднего размера куска $d_{c,p}$ будет объективным в том случае, если $d_{c,p}$ будет зависеть от физико-технических свойств горного массива, параметров детонации ВВ и параметров расположения скважин на уступе. Наиболее полно эти показатели учитывают в формулах для определения размера зоны регулируемого дробления и сетки расположения скважин на уступе в работах [2, 16].

Линии сопротивления по подошве (ЛСПП) W , обеспечивающие заданную степень дробления при короткозамедленном взрывании (КЗВ) групп зарядов ВВ на открытую поверхность, можно определить по формуле, откорректированной для условий конкретного карьера:

$$W = 1,2 D \rho_B d_3 / (f \Phi)^{0,5} \sqrt{K_n d_{c,p} / d_e} \cdot 10^{-4} + d_e, \quad (3)$$

где D и ρ_B – скорость детонации и плотность заряжения.

Расстояние между скважинами в ряду a и расстояние между рядами скважин b для шахматной сетки определяли по формулам

$$a = W \sqrt{2} / \sqrt{3}; \quad b = W \sqrt{3} / \sqrt{2}. \quad (4)$$

Среднее абсолютное расхождение между фактическими и рассчитанными параметрами сети взрывных скважин составило 0,4 м.

Решая уравнение (3) относительно $d_{c,p}$, получим

$$d_{c,p} = ((W - d_e)^2 \Phi f d_3 10^8) / (1,44 K_n (D \rho_B d_3)^2). \quad (5)$$

Таблица 2. Фактический и расчетный размеры среднего куска взорванной горной массы на карьере

Индекс блока	Объект расчета	$d_{с,р}$, м	f	$d_{з}$, м	$d_{с,р}$, м		Расхождение, м
					фактический	расчетный	
220–016	Руда	0,79	12,8	0,2445	0,21	0,28	0,07
220–015		0,66	12,8	0,2445	0,21	0,27	0,06
230–061		1,39	12,8	0,2445	0,32	0,36	0,04
230–065		1,01	12,8	0,2445	0,21	0,16	0,05
230–070		0,8	12,8	0,2445	0,22	0,28	0,06
240–067		1,49	12,8	0,2445	0,35	0,37	0,02
230–060	Вскрыша	0,97	12,8	0,2445	0,54	0,51	0,03
230–062		0,97	12,8	0,2445	0,29	0,28	0,01
230–073		0,67	10,2	0,2445	0,14	0,20	0,06
230–064		0,75	12,8	0,2445	0,21	0,25	0,04
690–138		0,75	12,2	0,2445	0,48	0,42	0,06
690–143		0,62	12,2	0,2445	0,34	0,25	0,09
700–108		0,68	12,8	0,2445	0,35	0,24	0,11
700–103		0,34	12,2	0,2445	0,22	0,14	0,08
700–109		0,27	12,8	0,2159	0,29	0,22	0,07
710–133		0,41	8,8	0,2159	0,23	0,21	0,02

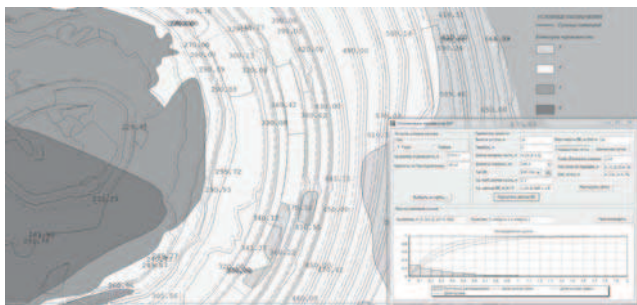


Рис. 4. Снимок экрана с графическим интерфейсом разработанной системы

В формуле (5) геометрическое расположение зарядов выражается величиной W , a или b , детонационные характеристики – величинами D , ρ_B , $d_{з}$, свойства массива – величинами f , Φ , d_e .

Проанализируем численно величину среднего размера куска в зависимости от входящих в (5) фактических параметров БВР, свойств трещиноватого массива и сравним расчетные результаты с фактическими, полученными после массовых взрывов на карьере «Восточный». Результаты расчетов и фактические средние размеры кусков взорванной горной массы приведены в табл. 2.

Численный анализ табл. 2 показывает, что средневзвешенная величина $d_{с,р}$ по всем блокам составляет: по руде 0,25 м (фактические замеры) и 0,29 (по расчету); по вскрыше 0,31 и 0,27 м соответственно. Среднее отклонение расчетных значений от фактических равно 5 см, или 12 %, что, согласно Инструкции по проведению маркшейдерских работ, не превышает максимально допустимой разности двух независимых определений.

Полученная математическая модель используется для оценки надежных параметров БВР (a , b , W , $q_{п}$) и результатов взрыва $d_{с,р}$ на любом участке карьера. Для этого на интерактивной карте взрываемости указывают контур буровзрывного блока, а данные о естественных параметрах массива, значение среднего требуемого диаметра куска добавляют в расчет автоматически из базы данных свойств области карты, соответствующей категории взрываемости пород (рис. 4).

Задавшись оптимальными параметрами проекта массового взрыва (типом ВВ, диаметром скважин, высотой уступа, величиной перебура), нажатием кнопки «Расчитать расход ВВ» на монитор выводятся значения удельного расхода ВВ и параметров сетки взрывных скважин, позволяющие достичь необходимого качества дробления горной массы. Значения в полях «Вместимость ВВ» и «Длина незаряжаемой части» рассчитываются автоматически, исходя из конструкции заряда. Кроме этого, оператор может оценить фракционный состав взорванной горной массы при данных параметрах взрывания и оперативно выполнить их корректировку.

Выводы

1. Усовершенствована и проверена в условиях карьера «Восточный» АО «Полюс» методика натурного изучения блочности пород в массиве с использованием текстурированной 3D-модели актуальной поверхности карьера, построенной по данным аэрофотосъемки откосов уступов беспилотными летательными аппаратами.


2. На представительном фактическом материале (808319 измерений по 7 петрографическим типам пород) в пределах карьера «Восточный» установлены следующие особенности вскрытого им массива горных пород: значительный диапазон размеров отдельностей пород (0,11–2,13 м) и среднего размера отдельностей в каждом их петрографическом типе (0,36–0,91 м), четко проявленная тенденция к увеличению с глубиной (520 м по вертикали) блочности породного массива.

3. На основе закона сохранения энергии разработана математическая модель и получена формула для определения расчетного удельного расхода ВВ, обеспечивающего заданный размер среднего куска взорванной горной массы.

4. Путем теоретических исследований и с учетом фактического гранулометрического состава взорванной горной массы в карьере получена формула для определения среднего размера куска $d_{с,р}$ в зависимости от технологических параметров БВР и естественных свойств породного массива. Результаты сопоставления прогнозных и фактических данных, выполненного по 16 буровзрывным блокам, расположенным на различных участках карьерного поля, показали их хорошую сходимость (среднее отклонение прогноза среднего размера куска от фактических данных составляет 5 см, или 12 %).

5. Применение интерактивной карты взрываемости позволяет оперативно рассчитать параметры БВР и дать предпроектную оценку качества взрывной подготовки горной массы по среднему размеру куска на любом участке карьера с известной блочностью и крепостью слагающих его пород.

Библиографический список

1. Суханов А. Ф., Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1983. – 344 с.
2. Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н. Метод расчета параметров буровзрывных работ на карьерах с целью обеспечения заданного качества дробления горных пород // Горный журнал. 2017. № 8. С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.12
3. Кутузов Б. Н. Справочник взрывника : в 2 ч. Сер. : Библиотека горного инженера. – М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2014. Т. 10. Взрывное дело. Кн. 1. Ч. II. Техника, технология и безопасность взрывных работ. – 304 с.
4. Фокин В. А., Тогунов М. Б., Семкин С. В., Шитов Ю. А. Методика расчета параметров буровзрывного дробления массива горных пород при малой высоте уступов в карьере // Горный журнал. 2015. № 2. С. 51–54. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.09
5. Furtney J. K., Sellers E., Onederra I. Simple models for the complex process of rock blasting // *Rock Fragmentation by Blasting : Proceedings of the 10th International Symposium*. – Boca Raton : CRC Press, 2013. P. 275–282.
6. Zheng Bingxu, Li Zhanjun, Liu Yi. Theory and Practice of the Fragmentation Control of Rock Blasting // *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2011. P. 188–194.
7. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries, Ibadan, Oyo State, Nigeria // *Geomaterials*. 2013. Vol. 3. No. 1. P. 28–37.
8. Дугартыренов А. В., Ким С. И., Бельченко Е. Л., Николаев С. П. Требования к выбору параметров БВР для дробления сложноструктурных массивов горных пород комбинированными и дополнительными зарядами // *Взрывное дело*. 2015. № 113/70. С. 142–148.
9. Снитка Н. П., Мислибоев И. Т. Экспериментальное обоснование параметров сетки скважин на карьерах в зоне взрывного ослабления породного массива // *Горный журнал*. 2016. № 2. С. 13–15. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.02
10. Ghiasi M., Askarnejad N., Dindarloo S., Shamsoddini H. Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26. Iss. 2. P. 183–186.
11. Yang L.-Y., Ding C.-X. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 107. P. 150–158.
12. Xia X., Li H., Niu J., Li J., Liu Y. Experimental study on amplitude change of blast vibrations through steps and ditches // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 71. P. 77–82.
13. Овсянников А. Н., Игнатенко И. М., Дунаев В. А. Районирование карьерного поля по взрываемости горных пород (на примере рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК») // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Естественные науки*. 2015. № 15(212). С. 172–177.
14. Игнатенко И. М., Коновалов А. В., Овсянников А. Н. Компьютерная технология расчета параметров буровзрывных работ на карьерах // *Черная металлургия*. 2015. № 10(1390). С. 35–37.
15. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Kononov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS Geomix // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. Iss. 4. P. 26809–26818.
16. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. – Белгород, 2017. – 191 с. 

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 1, pp. 46–50
DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10

Improving procedure of pre-project assessment of hard rock blastability in open pit mines

Information about authors

I. M. Ignatenko¹, Director of the Institute of Earth Sciences, Candidate of Engineering Sciences
V. A. Dunaev¹, Professor, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences
V. N. Tyupin¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, tyupinvn@mail.ru
¹Belgorod State University, Belgorod, Russia

Abstract

Efficiency of hard mineral mining by the opencast method is in many ways governed by blasting quality, while the latter depends on natural jointing and hardness of rocks, as well as on drilling-and-blasting design.

In terms of Vostochny open pit mine, Polyus, procedure of full-scale examination of exposed rock mass in vertical and horizontal directions is improved. Using a representative sampling of actual data (808 319 measurements in rocks of 7 petrographic types) within the limits of Vostochny open pit mine, the following features of exposed rock mass are identified: considerable range of size of joints (0.11–2.13 m) and average size of joints in each petrographic type (0.36–0.91 m); clear trend of intensification of jointing with increasing depth (520 m vertically down). The mathematical model is developed for prediction of size in rock fragmentation by blasting with regard to the energy conservation law and effect of blasting environment in a rock block. The formula is proposed for determining average size of rock fragmentation by blasting depending on drill-and-blast process parameters and natural properties of rock mass. Based on the interactive map of rock blastability, the procedure is developed for on-line computation of drill-and-blast design parameters and pre-project assessment of blasting quality in any area of an open pit mine with the known jointing and hardness of rock mass. Application of this procedure will enable improved quality and shorter time of blasting in extraction blocks.

Keywords: open pit mine, jointing and hardness of rocks, interactive map, blastability, drill-and-blast design parameters, average size of rock fragmentation.

References

1. Sukhanov A. F., Kutuzov B. N. Breakage of Rocks. 2nd enlarged and revised edition. Moscow : Nedra, 1983. 344 p.
2. Kutuzov B. N., Tyupin V. N. Drilling and blasting design method to ensure preset fragmentation of rocks in open pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 8. pp. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.12

3. Kutuzov B. N. Shot-Firer's Manual. In two volumes. Series: Mining engineer's library. Moscow : Gornoe delo LLC «Kimmeriyskiy tsentr», 2014. Vol. 10. Blasting. Book. 1. Iss. II. Technique, Technology and Safety of Blasting. 304 p.
4. Fokin V. A., Tozunov M. B., Semkin S. V., Shitov Yu. A. Design procedure for drilling-and-blasting in open pit mines with low benches. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 2. pp. 51–54. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.09
5. Furtney J. K., Sellers E., Onederra I. Simple models for the complex process of rock blasting. *Rock Fragmentation by Blasting : Proceedings of the 10th International Symposium*. Boca Raton : CRC Press, 2013. pp. 275–282.
6. Zheng Bingxu, Li Zhanjun, Liu Yi. Theory and Practice of the Fragmentation Control of Rock Blasting. *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2011. pp. 188–194.
7. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries, Ibadan, Oyo State, Nigeria. *Geomaterials*. 2013. Vol. 3, No. 1. pp. 28–37.
8. Dugartyrenov A. V., Kim S. I., Belchenko E. L., Nikolaev S. P. Blasting complex massive rock structures using combined and additional charges parameters for blasting works. *Explosion technology*. 2015. No. 113/70. pp. 142–148.
9. Snitka N. P., Misliboev I. T. Experimental proof of blasthole pattern in pre-blasting weakening zones in open pit mines. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 2. pp. 13–15. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.02
10. Ghiasi M., Askarnejad N., Dindarloo S., Shamsoddini H. Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26, Iss. 2. pp. 183–186.
11. Yang L.-Y., Ding C.-X. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 107. pp. 150–158.
12. Xia X., Li H., Niu J., Li J., Liu Y. Experimental study on amplitude change of blast vibrations through steps and ditches. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 71. pp. 77–82.
13. Ovsyannikov A. N., Ignatenko I. M., Dunayev V. A. Methods of zoning of quarry field in explosiveness of rocks (on example mine "Zhelezny" of OJSC "Kovdorsky GOK". *Scientific bulletins of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences*. 2015. No. 15(212). pp. 172–177.
14. Ignatenko I. M., Kononov A. V., Ovsyannikov A. N. The Computer-Aided Technology for Calculating the Parameters of the Drilling and Blasting Operations at the Open-Cut Mines. *Ferrous Metallurgy*. 2015. No. 10(1390). pp. 35–37.
15. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Kononov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS Geomix. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, Iss. 4. pp. 26809–26818.
16. Tyupin V. N. Blasting and Geomechanical Processes in High-Stress Fractured Rock Mass. Belgorod, 2017. 191 p.