



## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.35:681.3

### ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ ВЗРЫВАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА КАРЬЕРАХ

**В.А. Дунаев, И.М. Игнатенко,  
Н.А. Годовников,  
А.Н. Овсянников**

*Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет, Россия, 308015,  
г. Белгород, ул. Победы, 85*

*E-mail: ignat86\_m@mail.ru*

Дана характеристика разработанного авторами информационно-аналитического и программного обеспечения оценки взрываемости горных пород на карьерах. Изложена методика такой оценки и описана созданная на ее основе автоматизированная система в виде функционального модуля в ГИС ГЕОМИКС.

Ключевые слова: карьер, буровзрывные работы, взрываемость горных пород, кусковатость взорванной горной массы, оценка, программное обеспечение, автоматизированная система.

#### Введение

Сегодня в России более 70% твердого минерального сырья добывается открытым способом. При этом доминирующая часть (до 60%) расходов на его добычу приходится на буровзрывные работы (БВР). Оптимизация параметров БВР на карьерах и, соответственно, затрат на их выполнение основывается на оценке взрываемости (сопротивления взрывному разрушению) горных пород, которая определяется их блочностью (размером отдельности), анизотропией интенсивности трещиноватости и крепостью. Существующие способы оценки взрываемости пород либо сложные в исполнении и неоднозначные по своим результатам (сейсмоакустический и по энергоёмкости бурения взрывных скважин), либо требуют большого объёма натурных исследований (геологический), что связано с необходимостью длительного пребывания людей в опасной зоне (нижней части откосов уступов карьера). При этом обработке первичных данных натурных исследований осуществляется преимущественно вручную.

Кроме того, остаются нерешёнными такие важные вопросы как оценка анизотропии интенсивности трещиноватости породного массива, предпроектный прогноз кусковатости горной массы, оценка кусковатости взорванной горной массы и корректировка по её результатам параметров БВР. Авторами разработана методика и автоматизированная система оценки взрываемости горных пород на карьерах (рис. 1), обеспечивающая безопасность натурных исследований и оперативность получения всего комплекса исходных материалов, необходимых для проектирования БВР.

Натурные (полевые) работы в карьере имеют своей целью получение пространственно-координированной первичной информации путем помаршрутной геолого-структурной съёмки карьера, сопровождаемой отбором образцов горных пород для физико-механических испытаний. В процессе съёмки откосы уступов карьера подвергаются фотогеологической документации с применением планшетного компьютера. При этом вместо традиционной зарисовки (трудёмкой в исполнении и очень схематичной, неточной, во многом субъективной по своему конечному результату) выполняют дешифрирование масштабированного фотоснимка и различным цветом на нём показывают элементы геологического строения документируемого участка уступа (контакты пород, разрывные нарушения, оси складок и др.).

Следующим этапом натурных исследований является измерение азимутов и углов падения разрывных нарушений и трещин отдельности, а также массовые измерения расстояний между трещинами одной системы и размера отдельности. Поскольку в откосах рабочих уступов карьера структурные элементы (разрывные нарушения, трещины отдельности), как правило, проявлены обнажённой плоскостью, дистанционное определение их ориентации осуществляется таким образом. Высокоточным тахеометром (например, Sokkia SET1030R3) в безотража-

тельном режиме производят съёмку нескольких (не менее 3) точек, принадлежащих интересующей нас плоскости. Угловые и линейные параметры съёмки с помощью специальной программы трансформируются в координаты этих точек. На основе известного уравнения плоскости выполняется расчет азимута и угла её падения по координатам принадлежащих ей точек [1]. На участках «гладкого» откоса уступа ориентация структурных элементов устанавливается путем непосредственного измерения их азимутально-угловых параметров горным компасом, а в зонах магнитных аномалий – гироскопическим компасом.

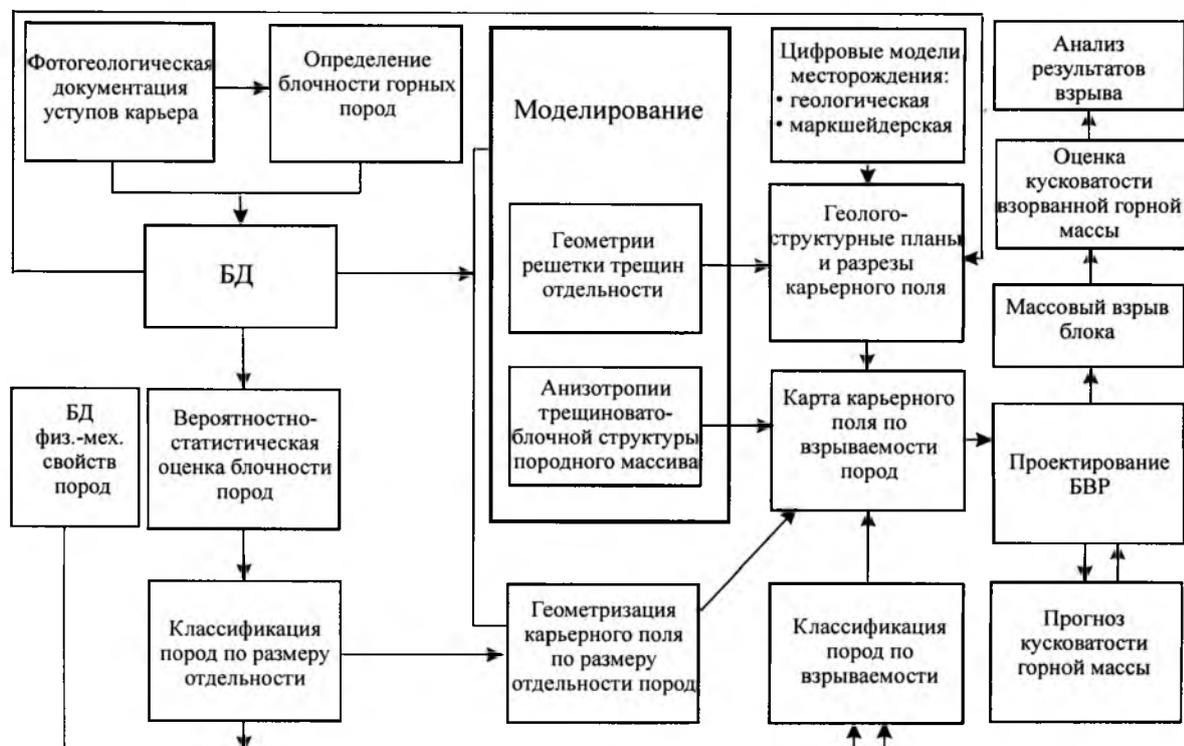


Рис. 1. Принципиальная блок-схема методики и автоматизированной системы оценки взрываемости горных пород на карьерах

Определение расстояний между трещинами в каждой системе и размера ограничивающих этими трещинами отдельности пород выполняется полностью дистанционно по масштабированному фотоснимку откоса уступа. По результатам съёмки тахеометром характерных точек на поверхности откоса или сканирования её лазерным сканером плоское фотоизображение в компьютере трансформируется в трёхмерную поверхность и с помощью перспективных преобразований устраняются искажения, возникающие при фотосъёмке откоса. Затем трансформированный снимок подвергают обработке в ручном режиме: исключают из области определения размера отдельности осыпь в основании уступа и разрушенную зону перебуров взрывных скважин в верхней его части, разными типами линий векторизуют трещины различных блокообразующих систем. На подготовленном таким образом снимке автоматически по перпендикуляру между смежными трещинами каждой системы определяют искомые расстояния.

По материалам натурных исследований и результатам дистанционного определения элементов залегания разрывных нарушений и трещин, расстояний между трещинами одной системы и блочности пород формируется база пространственно-координированных данных, включающая первичную количественную информацию. Все последующие процедуры, составляющие предложенную методику, реализуются через запрос к базе данных.

По каждому типу пород, слагающих карьерное поле, определяются статистические характеристики размера отдельности (размах, среднее, математическое ожидание и др.), строится полигон вариационного ряда и график плотности вероятности. На основе анализа полученных данных разрабатывают классификацию пород по размеру отдельности и рассчитывают долю (в %) каждого класса в породном массиве.

На визуализированном маркшейдерском плане карьера с трассами пройденных маршрутов и интервалами по ним с указанием для каждого интервала среднего размера отдельности пород осуществляют геометризацию карьерного поля по этому параметру с учетом разра-



ботанной классификации, т.е. карьерное поле расчленяют на участки, каждый из которых представлен одним классом крупности отдельности пород.

Складчато-разрывная структура породного массива отражается на сводном геолого-структурном плане карьера. Для его построения привлекаются цифровые геологическая и маркшейдерская модели разрабатываемого месторождения. Увязка на плане между соседними геологическими маршрутами плоских структурных элементов (разрывных нарушений, даек магматических пород, четких границ между моноклинально залегающими пластами осадочных или метаморфических пород) осуществляется автоматически путем трассирования следа пересечения структурного элемента с поверхностью карьера [2]. Нечеткие и криволинейные в плане геологические границы увязывается интерактивно.

Структурно однородные участки на плане карьера характеризуются круговой ориентирной диаграммой трещин с показом на ней полюсов трещин различных систем. Такие диаграммы получают как результат компьютерного моделирования геометрии решетки трещин по запросу к базе данных.

Итоговым картографическим документом для непосредственного использования при проектировании буровзрывных работ является карта карьерного поля по взрываемости горных пород. Она строится путем совмещения геолого-структурного плана карьера и его плана, геометризованного по категориям блочности (размера отдельности) пород в соответствии с классификацией пород по взрываемости. В этой классификации каждая категория пород по взрываемости характеризуется категорией блочности, принадлежностью к определенному инженерно-геологическому литотипу пород с указанием их крепости, параметрами взрывания (размером ячейки сети взрывных скважин, их диаметром, удельным расходом ВВ). Для разработки классификации пород по взрываемости используется номограмма О.П. Якобашвили [3], связывающая взрываемость пород с их крепостью и блочностью.

Выбор геометрии ячейки сети взрывных скважин и схемы их коммутации при проектировании буровзрывных работ на карьерах определяется особенностями анизотропии интенсивности трещиноватости породного массива. Она оценивается направлением ( $\bar{e}$ ) и длиной ( $L(\bar{e})$ ) вектора максимальной и минимальной интенсивности трещиноватости:

$$\bar{e}_{max} = \sum_i \omega_i \cdot \bar{n}_i; \bar{e}_{min} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i} \cdot \bar{n}_i$$

$$L(\bar{e}) = \sum_{i=1}^n \frac{[\omega_i][x_i] \cos \alpha + [y_i] \cos \beta + [z_i] \cos \gamma}{N_i \sqrt{[x_i]^2 + [y_i]^2 + [z_i]^2}},$$

где,  $\omega_i$  - частота трещин ( $m^{-1}$ ) по их системам;  $\bar{n}_i$  - вектор нормали к плоскости трещин каждой системы;  $\bar{e}_{max}, \bar{e}_{min}$  - вектор максимальной и минимальной интенсивности трещиноватости;  $\alpha, \beta, \gamma$  - углы между вектором и осями координат (x, y, z);  $L(\bar{e})$  - математическое ожидание интенсивности трещиноватости по вектору.

Компьютерная технология предпроектного прогноза кусковатости горной массы с целью корректной проектной удельного расхода разработана на физико-математической основе П.С. Миронова [4]. В общем случае горные породы относятся к нормально дробимым, для которых справедливо распределение Вейбулла в виде функции:

$$P(x) = 1 - e^{-k_1 * k_2 * \phi * q * x},$$

где,  $P$  - вероятность выхода кусков размером от 0 до любого заданного «х», м;

$q$  - удельный расход энергии, Дж/м<sup>3</sup>; равен произведению удельного расхода ВВ на его теплотворную способность или «теплоту взрыва»;

$\phi$  - эталонная константа дробимости пород (м<sup>2</sup>/Дж); отражает расход энергии на образование единицы поверхности и зависит от свойств массива (прочности пород и среднего размера их элементарного структурного блока); определяется по графикам (рис.6).

$k_1, k_2$  - поправки в эталонный константе:

$$k_1 \text{ (учет детонационного импеданса)} = \sqrt{\frac{3,8 * 10^6}{\rho * c}},$$

где  $\rho$  - плотность применяемого ВВ, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  - скорость детонации этого ВВ, м/с.

$$k_2 \text{ (учет диаметра заряда)} = \sqrt{\frac{0,225}{d}},$$

где  $d$  – диаметр заряда, м.

$$P = 100 * e^{-k_1 * k_2 * \phi * q * x},$$

где  $P$  – выход негабарита (%), т.е. выход куска выше заданного размера «х».

$$D_{cp} = \frac{1}{k_1 * k_2 * \phi * q}$$

где  $D_{cp}$  – средний размер куска во взорванной массе, м.

Решением исходного уравнения относительно  $q$  определяем проектный удельный расход ВВ, обеспечивающий заданные параметры качества взрывной подготовки горной массы.

Оценка кусковатости пород во взорванной горной массе осуществляется в целом по той же методике, что и блочности пород в откосах уступов карьера, но с одним существенным отличием. Фрагментация развала на фотоснимке выполняется полностью автоматически с использованием для этого алгоритма маркерного водораздела Ф. Мейера [5]. Каждый фрагмент характеризуется максимальным и средним линейными размерами. В итоге получаем гистограмму и график плотности вероятности размера куска породы в развале и его статистические характеристики, а также критериальные параметры, характеризующие качество взрывной подготовки горной массы (средний размер куска, выход негабарита).

Автоматизированная система оценки взрываемости горных пород на карьерах, основанная на изложенной выше методике, реализована в виде функционального модуля *BlockBlast* в среде горно-геологической ГИС ГЕОМИКС [6]. Она представляет собой совокупность функциональных модулей, каждый из которых включает одинаковое для всех ядро и программный компонент, характерный для конкретного модуля (рис. 2).



Рис. 2. Структурная и функциональная схема ГИС ГЕОМИКС

Ядро системы обеспечивает единый формат данных, их пространственно-координатную привязку, стандарт интерфейсов пользователя, сохранение и отображение картографической, цифровой и текстовой информации, в том числе как результат решения задачи в программном компоненте функционального модуля. Программный компонент – набор специальных программ, создающих интерфейс ядра с пользователем и реализующих алгоритмы решения определенных задач. Программные компоненты выполняют запрос к ядру, обрабатывают полученную информацию (решают задачи), осуществляют взаимодействие между функциональными модулями на уровне обмена данными. Программное ядро системы ГИС ГЕОМИКС включает следующие программные компоненты: БД, растровый редактор, векторный картографический редактор и редактор макетов.

Базовыми функциональными модулями ГИС ГЕОМИКС являются геологический (DrillProj), маркшейдерский (Mark) и проектирования БВР (DrillBlast). Использование прикладных программных модулей и функциональных возможностей ядра ГИС ГЕОМИКС позволяет обрабатывать первичную маркшейдерскую, геологическую и буровзрывную информацию и предоставлять её программному компоненту функционального модуля BlockBlast.

Программный компонент функционального модуля BlockBlast представляет собой комплекс программ (рис 3), реализующих алгоритмы, разработанные в соответствии с методикой и математической основой решения того или иного блока задач по оценке взрываемости пород на карьерах.

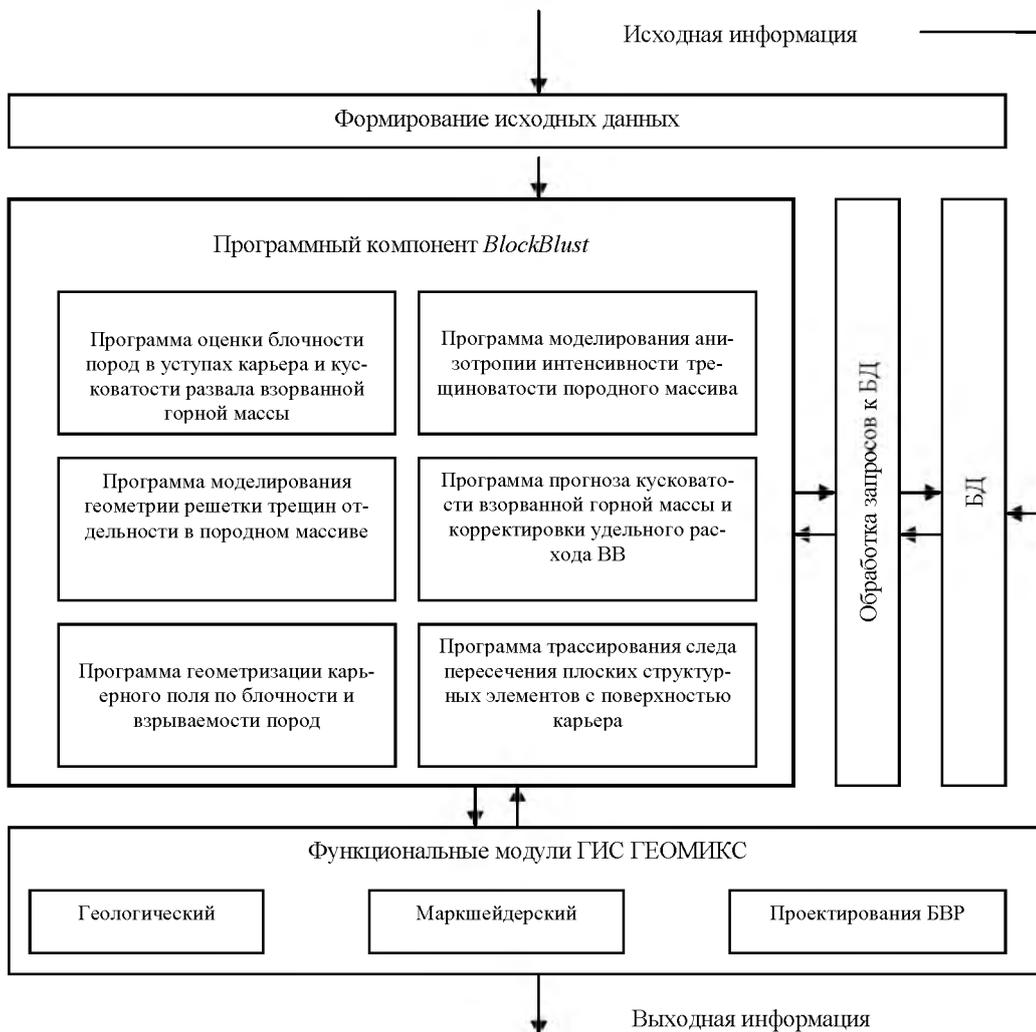


Рис. 3. Структурная и функциональная схема программного компонента BlockBlast

Исходная информация вводится посредством специально разработанных программных инструментов (диалоговое окно, геометрическая область и т.п.) и напрямую в базу данных. Структура базы данных иерархическая.



Обработка запросов к БД позволяет адаптировать программный компонент под любой формат данных, т.е. при изменении формата БД не надо переписывать каждый алгоритм программы под новый формат, необходимо лишь изменить саму функцию обработки запросов к БД. Программный компонент *BlockBlast* будучи надстройкой ГИС ГЕОМИКС, использует ее функциональные возможности (интерфейс, отображение информации, ввод и корректировка данных и т.п.). Выходной информацией являются графические, табличные и текстовые документы.

Положительные результаты апробации базовых блоков разработанной системы оценки взрываемости горных пород на карьерах Стойленского и Ковдорского ГОКов доказали ее высокую эффективность. Внедрение системы планируется после проведения опытно-методических работ по ее адаптации к производственным условиям.

### Список литературы

1. Дистанционное определение элементов залегания трещин при натурном изучении деформаций уступов карьера / Дунаев В.А., Олейник О.В., Игнатенко И.М., Яницкий Е.Б. // Изв. ТулГУ. Науки о земле, вып.1. – 2011. – С. 107-111.
2. Компьютерная технология трассирования следа пересечения трещины с поверхностью карьера для решения геолого-структурных задач / Дунаев В.А., Игнатенко И.М., Кабелко С.Г., Яницкий Е.Б. // ГИАБ. – 2011. – № 4. – С.71-74.
3. Якобашвили О.П. Цифровая сейсмометрия массивов горных пород на карьерах. – В кн.: Актуальные проблемы освоения месторождений и использования минерального сырья. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – С.71-91.
4. Оксанич И.Ф., Миронов П.С. Закономерности дробления пород взрывом и прогнозирование их гранулометрического состава. – М.: Недра, 1982. – 166 с.
5. Meyer F. Color image segmentation // The collection of materials of the International Conference on Image Processing and its Applications. – Maastricht, Netherlands, 1992. – P. 303-306.
6. Серый С.С., Дунаев В.А., Герасимов А.В. Геолого-маркшейдерская ГИС ГЕОМИКС: структура, функциональные возможности, опыт внедрения // Маркшейдерский вестник. – 2006. – №4. – С. 54-56.

## SOFTWARE AND INFORMATION-ANALYTICAL SUPPORT OF THE ASSESSMENT OF ROCKS EXPLOSIBILITY IN OPEN-PITS

**V.A. Dunaev, I. M. Ignatenko,  
N. A. Godovnikov,  
A. N. Ovsyannikov**

*Belgorod State National Research  
University, Pobedy St., 85, Belgorod,  
308015, Russia  
E-mail: ignat86\_m@mail.ru*

Software and information-analytical support of the assessment of rocks explosibility in open pits is presented in the authors' characteristic. The technique of such assessment is stated and the automated system created on its basis in the form of the functional module in GIS the GEOMIX is described.

Key words: open-pit, blast-hole drilling, explosibility of rocks, exploded rock mass lumpiness, assessment, software, the automated system.