УДК 007.3

В.А. Дунаев
д-р геол.-мин. наук
профессор
ОАО «ВИОГЕМ»[1]
заведующий отделом геологии и геоинформатики
dunaev_va@geomix.ru

С.Г. Кабелко
канд. техн. наук
ОАО «ВИОГЕМ»[1]
старший научный сотрудник
kabelko@geomix.ru

А.В. Герасимов
канд. техн. наук
ОАО «ВИОГЕМ»[1]
заведующий лабораторией геоинформационных систем
gerasimov_av@geomix.ru

Т.П. Котарева
ОАО «Стойленский ГОК»[2]
ведущий геолог
Kotareva_TP@sgok.ru

Компьютерная технология информационного обеспечения оперативного планирования добычи руд в карьере

[1]Россия, 308007, Белгород, пр. Б. Хмельницкого, 86.
[2]Россия, 309500, Белгородская обл., Старый Оскол, Юго–западный промрайон, площадка фабричная, проезд 4.

В статье изложена основанная на блочном моделировании развала взорванной горной массы компьютерная технология информационного обеспечения оперативного планирования добычи руды в карьере с получением по всем буровзрывным блокам картограмм распределения содержания полезного компонента и построенных на их основе схем размещения заходок экскаватора с указанием объема и качества руды в каждой из них. Эта информация передается в автоматизированную систему управления горно-транспортным комплексом для организации внутрикарьерного усреднения добытой руды

Ключевые слова: карьер; буровзрывной блок; развал взорванной горной массы; планирование добычи руды; компьютерная технология; моделирование; автоматизация; заходка экскаватора; внутрикарьерное усреднение; система управления горно–транспортным комплексом

Оперативное планирование добычи руд в карьере призвано обеспечить стабильность требуемого качества и количества подаваемого на обогатительную фабрику сырья, что достигается процедурой его внутрикарьерного усреднения, традиционно базирующемся непосредственно на данных опробования буровзрывных скважин и расчетах объемов отгружаемой на фабрику

Рис. 1.
Схема прогнозной оценки геометрии развала буровзрывного блока и распределения в нем содержания полезного компонента с получением информации, необходимой для планирования его отработки

руды в процессе отработки буровзрывных (БВР) блоков.

При этом получается, что качество руды оценивается в БВР блоке, а ее объем – в образованном после взрыва блока кусковатом развале. Поскольку распределение в развале компонентов, определяющих качество добываемого сырья, значимо отличается от такового в первичном контуре БВР блока, это приводит к сбоям во внутрикарьерном усреднении подаваемого на фабрику сырья.

Разработанное ОАО «ВИОГЕМ» в составе ГИС ГЕОМИКС компьютерное моделирование развала взорванной горной массы [1] позволяет решить задачу информационного обеспечения оперативного планирования добычи руды в карьере, предусматривающую один объект оценки качества и количества добываемой руды (развал взорванной горной массы). Технология решения этой задачи базируется на оценке геолого-маркшейдерской ситуации в карьере до и после взрывных работ с использованием компьютерного прогнозирования результатов взрывного разрушения породного массива по представленной на ***рис. 1*** схеме. Технология апробирована на карьере ОАО «Стойленский ГОК», эксплуатирующем одноименное месторождение железистых кварцитов на северо-востоке Белгородской области. На этом карьере ранее была проведена верификация компьютерной технологии прогнозирования развала взорванной горной массы, результаты которой показали, что в процессе добычи железистых кварцитов образованная взрывом кусковатая рудная масса перемещается в среднем на 22 м, а возможные средние отклонения прогнозной позиции кусков руды от их фактического местонахождения в развале не превышают 6 м, что в 3,3 раза меньше ширины заходки экскаватора (20 м) [2].

Скважинные модели БВР блоков формируются в соответствии с паспортами их взрыва и отражают позицию и параметры взрывных скважин, данные проекта взрыва (сетку скважин, их диаметр, глубину и угол наклона, время замедления при многорядном взрывании, удельную энергию и скорость детонации взрывчатого вещества, длину заряда, удельный вес забойки, схему монтажа взрывной сети). Разработанный интерфейс автоматической загрузки указанных выше характеристик позволяет оперативно создавать такие модели и контролировать правильность ввода исходных данных.

Далее на основе скважинной модели и данных маркшейдерской съемки поверхности каждого БВР блока автоматически создаются их блочные модели (БМ) с размером элементарной ячейки 1×1×1 м. Ячейкам, через которые проходят стволы скважин, присваиваются значения содержания компонентов по данным опробования этих скважин, а для остальных ячеек они рассчитываются методом обратных расстояний на основе эллипсоида зоны влияния проб в зависимости от параметров сетки буровзрывных скважин [3]. Кроме того каждой ячейке придается свое значение плотности пород и их прочностных характеристик (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, критического напряжения на сдвиг, сжатие и растяжение).

Моделирование процесса взрывного разрушения породного массива реализовано в программном модуле *BlastModel* системы ГИС ГЕОМИКС и представляет собой виртуальное отслеживание позиции каждого элементарного блока со всеми заданными ему характеристиками при перемещении в ре-

зультате взрыва вплоть до формирования развала взорванной горной массы. Конечный итог этой процедуры – БМ образованного взрывом развала, характеризующая прогнозную область разлета разрушенного взрывом материала и прогнозное распределение полезного компонента в каждой элементарной ячейке БМ.

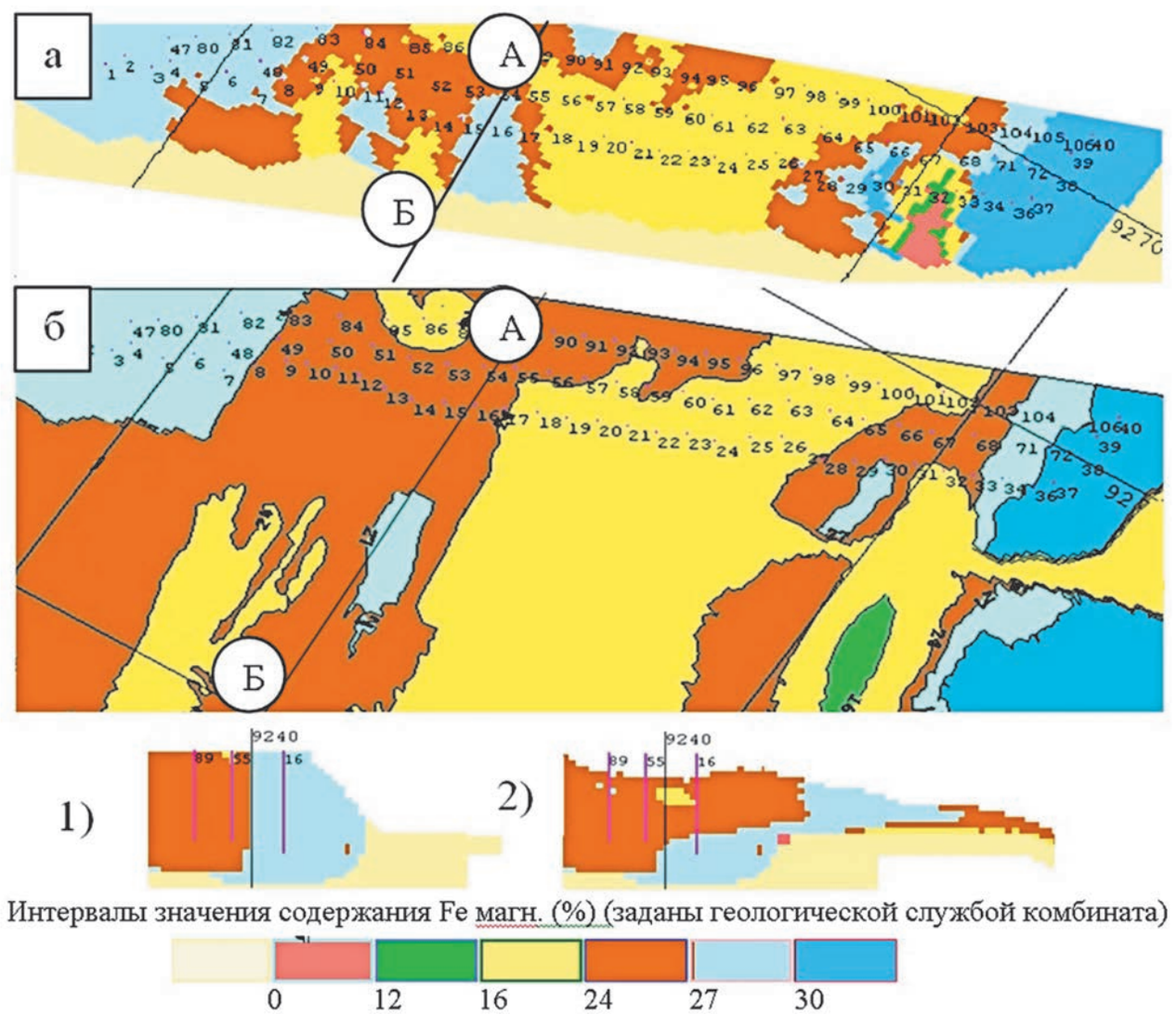
Обработка результатов моделирования заключается в построении картограммы распределения содержания компонента, определяющего качество полезного ископаемого (усредненно на высоту развала) (***рис. 2***), расчете объемов с оценкой качества руды в целом по развалу и его отдельным участкам с градацией по добычным горизонтам. Усредненное прогнозное содержание компонента *c* (*x, y*) рассчитывается в соответствии с размером элементарной ячейки БМ по сетке 1×1 м с использованием формулы:

$$c(x,y) = \left(\int_0^{h(x,y)} C(x,y,z)\,dz \right) / h(x,y),$$

где C(x,y,z) – установленное в процессе моделирования развала содержание полезного компонента в элементарной ячейке БМ, *h(x,y)* – высота развала.

Расчет объемов руды и оценка ее качества предваряются построением двух поверхностей данного участка карьера (***рис. 3***). Одна из них (а) ограничивает развал сверху и строится путем триангуляции Делоне [4] с учетом всех точек центров верхних ячеек блочной модели развала, а другая (б) – ограничивает развал снизу и строится таким же образом, но

Рис. 2.
Картограмма распределения содержания $Fe_{магн}$ в буровзрывном блоке № 077 (а) и в образованном после его взрыва развале горной массы (б); ниже – разрезы по линии А-Б до (1) и после (2) взрыв



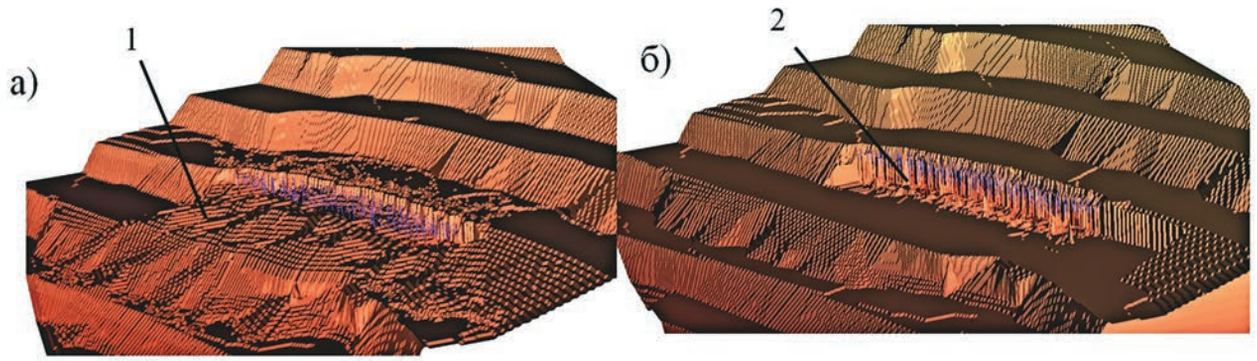


Рис. 3.
Поверхность участка карьера до (а) и после полной (б) отработки взрывного блока № 77 (1, 2 – соответственно, верхняя и нижняя поверхности, ограничивающие развал взорванной горной массы)

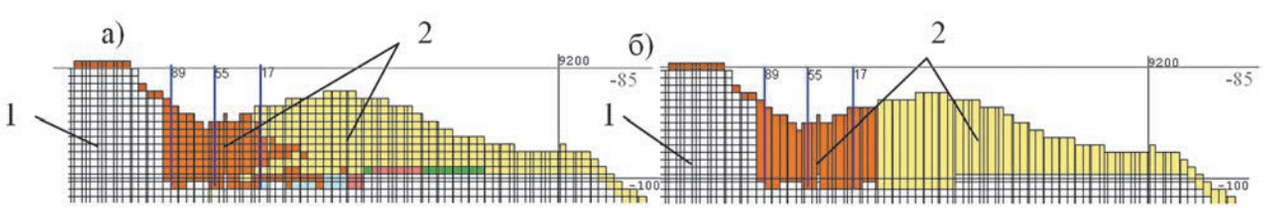
по точкам центров ячеек, подстилающих развал. Подсчет объемов выполняется методом вертикальных сечений тела, ограниченного указанными выше двумя поверхностями. Для достижения требуемой точности вычислений расстояние между сечениями выбирается в соответствии с маркшейдерской инструкцией [5]. Обычно оно укладывается в интервал 10–20 м. По каждому сечению автоматически строится разрез, характеризующий с заданным шагом распределение содержания полезного компонента, и формируются таблицы подсчета объемов и среднего содержания компонента по ограниченным смежными разрезами частям развала.

Геолого-маркшейдерское обеспечение оперативного планирования добычи руды базируется на построении и сопровождении блочных моделей двух типов. Первый из них отражает части карьерного поля с вскрытыми рудными телами, не затронутыми в данное время буровзрывными работами, а второй – образованные взрывами развалы взорванной горной массы. Обе эти модели должны иметь общую точку начала координат, чтобы исключить линейные смещения их элементарных ячеек относительно друг друга.

Модель первого типа ограничивается сверху текущей поверхностью карьера, а снизу – его проектной поверхностью в направлении развития горных работ на заданный период времени. Она отражает следующую необходимую для функционирования модуля *«BlastModel»* информацию: пространственную позицию и физико-механические параметры типов горных пород, слагающих карьерное поле; исходное (установленное по результатам разведочных работ) распределение содержания полезного компонента, которое в указанном модуле дополняется данными опробования буровзрывных скважин. Для корректной интеграции рассматриваемой модели с блочной моделью второго типа необходима возможность разбиения ее элементарных блоков до размера ячеек 1×1×1 м. В связи с этим существующая блочная геологическая модель Стойленского месторождения была детализирована до размера элементарной ячейки 5×5×5 м, а на локальных участках – до 1×1×1 м.

Модель второго типа формируется по результатам моделирования развалов горной массы планируемых к взрыву буровзрывных блоков. Для каждого блока строится прогнозная поверхность развала и подстилающая его поверхность неразрушенного взрывом породного массива (***рис. 3***). После моделирования взрывного разрушения каждого БВР блока ячейки БМ, заключенные между этими поверхностями, со всеми своими характери-

Рис. 4.
Сечение блочной модели участка карьера после взрыва БВР блока № 77 до (а) и после (б) объединения ячеек по оси Z: 1 – массив горных пород; 2 – взорванная горная масса (интервалы значений $Fe_{магн}$ (%) – на рис. 2)



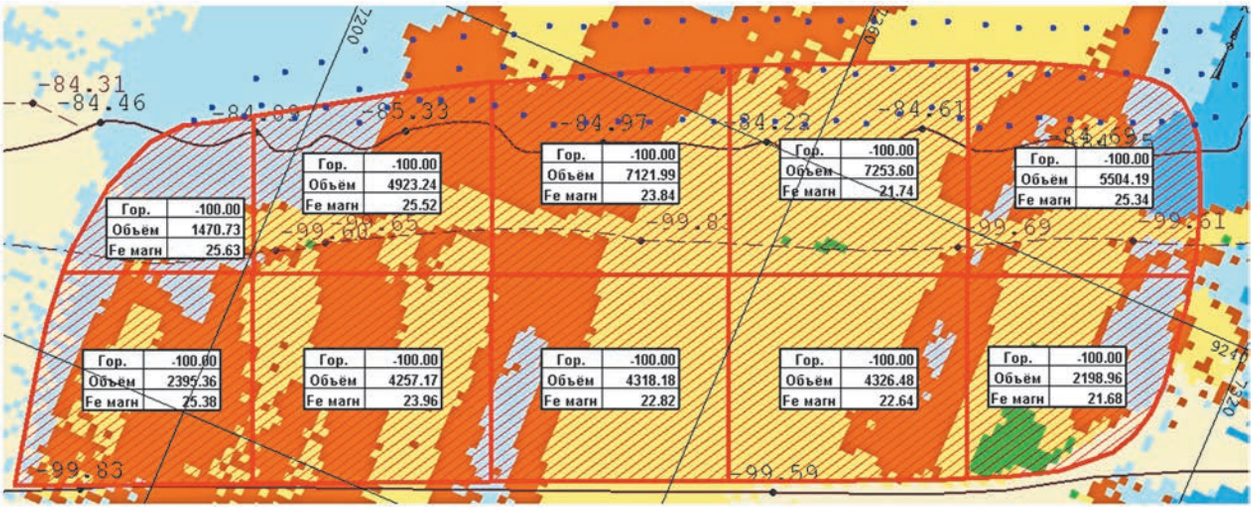


Рис. 5.
Контуры экскавации взорванной горной массы для АСУ ГТК «ВИСТ»

стиками добавляются в модель второго типа, а в модели первого типа отсекаются все ячейки, находящиеся выше подстилающей развал поверхности. В процессе добычи руды блочная модель второго типа корректируется по данным маркшейдерских съемок карьера путем отсечения ячеек, находящихся выше актуальной поверхности развала. Таким образом, полученные БМ двух типов характеризуют геолого-маркшейдерскую ситуацию в карьере после взрыва с учетом результатов прогноза взрывного разрушения горных пород.

Повышение оперативности вычислений с использованием блочной модели достигается путем объединения элементарных ячеек по высоте развала с усреднением содержания полезного компонента (***рис. 4***). Корректировка маркшейдерской ситуации в карьере осуществляется по авторской программе, позволяющей строить горизонтали на основе прогнозной поверхности развала и интегрировать их в соответствующие маркшейдерские планы.

Для решения задач оперативного планирования добычи руды, главной целью которого является ее внутрикарьерное усреднение, помимо актуальной геолого-маркшейдерской информации необходимо отслеживание (диспетчеризация) позиции и состояния горно-транспортного оборудования. На передовых горных предприятиях эта функция возлагается на автоматизированные системы управления горно-транспортным комплексом (АСУ ГТК). В частности на Стойленском ГОКе функционирует АСУ ГТК «ВИСТ» на базе программного обеспечения «Карьер». ГИС ГЕОМИКС интегрирована с этой системой. В нее передаются результаты автоматизированного формирования заходок (контуров экскавации) развала взорванной горной массы и автоматического расчета по данным прогноза взрывного разрушения БВР блока для каждой заходки экскаватора объема руды (м^3) и среднего содержания (%) в ней полезного компонента (***рис. 5***).

Таким образом, разработанная в ГИС ГЕОМИКС на базе компьютерного моделирования развала взорванной горной массы технология информационного обеспечения оперативного планирования добычи руд в карьере позволяет отслеживать геолого-маркшейдерскую ситуацию на участках планирования и проведения буровзрывных работ с использованием блочных моделей двух типов. Первая модель отражает части карьерного поля с вскрытыми рудными телами, не затронутыми в данное время буровзрывными работами. Сверху она ограничена текущей поверхностью карьера, а снизу – его проектной поверхностью в направлении развития горных работ на заданный временной интервал. Вторая модель формируется по результатам компьютерного моделирования развалов горной массы планируемых к взрыву БВР блоков, для каждого из которых строится прогнозная поверхность развала и подстилающая его поверхность неразрушенного взрывом массива горных пород, а также картограмма распределения содержания полезного компонента; выполняется автоматический подсчет объемов руды и среднего содержания компонента по заходкам экскаватора, результаты которого передаются в автоматизированную систему управления горно-транспортным комплексом для организации внутрикарьерного усреднения добытой руды.

Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615905 Компьютерное моделирование развала и прогнозирование распределения полезных компонентов во взорванной горной массе. 9.09.2010.
2. Кабелко С.Г., Дунаев В.А., Герасимов А.В. Верификация компьютерной технологии прогнозирования развала взорванной горной массы в карьерах //Маркшейдерия и недропользование. 2016. № 3(83). С. 62–65.
3. Капутин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра. 2002. 424 с.
4. Ершов В.В., Дремуха А.С., Трость В.М. и др. Автоматизация геолого-маркшейдерских графических работ. М.: Недра. 1990.
5. Инструкция по производству маркшейдерских работ. РД – 07 – 603-03. М. ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России». 2004. 126 с.

UDC 007.3

V.A. Dunaev, Head of the Department of Geology and Geoinformatics, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, "VIOGEM" JSC[1], dunaev_va@geomix.ru.
S.G. Kabelko, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, "VIOGEM" JSC[1], kabelko@geomix.ru.
A.V. Gerasimov, Head. Laboratory of Geoinformatics, Candidate of Engineering Sciences, "VIOGEM" JSC[1], gerasimov_av@geomix.ru.
T.P. Kotareva, Leading Geologist of JSC "StoilenskyGOK", Kotareva_TP@sgok.ru.

[1]86, B. Khmelnizkogo Prospect, Belgorod, 308007, Russia.

[2]Travel 4, Industrial site, South–western industrial zone, Stary Oskol, Belgorod region, 309500, Russia.

Computer technology of information support of operational planning ore extraction in the quarry

Abstract. This article is about the computer technology of information support of operational planning of mining ore in pit based on block modelling of the collapse of blasted rock mass. This technology allows ore production planning with getting distribution cartograms of the content of useful component in all drilling and blasting blocks and obtaining excavator placement schemes stopes built based on them with an indication of volume and quality of the ore in each of them. This information is transmitted to the automated system of mining and transport complex control for the organization of innerquarry averaging of mined ore.

Keywords: quarry; drilling and blasting block; the collapse of the blasted rock mass; ore extraction planning; computer technology; modeling; automation; excavator stope; innerquarry averaging; the control system of mining and transport complex

References

1. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2010615905 Komp'iuternoe modelirovanie razvala i prognozirovanie raspredeleniia poleznykh komponentov vo vzorvannoi gornoi masse. 9.09.2010* [Certificate of state registration of the computer program № 2010615905 Computer modeling of the collapse and prediction of the distribution of useful components in the blown rock mass. 9/09/2010].
2. Kabelko S.G., Dunaev V.A., Gerasimov A.V. *Verifikatsiia komp'iuternoi tekhnologii prognozirovaniia razvala vzorvannoi gornoi massy v kar'erakh* [Verification of computer technology for predicting the collapse of blown rock in quarries]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsoil use], 2016, no. 3(83), pp. 62–65.
3. Kaputin Iu.E. *Gornye komp'iuternye tekhnologii i geostatistika* [Mountain computer technologies and geostatistics]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2002, 424 p.
4. Ershov V.V., Dremukha A.S., Trost' V.M. i dr. *Avtomatizatsiia geologo-marksheiderskikh graficheskikh rabot* [Automation of geological surveying works], Moscow, Nedra Publ., 1990.
5. *Instruktsiia po proizvodstvu marksheiderskikh rabot. RD – 07 – 603-03. M. FGUP «Nauchno-tekhnicheskii tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii»* [Instructions for the production of mine surveying. RD - 07 - 603-03. M. FSUE "Scientific and Technical Center for Safety in Industry of Gosgortekhnadzor of Russia"], 2004, 126 p.