



УДК 681.3.06

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВАЛА БУРОВЗРЫВНОГО БЛОКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВО ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ

С. Г. КАБЕЛКО**ФГУП ВИОГЕМ****e-mail: kabelko@mail.ru**

Компьютерная технология моделирования развала буровзрывного блока предназначена для поиска оптимальных параметров взрыва и экономии времени специалистов на предприятии. Производители современных вычислительных систем идут в сторону увеличения числа процессоров и ядер, а не увеличивают частоту одного процессора. В современных видеокартах количество процессоров 128 и выше. Для оптимального использования аппаратных ресурсов, необходимо применять технологии параллельного программирования. Это позволит значительно повысить производительность компьютерной техники.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, моделирование взрыва.

Компьютерное моделирование развала буровзрывного (БВР) блока позволяет, оперируя параметрами взрывчатки, сети коммутаций, расположением БВР скважин, добиться необходимого качества дробления и спрогнозировать область возможного разлёта разрушаемого материала. А также получить информацию при оперативном планировании работ в карьере без привлечения специалистов о маркшейдерской поверхности после взрыва БВР блока и спрогнозировать распределение полезных компонентов в развале.

Математическая модель процесса развала БВР блока описывает зависимости количественных показателей природно-технологических факторов, влияющих на формирование развала и распределение полезного компонента во взорванной горной массе [1]. Для построения численной модели используется расчетная сетка, которой буровзрывной блок разбивается взаимно перпендикулярными плоскостями на элементарные ячейки (блочная модель). На практике блочная модель буровзрывного блока с размером элементарной ячейки 1 м³ представляет собой совокупность нескольких миллионов ячеек, на которые оказывают влияние природно-технологические факторы взрыва и которые взаимодействуют между собой в различные моменты времени. В связи с большим количеством операций математической модели, программная реализация должна использовать новейшие технологии программирования для оптимального использования аппаратных ресурсов компьютерной техники.

Для компьютерного моделирования развала БВР блока необходима следующая исходная информация:

- фактические положения верхних и нижних бровок уступов буровзрывного блока и прилегающего к нему участка карьера по результатам маркшейдерской съёмки;
- распределение полезных компонентов в целике по результатам опробования БВР скважин;
- прочностные и геолого-структурные характеристики разрушаемого материала;
- характеристики взрывной сети скважин;
- характеристики материалов взрывчатки и забойки.

В связи с большим объёмом исходной информации для практического применения данной разработки необходимо иметь оперативный доступ к геологической, маркшейдерской и проектной буровзрывной информации на предприятии. Это позволит минимизировать временные затраты на сбор данных для компьютерного моделирования. Поэтому программное обеспечение, реализующее задачу прогнозирования развала БВР блоков при массовом взрыве на карьере, разработано на базе программ-

ного комплекса ГИС ГЕОМИКС [2]. Это позволяет иметь прямой доступ к базам данных (БД) геологической, маркшейдерской и проектной буровзрывной информации, которая формируется в соответствующих модулях программного комплекса. Схема информационных потоков показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема информационных потоков при прогнозировании формы развала и распределения полезного компонента во взорванной горной массе



Решение любой задачи, связанной с компьютерным моделированием процесса или явления, включает в себя разработку программного обеспечения для:

- ввода исходных данных;
- расчета процесса или явления по алгоритмам, реализующим численное решение уравнений предложенной математической модели;
- визуального представления полученных результатов расчета и их обработки.

Ввод исходных данных, визуальное представление результатов расчёта, последующая их обработка и получение готовой документации осуществляется при помощи инструментов, входящих в состав ГЕОМИКС (система управления базами данных (СУБД), инструмент для работы с блочными моделями, векторный картографический редактор и инструмент для работы с электронными таблицами).

Программная реализация основного модуля написана в среде программирования Borland Delphi. Также разработана библиотека вспомогательных функций на языке C++ с применением технологий CUDA. Эта технология позволяет реализовывать алгоритмы на графических процессорах (GPU) ускорителей GeForce восьмого поколения и старше. Использование технологий CUDA целесообразно при выполнении простых однотипных операций над большим количеством данных [3,4]. При сложных однотипных операциях над большим количеством данных или сильной разветвлённости алгоритма эффективней использовать технологии параллельного программирования процессоров CPU средствами, предоставленными операционной системой [5]. Небольшое количество данных целесообразно обрабатывать последовательно, т.к. при параллельном решении задач происходят затраты машинного времени на приведение данных, инициализацию и синхронизацию процессов [3, 5].

Блок-схема алгоритма основного модуля расчёта прогнозирования развала буровзрывного блока представлена на рис. 2.

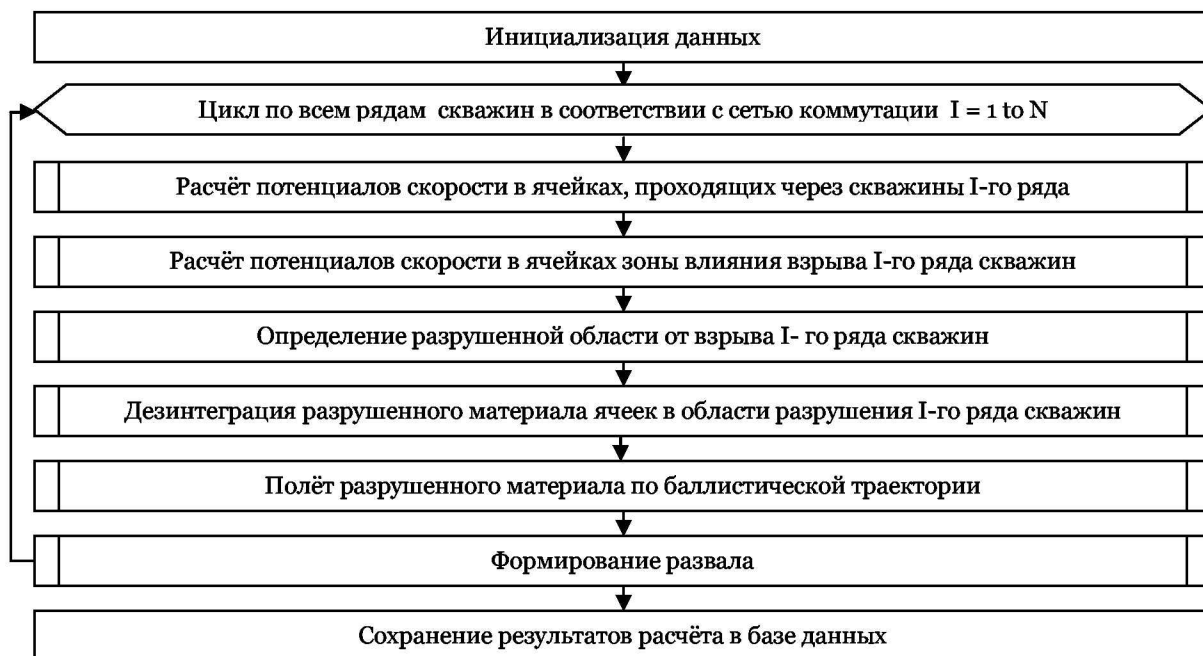


Рис. 2. Блок-схема алгоритма основного модуля программы

При инициализации данных происходит загрузка информации из базы данных в структуру из динамических массивов. Это позволяет на порядок увеличить скорость доступа к данным. Также на этапе инициализации происходит вычисление табличного интеграла ошибок, который используется при перераспределении объемов между ячейками на стадии полёта по баллистической траектории.

Далее для нахождения потенциала скорости в ячейках, через которые проходят скважины φ_{sn} , требуется вычисление интеграла [6]:

$$\varphi|_{sn} = - \int_{t(z)}^{\tau_B} \frac{2p(t)(V/V_0)^{1,25}}{(1 + \rho_{BB} D / (\rho_c D_c)) \rho_c} dt, \quad (1)$$

где $p(t)$ – мгновенное давление в продуктах взрыва, определяемое по формуле [6,7]:

$$p(t) = \frac{1}{8} \rho_{BB} D^{8/3} L^{-2/3} t^{2/3} e^{1-(Dt/L)^{2/3}},$$

τ_B – время до вылета забойки, $t(z)$ – момент времени, при котором нижний срез забойки проходит расстояние z от своего первоначального положения, D – скорость детонации, V, V_0 – конечный и начальный объемы продуктов взрыва, D_c – скорость упругой волны в среде, L – длина заряда, ρ_{BB} – плотность заряда, ρ_c – плотность среды.

Уравнение для определения функции $t(z)$ имеет вид [6]:

$$d^2 t / dz^2 = \frac{P_{max} h_3^3 g (dt/dz)^2}{(h_{заб} - z)(h_3 + z)^3 \gamma_{заб}}, \quad (2)$$

где $h_{заб}, h_3$ – длина забойки и заряда соответственно; $P_{max} = 1/8 D^2 \rho$; D – скорость детонации заряда; ρ_{BB} – плотность заряда; g – ускорение свободного падения; $\gamma_{заб}$ – удельный вес забойки.

Блок-схема алгоритма расчёта потенциалов скорости в ячейках представлена на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта потенциала скорости в ячейках, через которые проходят скважины

В выше описанной процедуре решение уравнения (2) методом Рунге-Кутты [8] выполняется для нескольких десятков ячеек в одном ряду скважин, решение интеграла (1) методом Симпсона [8] также выполняется для небольшого количества ячеек в одном ряду скважин. Общее машинное время выполнения данной процедуры, на современных ПК используя один процессор, не превышает 0,5 секунды для одного ряда скважин. В связи с малым количеством обрабатываемых ячеек и удовлетворительным машинным временем расчёта данной процедуры нет необходимости оптимизировать программный код с применением технологий параллельного программирования.

Расчёт распределения потенциалов скорости в зоне влияния взрыва для ячеек, через которые не проходят скважины и неграничных ячеек, происходит методом итераций по формуле [9]

$$\varphi_{ijk}^{m+1} = \frac{\varphi_{i+1,jk}^m + \varphi_{i-1,jk}^m + \varphi_{ij+1,k}^m + \varphi_{ij-1,k}^m + \varphi_{ijk+1}^m + \varphi_{ijk-1}^m}{6}, \quad (3)$$

где φ_{ijk}^{m+1} – потенциалы в центрах ячеек блока на $(m+1)$ -й итерации;

$\varphi_{i+1,jk}^m, \varphi_{i-1,jk}^m, \varphi_{ij+1,k}^m, \varphi_{ij-1,k}^m, \varphi_{ijk+1}^m, \varphi_{ijk-1}^m$ – потенциалы в центрах ячеек блока на m -й итерации.

Количество ячеек, над которыми производятся операции по формуле (3), имеют порядок 10^6 , количество итераций для каждой ячейки до установления экви-

тенциального поля в массиве около 500. В данном случае выполняется простая операция для большого количества ячеек, поэтому для расчётов эффективно применить технологию CUDA. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.

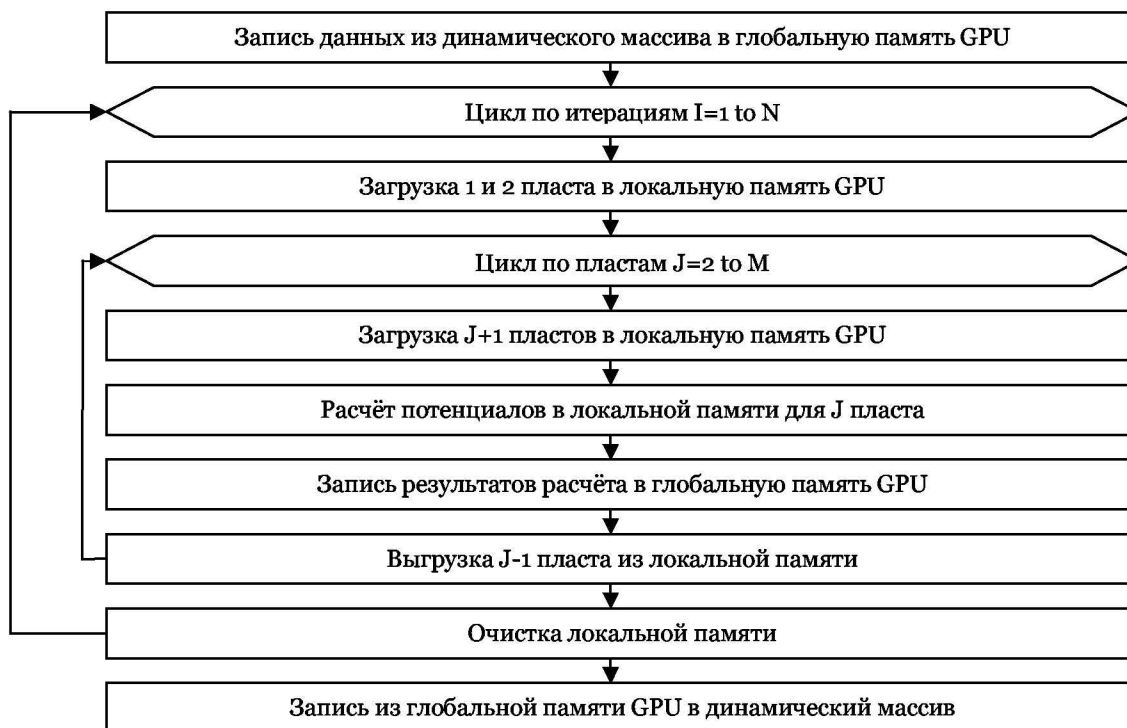


Рис. 4. Блок-схема алгоритма распределения потенциалов скорости в ячейках массива

Исходные данные представляют собой трёхмерный массив потенциалов скорости. Расчёт на GPU осуществляется по пластам. Пласт представляет собой двухмерный массив с одинаковыми значениями индекса по первой оси. В локальную память GPU загружается по очереди три пласта, и расчёт потенциалов по формуле (3) ведётся для ячеек среднего пласта. Каждая ячейка рассчитывается в отдельном потоке. Граничные пласты в соответствии с математической моделью [1] в расчёте не участвуют.

Применение технологии CUDA на видеоадаптере GeForce 9500M GS позволило в 5 раз сократить машинное время выполнения процедуры по сравнению с временем выполнения расчётов на одном процессоре.

Критерий разрушения материала в ячейке, в соответствии с математической моделью, имеет вид [10]

$$a \leq v_{kp} / \sqrt{D/3},$$

где a – размер области, которая должна сохраниться целой, D – коэффициент дробности, который равен [10]:

$$D = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial x} \right)^2.$$

Критическая скорость V_{kp} вычисляется по формуле [10]:

$$V_{kp} = \sigma_{kp} / \sqrt{\rho_c E},$$

где σ_{kp} – предельное напряжение на сжатие, отрыв или сдвиг для материала, заполняющего ячейку, ρ_c и E – соответственно плотность среды и модуль упругости среды в этой ячейке.

Материал в ячейке разрушается, если удовлетворяют критерию разрушения все ячейки в массиве, находящиеся по направлению вектора скорости. Таким образом, проверка ведётся послойно от ячеек, граничащих со скважиной до ячеек, граничащих со свободной поверхностью. Количество проверяемых ячеек имеет порядок 10^4 . В связи с относительно небольшим количеством ячеек, разветвлённостью алгоритма, а также с удовлетворительным машинным временем расчёта на одном процессоре (до 1 с) нет необходимости применять технологии параллельного программирования для данной процедуры.

Дезинтеграция материала в ячейках является, в соответствии с математической моделью[1], итерационным процессом и сопровождается перераспределением объёмов в сторону открытых поверхностей. Количество ячеек, участвующих в дезинтеграции с каждой итерацией, может увеличиваться и имеет порядок 10^5 . В связи со сложностью операций и разветвлённостью алгоритма для данной процедуры применяется технология параллельного программирования CPU. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

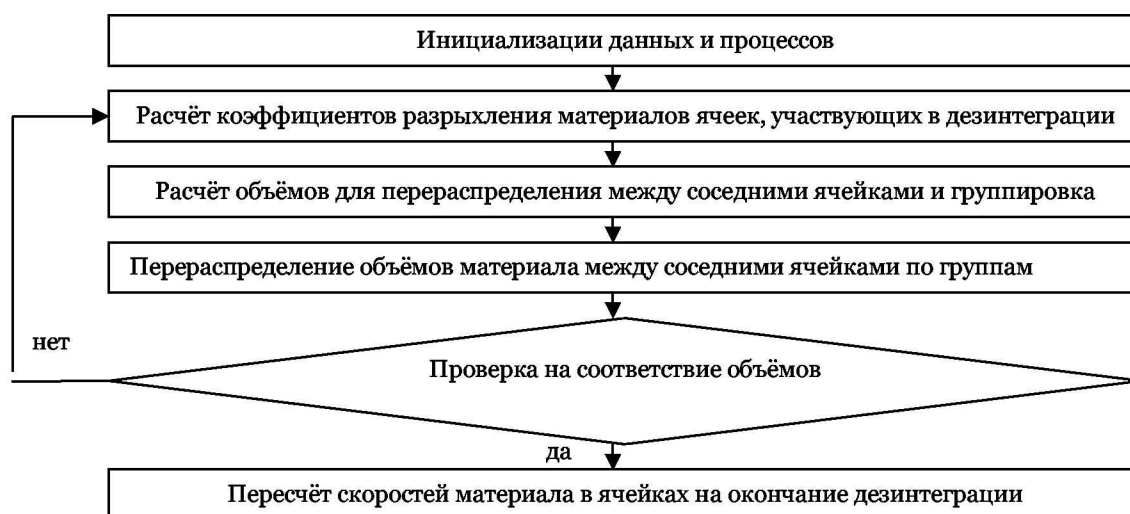


Рис. 5. Блок-схема алгоритма дезинтеграции материала в ячейках

При инициализации процедуры устанавливаются параметры параллельного решения задач и передаются данные, необходимые для расчёта дезинтеграции материала в ячейках. В зависимости от дивергенции скорости определяется коэффициент разрыхления для каждой ячейки, участвующей в дезинтеграции. Процесс расчёта происходит в два этапа. На первом этапе рассчитываются объёмы для перераспределения между 26 соседними ячейками в зависимости от порозности материала в выбранном направлении. При этом ячейки ставят в очередь и распределяют по потокам, количество потоков соответствует количеству процессоров. Для каждой ячейки запускается расчёт. Результаты расчётов записываются отдельно в динамический массив. На втором этапе происходит перераспределение объёмов, рассчитанных на первом этапе, и их запись в соответствующие ячейки. Во избежание конфликтов чтения-записи информации, ячейки предварительно разбиваются на 27 независимых групп. Далее ячейки по группам становятся в очередь и распределяются по потокам. Для каждой ячейки запускается расчёт. Описанный итерационный процесс продолжается, пока объёмы материала в ячейках не будут превышать рассчитанные по коэффициенту разрыхления. Далее происходит пересчёт скоростей для материала в каждой ячейке, участвующей в дезинтеграции, по формуле

$$v_i = \Delta V_i / S_i \tau_p,$$



где ΔV_i – перемещаемый в направлении i -й координаты объем; v_i – новое значение проекции скорости на i -ю ось; S_i – площадь поперечного сечения; τ_p – время дезинтеграции.

На стадии полёта материала по баллистической траектории участвуют 10^6 ячеек. В связи со сложностью операций и разветвлённостью алгоритма для данной процедуры применяется технология параллельного программирования CPU. Блок-схема представлена на рис. 6. После инициализации данных решается система уравнений методом Рунге-Кутты и находятся новые скорости полёта материала в ячейках [8]. Перераспределение объёмов осуществляется послойно от свободной поверхности в глубь массива. Отдельно для каждого слоя выполняется параллельное решение задач перераспределения материала между ячейками, аналогичное процедуре дезинтеграции. Расчёт переносимых объёмов определяется из решения уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка, приведённого к табличному интегралу ошибок [8, 11]. Значения интеграла рассчитаны при инициализации основного модуля программы.

При формировании развала, разрушенный материал в ячейках, находящихся в баллистике, проверяется в соответствии с математической моделью [1] на условия постановки в конечное положение. Процесс полёта материала после взрыва всех скважин осуществляется до тех пор, пока все ячейки не займут конечное положение.

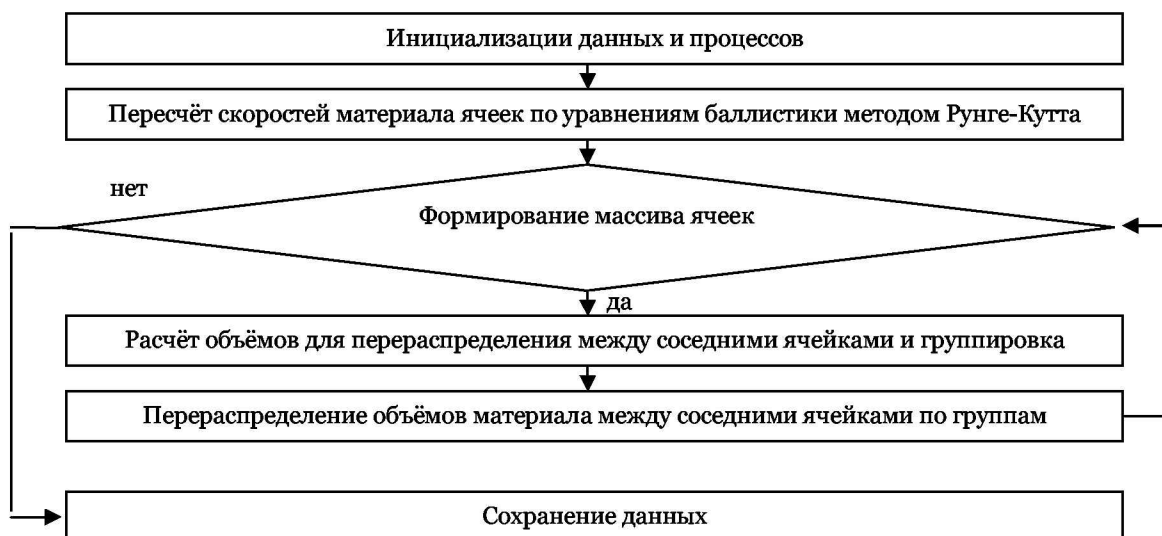


Рис. 6. Блок-схема алгоритма полёта разрушенного материала по баллистической траектории

В качестве исходных данных для проведения численных экспериментов использовались результаты промышленных взрывов по 12 буровзрывным блокам на Лебединском карьере. Эксперименты проводились на персональном двухядерном компьютере с видеоадаптером GeForce 9500M GS. Машинное время компьютерного моделирования развала составило от 25 минут (125 буровзрывных скважин, 3 500 000 ячеек блочной модели) до 1 часов 20 минут (520 буровзрывных скважин, 14 300 000 ячеек блочной модели). Использование технологий параллельного программирования сократило машинное время расчёта в 1.5-2 раза.

Результаты моделирования развала представлены на рис. 7, 8 и 9.

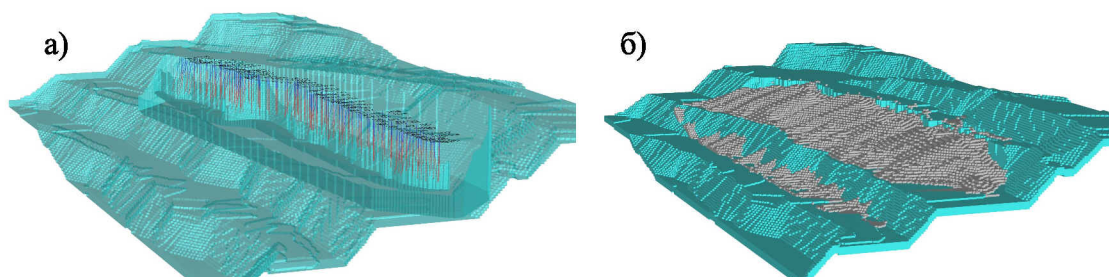


Рис. 7. Блочная модель буровзрывного блока а) до взрыва; б) после взрыва



Рис. 8. Распределение содержания Fe_{mg} в вертикальных сечениях целика

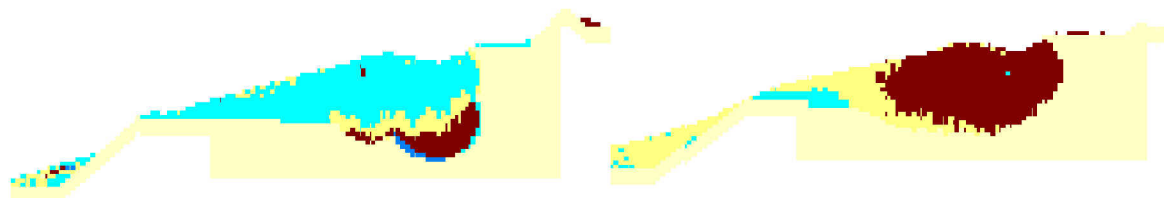


Рис. 9. Распределение содержания Fe_{mg} в вертикальных сечениях развала

Литература

1. Жилияков, Е.Г. Математическая модель развала буровзрывного блока и распределения содержания полезного компонента во взорванной горной массе /Е.Г. Жилияков, С.Г. Кабелко // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Информатика. – Белгород. – С. 66-73.
2. Серый, С.С. ГИС ГЕОМИКС – интегрированная информационная система геолого-маркшейдерского обеспечения открытых и подземных горных работ [Текст] / С.С. Серый, В.А.Дунаев, А.В.Герасимов // Сб. докладов Международного семинара «Передовые технологии проектирования буровзрывных работ на карьерах». – Бишкек, 2006. – С. 87-89.
3. Берилло А. NVIDIA CUDA – неграфические вычисления на графических процессорах / А. Берилло // ixbt.com, 23.09.2008. Режим доступа: <http://www.ixbt.com/video3/cuda-1.shtml>, <http://www.ixbt.com/video3/cuda-2.shtml>
4. Домашняя страница CUDA [Электронный ресурс] // NVIDIA.— Режим доступа: http://www.NVIDIA.ru/object/cuda_learn_ru.html
5. Антонов, А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI / А.С. Антонов // Изд-во Московск. ун-та, 2004.— ISBN 5-211-04907-1
6. Друкованый, М.Ф. Управление действием взрыва скважинных зарядов на карьерах / М.Ф. Друкованый, В.С. Куц, В.И. Ильин. – М.: Недра,1980. – 223 с.
7. Кузнецов, В.М. Математические модели взрывного дела / В.М. Кузнецов. – Изд-во «Наука»; Новосибирское отд.; Новосибирск, 1977. – 762 с.



-
8. Корн, Г. Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
9. Зельдович, Я.Б. Элементы математической физики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1973. – 351 с.
10. Боровиков, В.А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990, – 231 с.
11. Тихонов, В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Радио, 1977. – 488 с.

COMPUTER SIMULATION OF THE COLLAPSE OF DRILLING AND BLASTING UNIT AND DISTRIBUTION OF MINERAL COMPONENTS IN THE MINING EXPLODE AMIS

S. G. KABELKO

FSUE VIOGEM

e-mail: kabelko@mail.ru

Computer simulation of the collapse of the technology of explosive unit designed to find optimal parameters of the explosion and saving time professionals in the enterprise. Manufacturers of modern computing systems go towards increasing the number of processors and cores, and not increase the frequency of a processor. In modern video cards the number of processors 128 and above. To optimize the use of hardware resources necessary to apply parallel programming technologies. This will greatly improve the performance of computer equipment.

Key words: computer modeling, simulation of the explosion.