

На правах рукописи



КАБЕЛКО СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО
И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЗРЫВНОГО
РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА КАРЬЕРАХ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (в науке и технике)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2013

Работа выполнена на кафедре информационно-телекоммуникационных систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГАОУ ВПО) «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Жиляков Евгений Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Редькин Геннадий Михайлович

кандидат технических наук
Михелев Владимир Михайлович

Ведущая организация : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится “13” марта 2013 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.212.015.10 на базе ФГАОУ ВПО «Белгородского государственного национального исследовательского университета» (НИУ «БелГУ») по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, корпус 15, ауд.3-8.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Автореферат разослан “ ____ ” февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



С.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время открытая разработка месторождений полезных ископаемых доминирует в горной промышленности. При этом единственным способом дезинтеграции скальных горных пород является их разрушение скважинными зарядами взрывчатого вещества (ВВ). Ежегодно в нашей стране с применением такого способа добывается около миллиарда тонн минерального сырья и вскрышных пород. Взрывное разрушение горных пород – дорогостоящий технологический процесс. В стоимости добычи сырья он составляет 20-30%. Основной путь сокращения этих затрат – оптимизация удельного расхода ВВ за счет уменьшения доли энергии взрыва на бесполезную работу по перемещению взорванной горной массы.

Для управления добычей руды при оперативном планировании, необходима информация о процентном содержании компонентов регламентирующих качество полезных ископаемых в развале горных пород. Распределение полезных компонентов, полученное в результате опробования буровзрывных скважин и распределение их в развале, могут значительно отличаться. Возникающие вследствие этого сбои во внутрикарьерном усреднении качества сырья приводят к существенным потерям полезных компонентов в процессе его обогащения.

Оптимизировать удельный расход ВВ и осуществить прогноз распределения в развале взорванной массы компонентов, регламентирующих качество минерального сырья при управлении добычей руды, позволяет компьютерная система прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах с использованием соответствующего математического и алгоритмического обеспечения.

Теория взрывного разрушения горных пород основана на фундаментальных исследованиях, проводимых как в России, так и в странах зарубежья. Весомый вклад в развитие теории взрыва внесли учёные: О.Е. Власов, А.В. Гальянов, М.Ф. Друкованый, С.Н. Копылов, Б.Н. Кутузов, М.А. Лаврентьев, Г.Г. Ломоносов, П.С. Миронов, И.Ф. Оксанич, Г.И. Покровский, Б.Р. Ракишев, С.А. Смирнов, А.А. Черниговский и другие. Работы этих авторов посвящены исследованию ширины развала буровзрывного блока, определения гранулометрического состава при дроблении, создания полостей и определения зон разрушения. Большинство учёных выделяют три этапа процесса взрывного разрушения. На начальном этапе, который длится несколько миллисекунд, происходит перенос энергии взрывной волной от скважинных зарядов в разрушаемый массив. Для описания этого этапа О. Е. Власовым и С.А. Смирновым предложен математический аппарат, основанный на применении законов гидродинамики в импульсной постановке, согласно которому потенциалы скорости $\varphi(x,y,z)$ в разрушаемом массиве от скважинных зарядов определяются из решения уравнения Лапласа:

$$\varphi_{xx}(x, y, z) + \varphi_{yy}(x, y, z) + \varphi_{zz}(x, y, z) = 0.$$

Для решения уравнения Лапласа предлагается вычислять интеграл по поверхности:

$$\frac{\rho}{2} \oint \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial n} dF = Q,$$

где dF – элемент поверхности, ограничивающий рассматриваемую среду; n -направление внутренней нормали; ρ -плотность среды; Q – энергия скважинного заряда. Авторами были получены выражения для определения потенциалов скорости при цилиндрической и сферической симметрии скважинных зарядов.

Полученные зависимости не позволяют учитывать влияние друг на друга близко расположенных зарядов, геометрические характеристики поверхности карьера, влияние ранее взорванной части буровзрывного блока при многорядном короткозамедленном взрывании.

На втором этапе, длящемся десятки миллисекунд, происходит дезинтеграция разрушенной части породного массива, сопровождающаяся его разрыхлением и перераспределением скоростей от скважинных зарядов в сторону открытых поверхностей. Третий этап (формирование развала взорванной горной массы) характеризуется перемещением дезинтегрированного материала по баллистической траектории в течении нескольких секунд.

Математическое описание второго и третьего этапов исследовались во многих работах. Авторы предлагают разбить разрушаемый массив на зоны в зависимости от геометрии скважинных зарядов, и в процессе взрывного разрушения для каждой из зон применяется свой математический аппарат расчёта перемещения разрушенного материала.

Недостатками данного подхода является сложность определения зон в пространстве при одновременной инициации нескольких скважинных зарядов в случае многорядного короткозамедленного взрывания. Все приведенные схемы и модели развала породного массива и изменения его структуры предполагают наличие плоской симметрии. При этом вопросы прогнозирования распределения компонентов, регламентирующих качество минерального сырья, во взорванной горной массе не рассматриваются.

Для описания процесса взрывного разрушения горных пород в пространстве необходимо построение численной модели (блочной модели), которая разбивает буровзрывной блок взаимно перпендикулярными плоскостями на элементарные ячейки. На практике, блочная модель буровзрывного блока с размером элементарной ячейки 1 м^3 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 тем, что прогнозирование результатов взрывного разрушения в такой постановке требует проведения весьма трудоёмких расчётов, возникает необходимость в разработке методов и алгоритмов их реализации с применением технологий параллельного программирования центральных и графических процессоров на высокопроизводительных вычислительных системах.

Целью работы является повышение эффективности оперативного управления добычей руды в карьерах на основе разработки методов и алгоритмов трёхмерного прогноза результатов взрывного разрушения с использованием высокопроизводительных вычислительных систем.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработка математических основ системы трёхмерного прогнозирования взрывного разрушения массива горных пород;
2. Разработка и программная реализация специальных алгоритмов системы прогноза взрывного разрушения массива горных пород;
3. Разработка методики прогноза распределения содержания компонентов, регламентирующих качество минерального сырья и размеров отдельности во взорванной горной массе при её выемке на карьерах.
4. Проведение экспериментальной проверки адекватности и эффективности разработанной системы прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах.

Методы исследований. В ходе выполнения диссертационной работы использовались методы системного анализа, математического моделирования, численные методы решения дифференциальных уравнений и систем, методы прямого и параллельного программирования, вычислительный эксперимент.

Научная новизна полученных результатов работы заключается:

1. В новой математической модели взрывного разрушения горных пород на карьерах, учитывающая стадийность этого процесса и комплекс влияющих на него основных факторов, что позволяет находить оптимальные схемы взрывания породного массива и прогнозировать распределение компонентов регламентирующих качество полезного ископаемого, для управления добычей руды открытым способом при оперативном планировании.
2. В новых алгоритмах, обеспечивающих прогнозирование результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах с использованием технологий параллельного программирования центральных и графических процессоров, что позволяет увеличить скорость прогнозной оценки распределения полезного компонента в развале взорванного блока пород.
3. В новом методе прогноза распределения полезного компонента в развале взорванного блока пород, основанного на использовании вычислительных экспериментов разработанной математической моделью взрывного разрушения горных пород на карьерах.

Практическая значимость работы заключается в разработке программного модуля для компьютерного прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах и создании на основе авторской математической модели этого процесса компьютерной технологии прогнозирования распределения во взорванной горной массе компонентов, регламентирующих качество полезного ископаемого, что позволяет снизить потери полезных компонентов при обогащении и оптимизировать удельный расход взрывчатого вещества на этапе проектирования. Результаты работы внедрены в ОАО ВИОГЕМ г. Белгород, о чём имеется соответствующий акт.

Область исследования. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» по следующим областям исследований:

п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надёжности сложных систем».

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод прогнозной оценки распределения компонентов, регламентирующих качество минерального сырья в развале взорванного блока пород, основанный на использовании разработанной математической модели прогнозирования результатов взрывного разрушения.

2. Математическая трехмерная модель взрывного разрушения массива горных пород скважинными зарядами, позволяющая прогнозировать результаты этого процесса в условиях многомерного короткозамедленного взрывания.

3. Вычислительные алгоритмы, обеспечивающие прогнозирование результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах с использованием технологий параллельного программирования центральных и графических процессоров.

4. Программная реализация разработанных алгоритмов прогнозирования результатов взрывного разрушения массива горных пород на базе высокопроизводительных вычислительных систем с графическими ускорителями.

Достоверность и обоснованность результатов исследований определяются корректностью математических выкладок и компьютерного моделирования, отсутствием противоречий с известными теоретическими положениями и выводами в области математического моделирования взрывного разрушения, представительным количеством вычислительных экспериментов по сопоставлению с реальными эмпирическими данными.

Личный вклад соискателя. В диссертационной работе приведены результаты исследований, выполненных лично автором или при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы. Основные научные и практические результаты работы докладывались на Всероссийской научной конференции «Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ» (Апатиты, 2008), на 10-м и 11-м международном симпозиуме «Освоение минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных геолого-гидрогеологических условиях» (Белгород, 2009 и 2011), на Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в горном деле» (Екатеринбург, 2011) и на международной молодежной конференции «Прикладная математика, управление и информатика» (Белгород, 2012).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 9 статей, в том числе 3 из них в изданиях рекомендованных ВАК РФ по научной специальности диссертационной работы. Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Получен патент на способ определения содержания полезного компонента во взорванной горной массе при её выемке на карьерах.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 141 страницу текста, 45 рисунков, 2 таблиц и список литературы из 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований и формулируется их цель, научная новизна и практическая значимость работы; приводятся сведения о публикациях результатов исследования, их апробации; даётся общий обзор содержания диссертации.

В **первой главе** на основе анализа литературных источников рассмотрена проблема прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах при управлении добычей руды открытым способом.

Обоснована целесообразность применения компьютерного моделирования взрывного разрушения горного массива для прогнозирования распределения компонентов регламентирующих качество полезных ископаемых, определения формы развала, размера отдельности.

Рассмотрены физические основы процесса взрывного разрушения и влияющие на него основные факторы. Сделан обзор основных методов прогнозирования распределения компонентов во взорванной горной массе, существующих математических моделей и программного обеспечения прогноза результатов взрывного разрушения.

На основании проведенного анализа сформулированы конкретные задачи диссертационного исследования, решение которых позволяет достичь основной цели работы.

Во **второй главе** «Разработка математических основ системы прогнозирования результатов взрывного разрушения массива горных пород на карьерах» разработаны математические основы расчётов распределения потенциалов и начальных скоростей породного массива, дезинтеграции разрушенной части и его перемещения по баллистической траектории с формированием развала.

Численные расчёты физических процессов происходящих при взрывном разрушении осуществляются на основе блочной модели (БМ) буровзрывного блока, разбивающей пространство на элементарные ячейки размером 1 м^3 . Разработанная математическая модель описывает поведение породного массива в элементарных ячейках БМ при поэтапном процессе его взрывного разрушения в условиях многорядного короткозамедленного взрывания скважинных зарядов ВВ.

В разделе 2.1 «Математические основы прогноза начального этапа взрывного разрушения породного массива» распределение потенциального поля скоростей от взрыва скважинных зарядов определяется из решения уравнения Лапласа для потенциалов скорости φ :

$$\varphi_{xx}(x, y, z) + \varphi_{yy}(x, y, z) + \varphi_{zz}(x, y, z) = 0. \quad (1)$$

Чтобы учесть влияние друг на друга близко расположенных зарядов, геометрические характеристики поверхности карьера, влияние ранее взорванной части буровзрывного (БВР) блока при многорядном короткозамедленном взрывании, автором предложено для уравнения (1) решать задачу Дирихле в многосвязной области методом простых итераций с постановкой следующих граничных условий для потенциалов скорости:

– на открытых поверхностях (в воздухе):

$$\varphi|_0 = 0; \quad (2)$$

– на удалённой поверхности S_m от БВР скважин, где взрывная волна за время разрушения не успела распространиться :

$$\varphi|_{S_m} = 0; \quad (3)$$

– на границе с разрушенной областью от взрыва предыдущих скважин на основе экспериментальных данных предполагается степенной закон изменения скорости и объёмов за время дезинтеграции (второй этап разрушения ~ 50 мс) и получена зависимость:

$$\varphi = \frac{P_0}{\rho_0} \int_{t_{зам}-t_0}^{t_{зам}} \left(\frac{t+t_0}{t_0} \right)^{-\beta} dt, \quad (4)$$

где P_0 , ρ_0 , t_0 – давление, плотность и время на начало дезинтеграции соответственно; $t_{зам}$ – время замедления между взрывами рядов скважин; β – коэффициент объёмного расширения;

– на поверхности БВР скважин согласно выводам М.Ф. Друковского и с учётом поправки на соотношение импедансов горной среды и продуктов взрыва, а также изменение объема самой скважины при взрыве получена зависимость:

$$\varphi|_{S_n} = - \int_{t(z)}^{t_p} \frac{2p(t)(V/V_0)^{1,25}}{(1 + \rho_{вв} D / (\rho_c D_c)) \rho_c} dt, \quad (5)$$

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

$$p(t) = \frac{1}{8} \rho_{вв} D^{8/3} L^{-2/3} t^{2/3} \exp\left(1 - (Dt/L)^{2/3}\right),$$

D – скорость детонации, V, V_0 – конечный и начальный объёмы продуктов взрыва, D_c – скорость упругой волны в среде, L – длина заряда, $\rho_{вв}$ – плотность заряда, ρ_c – плотность среды, $t(z)$, t_p – начальное и конечное время формирования давления в ячейках БМ через которые проходят БВР скважины.

Для зарядов с применением забоек необходим расчёт времени $t(z)$ прохождения забойки через верхние ячейки скважины. Для этого на основе уравнения движения забойки получено дифференциальное уравнение:

$$d^2t/dz^2 = \frac{P_{\max} h_3^3 g (dt/dz)^2}{((h_{заб} - z)(h_3 + z)^3 \gamma_{заб})}, \quad (6)$$

где $h_{заб}, h_3$ - соответственно длина забойки и заряда; максимальное давление продуктов взрыва вычисляется по формуле:

$$P_{\max} = \frac{D^2 \rho_{вв}}{8};$$

D – скорость детонации; $\rho_{вв}$ – плотность заряда; g – ускорение свободного падения; $\gamma_{заб}$ – удельный вес забойки.

Разрушение материала происходит по критерию О.Е. Власова:

$$a \leq v_{кр} / \sqrt{D/3}, \quad (7)$$

где a – размер области, которая должна сохраниться целой, D – критерий дробимости, который равен:

$$D = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial x} \right)^2. \quad (8)$$

Критическая скорость разрушения определяется:

$$V_{кр} = \sigma_{кр} / \sqrt{\rho E},$$

где $\sigma_{кр}$ – предельное напряжение на сжатие, растяжение или сдвиг; ρ – плотность среды; E – модуль упругости среды.

Начальные скорости разрушенной части породного массива определяются из уравнения:

$$V(x, y, z) = \text{grad } \varphi(x, y, z)$$

В разделе 2.2 «Математические основы прогноза этапа дезинтеграции разрушенной части породного массива» разработаны математические основы процессов происходящих под действием сдвиговых напряжений и приводящих к дилатансионному разупрочнению разрушенной части массива горных пород, сопровождающиеся разрыхлением среды и изменением распределения скоростей. Разрыхление разрушенного массива в зависимости от положительной дивергенции скорости определяется по формуле:

$$K_p = \frac{V_2}{V_1} = 1 + \tau_p \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (9)$$

где V_1, V_2 – соответственно значения элементарных объемов до и после разрыхления, v_x, v_y, v_z - проекции вектора скорости на координатные оси, τ_p – время дезинтеграции.

Перемещать разрушенный материала в процессе разрыхления между б-ю соседними направлениями предлагается в зависимости от коэффициента сопротивления перемещению объёмов в выбранном направлении в соответствии с формулой:

$$V_i = \frac{\Pi_i}{\sum_{j=1}^{26} \Pi_j} V_0, \quad (10)$$

где V_i – перемещаемый объём в соседнюю ячейку, V_0 – первоначальный объём, Π_i – коэффициент сопротивления в перемещаемом направлении, который определяется по формуле:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{K_{pi}}\right) V_i,$$

где K_{pi} – коэффициент разрыхления элементарного объёма V_i в заданном направлении, n – количество элементарных объёмов учитываемых в заданном направлении.

Распределение скоростей на этапе дезинтеграции предлагается в зависимости от перемещаемых объёмов рассчитывать по формуле:

$$v_i = \frac{\Delta V_i}{S_i \tau_p}, \quad (11)$$

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

Характеристики разрушенного материала в элементарных ячейках при перемещении предлагается пересчитывать по формуле:

$$c = (c_1 V_1 + c_2 V_2) / (V_1 + V_2).$$

где c – новое значение параметра; $c_1 V_1$ – значение параметра и объёма перед перераспределением объёмов; $c_2 V_2$ – значение параметра и объёма переходящего в ячейку.

Таким образом, переместившийся разрушенный материал и распределение скоростей являются начальными данными для этапа баллистического движения дезинтегрированной среды.

В разделе 2.3 «Математические основы прогноза перемещения дезинтегрированного материала и формирования его развала» разработан математический аппарат описывающий поведение разрушенного материала при перемещении по баллистической траектории. Изменения скоростей центров масс всех ячеек за малый промежуток времени Δt , определяется из решения системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -bv_x |V| \\ \frac{dv_y}{dt} = -bv_y |V| \\ \frac{dv_z}{dt} = -bv_z |V| - g \end{cases}, \quad (12)$$

где $|V|$ – модуль вектора скорости, $v_x = dx/dt$; $v_y = dy/dt$; $v_z = dz/dt$ – проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат.

Для перемещения объёмов между ячейками БМ автором предлагается использовать весовые коэффициенты равные вероятностям перехода, которые рассчитываются по формуле:

$$V_1 = V_0 * P(x, y, z), \text{ где}$$

$$P(x, y, z) = P(x, t) * P(y, t) * P(z, t),$$

$$P(\lambda, t) = \int_{\lambda - \Delta\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} f(\lambda, t) d\lambda, \quad (13)$$

$$f(\lambda, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi N t}} e^{-\frac{(\lambda - \lambda_0 - \mu t)^2}{N t}}, \quad (14)$$

$f(\lambda, t)$ – плотность вероятности перехода разрушенной среды из положения λ_0 в положение λ за время t ; $\lambda = \{x, y, z\}$; $\mu = \{v_x, v_y, v_z\}$; N – коэффициент диффузии; $\Delta\lambda$ – половина размера ячейки БМ; V_0 – изначальный объём текущей ячейки; V_1 – объём переносимый из текущей ячейки в соседнюю ячейку с вероятностью перехода $P(x, y, z)$; $P(x, t), P(y, t), P(z, t)$ – вероятности перехода по соответствующим координатным осям.

Импульс скорости при этом вычисляется по формуле:

$$v = \frac{v_1 \rho_1 V_1 + v_2 \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2},$$

где v – новая проекция скорости на координатные оси, $v_1 \rho_1 V_1$ – соответственно проекция скорости, плотность и объём разрушенного материала в ячейке, в которую необходимо переместить объём V_2 из ячейки с проекцией скорости материала v_2 и плотностью ρ_2 .

Характеристики материала в элементарных объёмах пересчитываются также как и в процессе дезинтеграции.

На следующем интервале времени в качестве начальных скоростей используются вычисленные на предыдущем интервале по уравнениям баллистики значения проекций скоростей. Данные вычисления производятся до тех пор, пока весь разрушенный материал, не достигнет горизонта падения, и горизонтальные составляющие вектора абсолютной скорости центра масс ячеек БМ не станут пренебрежительно малы.

Таким образом, разработаны математические основы взрывного разрушения породного массива с учётом геометрии карьера, различной конфигурации зарядов в скважинах, параметров взрывчатки и забойки, прочностных характеристик разрушаемого материала, позволяющие определить форму развала и отследить распределение в нём полезных компонентов и размеров отдельностей.

В разделе 2.4 формулируются основные результаты и выводы главы.

В третьей главе «Разработка алгоритмического обеспечения системы прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах» разработаны алгоритмы моделирования взрывного разрушения породного массива от скважинных зарядов при использовании схем многорядного короткозамедленного взрывания с применением технологий параллельного программирования центральных (CPU) и

графических (GPU) процессоров. Разработана методика прогноза результатов взрывного разрушения на основе моделирования процесса взрыва.

В разделе 3.1 «Методика прогнозирования и необходимые для ее реализации исходные данные» разработан алгоритм расчёта результатов взрывного разрушения массива горных пород при многорядном короткозамедленном взрывании, представленный на рисунке 1, и необходимые для его реализации исходные численные модели. Рассмотрены особенности построения алгоритмов параллельного программирования для центральных и графических процессоров.



Рис. 1. Блок-схема общего алгоритма прогнозирования результата в взрывном разрушении при многорядном короткозамедленном взрывании

В разделе 3.2 «Алгоритмы прогноза начальной стадии взрывного разрушения породного массива» рассмотрены численные методы для решения уравнения Лапласа (1) при граничных условиях (2,3,4,5).

Расчёт потенциалов скорости не граничных ячеек разрушаемого массива осуществляется методом итераций по формуле:

$$\varphi_{ijk}^{m+1} = \frac{\varphi_{i+1jk}^m + \varphi_{i-1jk}^m + \varphi_{ij+1k}^m + \varphi_{ij-1k}^m + \varphi_{ijk+1}^m + \varphi_{ijk-1}^m}{6}, \quad (15)$$

где φ_{ijk}^{m+1} – потенциалы в центрах ячеек блока на (m+1)-ой итерации;
 $\varphi_{i+1jk}^m, \varphi_{i-1jk}^m, \varphi_{ij+1k}^m, \varphi_{ij-1k}^m, \varphi_{ijk+1}^m, \varphi_{ijk-1}^m$ – потенциалы в центрах ячеек блока на m-ой итерации.

На основе формулы интегрирования сложной функции, получено выражение для расчёта потенциалов на границе с разрушенной областью (4):

$$\varphi = \varphi_0 \frac{1}{1-\beta} \left[\left(\frac{t_{зам} + t_0}{t_0} \right)^{1-\beta} - \left(\frac{t_{зам}}{t_0} \right)^{1-\beta} \right].$$

Обосновано, что интеграл для потенциалов скорости на боковых границах скважин (5) целесообразно вычислять методом Симпсона, а дифференциальное уравнение (6) для определения $t(z)$ решать методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Для реализации начальной стадии взрывного разрушения разработан алгоритм с применением технологии параллельного программирования графических процессоров на CUDA (см. рис. 2).

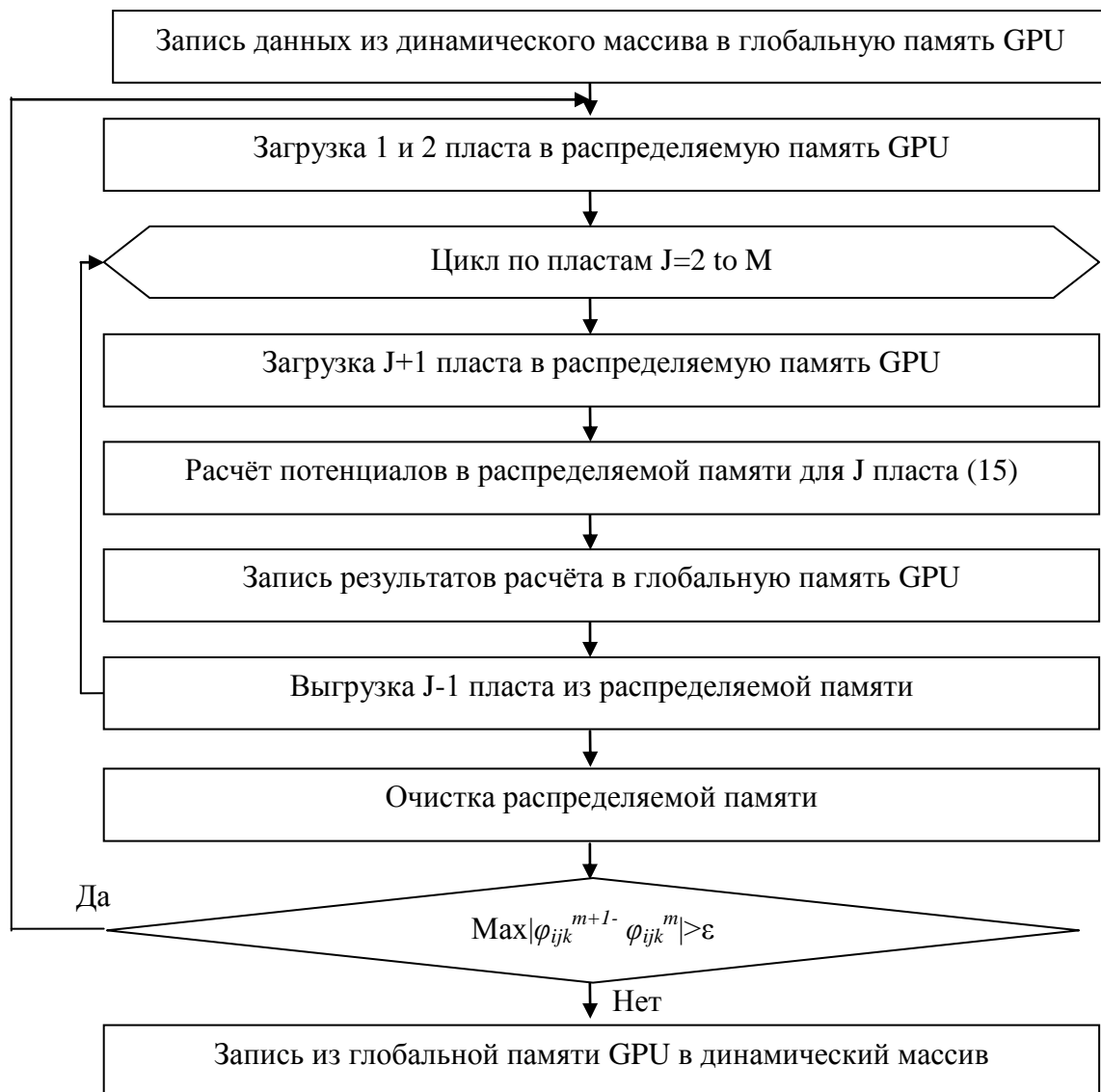


Рис. 2. Блок схема алгоритма расчёта распределения потенциалов скорости в массиве для технологии параллельного программирования GPU

Исходные данные представляют собой трёхмерный массив потенциалов скорости, рассчитанный на границах по формулам (2,3,4,5). В связи с ограниченным объёмом распределяемой памяти расчёт на GPU

осуществляется по пластам. Пласт представляет собой двухмерный массив с одинаковыми значениями индекса по одной из осей. В распределяемую память *GPU* загружаются по очереди три пласта и расчёт потенциалов по формуле (15) ведётся для ячеек среднего пласта. Каждая ячейка рассчитывается в отдельном потоке. Граничные пласты в соответствии с математической моделью в расчёте не участвуют. Процедура вызывается до тех пор, пока максимальная разность между значениями потенциалов в ячейках на текущем и предыдущем шагах не будет превышать заданную погрешность ϵ .

Определение разрушенной области осуществляется по формуле (7). При этом для расчёта вторых производных (8) применяются формулы приближений в узлах блочной модели.

В разделе 3.3 «Алгоритм прогноза дезинтеграции разрушенной части породного массива» разработан алгоритм реализации процессов дезинтеграции для параллельного решения задач на многоядерных центральных и графических процессорах рис. 3.

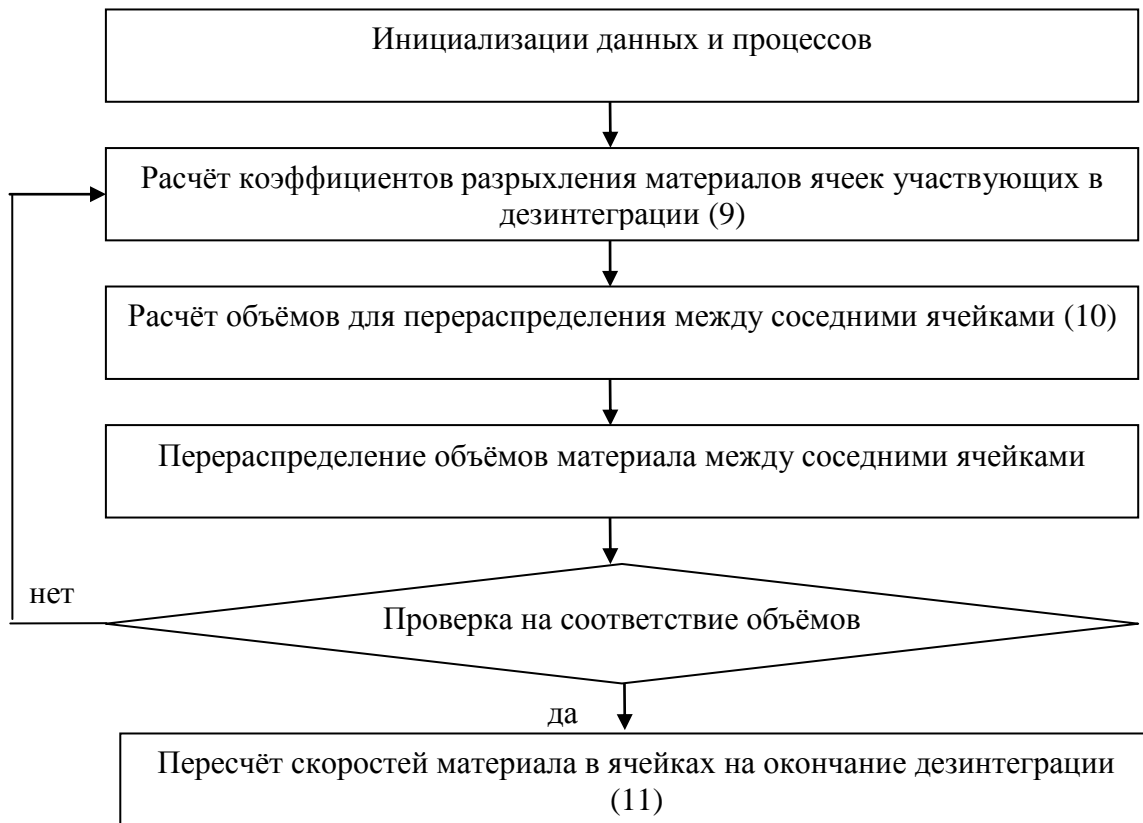


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта этапа дезинтеграции

Процесс расчёта происходит в два этапа. На первом этапе рассчитываются объёмы для перераспределения между 26 соседними ячейками в зависимости от коэффициента сопротивления материала в выбранном направлении(10). При этом ячейки ставятся в очередь и распределяются по потокам. 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.

В разделе 3.4 «Алгоритм прогноза перемещения дезинтегрированного материала и формирования его развала» разработан алгоритм перемещения разрушенного материала по баллистической траектории для параллельного решения задач на центральных и графических процессорах рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчёта характеристик разрушенного материала при перемещении по баллистической траектории

Перераспределение объёмов осуществляется послойно от свободной поверхности вглубь массива. Отдельно для каждого слоя выполняется параллельное решение задач перераспределения характеристик материала между ячейками.

При вычислении переносимых объёмов интеграл (13) приведён заменой переменных к интегралу ошибки (16), который является табличным.

$$P(\lambda, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{u_0}^{u_1} e^{-U^2} dU. \quad (16)$$

Это позволяет изначально сформировать массив значений интеграла (16) при различных пределах интегрирования (u_0 , u_1) и использовать его при расчётах.

В разделе 3.5 «Методика прогноза результатов промышленных взрывов на карьерах на основе моделирования процесса взрывного разрушения» разработаны методики и алгоритмы прогноза результатов взрывного разрушения в виде поверхности, картограмм и планов на основе

обработки информации о характеристиках разрушенного материала в ячейках блочной модели развала.

Модель поверхности развала строится посредством триангуляции Делоне точек с координатами центров верхних ячеек блочной модели. Далее строятся изолинии по поверхности развала с выбранным шагом.

Распределение компонентов полезного ископаемого отслеживается в процессе моделирования взрывного разрушения при перемещении материала в ячейках БМ. На основе БМ развала строится картограмма с выделением областей по заданным значениям содержаний полезного компонента усреднённых по высоте. На основании картограммы определяются направления заходов экскаватора и методом вертикальных сечений определяются объёмы и содержания полезного компонента в каждой заходке.

Расчёт средних значений размеров отдельности в развале осуществляется на основе исходных данных по трещиноватости БВР блока до взрыва с последующим дроблением разрушенного материала по критерию (7). Полученные значения отслеживаются в процессе моделирования взрывного разрушения при перемещении материала в ячейках БМ. В результате строится картограмма на основе БМ развала, в которой выделяются области по заданным значениям средних размеров отдельности

Таким образом, разработанные алгоритмы прогноза результатов взрывного разрушения породного массива, позволяют эффективно использовать современную многопроцессорную вычислительную технику. При этом расчётное время моделирования уменьшается в разы по отношению к времени выполнения на одном процессоре.

В разделе 3.6 формулируются основные результаты и выводы главы.

В четвёртой главе «Программная реализация и апробация разработанных алгоритмов» разработана архитектура программного обеспечения системы прогнозирования результатов взрывного разрушения, описан интерфейс с пользователем и представлены результаты вычислительных экспериментов с оценкой адекватности разработанных математических моделей и алгоритмов.

В разделе 4.1 «Архитектура программного обеспечения и реализация интерфейса» описаны структурные и функциональные схемы программной реализации прогнозирования результатов взрывного разрушения.

Программный компонент прогнозирования результатов взрывного разрушения представляет собой совокупность программных модулей, каждый из которых решает определённые задачи. Структурная и функциональная схема программного компонента представлена на рисунке 5.

Программная реализация модулей формирования исходных данных, расчётного, обработки запросов к БД и БМ, описания структур и констант написаны в среде программирования *Borland Delphi* с применением графических и математических библиотек. Для реализации модуля параллельного программирования *GPU* разработана библиотека вспомогательных функций на языке *C++* с применением технологий *CUDA*.

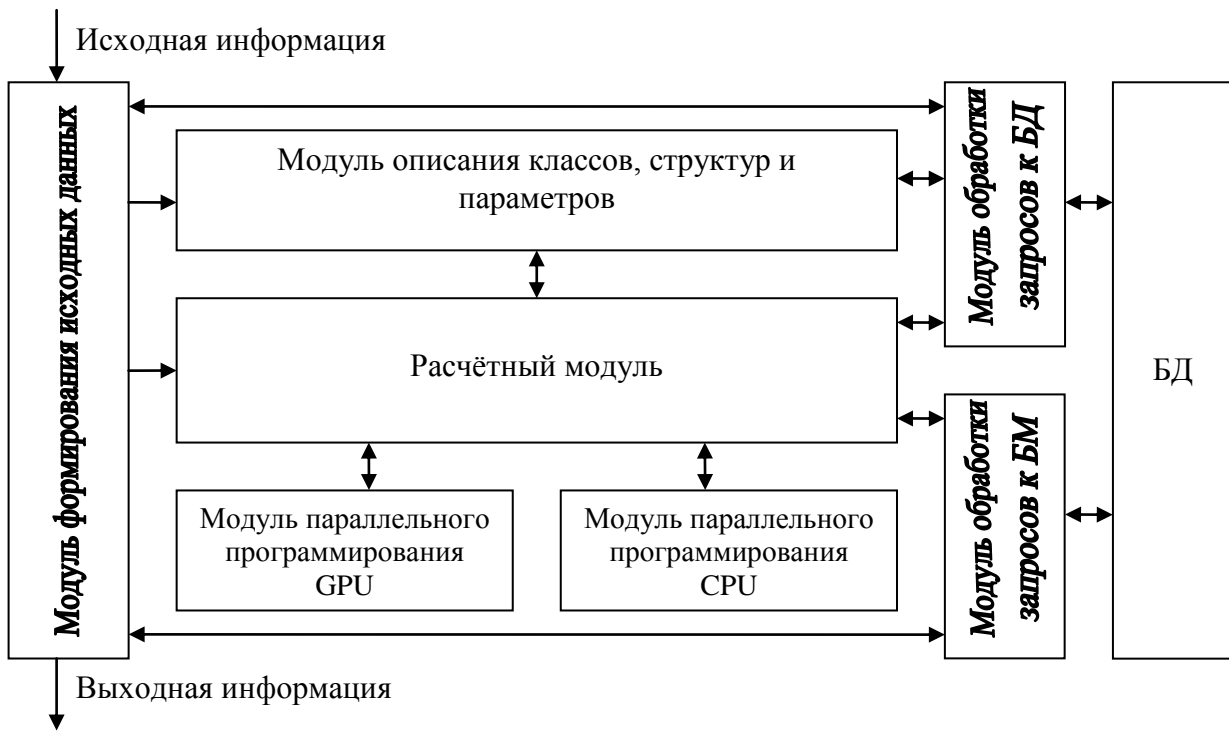


Рис. 5. Структурная и функциональная схема программного компонента прогнозирования результатов взрывного разрушения

В разделе 4.2 «Апробация работоспособности программной реализации разработанного математического и алгоритмического обеспечения» представлены результаты сравнения поверхностей полученных при прогнозировании результатов взрывного разрушения с поверхностями, полученными в результате обработки фотостереосъемки карьера после взрыва по 12 буровзрывным блокам на ОАО «Лебединский ГОК». Разрушаемый материал составляют железистые кварциты, слаборудные кварциты и сланцы. Средняя плотность этих материалов соответственно составляет – 3400, 3000, 2700 кг/м³, предел прочности на сжатие, сдвиг и растяжение составляют 182,160,120 (сжатие), 16-20(сдвиг) и 4-6 МПа (растяжение), коэффициент крепости по Протодьяконову – 18.6, 22,6 МПа и модуль Юнга – 9,26*10⁴ МПа. Применяемое ВВ – акватол: плотность – 1340 кг/м³, удельный вес забойки – 15000 н/м³, скорость детонации – 5600 м/с.

Расчёты выполнялись на графической станции с 4 двудерными процессорами и с видеоадаптером GeForce GT550Ti. Для оценки адекватности сравниваются поверхности рассчитанные в результате моделирования взрывного разрушения и полученные в результате фотостереосъемки карьера после взрыва. Оцениваемая величина представляет собой разность:

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} - x_{ij},$$

где $x_{ij} = P_c[i, j, k_{\max}] \cdot z$ - вертикальные составляющие точек центра верхних ячеек БМ, $\bar{x}_{ij} = P_{pr}(P_c[i, j, k_{\max}])_S \cdot z$ - вертикальная проекция точки P_c на поверхность S , построенную по результатам фотостереосъемки, $i=1,2,\dots,N$, $j=1,2,\dots,K$.

Смещение оцениваемой величины вычисляется по формуле:

$$\hat{M}(\hat{x}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \hat{x}_{ij}}{N \cdot K}.$$

Среднеквадратичное отклонение вычисляется по формуле:

$$\sigma(\hat{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (\hat{M}(\hat{x}) - \hat{x}_{ij})^2}{N \cdot K}}.$$

Вероятность попадания оцениваемой величины в диапазон $[-2\sigma..2\sigma]$ вычисляется по формуле:

$$P(\hat{x} \in [-2\sigma..2\sigma]) = \frac{M}{N \cdot K},$$

где M – количество значений $\hat{x} \in [-2\sigma..2\sigma]$.

Характеристики взрывающихся блоков и результаты моделирования приведены в таблице 4.1 и на рисунке 6.

Таблица 4.1

№ блока	Дата взрыва	Площадь блока, м ² , N*K	Кол-во скважин	Характерные особенности	Время расчёта, мин	\hat{M} , м	σ , м	$P(\hat{x} \in [-2\sigma..2\sigma])$
87	20.04.07	60 000	520	Дугообразная геометрия, большое количество скв.	105	0.32	1.62	0.92
78	20.04.07	15 000	155	Взрыв с одной открытой поверхностью	26	0.66	1.72	0.91
91	20.04.07	23 000	230	Инициация взрыва в середине блока	39	0.25	1.76	0.93
60	20.04.07	11 000	93	Нижний блок при каскадном взрывании	21	-0.15	1.85	0.93
36	20.04.07	30 000	330	Верхний блок при каскадном взрывании	58	-0.15	1.85	0.93
218	11.10.07	42 000	446	Нижний блок при каскадном взрывании	86	0.11	1.91	0.95
220	11.10.07	12 000	99	Взрыв с подпорной стенкой	21	-0.36	1.61	0.92
221	11.10.07	32 000	248	Верхний блок при каскадном взрывании	42	0.11	1.91	0.95
227	11.10.07	14 000	163	Взрыв с разлётом на несколько горизонтов	26	-0.42	1.55	0.93
230	11.10.07	12 000	81	Взрыв съезда	20	-0.48	1.86	0.95
119	05.06.08	24 000	186	Разбит на 2 взрывных участка	34	0.18	1.48	0.90
142	26.06.08	10 000	59	Дугообразный блок	18	0.09	1.63	0.94

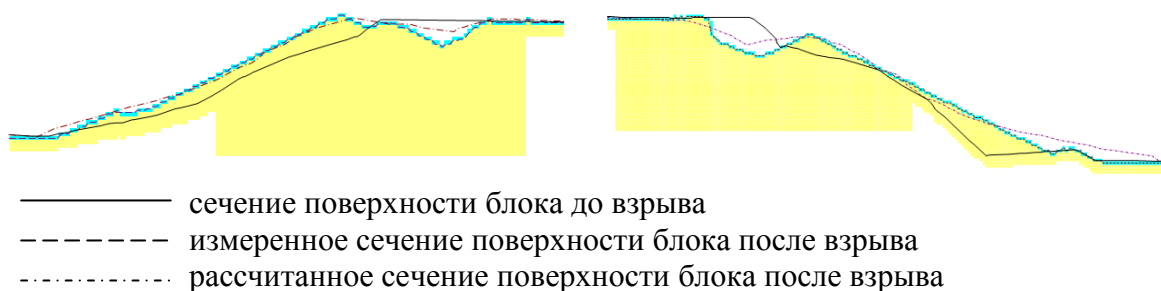


Рисунок 6. Характерные сечения развала 91 блока

Данные таблицы позволяют говорить об адекватности и эффективности предложенной системы прогнозирования результатов взрывного разрушения массива горных пород.

В разделе 4.3 формулируются основные результаты и выводы главы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение системы прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород на карьерах включая:

1.1. Математическую модель взрывного разрушения горных пород на карьерах, состоящую из трёх этапов моделирования: начальное, дезинтеграция и перемещение по баллистической траектории, и учитывающую геометрию карьера, различную конфигурацию зарядов в скважинах, параметры взрывчатки и забойки, прочностные и структурные характеристики разрушаемого материала. Адекватность модели подтверждается сопоставлением результатов вычислительных экспериментов с результатами реальных взрывов.

1.2. Алгоритмы, обеспечивающие 3D моделирование взрывного разрушения горных пород на карьерах в условиях многорядного короткозамедленного взрывания с применением технологий параллельных вычислений на графических ускорителях и многопроцессорной технике.

1.3. Методику и алгоритмы прогнозирования поверхности развала, распределения компонентов регламентирующих качество полезного ископаемого в развале и распределения средних размеров отдельности в развале на основе моделирования процесса взрыва.

1.4. Программное обеспечение, реализующее алгоритмы прогноза результатов взрывного разрушения горных пород на высокопроизводительных вычислительных системах.

2. Работоспособность разработанных математических основ и алгоритмов прогнозирования результатов взрывного разрушения горных пород подтверждается сопоставлением результатов проведённых вычислительных экспериментов с результатами реальных взрывов на породном массиве Лебединского месторождения.

3. Разработанная система прогнозирования результатов взрывного разрушения породного массива прошла апробацию и внедрена в ОАО ВИОГЕМ в виде программного модуля ГИС ГЕОМИКС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка ВАК

1. Жиляков Е.Г. Математическая модель развала буровзрывного блока и распределение содержания полезного компонента во взорванной горной массе / Е.Г. Жиляков, С.Г. Кабелко // Научные ведомости БелГУ. Сер. История, Политология, Экономика, Информатика. – 2010. – №1, Вып. 13/1. – С. 66-73.

2. Кабелко С.Г. Алгоритмы и численные методы компьютерного моделирования развала и распределение содержания полезного компонента во взорванной горной массе // Научные ведомости БелГУ. Сер. История, Политология, Экономика, Информатика. – 2010. – №7, Вып. 14/1. – С. 102-109.

3. Кабелко С.Г. Компьютерное моделирование развала буровзрывного блока и распределение содержания полезного компонента во взорванной горной массе // Научные ведомости БелГУ. Сер. История, Политология, Экономика, Информатика. – 2010. – №13, Вып. 15/1. – С. 84-92.

*Статьи в других журналах**и сборниках материалов научных конференций*

4. Герасимов А.В. Компьютерное моделирование развала взорванной горной массы / А.В. Герасимов, А.М. Божков, С.Г. Кабелко, К.С. Рязанов // Труды всероссийской научной конференции с международным участием «Компьютерные технологии проектирования и планирования горных работ» Апатиты, СПб. 2009г. – С. 109-113.

5. Серый С.С. Моделирование развала и распределение полезного компонента во взорванной горной массе в системе ГИС ГЕОМИКС/ С.С. Серый, А.В. Герасимов, А.М. Божков, С.Г. Кабелко, К.С. Рязанов // Материалы X международного симпозиума «Вопросы осушения, геологии, горных работ, геомеханики, гидротехники, геоинформатики и экологии». Белгород, 25-29 мая 2009 г. – С. 254-258.

6. Кабелко С.Г. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение системы прогнозирования распределения компонентов, регламентирующих качество руд, в развале разрушенной взрывом горной массы на карьерах / С.Г. Кабелко, А.М. Божков, А.В. Герасимов // Материалы XI международного симпозиума «Вопросы осушения, геологии, горных работ, геомеханики, гидротехники, геоинформатики и экологии». Белгород, 23-27 мая 2011 г. – С. 104-111.

7. Кабелко С.Г. Математическая основа, алгоритмы и программное обеспечение компьютерного моделирования взрывного разрушения горных пород на карьерах / С.Г. Кабелко, А.В. Герасимов // Доклады Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в горном деле». Екатеринбург, 12-14 октября 2011г. – С. 64-74.

8. Кабелко С.Г. Математическая основа, алгоритмы и программное обеспечение системы прогнозирования результатов взрывного разрушения на

карьерах / С.Г. Кабелко // Прикладная математика, управление и информатика: Сб. тр. Междунар. молодёж. конф., Белгород, 3-5 октября 2012 г. – С.146-149.

9. Коновалов А.В. Способ параллельного расчёта перераспределения материала на этапе баллистического движения при компьютерном моделировании взрывного разрушения горных пород на карьерах / А.В. Коновалов, С.Г. Кабелко // Сборник научных работ Том 3 «Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области информатики и информационных технологий», Белгород, 10-12 июля 2012 г. С. 111-114.

Программы для ЭВМ и патенты

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010615905 «Компьютерное моделирование развала и прогнозирование полезного компонента во взорванной горной массе» Кабелко С.Г., Дунаев В.А., Серый С.С., Герасимов А.В., Божков А.М. Заявка № 2010614291, дата поступления 15 июля 2010г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 9 сентября 2010 г.

11. Патент на изобретение №2386032 «Способ определения содержания полезного компонента во взорванной горной массе при её выемке на карьерах», Божков А.М., Кабелко С.Г., Рязанов К.С., Дунаев А.В., Серый С.С., Герасимов А.В. Заявка № 2008148421 приоритет изобретения 08 декабря 2008 г. Зарегистрирована в Государственном реестре изобретений РФ 10 апреля 2010 г.

Подписано в печать 01.02.2013. Гарнитура Times New Roman
Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 40.
Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»
308015, г. Белгород, ул. Победы, д.85

