УДК 622.3: 622.795: 519.24: 621.396.01

П.В. Васильев

УСКОРЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗАПАСОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рассмотрены основные современные методы оптимизации контуров карьеров. Предложен подход на основе метода колонии самореплицирующихся нанороботов. Для ускорения работы алгоритма используется параллельные вычисления на графических платах по технологии CUDA и OpenCL. Описанный метод оптимизации предназначен для реализации на блочных моделях месторождений твердых полезных ископаемых с открытым способом разработки.

Ключевые слова: блочная модель, оптимизация, подсчет запасов, граничные условия.

Построение многомасштабных матричных (ячеистых) моделей месторождений полезных ископаемых и динамических моделей отработки запасов требует применения высокопроизводительных алгоритмов и программ с использованием возможности распараллеливания вычислений с помощью стандартного графического обеспечения персональных компьютеров. В этой связи в последние годы появилась возможность задействовать для многопоточных вычислений коммерческие видиокарты NVIDIA GeForce 260 GTX и более поздних моделей с программным ядром CUDA или OpenCL, не приобретая дорогостоящих суперкомпьютеров. Хотя в освоении этой технологии есть определенные трудности, однако она является неоценимой для выполнения сложных научных и инженерных расчетов.

В настоящий момент центральные процессоры (CPU) масштабируются недостаточно быстрыми темпами — сегодня это в основном 2-х и 4-х ядерные компьютеры, в 2010 году ожидаются 12-ти ядерные, тогда как в современных видеокартах (GPU), например в GF8800GTX, число процессоров может достигать 128, что дает весомый прирост производительности при распараллеливании вычислений. Перенос расчетов на GPU во многих задачах обеспечивает, в среднем, ускорение в 5-30 раз, по сравнению с быстрыми универсальными процессорами. Круг трудоёмких в вычислительном отношении задач быстро растет, особенно в области прикладных проблем обработки и анализа изображений, тогда как возможность использовать суперкомпьютеры стоимостью сотни тысяч долларов есть не у всех научных организаций.

В случае применения GPU ускорителя эффект распараллеливания задачи достигается за счет аппаратной обработки данных в буфере текстуры, цвета или глубины на основе матричных операций. Хотя не все задачи целесообразно переносить на GPU, но для большого класса задач эта технология позволяет получить существенный выигрыш по сравнению с CPU вычислениями. В этой связи одним из наиболее перспективных направлений является аппаратное GPU ускорение оптимизации на базе параллельных вычислений [].

В составе интегрированных горно-геологических информационных систем MGIS для проектирования и планирования отработки месторождений твердых полезных ископаемых широко применяются методы оптимизации извлечения запасов на основе традиционных методов плавающего конуса и теории графов по Лерчсу-Гроссману [0]. В целом методы решения задач глобальной оптимизации делятся на детерминированные, стохастические и эвристические. В последнее время был предложен ряд новых методов эвристической оптимизации, основанных на генетических алгоритмах и имитации коллективной работы колонии муравьёв, популяции пчёл или роя частиц [0]. Выделяемые среди эвристических методов имитационные алгоритмы оптимизации основаны на моделировании коллективного поведения самоорганизующихся систем. Взаимодействующие элементы, в общем случае, живых или неживых систем называются агентами. Ключевыми особенностями имитационных методов выступают децентрализованность, взаимодействие агентов, обусловленность поведения агентов.

В настоящее время установлено, что алгоритм оптимизации открытых горных работ по теории графов LG имеет ряд существенных недостатков для сложноструктурных месторождений и длительным сроком жизни карьеров. Это связано с тем, что реальное развитие контуров карьеров ограничивается стохастическими процессами добычи и геологическими свойствами горного массива, что приводит в целом к неоптимальным результатам. Изменения в базе данных также требуют полного перерасчета моделей, что приводит к длительной обработке и не позволяет дать достоверную оценку погрешности результатов. Подходы на основе целочисленного линейного программирования [0] оказываются весьма требовательны к вычислительным ресурсам и дают лишь субоптимальные результаты.

В связи с этим в данной работе предложена модификация метода оптимизации роя частиц PSO путём имитации работы колонии самореплицирующихся нанороботов, метод NRO, предназначенный для оптимального извлечения запасов полезных ископаемых из недр по максимуму прибыли с учетом ограничений.

Как известно, одной из основных задач нанотехнологии является создание устройств для работы со структурами молекулярного и атомного размера, способных строить разнообразные объекты. Важная особенность нанороботов — возможность размножения (репликации) путём самосборки. Согласно модели фон Неймана при изготовлении последующих поколений репликаторов процесс ускоряется за счет сложения сил увеличивающегося числа репликаторов и расширения их специализации в сложной системе.

Использование молекулярных ассемблеров при добыче полезных ископаемых позволило бы выполнить полностью селективное извлечение полезных компонентов рудных тел без потерь и осуществить комплексную утилизацию минерального сырья по безотходной технологии. Естественно, что в перспективе такая техническая задача может быть решена только после овладения технологией управляемого механосинтеза и создания многомасштабной иерархии взаимодействия крупногабаритного горнодобычного оборудования с микро- и нанороботами. Ещё более сложной является задача совместного согласованного функционирования транспортно-погрузочного оборудования и колоний наноботов, которую не решить без использования беспроводных систем и мощных компьютеров, способных точно управлять гигантским количеством устройств. Однако для целей проектирования оптимальных этапов разработки месторождений по максимуму чистого дисконтированного дохода, ЧДД, задача оптимизации может быть сведена к имитации работы виртуальной системы добычи. В конечном счете требуется найти такие границы открытых горных работ, для которых будет получена максимальная прибыль и при этом должна быть достигнута минимизация количества отходов в условиях экономических, геологических и технологических ограничений, при этом обеспечен минимальный экологический ущерб окружающей среде.

Проблема оптимального планирования добычи в карьерах для блочных моделей месторождений определяется как отыскание последовательности выемки блоков по методу NRO в таком порядке, чтобы максимизировать чистый дисконтированный доход при следующих основных ограничениях: производительность пункта приёма готовой продукции, объём извлечения в заданный период времени, ограничения утилизацию различных типов руд, ограничения, связанные со складированием готовой продукции и отвалами пустых пород, ограничения по логистике, экологические допуски и налоговые сборы. Вводятся следующие параметры: T — число этапов планирования добычи; N — число блоков рудного тела; c_i^t — прибыль (в ЧДД или NPV) от добычи блока i в период *t*; O-подмножество рудных блоков; W-подмножество блоков пустой породы; t_i — масса блока i; m_t — масса перерабатываемой руды в период времени t; S_i — множество блоков, которые необходимо удалить до отработки блока i. А также

$$x_i^t = \begin{cases} 1, & \text{если блок i отработан в период времени между l и t} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

где ℓ_0^t — нижняя граница массы руды, обогащенной в период времени t; u_0^t — верхняя граница массы руды, поступающей для саморепликации нанороботов в период времени t; u_w^t — верхняя граница массы породы, добытой в период времени t.

В этом случае формулировка проблемы оптимизации добычи в карьере при оптимизации прибыли NPV по методу колонии самореплицирующихся NRO записывается следующим образом:

$$Z = \sum_{t=2}^{T} \sum_{i=1}^{N} (c_i^{t-1} - c_i^t) x_i^{t-1} + \sum_{i=1}^{N} c_i^T x_i^T$$

при следующих ограничениях функционирования:

$$\sum_{i \in O} t_i x_i^1 = m_1;$$

$$\sum_{i \in O} t_i (x_i^t - x_i^{t-1}) = m^t, \text{ где } t = 2,3,\dots,T.$$

$$\sum_{i \in W} t_i x_i^1 \le u_w^1$$

$$\sum_{i \in W} t_i (x_i^t - x_i^{t-1}) \le u_w^t, \text{ где } t = 2,3,\dots,T.$$

$$x_i^{t-1} \le x_i^t,$$

где t = 2,3,...,T

$x_i^t \le x_j^t$, где t = 1,2,...,T, j $\in S_i$; i = 1,2,...,N;

$$\ell_0^t \le m^t \le u_0^t,$$

где t = 1,2,...,T; $x_i^t = 0,1$, для всех i, t.

Ограничения гарантируют, что должна обеспечиваться заданная производительность рудника и имеющихся фабрик переработки, а также то, что масса удаляемой в отвал породы не должна превышать предписанные верхние границы. Параметры ограничения также предписывают то, что каждый блок перерабатывается или удаляется нанороботами в заданный период времени (этап отработки) при заданных углах откосов бортов карьера.

Алгоритм реализации метода NRO включает следующие основные шаги:

1. Строится блочная модель месторождения полезного ископаемого.

2. Для 3D модели устанавливаются два пункта доставки блоков: А) точка дальнейшей переработки руды или фабрика обогащения и В) точка формирования отвала пустой породы или отходов производства.

3. Генерируется первоначальное множество нанороботов для блоков поверхности двумерной решетки руды, полученной методом суммирования содержания металла в 3D блоках на топографическую поверхность.

4. Задаются ограничения на угол откоса и технологический регламент отработки.

5. При детализации геоструктур до микро и наноуровня изменяется размер и качество блоков. Множество нанороботов реплицируется в зависимости от степени раскрытия полезного минерала в руде.

6. В зависимости от бортового содержания металла в блоке выбирается тип робота А) или В) для его доставки к точке переработке или в отвал. Блоки 3D модели извлекаются последовательно сверху с учетом ограничений.

7. По дискретной модели месторождения выполняется поиск наикратчайшего пути к указанным выше пунктам.

8. В отличие от использования феромонов, как в методе колонии муравьёв ACO, в NRO применяется хранение траектории движения и задание вектора направления движения в пункты переработки и отвала.

9. Для ускорения работы используются параллельные вычисления для графических плат GPU, реализованная по технологии CUDA и OpenCL.

10. Переход к пункту 3 и смена координат пунктов переработки руды и отвала породы.

11. Оптимальные контура системы вложенных карьеров для дискретных этапов отработки по времени вычисляется как минимум суммарного пути колонии самореплицирующихся нанороботов.

Полученные модели поверхности далее используются для перспективного проектирования и составления графиков отработки запасов руд по *прибыли.*

Выводы

Для реализации всех преимуществ современных генетических и имитационных алгоритмов оптимизации карьеров необходимо воспользоваться всеми дополнительными возможностями параллельных вычислений на графических платах GPU с помощью предложенного NVIDIA C++ подобного языка подготовки и обработки CUDA и OpenGL.

Ускорение достигается за счет выполнения матричных аппаратных операций также при нахождений дистанционной функции и дискретной диаграммы Вороного. В качестве ускорителя обработки данных и распараллеливания вычислений использовалась графическая плата GPU NVIDIA GeForce 260 GTX. Метод разрабатывается для построения регулярных блочных моделей рудных тел с адаптацией для оптимизации контуров карьеров при отработке запасов сложноструктурных месторождений полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсентьев А.И.* Определение производительности и границ карьера. М.: Недра, 1970. –320с.
2. *Капутин Ю.Е.* Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров). — СПб.: Недра, 2004. — 424с.
3. *Компьютеры* и системы управления в горном деле за рубежом /Ю.П. Астафьев, А.С. Зеленский, Н.И. Горлов и др. — М.: Недра, 1989. — 264с.
4. *Наговицин О.В., Билин А.Л., Смагин А.В.* Оптимизация границ карьеров на основе алгоритма проф. С.Д. Коробова. // Горн. информ. — аналит. Бюлл / Моск. гос. горн. ун-т, 2002, -№ 7. -С. 244-246.
5. *Колганов В.Ф.* Компьютерное моделирование при разведке и оптимизации разра ботки месторождений алмазов / В.Ф. Колганов, И.Ф. Бондаренко, А.Ю. Давыденко, П.В. Васильев — Новосибирск: Наука, 2008. -262с.
6. *Карпенко А.П., .Селиверстов Е.Ю.* Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации (Particle Swarm Optimization). Наука и образование. — 2009. -№3. - Эл № ФС 77 — 30569.
7. *Caccetta L., Hill S.P.* An application of branch and cut to open pit mine scheduling. Journal of Global Optimization, 2003. — No.27. — pp.349-365.
8. *Fernбndez Martнnez J.L., Garcнa Gonzalo E.* The PSO family: deduction, stochastic analysis and comparison / Swarm Intell. 2009. -No.3 - pp.245–273. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Васильев П.В. — кандидат технических наук, руководитель лаборатории Геоинформационных технологий, БелГУ, email:vassiliev@bsu.edu.ru

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

СКВАЖИННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕТАНА ИЗ ЛИКВИДИРОВАННЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ: ВЫБОР ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ (№875/03-12 от 27.12.11, 12 с.)

Борисенко Александр Викторович, ведущий инженер, Московский государственный горный университет, a.borisenko_msmu@mail.ru

Рассмотрены основные технологические аспекты по выбору участков и определение параметров заложения метанодобычных скважин при разработке технологической части проектов извлечения метана из техногенных пустот угольных шахт.

Ключевые слова: извлечение шахтного метана, подработанный горный массив, выработанное пространство, техногенный коллектор, участки заложения скважин, параметры метанодобычных скважин.

WELLBORE METHANE EXTRACTION FROM ABANDONED COAL MINES: SELECTION OF MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Borisenko A.V.

The important issues during development of technological part of the design of methane extraction from technogenic interstices are the selection of areas and definition of methane extration wells allocation. Main technological aspects of the issues above are considered in the article.

Key words: coalmine methane extraction, tapped rock mass, tapped area, technogenic reservoir, areas of well location, methane extraction wells parameters.