# Моделирование карьеров рудных месторождений на высокопроизводительных гибридных вычислительных системах

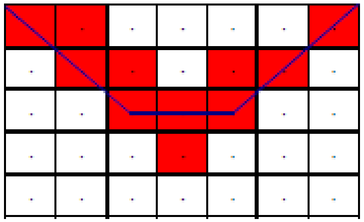
Исполнитель: Петров Д.В., НИУ «БелГУ», Белгород
Научный руководитель: Михелёв В.М.,
к.т.н., доцент кафедры МиПОИС НИУ «БелГУ»

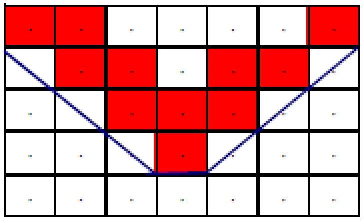
# Поиск предельных границ карьеров

Задача нахождения предельных границ карьеров рудных месторождений является одним из важнейших этапов планирования разработки полезных ископаемых открытым способом. Ее решение, во-первых, позволяет оценить объем получаемой прибыли, а во-вторых, является фундаментом для следующих этапов проектирования, таких как нахождение оптимальной сети карьерных транспортных путей и выбор мест расположения отвалов и перерабатывающих фабрик.

При нахождении границ карьера необходимо учитывать пространственное расп-ределение компонентов полезных ископаемых и принятых устойчивых или технол-огически допустимых углов откосов бортов карьера. С вычислительной точки зрения данная задача является сложной, т.к. для моделирования месторож-дений даже среднего размера приходится обрабатывать большие массивы данных.

Традиционно для решения этой задачи применяются модификации алгоритма «плавающего конуса» и основанного на теории графов алгоритма Лерча-Гроссмана. Эти алгоритмы характеризуются малой точностью (плавающий конус) и большой вычислительной сложностью (алгоритм Лерча-Гроссмана), поэтому существует необходимость в разработке новых методов решения данной задачи.





# Математическая постановка задачи

Аналитически задачу оптимизации можно описать следующим образом: пусть v, c, m — функции плотности, определяемые в каждой точке трехмерного пространства месторождения;

v(x, y, z) — себестоимость руды;

c(x, y, z) — стоимость разработки руды и пород;

m(x, y, z) = v(x, y, z) - c(x, y, z) — прибыль от разработки данного объема.

Пусть α(x, y, z) определяет угол в каждой точке пространства и S является семейством поверхностей, наклон которых ни в одной точке по отношению к постоянной горизонтальной плоскости не превосходит α.

Пусть V — семейство объемов, соответствующих семейству поверхности S. Требуется найти среди всех возможных формирований объёмов тот, который максимизирует интеграл

$$\int_V m(x, y, z)dzdydz \qquad (1)$$

Другими словами, требуется найти такие границы карьера открытых горных работ, в которых при разработке месторождения будет получена максимальная прибыль.

# Блочная модель месторождения

Для решения задачи оптимизации с применением ЭВМ используют упрощенную блочную математическую модель месторождения полезных ископаемых. Каждый блок данной модели характеризуется числом (весом), показывающим чистую прибыль, получаемую в ходе его добычи, с учетом процентного содержания полезных элементов, себестоимости его выработки и рыночной стоимости полезных элементов.

В этом случае задача оптимизации сводится к нахождению конечного набора соседних блоков, сумма весов которых будет максимальна.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | 8 | 12 | 12 | 0 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 |
| | -4 | -4 | -4 | -4 | 0 | 12 | 12 | 8 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | |
| | | -4 | -4 | -4 | -4 | 8 | 12 | 12 | 0 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | | |
| | | | -4 | -4 | -4 | 0 | 12 | 12 | 8 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | | | |
| | | | | -4 | -4 | -4 | 8 | 12 | 12 | 0 | -4 | -4 | -4 | -4 | | | | |
| | | | | | -4 | -4 | 0 | 12 | 12 | 8 | -4 | -4 | -4 | | | | | |
| | | | | | | -4 | -4 | 8 | 12 | 12 | 0 | -4 | | | | | | |
| | | | | | | | -4 | 0 | 12 | 12 | 8 | -4 | | | | | | |
| | | | | | | | | -4 | 12 | 12 | 12 | 0 | | | | | | |

# Генетический алгоритм

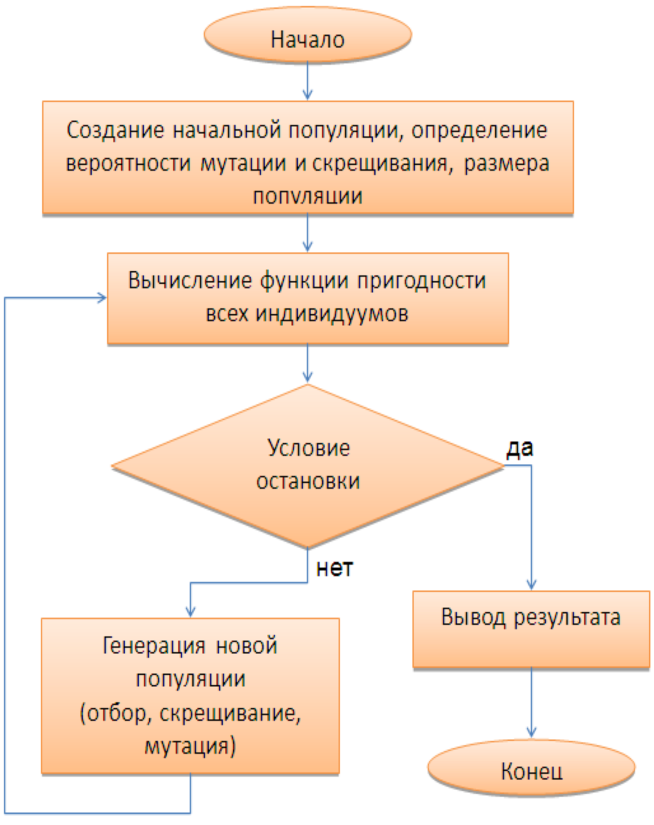
Пусть имеется трехмерная блочная модель месторождения $P_{I\times J\times K}$ каждый элемент которой характеризуется числом (весом):

$$p_{ijk}, i\in[0,I], j\in[0,J], k\in[0,K] \qquad (1)$$

показывающим чистую прибыль, получаемую в ходе его добычи, с учетом процентного содержания полезных элементов, себестоимости его выработки и рыночной стоимости полезных компонентов. Тогда ее можно охарактеризовать вектором $X=\{x_1,\dots,x_n\}$, где $n=I\cdot J$ в котором значение глубины столбца с координатами $(i, j)$ помещается в позицию

$$x_q, q=i*I+j \qquad (2)$$

Этот массив является хромосомой, т.к. он полностью характеризует один индивид – одну конкретную форму карьера. Путем итеративного применения генетических операторов к набору таких индивидов (популяции) находится оптимальная форма поверхности карьера.



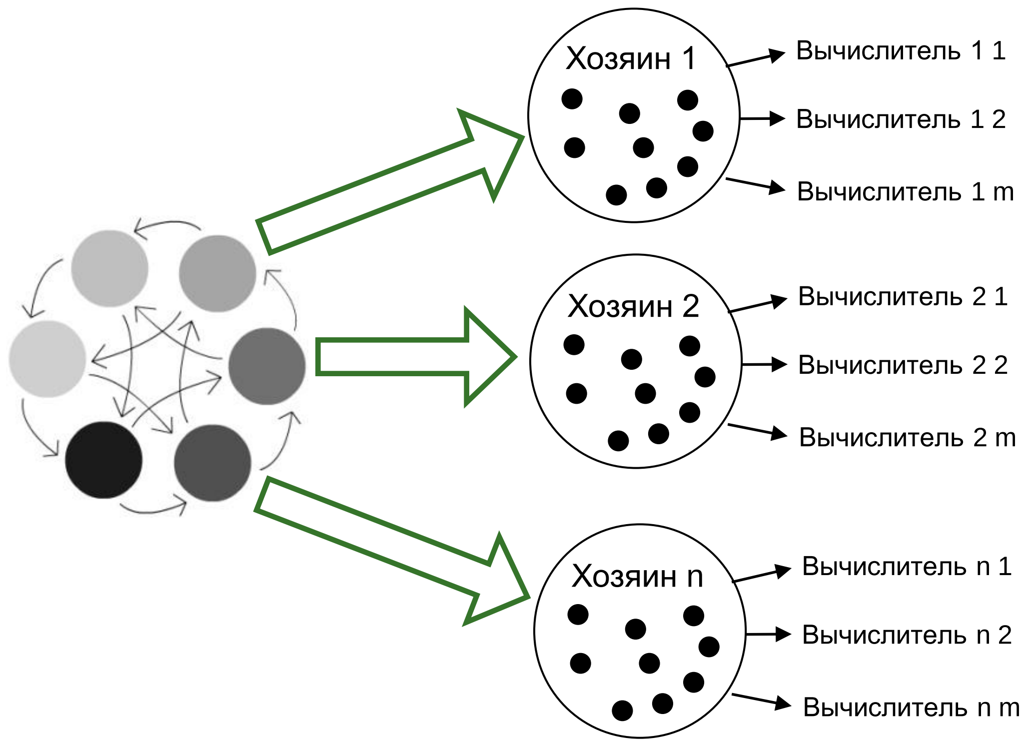

$$f(X)=\sum_{i=0}^{I}\sum_{j=0}^{J}\sum_{k=0}^{K} p_{ijk}, k\le x_q, q=i*I+j \qquad (3)$$

# Параллельный алгоритм

Два уровня параллелизма:

Островная модель ГА

Модель «Хозяин-подчиненный»




MPI

CUDA

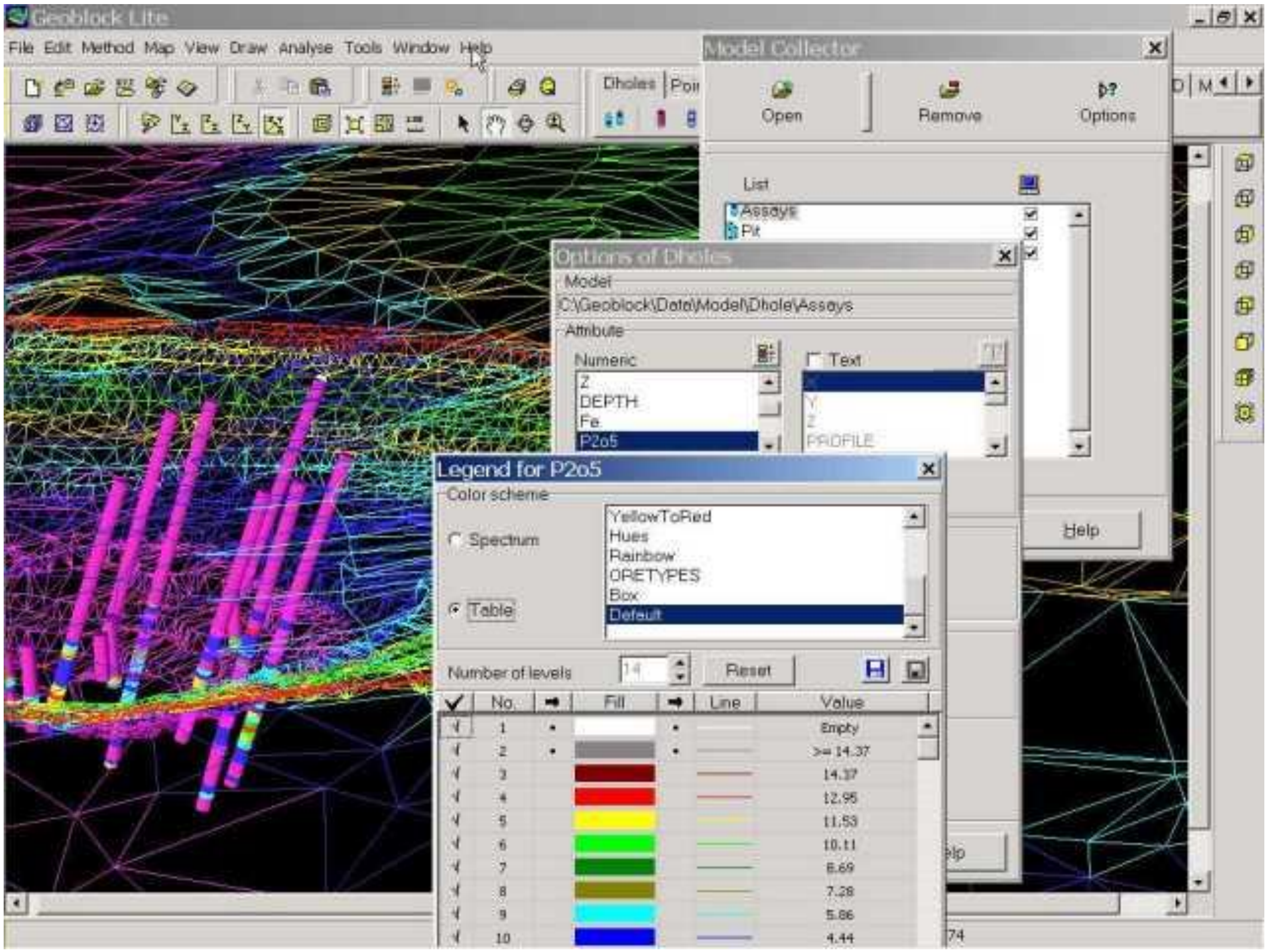
# Преимущества

- Позволяет работать с трехмерной моделью месторождения, что повышает качество получаемых результатов
- Предоставляет возможность гибкого масштабирования вычисли-тельного процесса
- Повышение доходности производства
- Уменьшение количества извлекаемой пустой породы, а следовательно уменьшение размеров отвалов, что немаловажно с точки зрения экологии

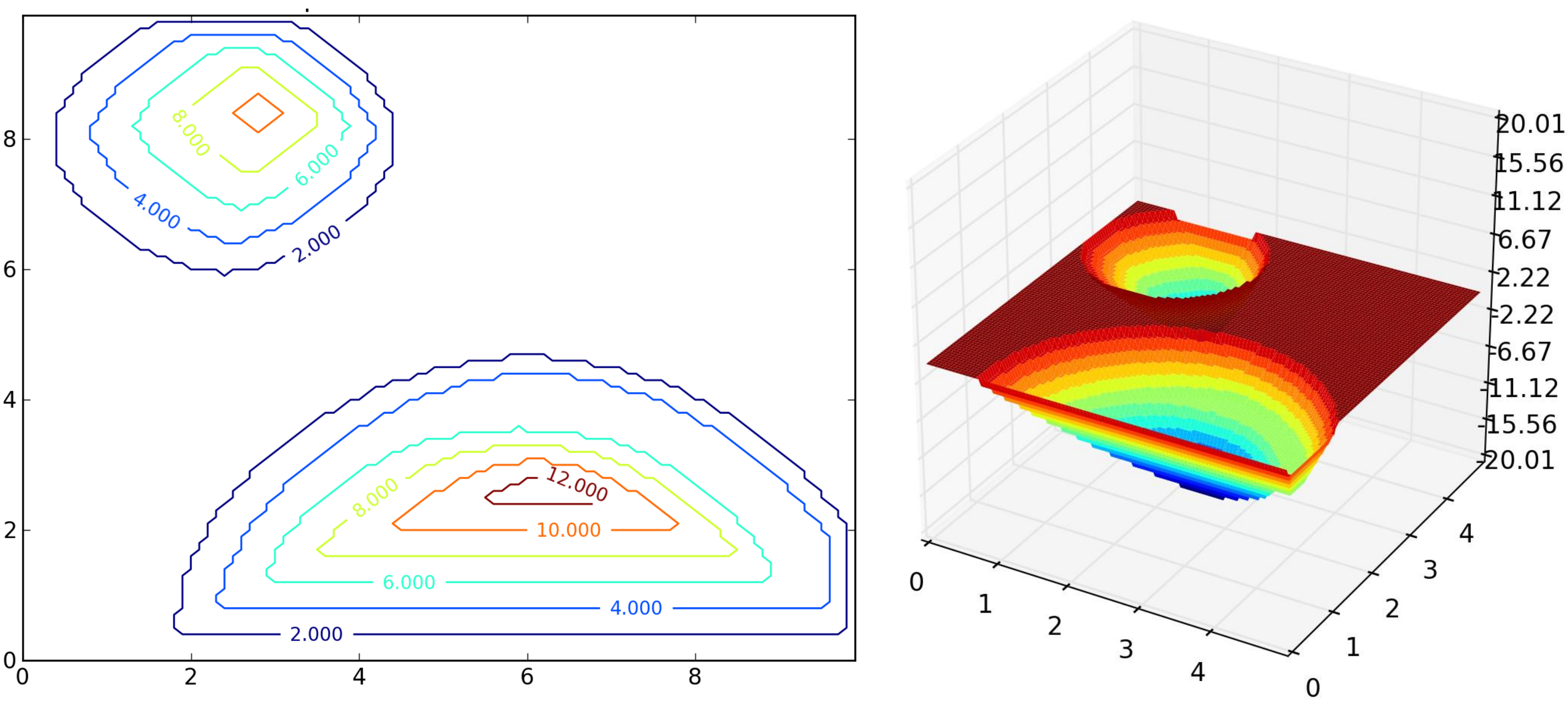
# Применение

| **Горно-обоготительный комбинат** | **Полезное ископаемое** | **Доказанные запасы** |
|---|---|---|
| Жирекенский ГОК, Забайкальский край | Молибден | 10,6 млн. тонн; |
| Сорский ГОК, Республика Хакасия | | 58,1 млн. тонн; |
| Лебединский ГОК | Железные руды | 25 млрд. тонн; |
| Михайловский ГОК | | |
| Стойленский ГОК | | |
| Чупинский ГОК (Республика Карелия) | Кварц | 5,6 млн. тонн |
| Ковдорской ГОК (Мурманская обл.) | Магнетит | 650 млн. тонн |
| Бурибаевский ГОК | Медь | 200 млн. тонн |

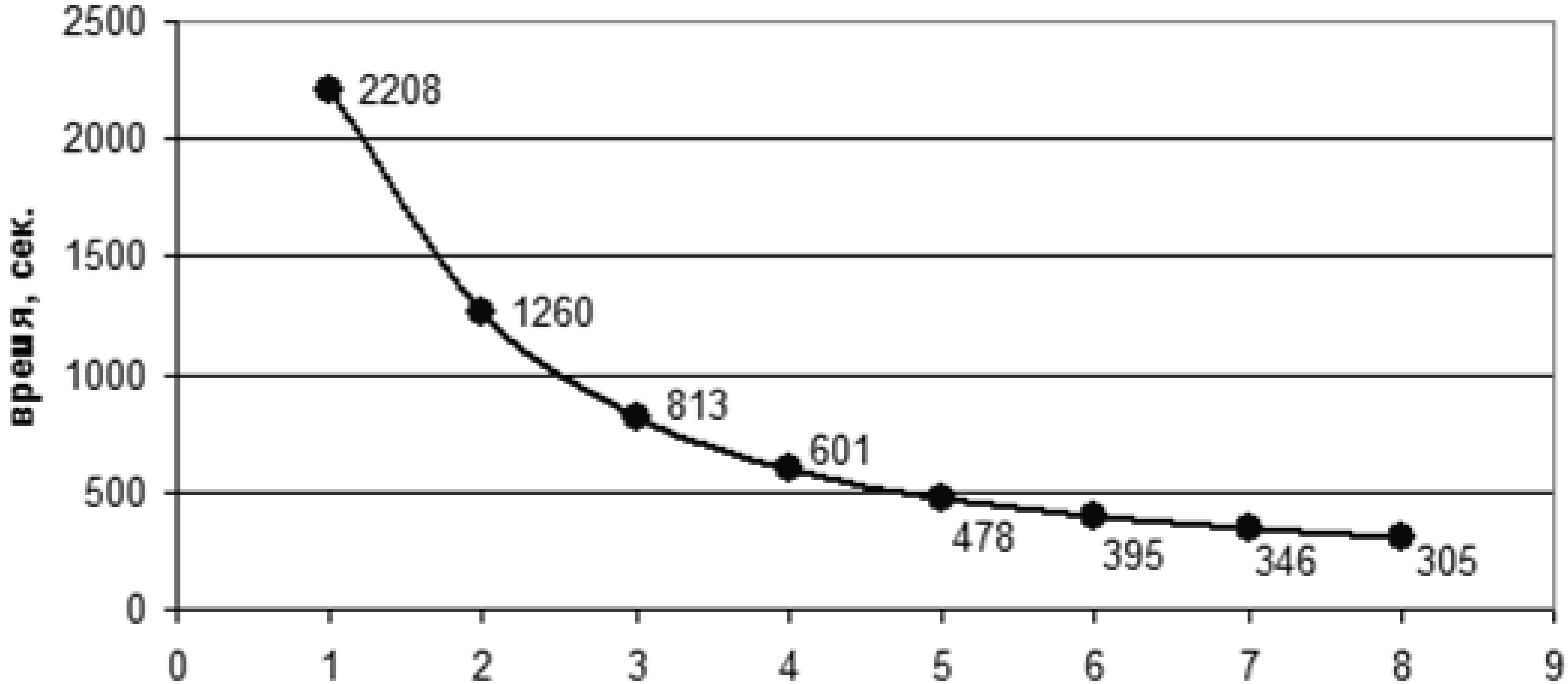
# ГГИС «Geo block»



# Пример расчета



# Пример расчета



Спасибо за внимание