

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОРТА КАРЬЕРА КУМТОР (КЫРГЫЗСТАН)

В.Г. Долгушев, В.А. Коваленко, С.Ф. Усманов

Кыргызско-Российский Славянский университет
Ул. Киевская, 44, Бишкек, Кыргызская Республика, 722000

Представлены результаты трехмерного моделирования напряженно-деформированного состояния борта карьера Кумтор. Проанализированы причины крупного обрушения участка борта карьера.

Современный уровень разработки месторождений открытым способом характеризуется увеличением глубины карьеров, ведением горных работ в сложных геолого-климатических условиях; к эффективности добычи предъявляются повышенные требования. Особое внимание уделяется обеспечению устойчивости горнотехнических сооружений при минимальном объеме вскрышных работ, устойчивости бортов карьеров и откосов.

Для прогнозирования устойчивости применяются различные методы: натурные наблюдения, аналитические расчеты, численное моделирование напряженно-деформированного состояния, геофизические методы.

В настоящее время в инженерной геотехнологической практике крайне редко применяется трехмерное численное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива. Это объясняется отсутствием вычислительных мощностей, недостаточным количеством программного обеспечения трехмерного численного моделирования, высокой стоимостью и сложностью в эксплуатации этих программ, кроме того, в нормативно-законодательной практике применяются двухмерные методы расчетов.

Одним из ведущих горнодобывающих предприятий в Кыргызстане является рудник Кумтор (совместная Кыргызско-Канадская компания Centera Gold). Разработка ведется в сложных условиях высокогорья на высоте свыше 3000 м над уровнем моря. На карьере создана специальная геотехническая служба, обеспечивающая мониторинг смещения горного массива и предотвращения обрушений. Для мониторинга и предотвращения аварий используется система фирмы Leica Geosystems. Несмотря на это, на предприятии не удалось предотвратить аварию, связанную с обрушением участка борта карьера Кумтор в 2002 г. Это обрушение повлекло человеческие жертвы и значительные материальные убытки для компании и экономики Кыргызской Республики (рис. 1). В течение 10 сек обрушился массив высотой 280 м и шириной в основании 250 м, глубина поверхности обрушения составила в среднем 40 м. Объем обрушенной массы составил свыше 2 млн 700 тыс. м³. До настоящего времени причины обрушения до конца не выяснены.



Рис. 1. Вид борта с обрушенной массой

В ходе исследований использовался сверхмощный вычислительный комплекс, так называемый вычислительный кластер. В его структуру входят: 64 процессора Intel Xeon 3.0 GHz, с оперативной памятью по 2 Gb, дисковая память на вычислительных узлах по 120 Gb.

Особенностью этого комплекса является заложенный в его основу параллельный принцип работы всех процессоров. Именно такой комплекс позволяет решать сложные задачи математического моделирования неоднородных, пространственных структур. Значительную проблему для использования вычислительного кластера представляет инсталляция и использование соответствующего программного обеспечения.

Достаточно мощным и свободно представляемым для пользователей является программный пакет ADVENTURE (Advanced Engineering analysis Tool for Ultra large Real world), разработанный лабораторией моделирования Токийского университета [1].

Вычислительные ресурсы кластерного компьютера и использование пакета Adventure дает возможность моделировать напряженно-деформированное состояние борта карьера в трехмерном пространстве.

Для расчетов был выбран участок борта карьера, на котором в 2002 г. произошло большое обрушение. Данные для расчета были представлены геотехнологической службой карьера. Расчет выполнялся для однородного массива.

В расчетах были приняты следующие физико-механические свойства породы: модуль Юнга — $20 \cdot 10^9$; коэффициент Пуассона — 0,25, объемный вес — $2,85 \text{ т/м}^3$, высота борта — 342 м, генеральный угол наклона 42° . Область была разбита на 6 млн конечных элементов в форме тетраэдра. Расчет поля напряжений выполнялся на 48 процессорах в течение 6 часов.

В рамках исследования были смоделированы две задачи: упругая и упруго-пластическая. Сравнение геомеханических моделей деформирования показало существенное различие в распределении поля деформаций.

На рис. 2 показано общее распределение смещений. Область *A* отображает участок массива со смещениями на свободную поверхность. Эта область является зоной потенциального обрушения массива. На рис. 3 показано распределение напряжений σ_{zy} вдоль вертикального сечения.

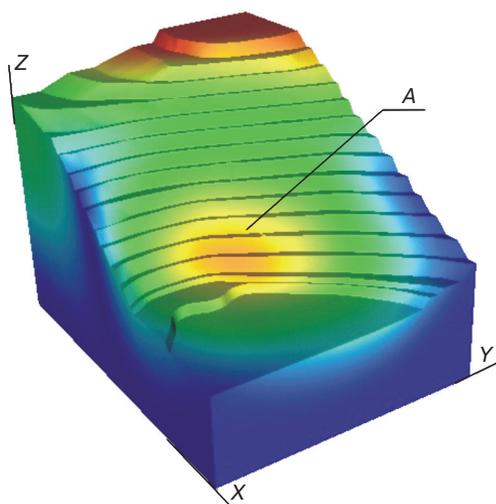


Рис. 2. Распределение смещений в горном массиве

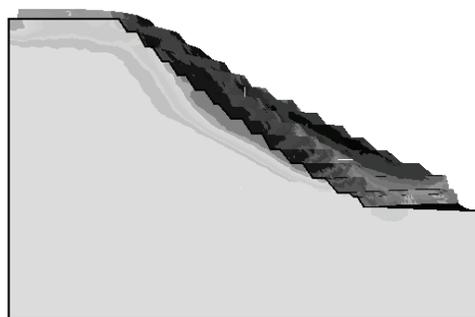


Рис. 3. Распределение напряжений σ_{zy} вдоль вертикального сечения

Для отображения результатов расчетов используется программа ParaView 3.2.0. Программа ParaView 3.2.0 дает возможность изображать распределение поля напряжений по всем компонентам напряжений, деформаций и смещений в любом сечении (табл.).

Компонента	Значение компоненты	
	минимальное	максимальное
Смещение X	-0,508484	0,157181
Смещение Y	-1,58122	0,510904
Смещение Z	-2.00965	0,684988
Напряжение ZX	-8,11296e+05	5,7367e+05

Как видно из характера распределения напряжений внутри массива, зоны с максимальными сдвиговыми напряжениями выходят на свободную поверхность и определяют область обрушений. По мнению авторов, именно завышенный угол наклона борта сыграл значительную роль при потере устойчивости массива в 2002 г.

Таким образом, при использовании вычислительного кластера и соответствующего программного обеспечения открываются возможность решать сложные задачи трехмерного моделирования. Прогнозировать устойчивость борта карьера в будущем следует с учетом реальной пространственной конфигурации поверхности на основе анализа трехмерного напряженного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ADVENTURE Project Home Page: <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp>.
- [2] *Усманов С.Ф.* Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива // *Современные проблемы механики сплошных сред. — Вып. 6: Гидрогазодинамика и экзогенно-геологические процессы природы. — Комитет по теорет. и прикл. механике Кыргызстана, Институт физики и механики горных пород НАН КР. — Бишкек. — 2007. — С. 73—78.*
- [3] *Хабиров В.В., Воробьев А.Е.* Теоретические основы развития горнодобывающих и перерабатывающих производств Кыргызстана / Под ред. Н.П. Лаверова. — М.: Недра, 1993.

NUMERICAL MODELING THREE-DIMENSIONAL STRESSED-STRAINED STATE OF THE OPEN PIT KUMTOR EDGE (KYRGYZSTAN)

V. Dolgushev, V. Kovalenko, S. Usmanov

Kyrgyz-Russian Slavic University
Kievskaja str., 44, Bishkek, Kyrgyz Republic, 720000

Results of three-dimensional modeling stressed-strained conditions of the open pit Kumtor edge are presented. The reasons of the large crushing the area of the pit edge is analysed.



Долгушев В.Г. — менеджер проекта МНТЦ, старший научный сотрудник ИВЦ КРСУ



Коваленко В.А. — начальник Информационно-вычислительного центра КРСУ, директор бранч-офиса МНТЦ в Кыргызской Республике, кандидат технических наук



Усманов С. Ф. — декан факультета международных отношений Кыргызско-Российского Славянского университета, кандидат технических наук