

*Абдылдаев К.К.*

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ БОРТОВ КАРЬЕРОВ**

*К.К. Abdyldaev*

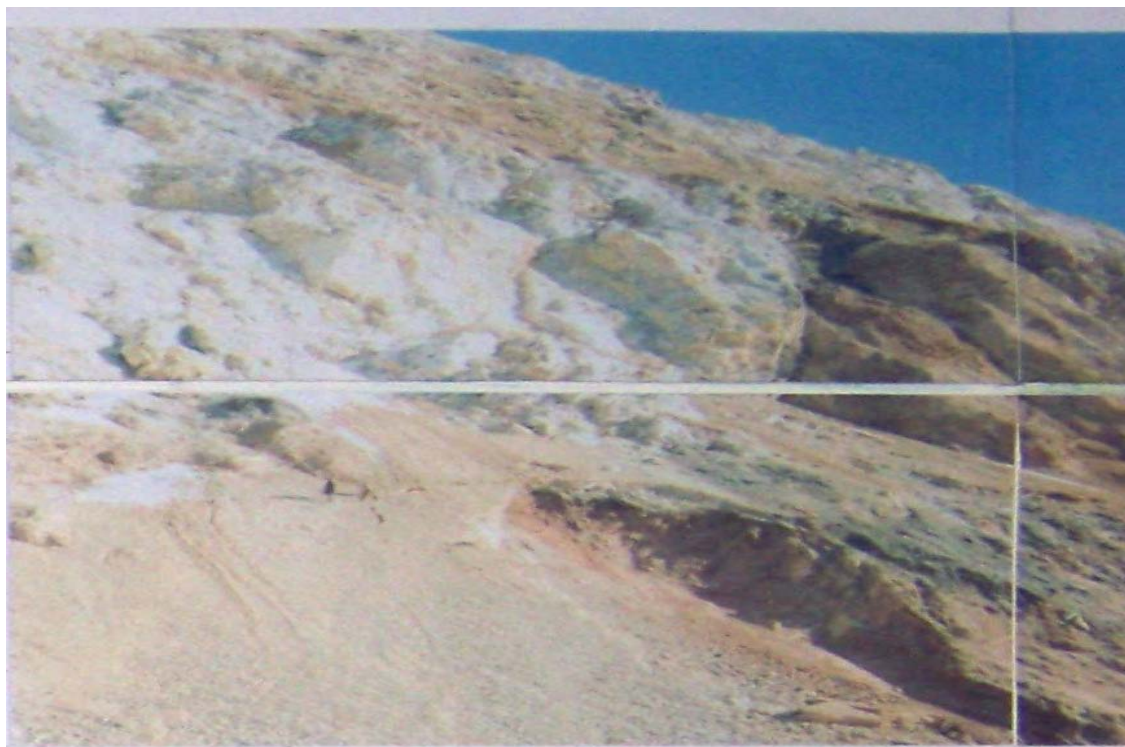
**NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS PITWALL**

*Приведены результаты численного моделирования геомеханических процессов при открытой разработке сложноструктурных рудных месторождений, с использованием разработанной системой компьютерного моделирования.*

*The results of numerical simulation of geomechanical processes in open development compound structure of ore deposits, using the developed system of computer simulation.*

Одной из сложных проблем при безопасном освоении рудных месторождений Кыргызстана открытым способом является учет структурных неоднородностей массива горных пород, которое

оказывают существенное влияние на характер распределения напряжений в прибортовом массиве, а в конечном итоге на устойчивость бортов карьеров. С целью оценки влияния неоднородностей прибортовых массивов на развитие геомеханических процессов проведено исследование напряженно-деформированного состояния породных массивов с использованием, разработанной нами компьютерной системы моделирования на основе метода конечных элементов. В качестве реального объекта со сложной структурой рассмотрен карьер месторождения Макмал (рис. 1).



**Рисунок 1.** Неоднородная структура карьера Макмал

Следует отметить, что открытая разработка месторождения Макмал сопровождалась массовыми разрушениями предохранительных берм их участков или отдельных блоков по Северному и Западному бортам. При этом, основными причинами самообрушения по Северному и Западному бортам предохранительных берм их участков или отдельных блоков стали прежде всего сложная структура

массива горных пород, слагающих данное месторождение и его тектоническая нарушенность. С целью установления наличия тектонических нарушений и неоднородной структуры массива на Северном борту карьера были пробурены инженерно-геологические скважины. Анализ выхода керна показал, что горными породами Северного борта карьера являются в основном мраморы,

граниты и скарны. В массиве также имеются рыхлые граниты. При этом, по

состоянию выхода керна о породах зоны дробления сделан вывод о том, что породы дробления способны к обрушениям по поверхностям скольжения и несклонны к пластическим деформациям. Причем, вероятной поверхностью скольжения является контакт мраморов с гранитами.

Для расчетов примем, что борт карьера состоит из пяти разновидностей пород. Глубина карьера составляет 210 м и угол наклона борта равен  $45^{\circ}$ . Физико-механические свойства пород, применяемые в расчете, приведены в таблице 1. На рисунке 2 приведена схема неоднородной структуры массива карьера Макмал.

Таблица 1. Физико-механические свойства пород.

Порода	Объемный вес $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
Мрамор	2,66	5,5-10,5	0,3
Известняк мраморизованный	2,71	6,0-10,4	0,28
Гранит крупнозернистый	2,6	6,9-10,4	0,26
Мраморная брекчия	2,66	8,0-12,5	0,22

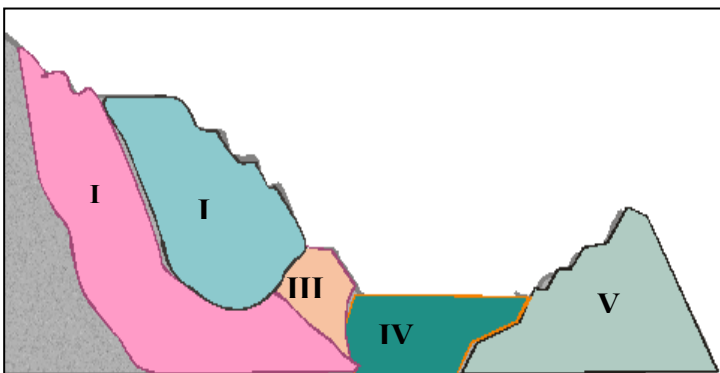


Рисунок 2. Схема неоднородности структуры карьера Макмал.

Рассматриваемую область объекта исследования можно представить в виде совокупности подобластей, с различными физическими характеристиками и геометрическими параметрами. Здесь, подобласть I представляет зону простираения крупнозернистой гранитной структуры; подобласть II – зона простираения известняка мраморизованного; подобласть III – зона простираения гранитов-порфиров; подобласть IV – имеет структуру мраморной брекчии; подобласть V – известняка мраморизованного. Таким образом, вся расчетная область  $\Omega$  состоит

из подобластей  $\Omega_i$  со своей границей  $S_i$ , т.е.

$$\Omega = \sum_{i=1}^N \Omega_i .$$

В пределах каждой подобласти сохраняется изотропность. Размеры области задаются исходя из размеров реального объекта

Важное значение с точки зрения обеспечения эффективности вычислительного процесса имеет выбор управляющей функции более значительная часть процессорного времени при генерации адаптивной сетки приходится именно на вычисление управляющей функции. Определение управляющей функции, обеспечивает генерацию конечно-элементной сетки, позволяющей получить решение с минимальной погрешностью при заданном ограничении на число узлов. Например, если при решении дифференциального уравнения эллиптического вида, решаемого в данной работе, и которое в общем виде можно записать

$$L\Phi(P) = f(P), \quad P(x, y) \in V$$

при краевых условиях

$$B_i\Phi(P) = b_i(P), \quad i = 1, 2, \dots, N ; \\ P(x, y) \in \Omega.$$

управляющей функция может иметь широко используемый вид

$$F(x, y) = |\text{grad}\Phi(x, y)|.$$

Здесь  $L\Phi$  и  $B_i\Phi$  – линейные однородные функции от  $\Phi(P)$  и ее производных.

Зоны требуемого локального сгущения и разрежения сетки в общем случае не могут быть известны заранее (они определяются геометрией объекта, граничными условиями, физическими свойствами материалов). Одним из первых этапов построения адаптивной сетки должно быть получение решения на грубой сетке. Процесс адаптации осуществляется путем поиска смещения каждого из узлов первичной сетки, которое обеспечило бы минимум некоторому функционалу. В этом случае число узлов и ячеек сетки не меняется, а происходит лишь деформация ячеек.

Замечено, что топология регулярных сеток становится малопригодной для описания сложных и многосвязных областей, а также при высокой степени сгущения узлов. Более гибкими в этом отношении являются адаптивные сетки. Они отличаются сгущением сетки в при контактных зонах. Задав параметры искомой сетки (координаты, шаги по координатным осям и т.п.) можно сгенерировать первичную треугольную сетку. После построения первичной сетки (рис. 3) выполняется формирование и решение МКЭ на первичной сетке, т.е. реализация традиционной схемы решения задачи МКЭ. Для повышения точности решения, следует перейти на следующий шаг- построение адаптивной сетки.

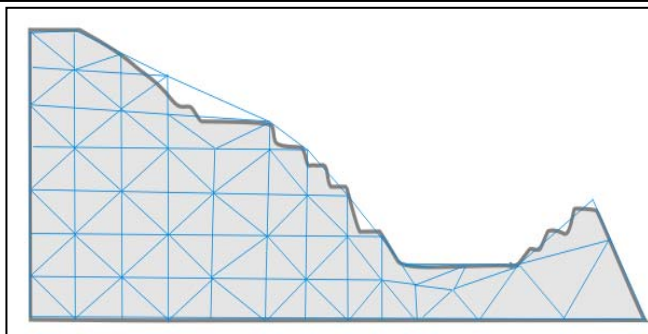
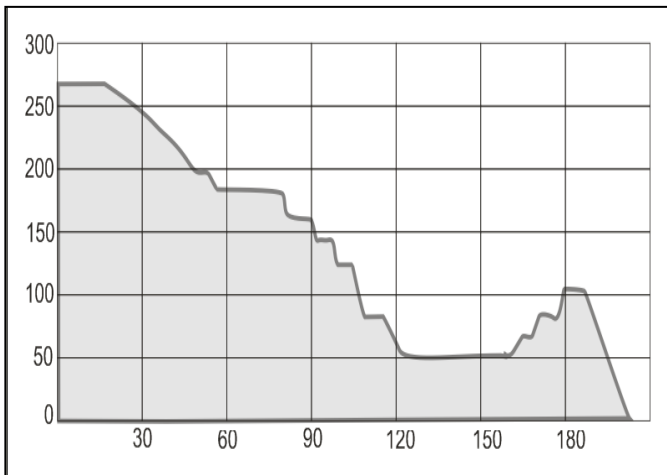
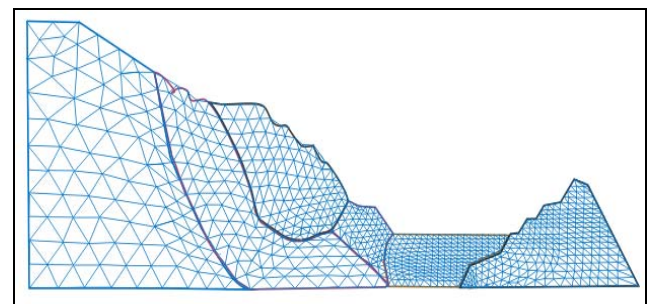


Рисунок 3. Схема визуального описания области.

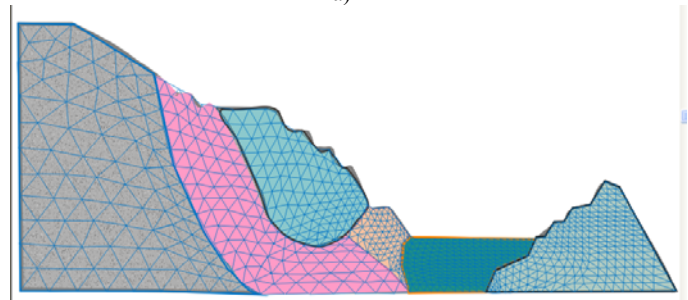
Рисунок 4. Первичная сетка.

Необходимо отметить, что точность и эффективность численного исследования задачи существенно зависит от свойств используемой расчетной сетки. При численном исследовании задач широко используются два типа сеток – структурированные

и неструктурированные. При решении многих практических задач, когда форма расчетной области является сложной, построение структурированной сетки становится чрезвычайно трудоемким. В таких случаях, использование неструктурированных сеток является единственно разумным решением. Следовательно, построение адаптивной сетки, связанное с ее доработкой приводит к появлению неструктурированных сеточных областей. Ближайшие узлы «сажаются» в угловые точки, граничные узлы проектируются на свою границу. Возможна интерактивная версия доработки сеточной области в части «сажания» узлов сетки в углы. Результат сохраняется в текстовом файле - протоколе. В протоколе должны содержаться координаты границ и угловых точек, номера узлов, номера элементов. В результате, после генерации адаптивной сетки выполняется следующий шаг-формирование и решение МКЭ на окончательной сетке (рис.5). Причем, для более детального анализа каждую рассматриваемую область можно построить в отдельности и выполнить все этапы МКЭ расчета для выбранной подобласти (например, подобласти 2 и 4 на рис.6)



а)



в)

Рисунок 5. Расчетная конечно-элементная сетка.

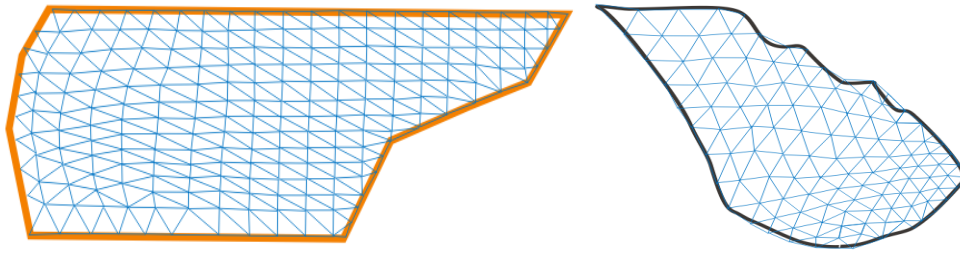


Рисунок 6. Автономное построение сеток МКЭ.

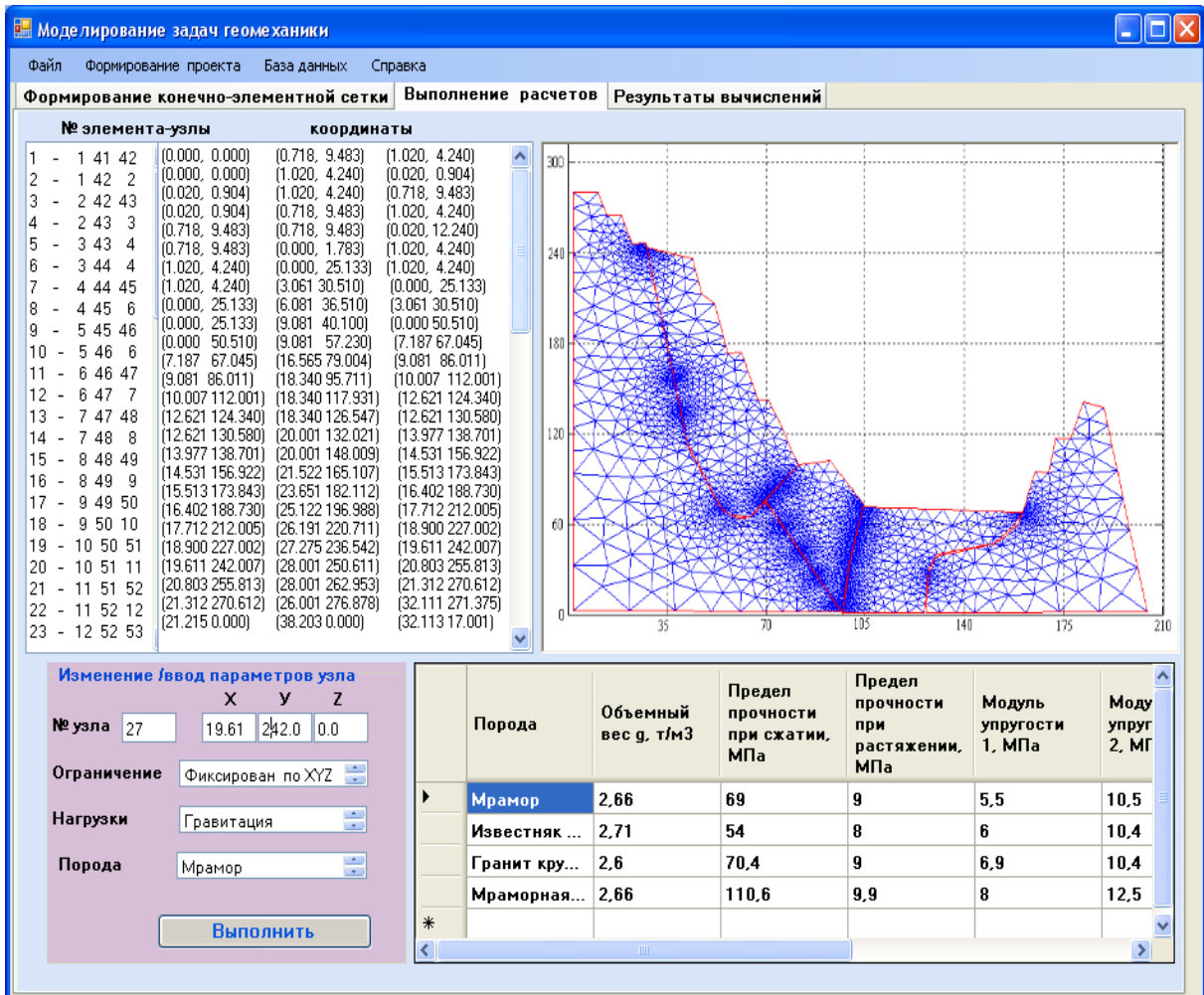


Рисунок 7. Окно процессора программы

Расчеты напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородного массива горных пород с использованием разработанной в данной работе системы компьютерного моделирования на основе методов конечных элементов показали, что распределение напряжений в прибортовом массиве имеет сложный характер. Концентрация напряжений, зарегистрированы во всех углах пересечения пород и уступов откосов. Такое распределение напряжений получены и другими исследователями, что подтверждает достоверность полученных в данной работе результатов. На рисунках 8-11 в качестве примеров показаны изолинии распределения напряжений  $\sigma_{yy}$  и  $\sigma_{xx}$  и деформации  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xx}$ .

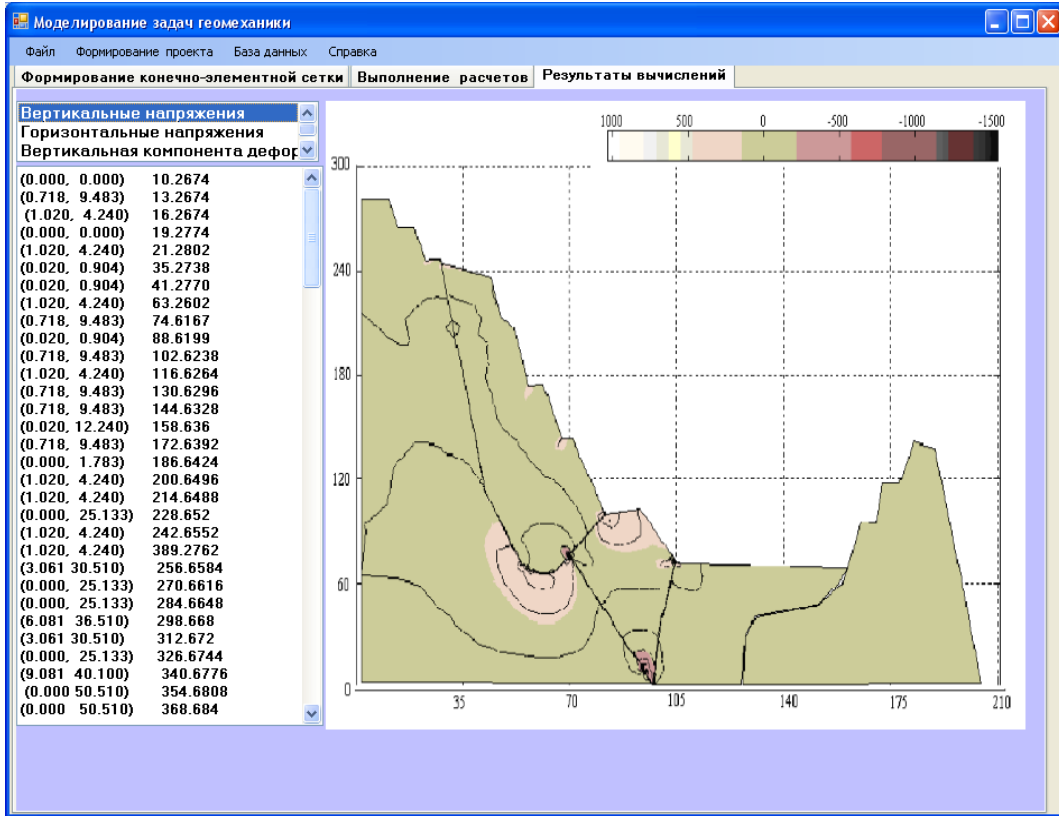


Рисунок 8. Изолинии напряжений  $\sigma_{yy}$  в неоднородном борту карьера

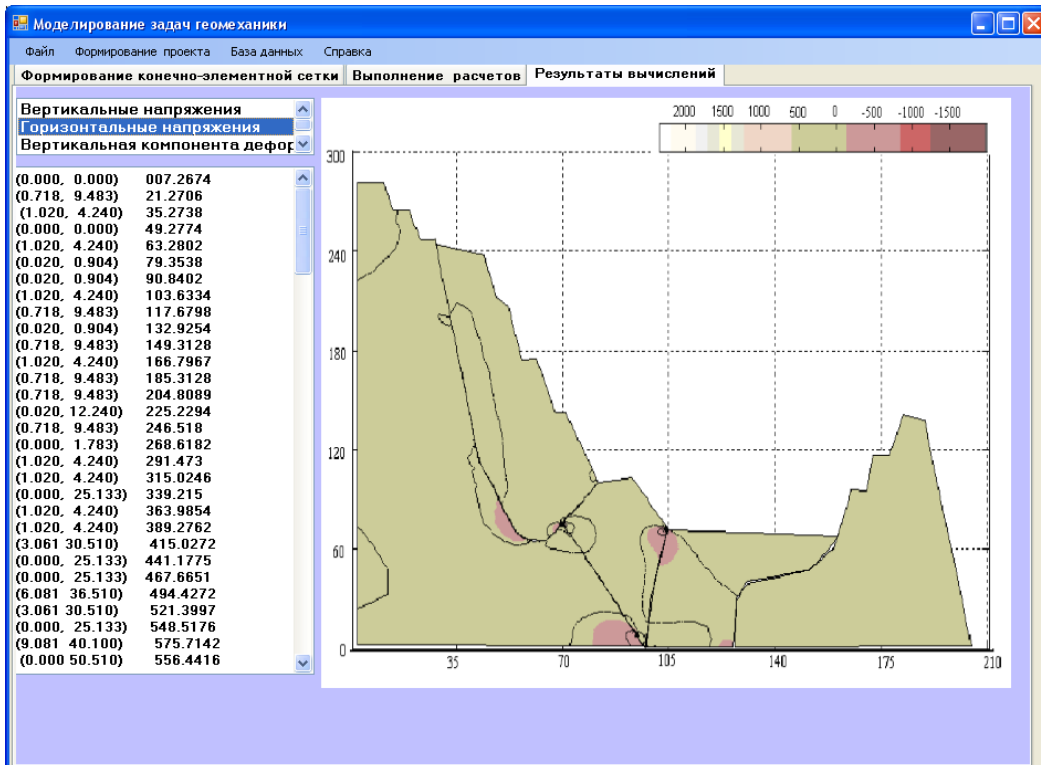


Рисунок 9. Изолинии напряжений  $\sigma_{xx}$  в неоднородном борту карьера

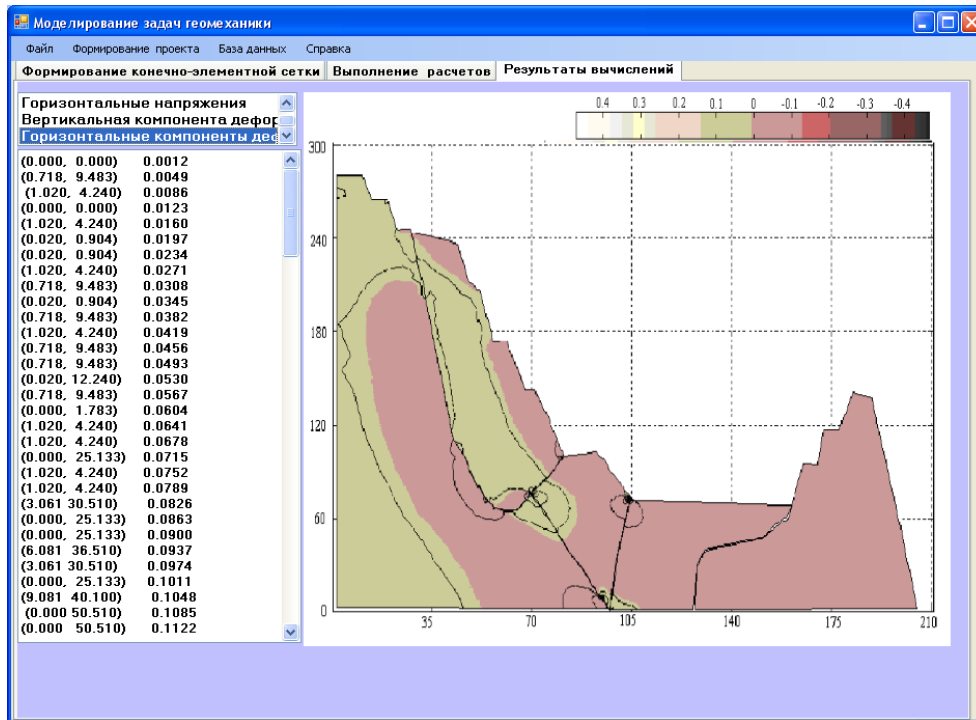


Рисунок 10. Изолинии деформаций  $\epsilon_{xx}$  в неоднородном борту карьера

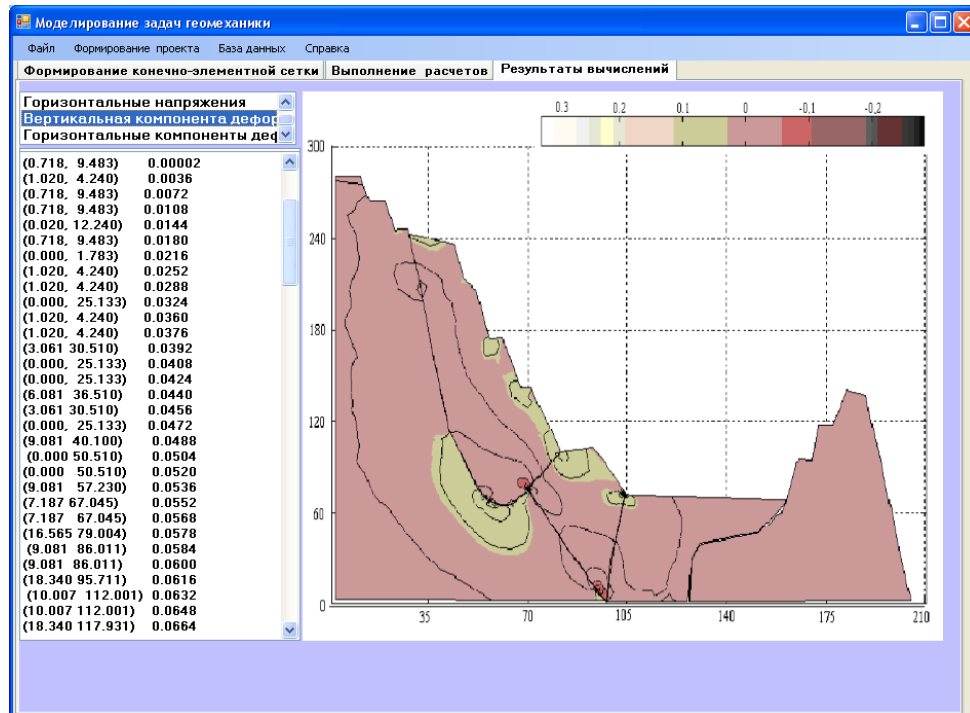


Рисунок 11. Изолинии деформаций  $\epsilon_{yy}$  в неоднородном борту карьера

В целом полученные нами системой компьютерного моделирования результаты численного моделирования геомеханических процессов при открытой разработке сложноструктурных рудных месторождений показали высокую достоверность картин распределения напряжений в неоднородных прибортовых массивах.

#### Литература

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - Мир, 1975. - 395с.
2. Абдылдаев К.К. Основы моделирования геомеханических процессов при открытой разработке рудных месторождений. - Бишкек, Инсанат, 2011. - 120 С.

Рецензент: д.т.н., профессор