



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГЛУБОКОЙ
КАРЬЕРНОЙ ВЫЕМКИ**

КОЗЫРЕВ А.А., СЕМЕНОВА И.Э., РЫБИН В.В., АВETИСЯН И.М.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

СХОДСТВА

- действие тектонических напряжений;
- вытянутая форма карьера в плане по одной из его осей;
- значительная проектная глубина карьерной выемки (800м и 1000 м)



КАРЬЕР РУДНИКА
«ЖЕЛЕЗНЫЙ» ОАО
«КОВДОРСКИЙ ГОК»

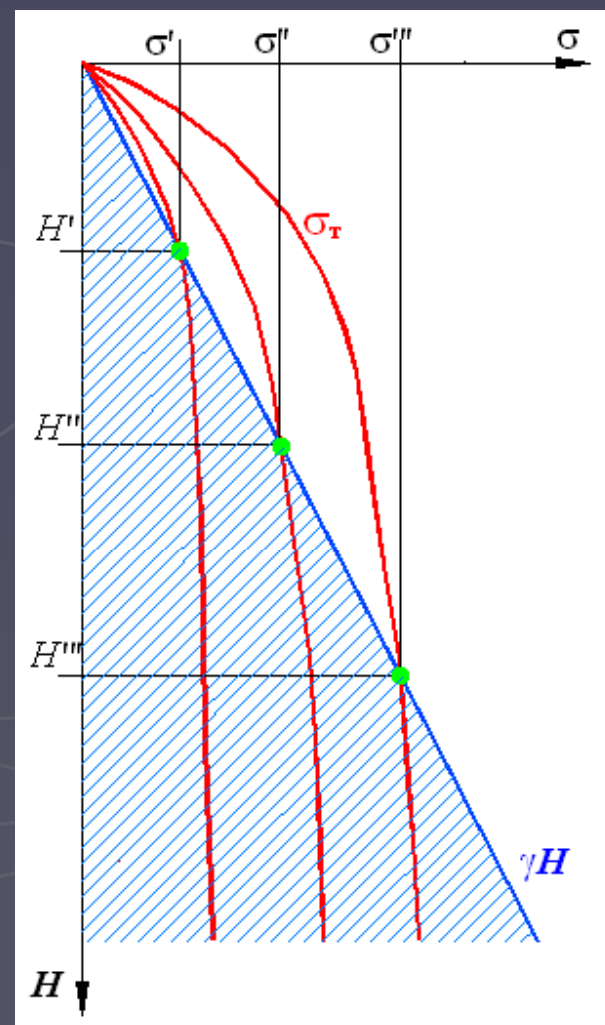
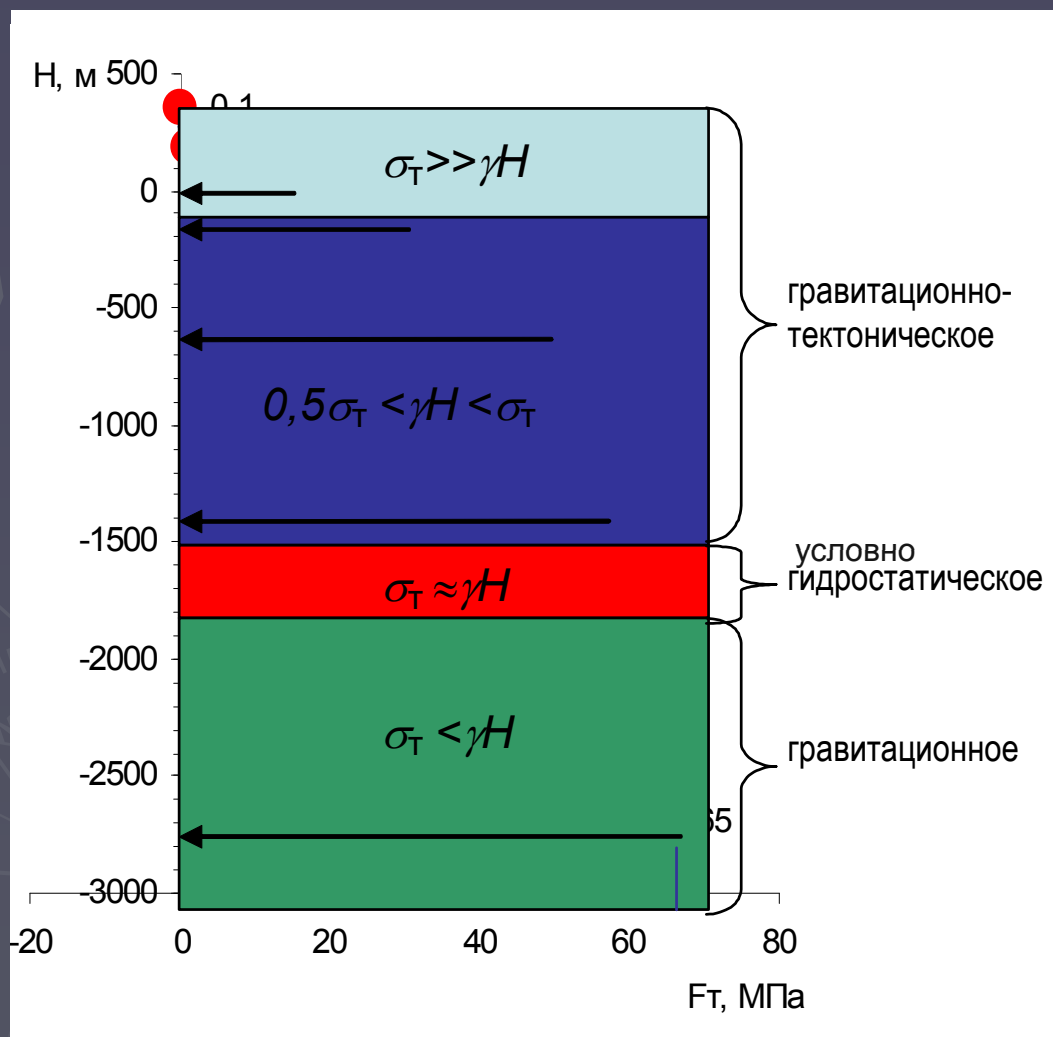


КАРЬЕР
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ»
ОАО «АПАТИТ»

РАЗЛИЧИЯ

- | | |
|---|---|
| ● плоский рельеф дневной поверхности | ● сложный гористый рельеф дневной поверхности |
| ● вертикальное падение рудного тела; | ● пологое падение рудного тела; |
| ● наличие радиальных разломных структур, а также структур, подсекающих борт карьера разных его участках | ● Главный разлом в лежащем боку рудной залежи |

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НДС В ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ



При действии в массиве пород тектонических напряжений с глубиной происходит трансформация НДС среды от гравитационно-тектонического к гидростатическому и далее практически до гравитационного

Последовательный учет факторов в геомеханических моделях различного масштабного уровня

Горно-геологические факторы	Уровень вложенности модели, с которого происходит учет фактора
☀ Тип исходного напряженно-деформированного состояния массива пород (гравитационно-тектонический) ☀ Разломные структуры 3-4 ранга ☀ Рельеф дневной поверхности ☀ Геометрические параметры и свойства рудных тел, а также слагающих массив пород ☀ Разломные структуры 1-2 ранга	I I-II I I (уточняется на последующих этапах) III
Горнотехнические факторы	
☀ Местоположение и приблизительный объем открытых и подземных выемок ☀ Техногенный рельеф с детальным учетом ▪ карьерных выемок ▪ произошедших ранее и возможных обрушений при отработке подземных запасов ☀ Конфигурация подземных выемок при различных вариантах отработки подкарьерных запасов ☀ Приближенные к реальной геометрия и размеры отдельных уступов или участков борта, элементов подземной технологии	I II II III

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ДЛЯ КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Тип породы	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент поперечных деформаций ν	Объемный вес γ , г/см ³
Вмещающая порода	$1 \cdot 10^5$	0,2	3,0
Рудное тело	$0,5 \cdot 10^5$	0,35	3,5
Ослабленная зона	$0,1 \cdot 10^5$	0,4	3,0
Разломные структуры 1 порядка	$0,1 \cdot 10^5$	0,4	3,0

Петрографический тип породы, руды	Предел прочности, МПа	
	на сжатие $\sigma_{сж}$	на растяжение σ_p
Фенит	209-350	9,1-23
Фенит с ослабляющими структурами	29-162	4,1-5,8
Оливинит	131-145	11,0-12,8
Апатит-кальцит-магнетитовая руда	91	9,6
Кальцит-форстерит-магнетитовая руда	62-108	5,7-7,6

Деформационно-прочностные свойства типов пород, принятые в геомеханической модели Хибинского массива

Название пород	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона ν	Объемный вес γ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{р}$, МПа
Окружающие породы (гнейсы)	$5 \cdot 10^4$	0.08-0.14	$2.61 \cdot 10^3$ - $2.84 \cdot 10^3$	200	17
Хибиниты (нефелиновые сиениты)	$4.2 \cdot 10^4$	0.25	$2.63 \cdot 10^3$	250	20
Ийолит-уртиты	$8 \cdot 10^4$	0.18 - 0.25	$2.70 \cdot 10^3$ - $2.88 \cdot 10^3$	300	27
Рисчорриты	$6.5 \cdot 10^4$	0.22	$2.60 \cdot 10^3$	230	16
Апатит-нефелиновые руды	$5.5 \cdot 10^4$	0.27	$2.92 \cdot 10^3$	140	6
Лявочорриты	$4.5 \cdot 10^4$	0.25	$2.70 \cdot 10^3$	180	15
Фойяиты	$7 \cdot 10^4$	0.24	$2.80 \cdot 10^3$	200	18

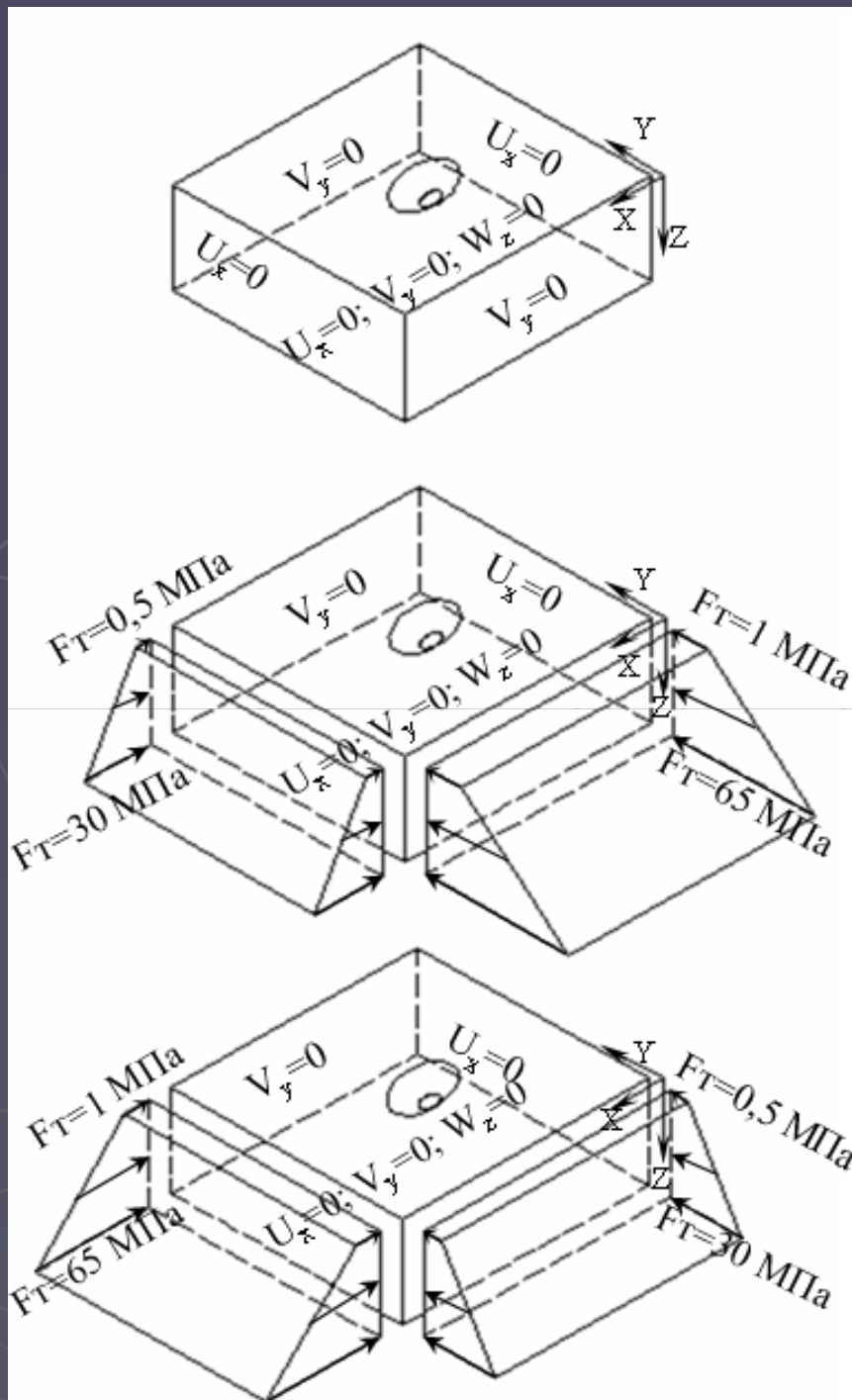
- ▶ На основании анализа, как абсолютных значений показателей, так и их изменений при нагрузке, для большинства пород можно сделать вывод об упругом их деформировании вплоть до разрушения. Это подтверждается также данными натурных наблюдений за характером разрушений пород в окрестности выработок на обрабатываемых ОАО «Апатит» месторождениях. На основании этого в качестве модели среды принята упругая модель

ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

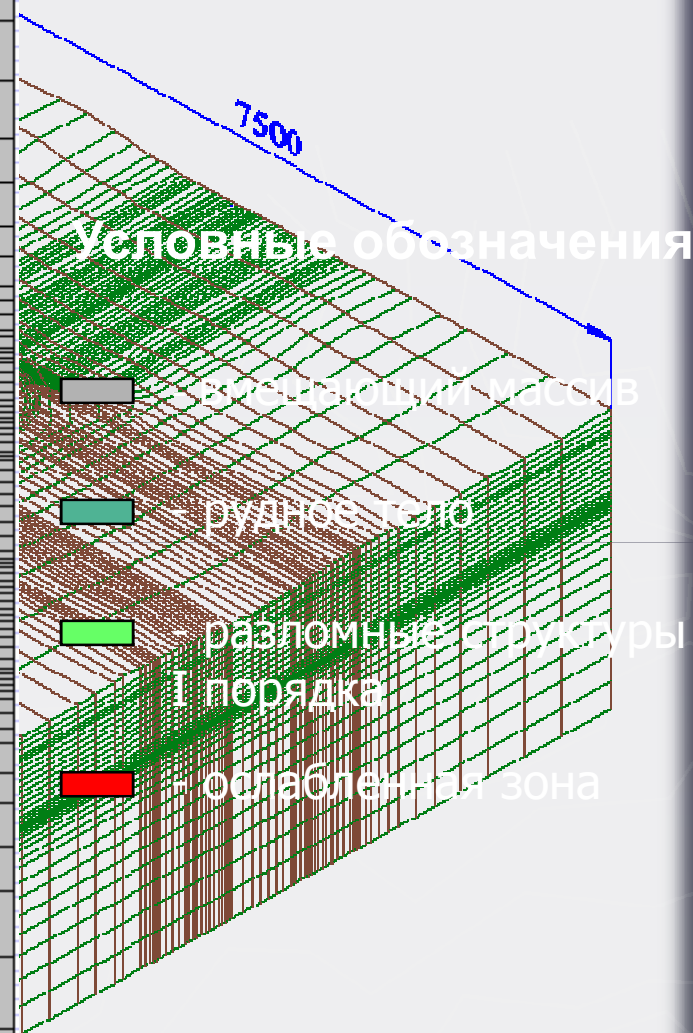
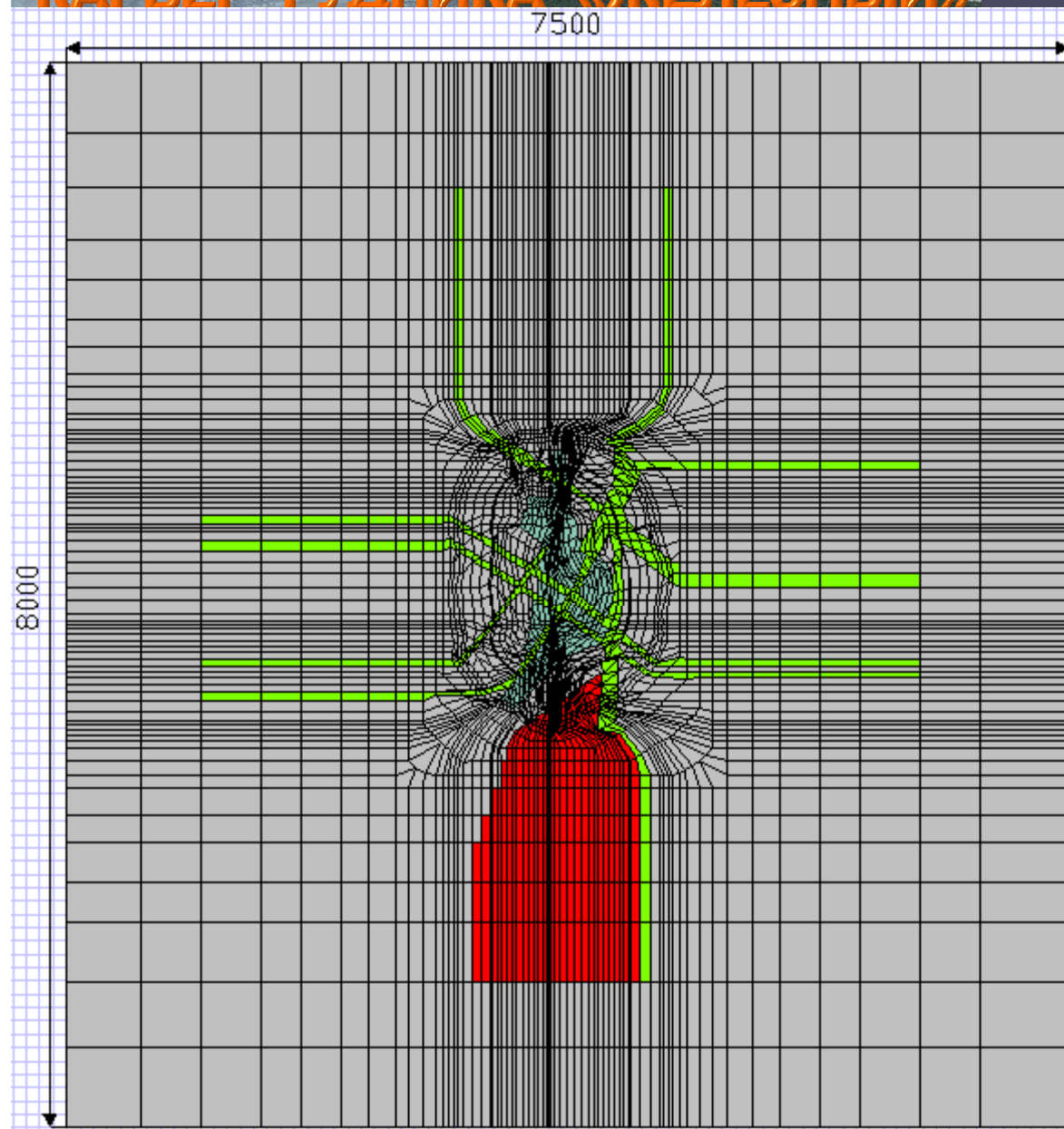
Гравитационный тип
нагружения

Гравитационно-
тектонический тип
нагружения при действии F_t
по короткой оси карьера

Гравитационно-
тектонический тип
нагружения при действии F_t
по длинной оси карьера

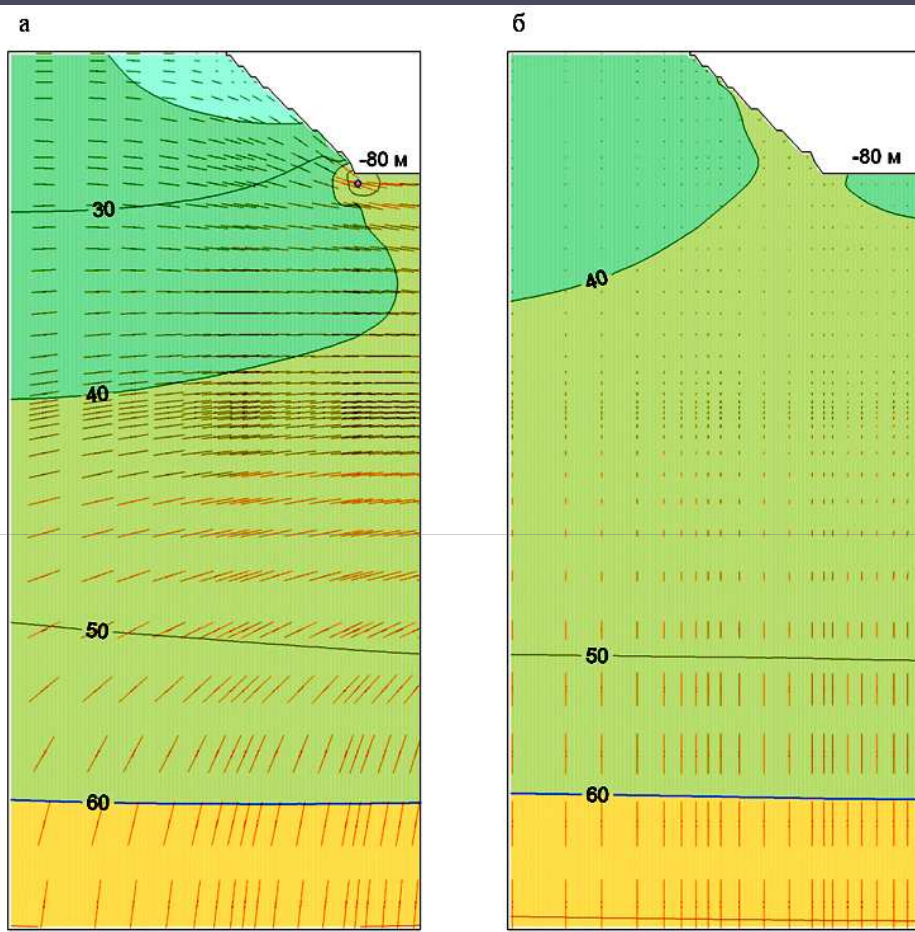


КАРЬЕР РУДНИКА «ЖЕЛЕЗНЫЙ»

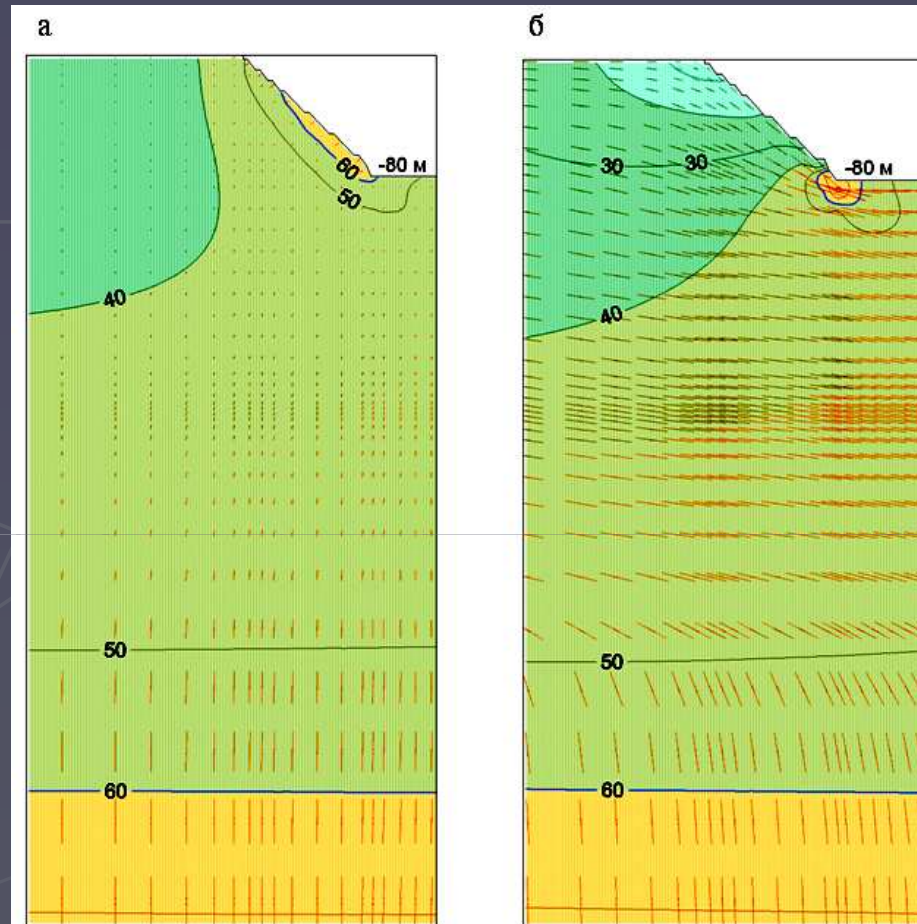


В модели в целом: узлов 184 800, элементов 174 915

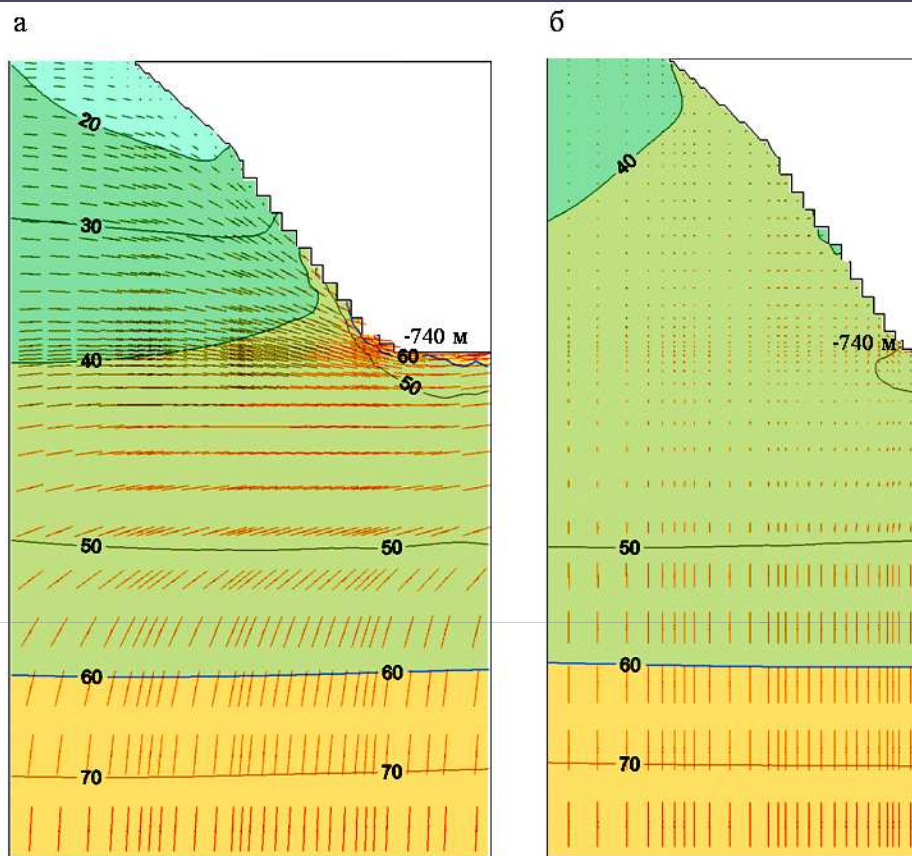
Напряженно-деформированное состояние в бортах карьера в однородном массиве



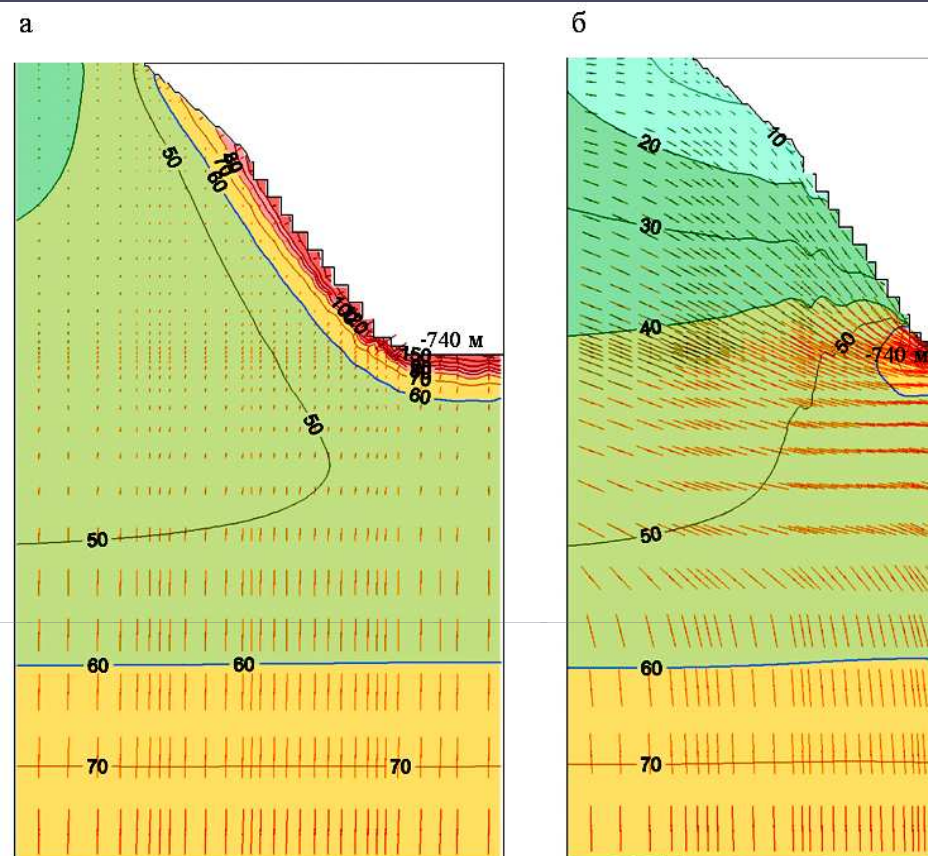
Распределение векторов σ_{max} для карьера глубиной 340 м при действии F_T по длинной оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



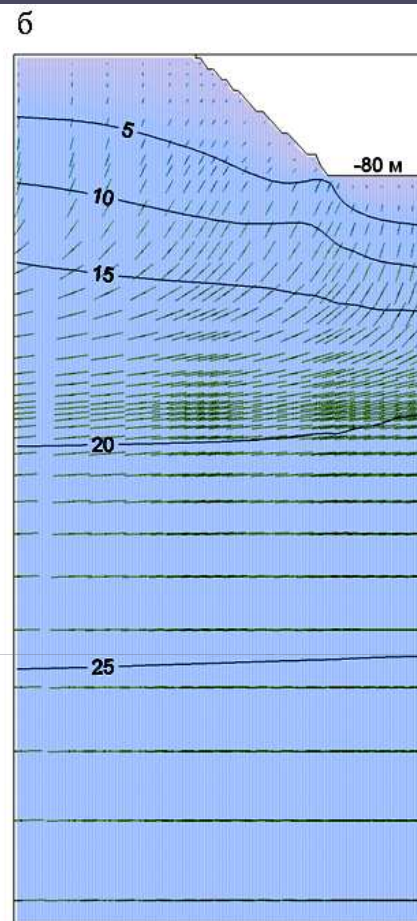
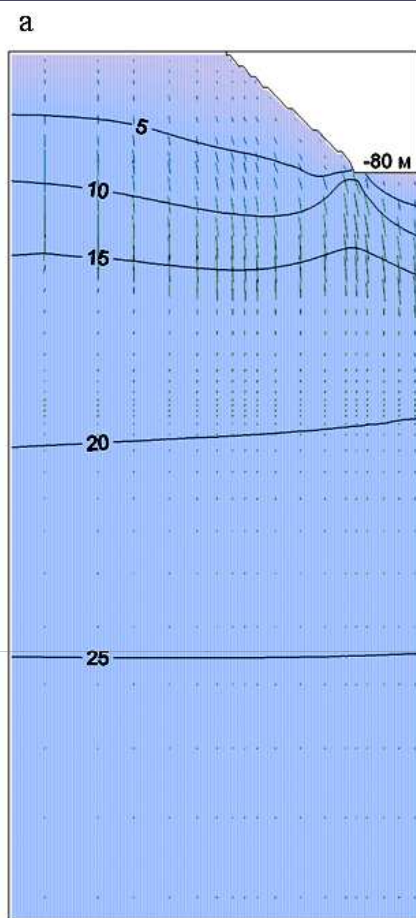
Распределение векторов σ_{max} для карьера глубиной 340 м при действии F_T по короткой оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



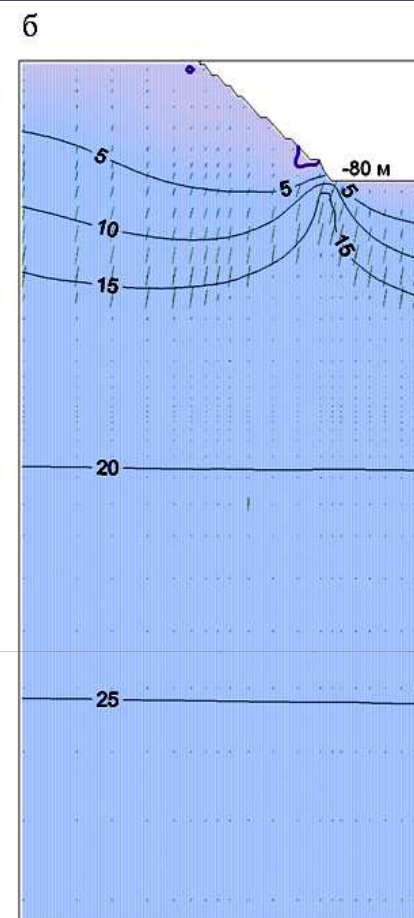
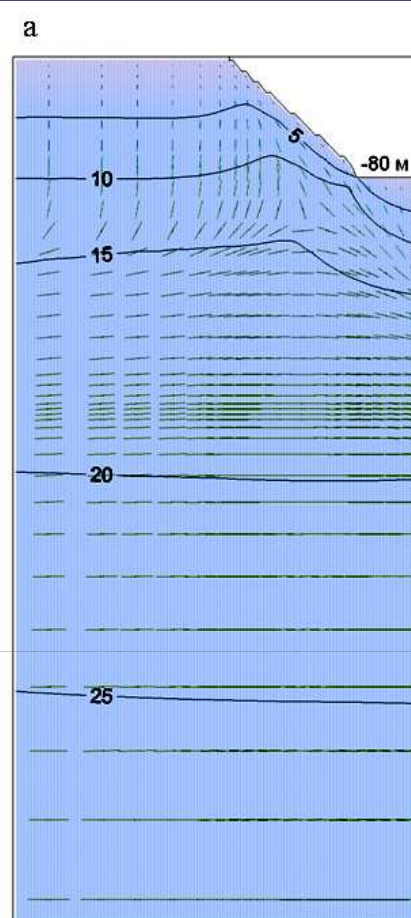
Распределение векторов σ_{max} для карьера глубиной 1000 м при действии F_T по длинной оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



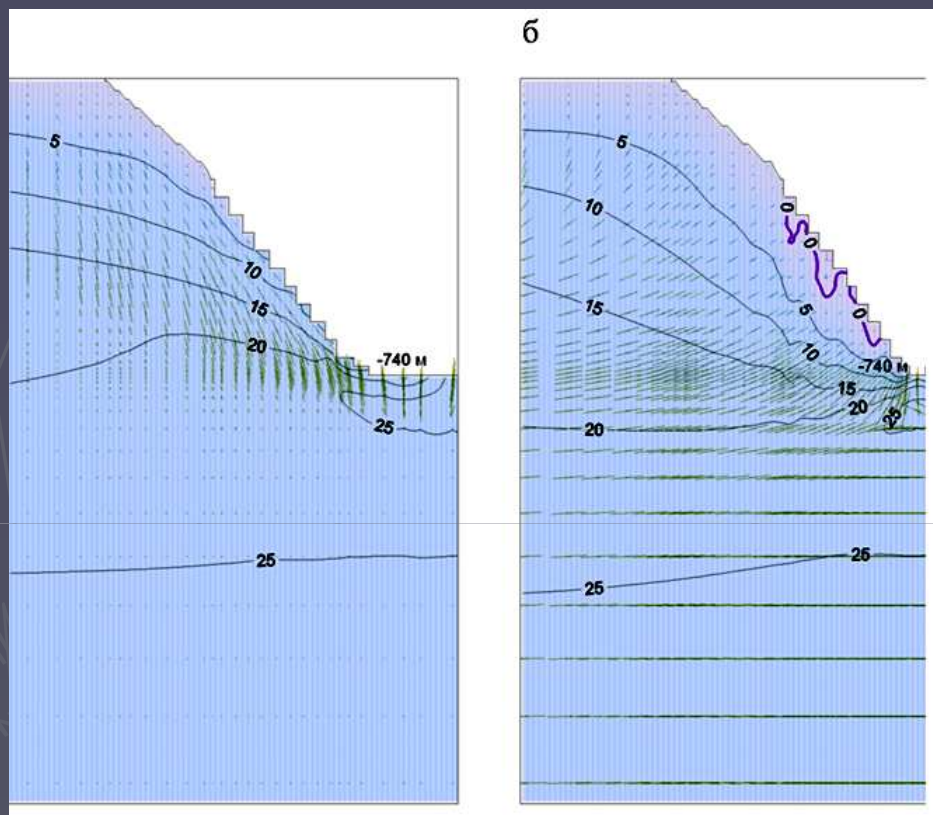
Распределение векторов σ_{max} для карьера глубиной 1000 м при действии F_T по короткой оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



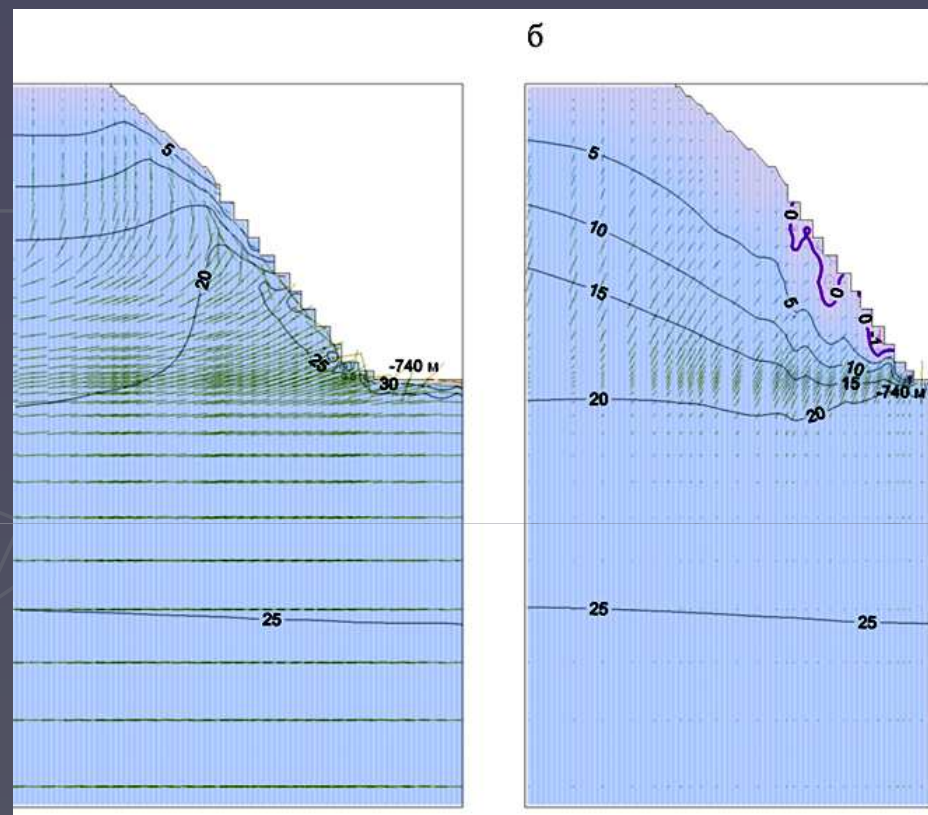
Распределение векторов σ_{min} для карьера глубиной 340 м при действии F_T по длинной оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



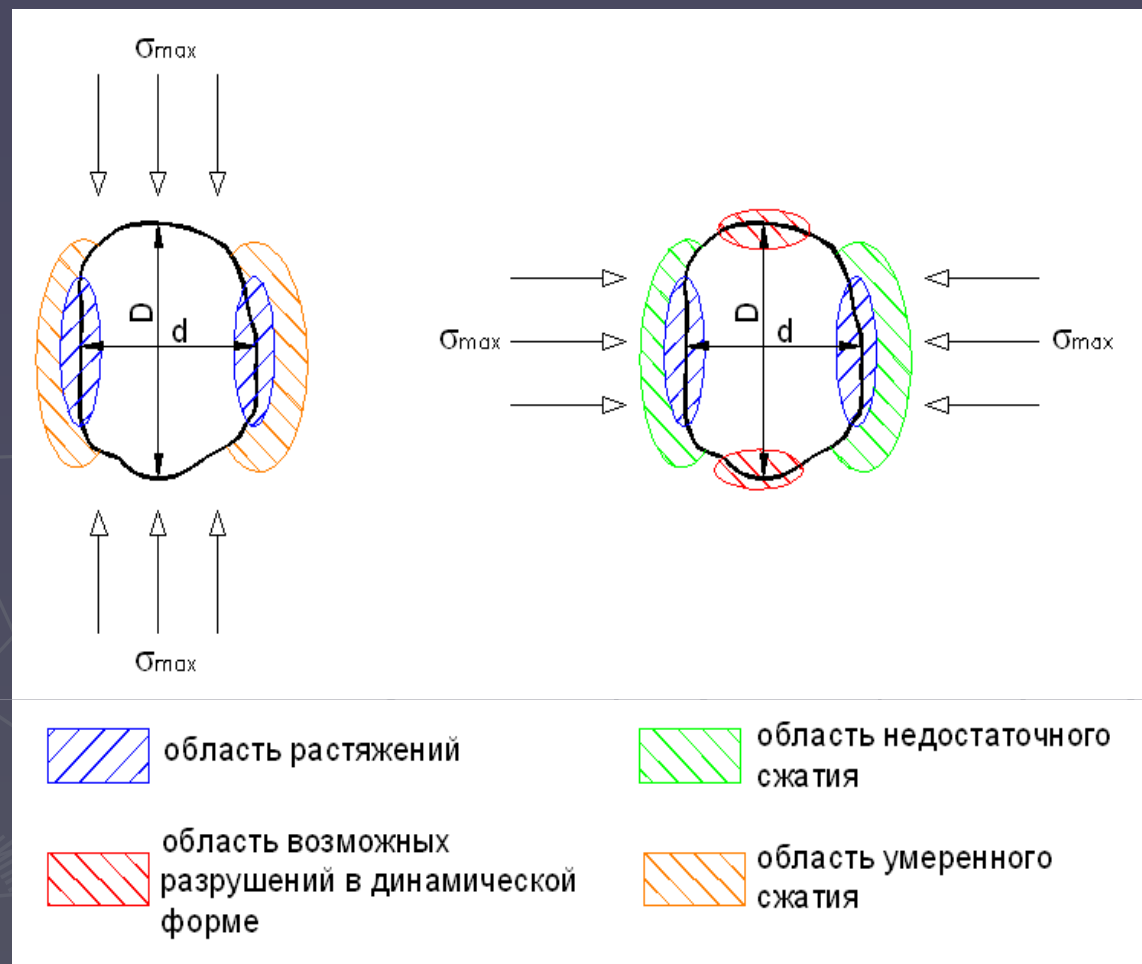
Распределение векторов σ_{min} для карьера глубиной 340 м при действии F_T по короткой оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



Распределение векторов σ_{min} для карьера глубиной 1000 м при действии F_T по длинной оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.



Распределение векторов σ_{min} для карьера глубиной 1000 м при действии F_T по короткой оси карьера: а) сечение по длинной оси; б) сечение по короткой оси.

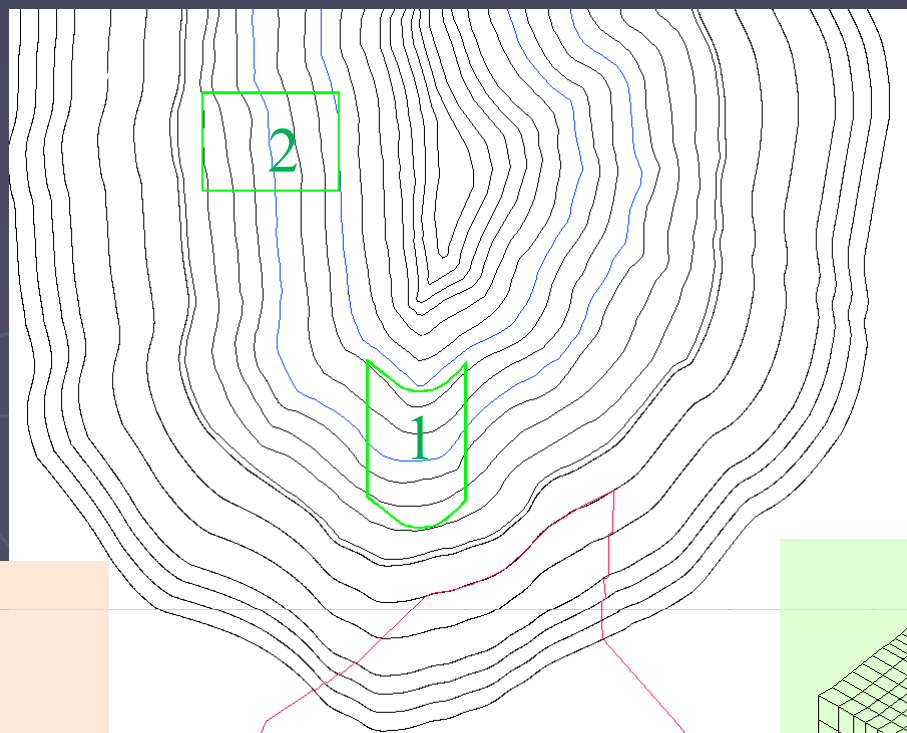
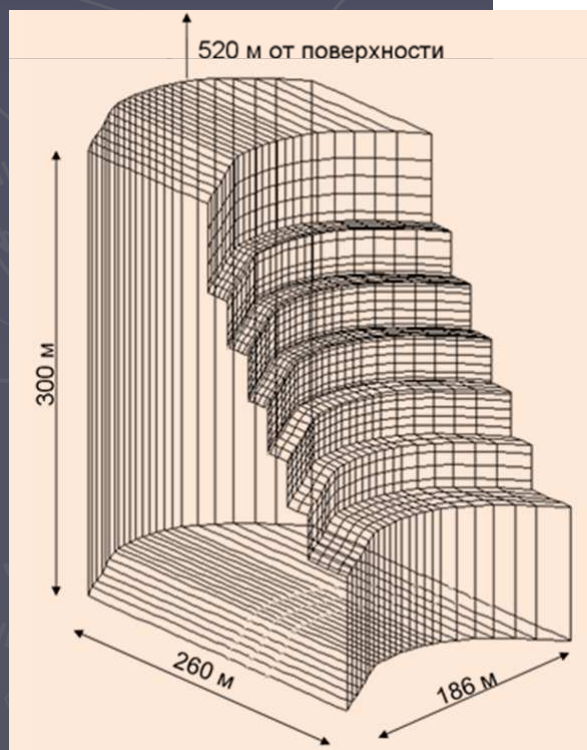


Таким образом, на основе численного моделирования распределения напряжений и деформаций в массиве пород в окрестности глубокой карьерной выемки установлено, что процессы техногенного трещинообразования и динамических проявлений горного давления в бортах карьера определяются его положением относительно направления максимального сжатия. Бóльшая устойчивость прибортового массива обеспечивается в случае расположения вытянутого в плане карьера ($D/d > 1$, где D и d – бóльший и меньший линейный размер карьера в плане) в направлении максимального сжатия.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МОДЕЛИ

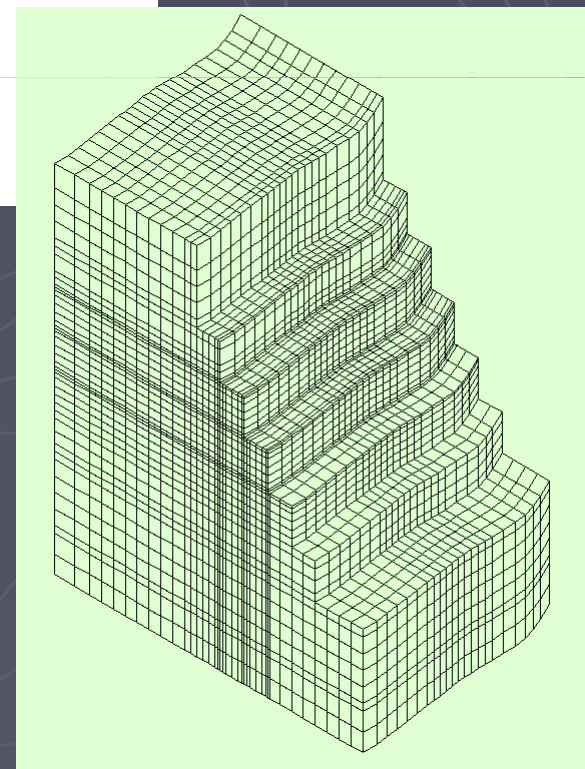
1

Модель участка
короткого борта



2

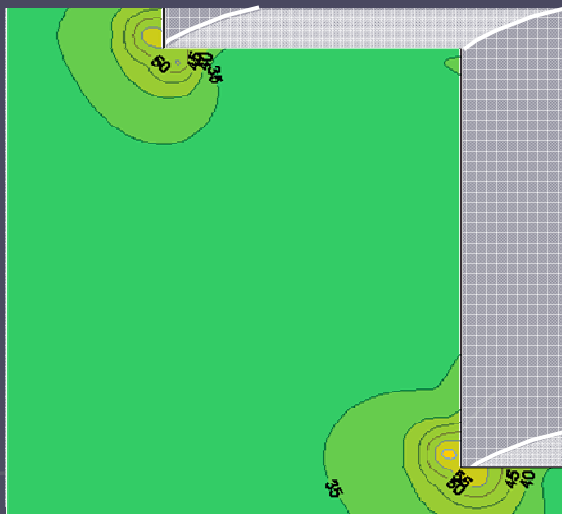
Модель участка
длинного борта



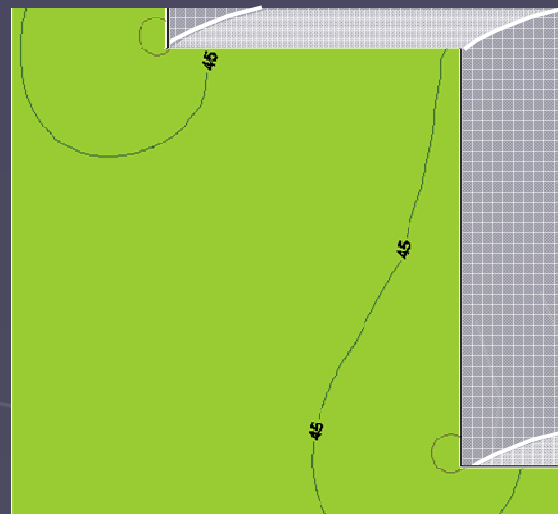
Сетка конечных
элементов содержит 23
вертикальных сечения, в
каждом из которых 1677
узлов и 1596 элементов.

Общая размерность
модели – 38571 узел и
35112 элементов.

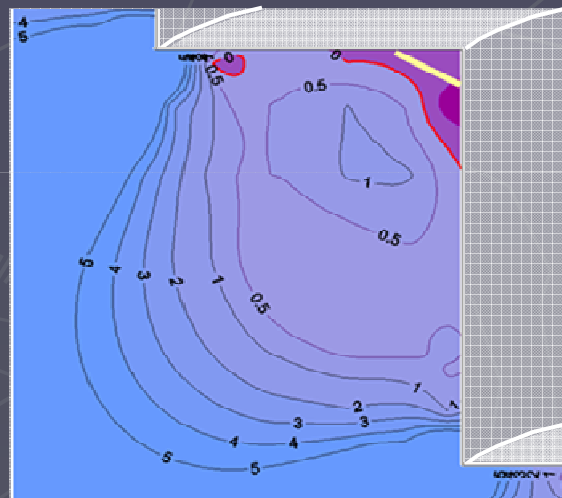
σ_{max} в уступе
короткого
участка борта



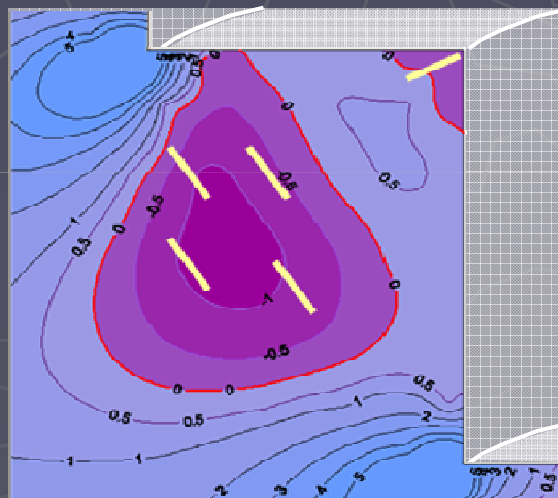
σ_{max} в уступе
длинного
участка борта



σ_{min} в уступе
короткого
борта

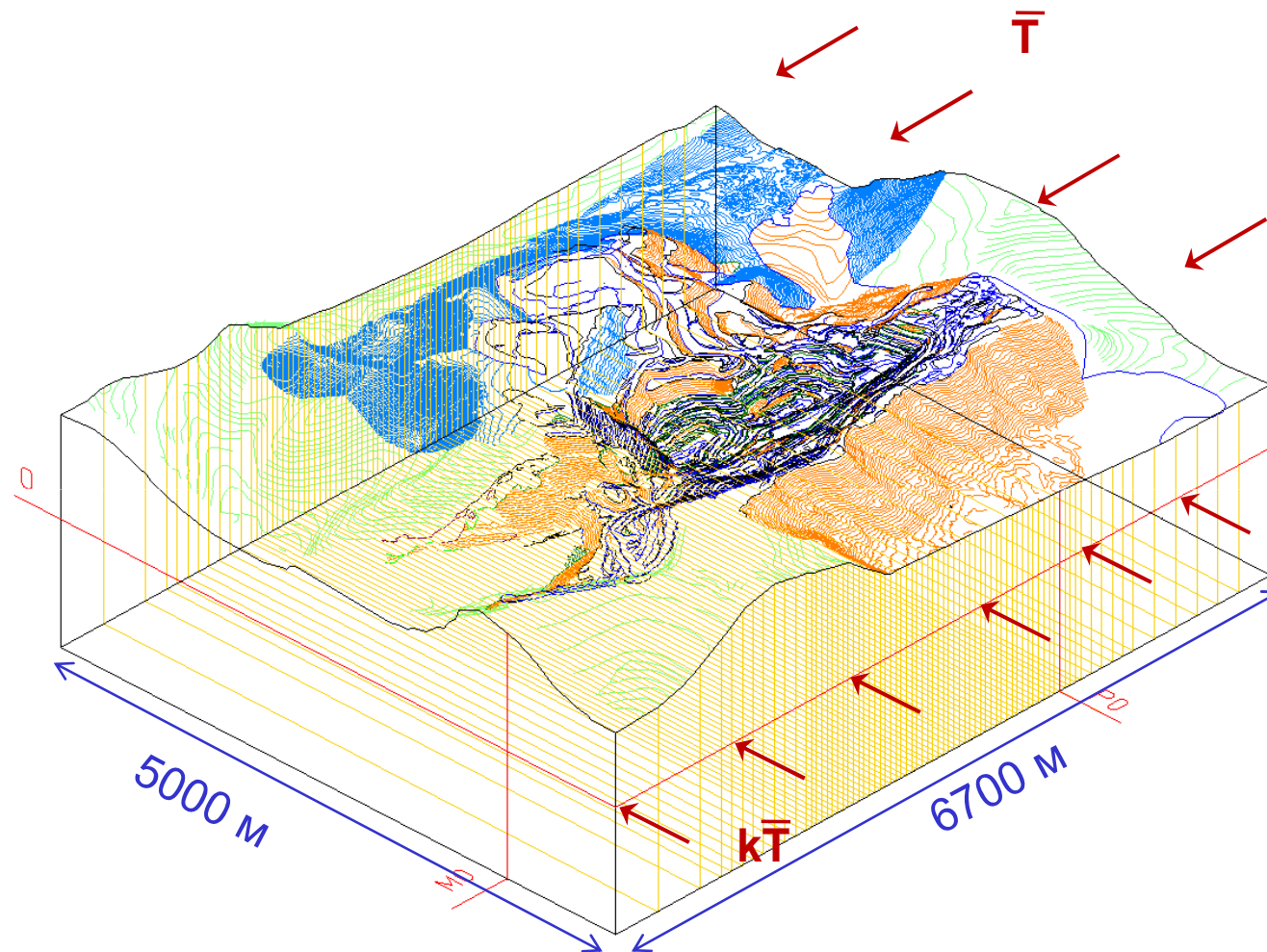


σ_{min} в уступе
длинного
участка борта



По данным численного моделирования НДС массива в локальных моделях участков бортов карьера можно сделать вывод о том, что вертикальные уступы в целом будут устойчивы. Формирование трещин скола возможно в краевой части уступа на коротком борту карьера при многократном снижении прочностных характеристик массива вследствие воздействия взрывов и процессов выветривания. В уступах длинного борта могут образовываться техногенные трещины в центральной их части, однако раскрытие трещин маловероятно в условиях действия максимальной компоненты сжимающих напряжений.

ПАРАМЕТРЫ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЛАТО РАСВУМЧОРР, ОТРАБАТЫВАЕМОГО РУДНИКОМ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ» ОАО «АПАТИТ»



$k=0.6$

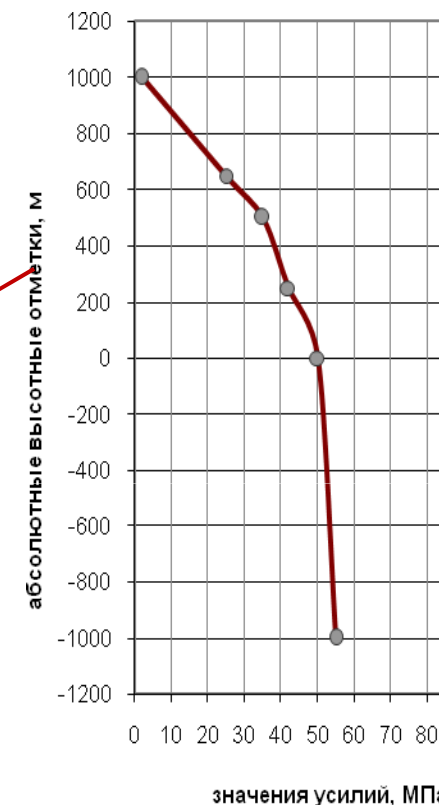
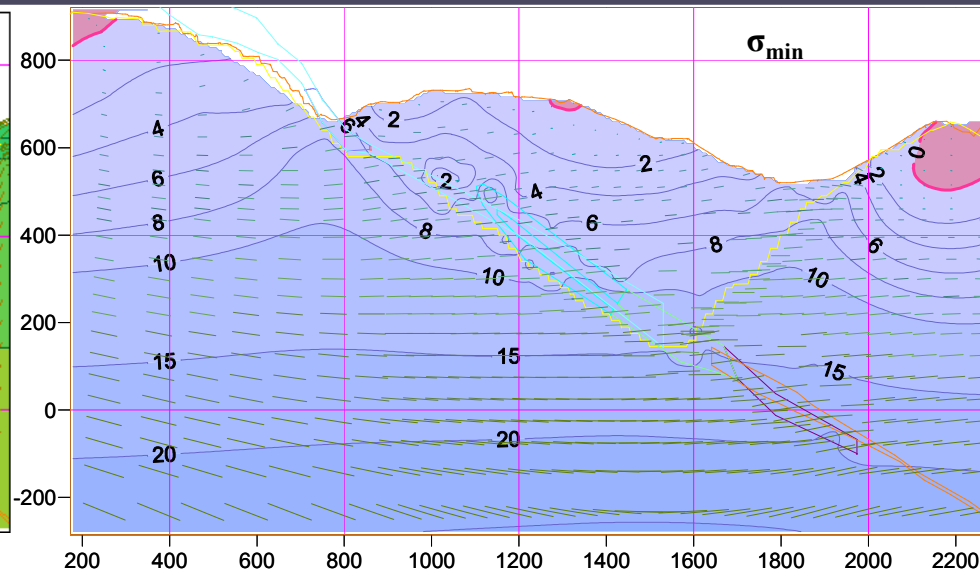
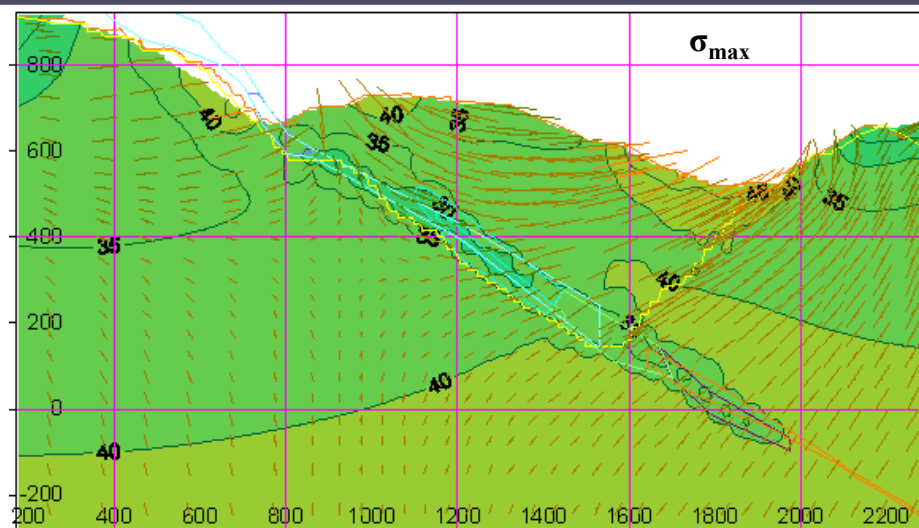


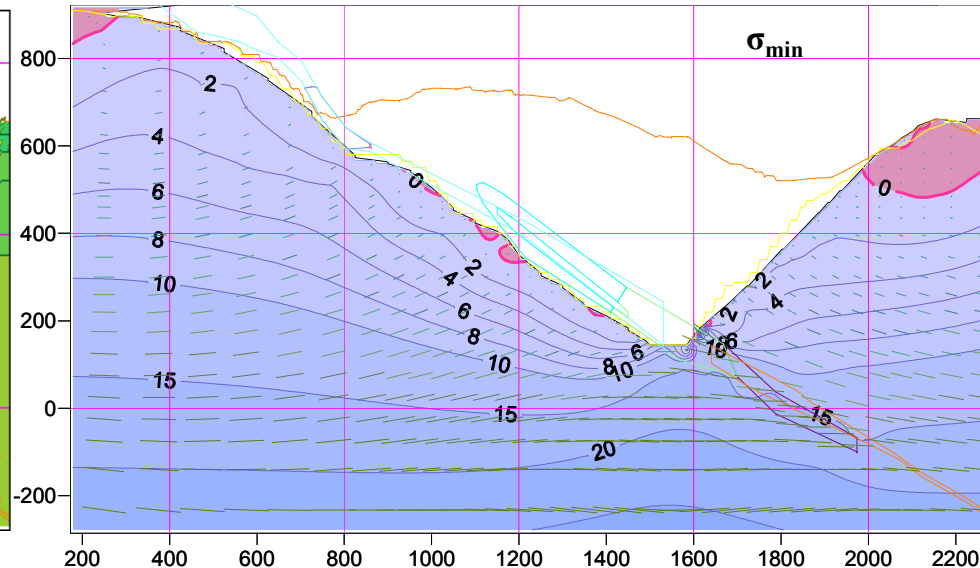
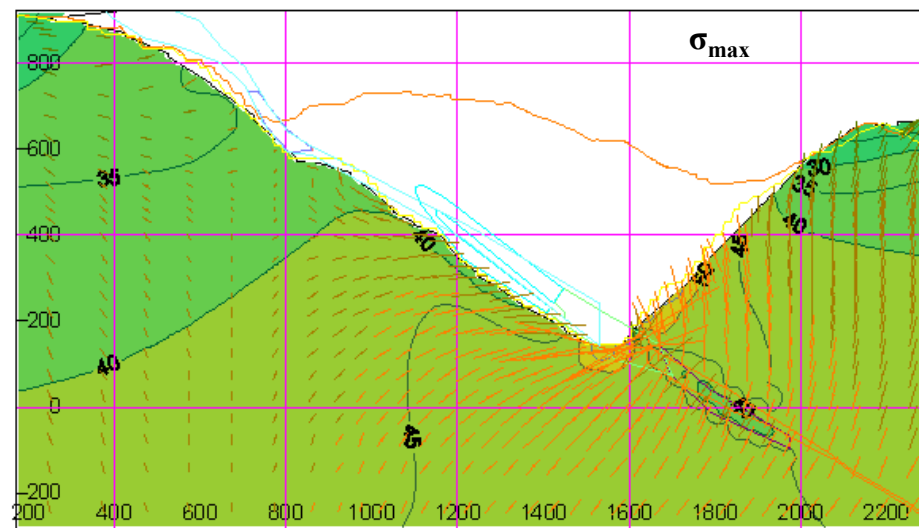
Схема задания горизонтальной пригрузки $\bar{T}$ от поверхности до дна модели по простиранию рудной залежи

Количество сечений – 78 Количество элементов – 109417 Количество узлов - 117000

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПО РАЗРЕЗУ 3В



Фактическое состояние горных работ



Карьерная выемка на конец отработки

В результате регионального моделирования

получено напряженно-деформированное состояние массива горных пород месторождения «Плато Расвумчорр» характеризуется действием максимальной компоненты главных напряжений по простиранию рудной залежи и, как следствие, по длинной оси карьерной выемки. Уровень напряжений σ_{max} в окрестности проектного карьера «Центральный» изменяется в пределах от 15 до 75 МПа, увеличиваясь от дневной поверхности к дну карьерной выемки. Зоны концентрации сжимающих напряжений приурочены к дну карьера, нижней части северного борта, а в плане, к наиболее вдающимся в массив участкам борта. Минимальная компонента меняется от -1 до 15 МПа, зоны растягивающих напряжений приурочены к приповерхностным областям гористого рельефа и верхним уступам борта карьера.

Рассчитанные узловые перемещения использовали для задания граничных условий вложенной модели II этапа.

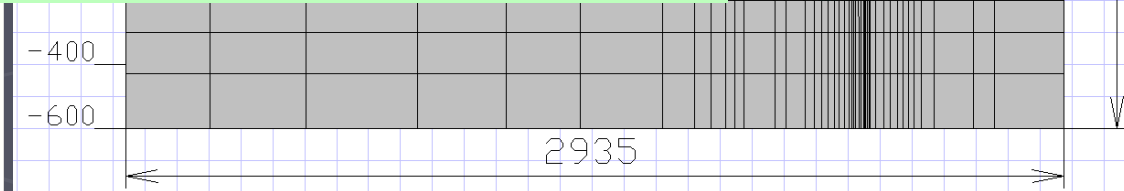
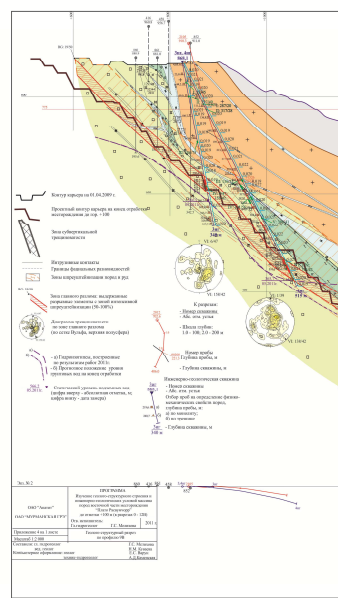
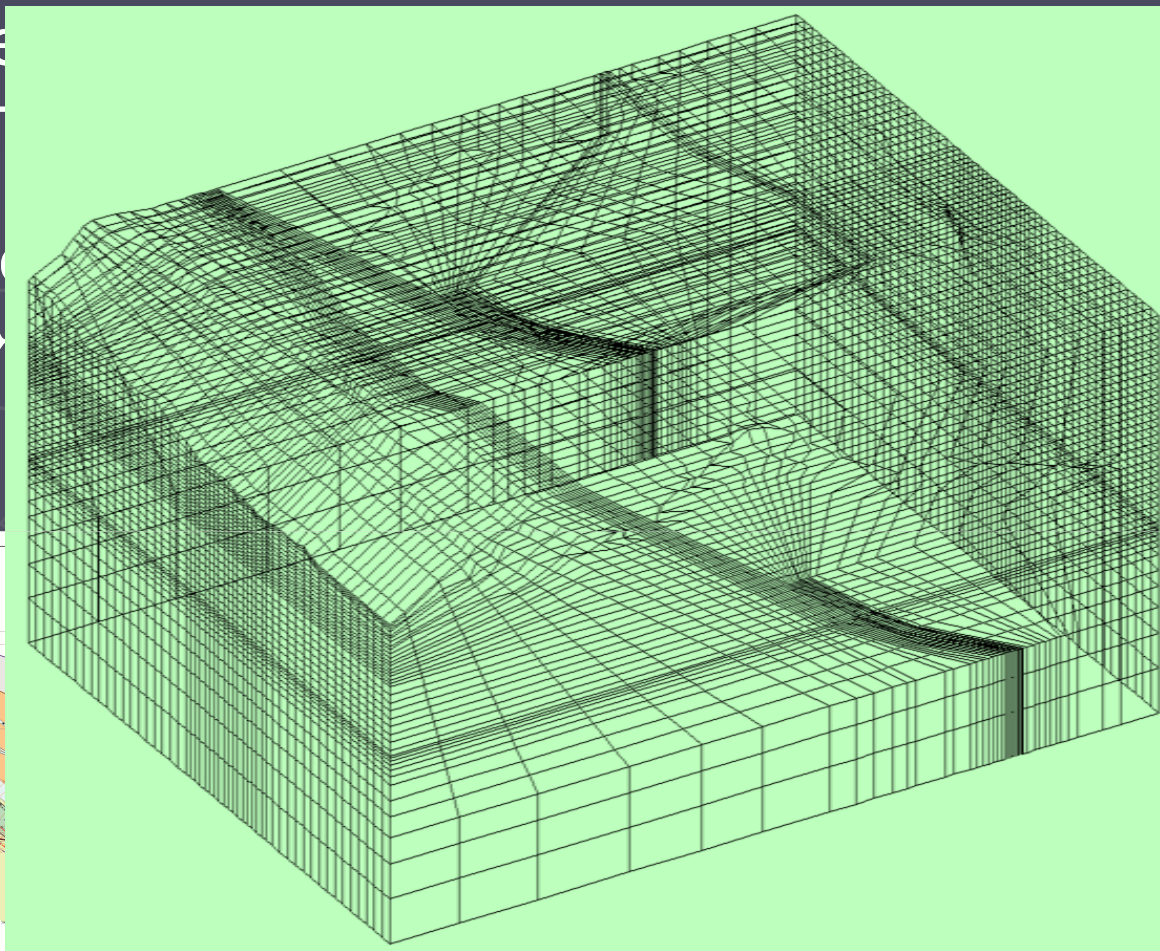
ЗАДАЧИ II ЭТАПА МОДЕЛИРОВАНИЯ

► определе
ослабл

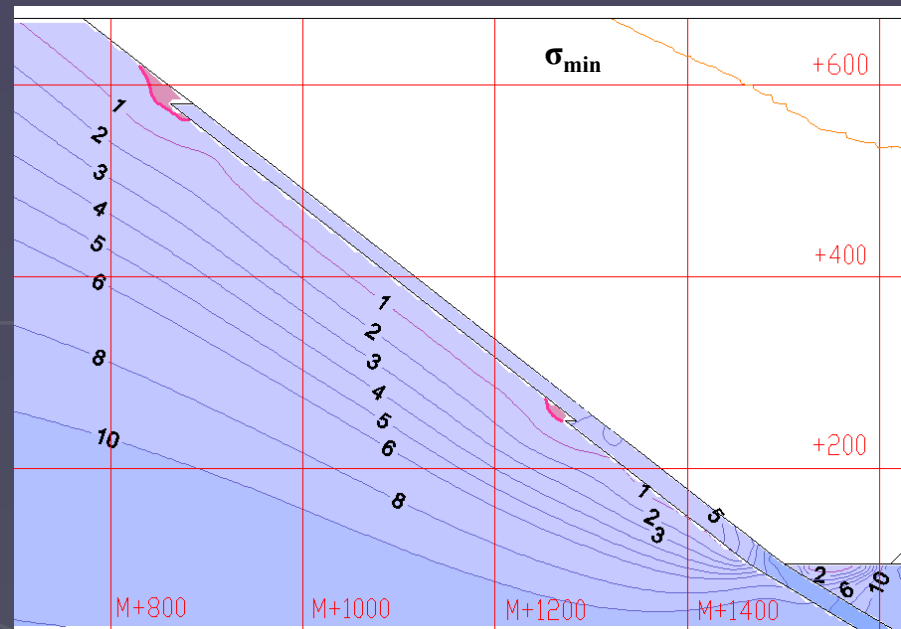
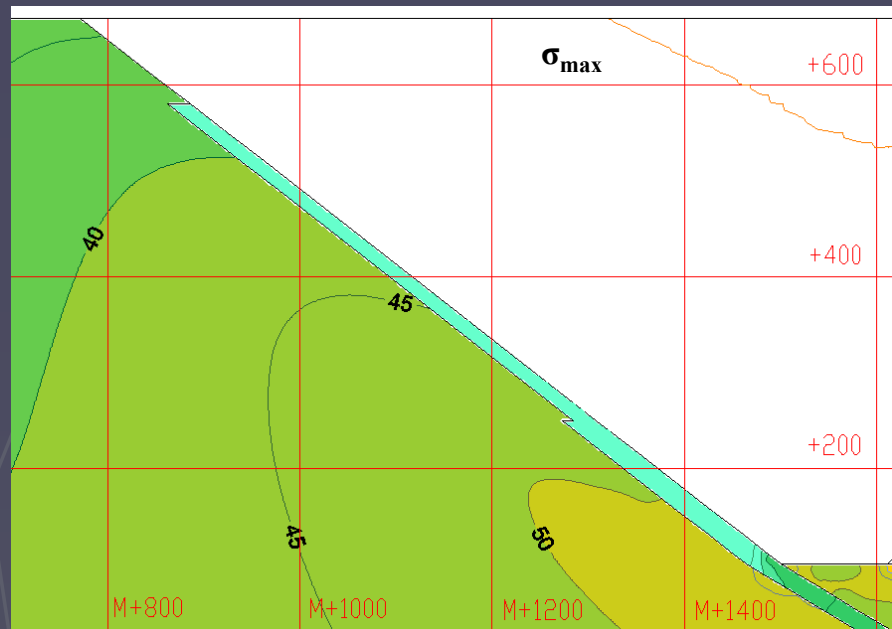
► уточн
ВОЗМОЖ

о борта

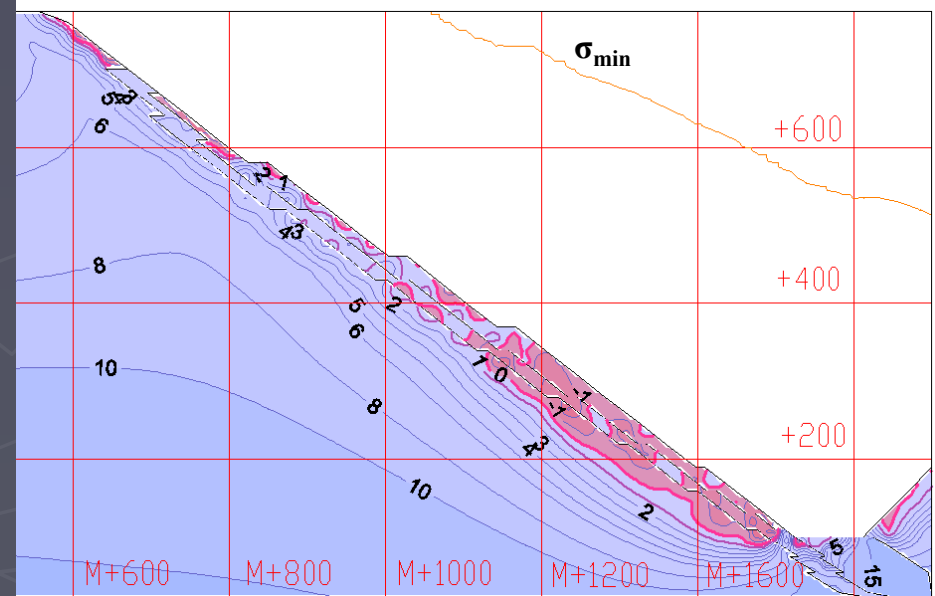
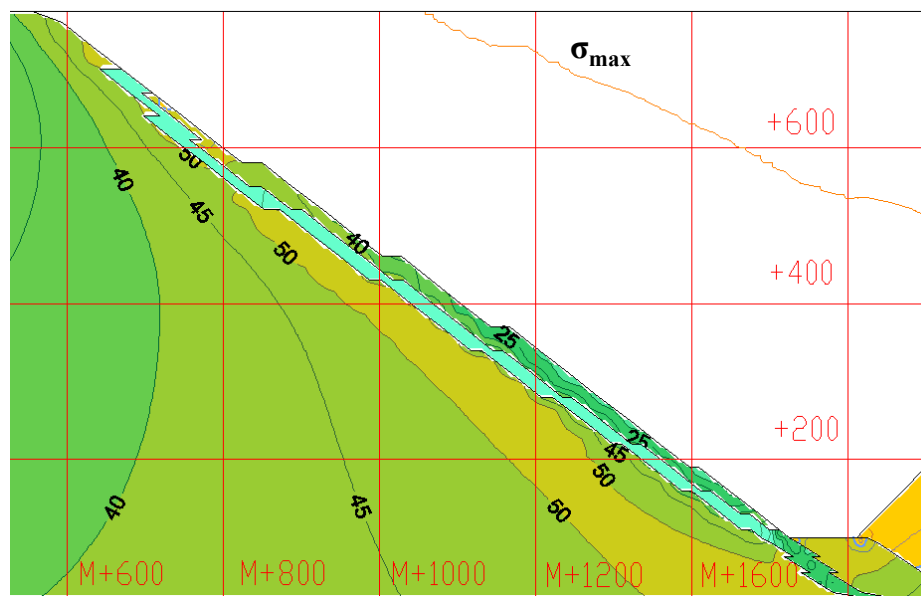
а борта и



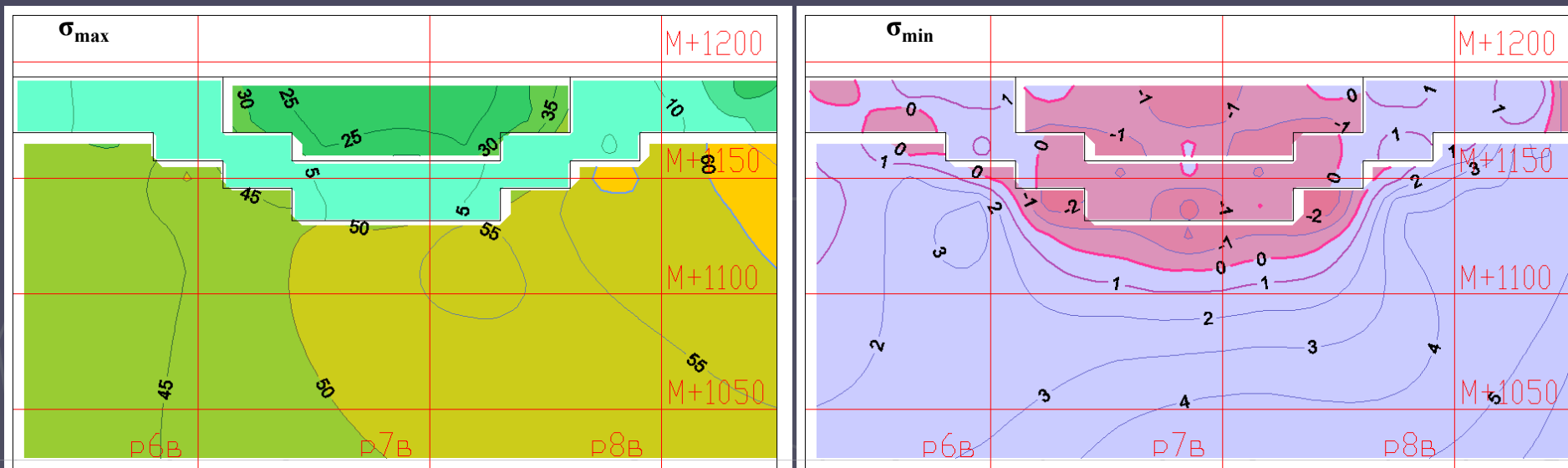
южный борт карьера находится в ослабленной зоне



ослабленная зона подсекает южный борт карьера

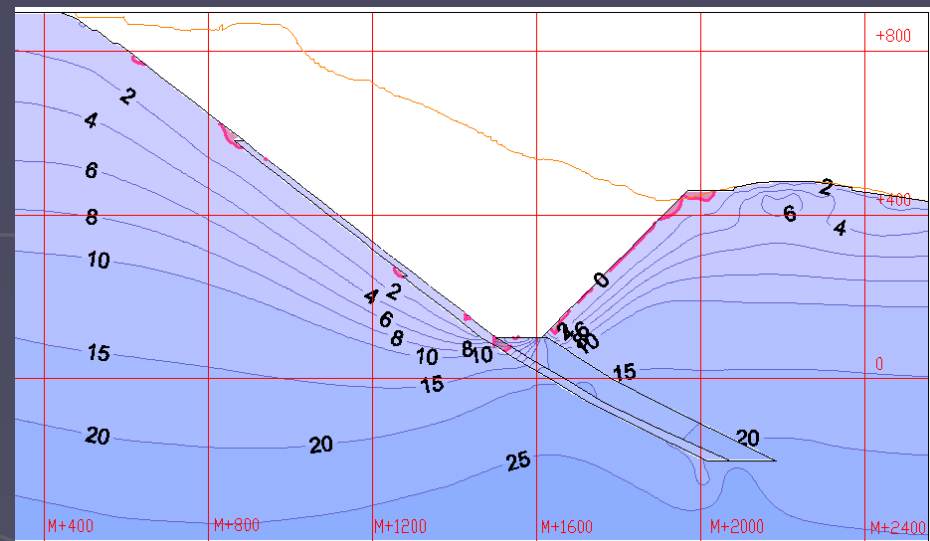
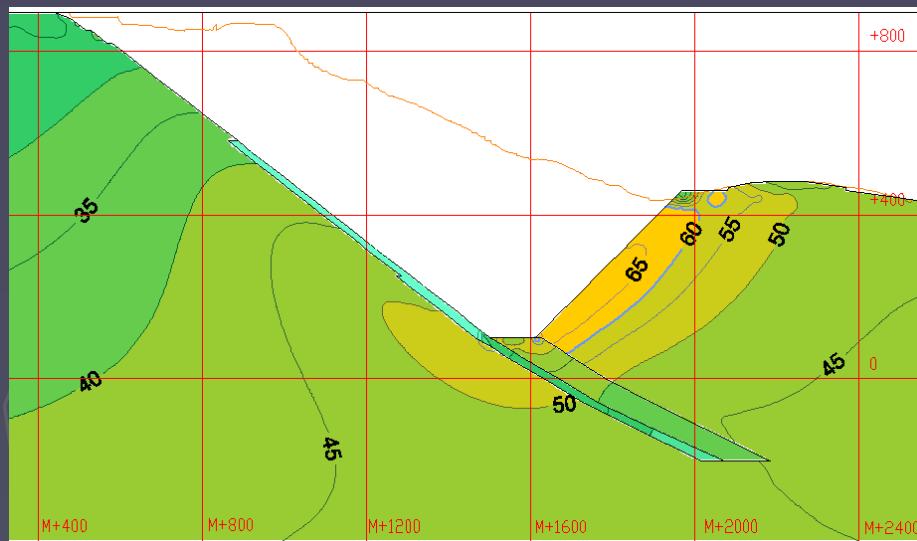


Распределение напряжений в горизонтальном сечении на отм. +320м в окрестности подсеченного участка борта

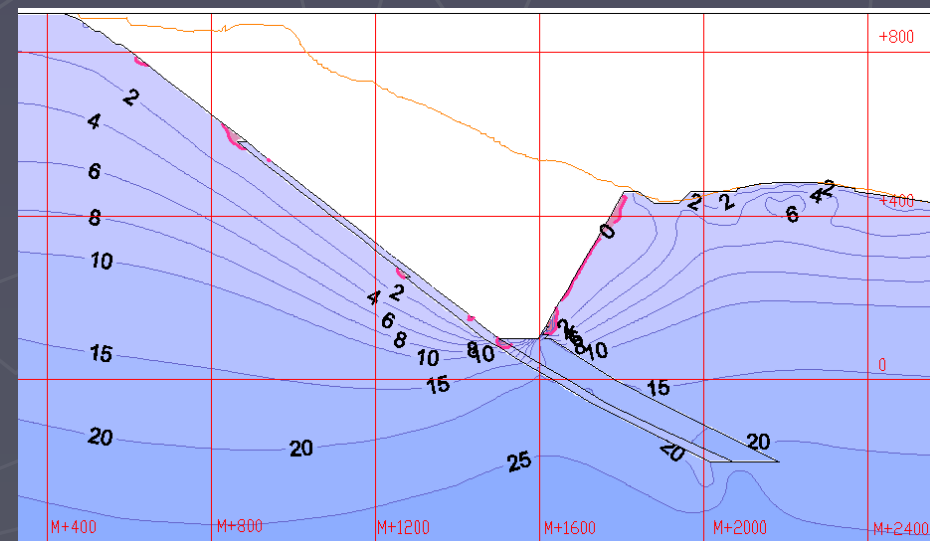
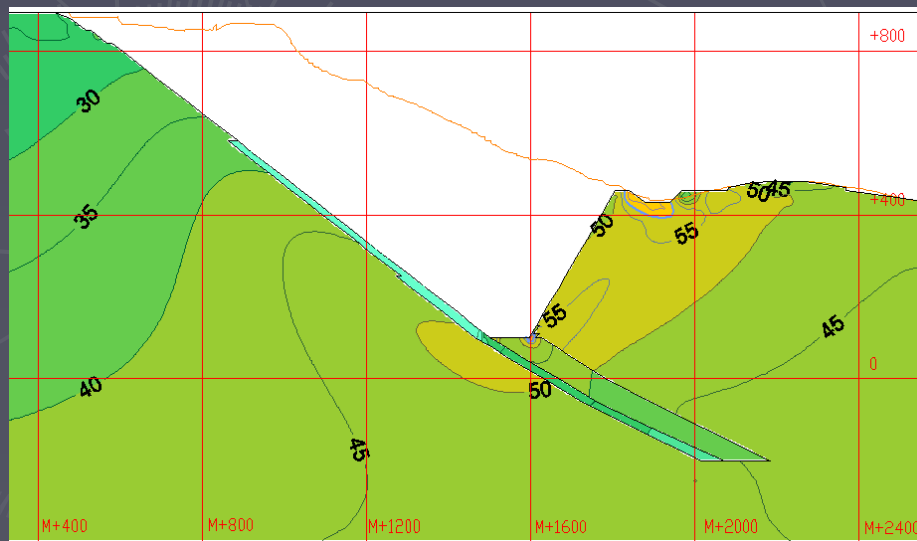


Геомеханическое состояние южного участка борта характеризуется более низкими по сравнению с северным участком величинами напряжений, что связано с большей высотой борта и наличием в массиве Главного разлома. Наиболее опасное состояние участков борта прогнозируется в случае, когда ослабленная зона подсекает его. В этом случае область растягивающих напряжений охватывает практически весь подсеченный участок борта и создаются условия для формирования и раскрытия трещин отрыва с последующей потерей устойчивости. При этом на данный момент не существует данных, позволяющих считать сцепление по главному разлому отличным от нуля.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПО Р.7В



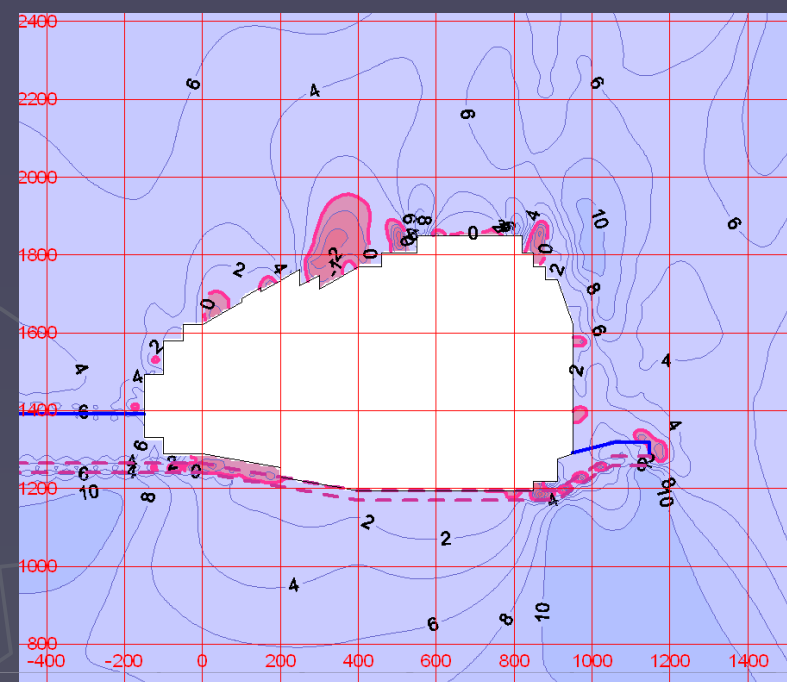
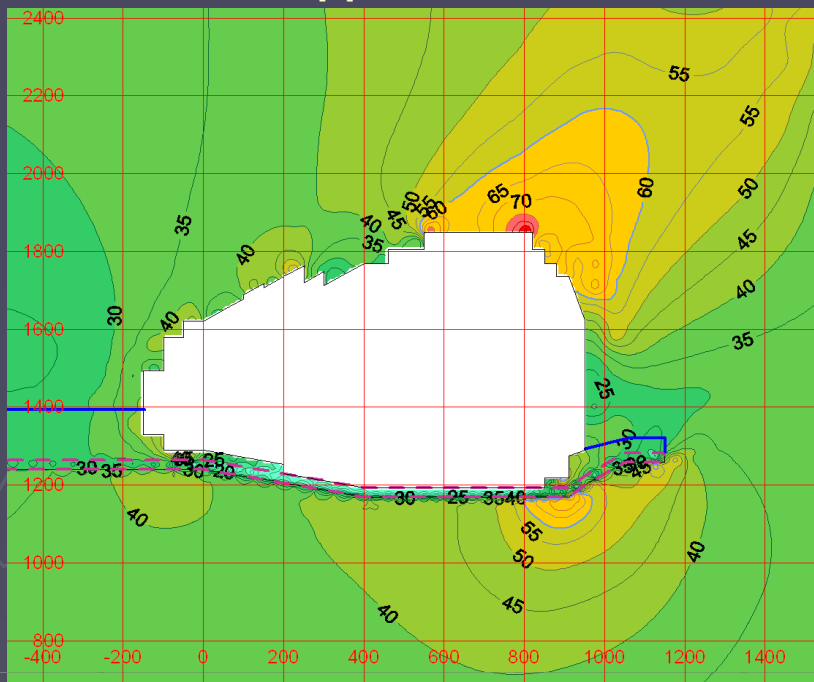
Северный борт 45°



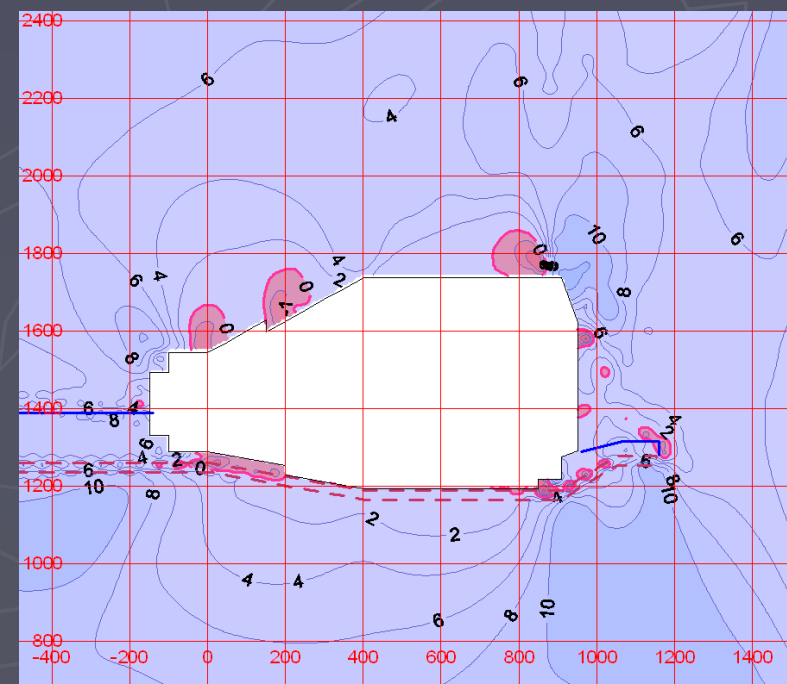
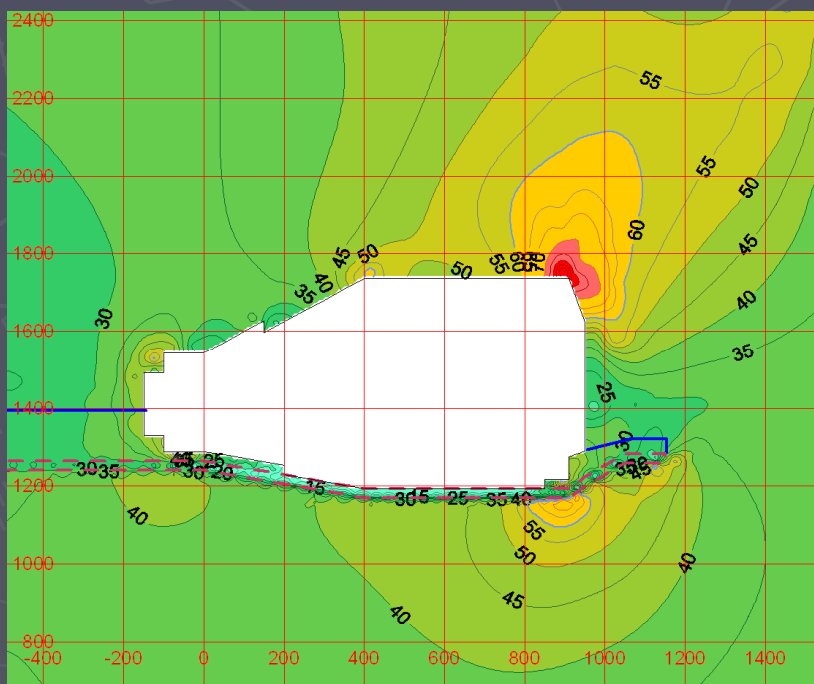
Северный борт 60°

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГОР. +320М

Северный
борт
45°



Северный
борт
60°



- ▶ Геомеханическое состояние северного участка борта характеризуется действием высоких сжимающих напряжений в нетронutom массиве от 35 до 50 МПа, а при формировании борта карьера с откосом 45° , значения действующих напряжений увеличиваются до 75 МПа. В случае формирования борта карьера с откосом 60° , уровень сжимающих напряжений составит не более 60 МПа, что связано с уменьшением размеров карьерной выемки по короткой оси.
- ▶ Учитывая, что в массиве пород северного участка борта карьера не выявлено систем трещин с опасными углами падения, формирование северного участка борта карьера можно рекомендовать под углом 60°

ВЫВОДЫ

- ▶ Изучены особенности распределения напряжений в окрестности глубокой вытянутой в плане карьерной выемки, находящейся в массиве пород с гравитационно-тектоническим типом НДС, которые заключаются в том, что борта карьера с увеличением глубины пересекают несколько зон с различным соотношением гравитационных и тектонических сил.
- ▶ С помощью мелкомасштабных моделей определены зоны растягивающих напряжений в бортах карьера. Области растяжения наблюдаются в основном на длинных участках борта карьера как при действии тектонических сил по длинной, так и по короткой оси карьера. установлено, что процессы техногенного трещинообразования и динамических проявлений горного давления в бортах карьера определяются его положением относительно направления максимального сжатия. Бóльшая устойчивость прибортового массива обеспечивается в случае расположения вытянутого в плане карьера ($D/d > 1$, где D и d – бóльший и меньший линейный размер карьера в плане) в направлении максимального сжатия
- ▶ Увеличение угла наклона длинных участков борта глубокой карьерной выемки в однородном скальном массиве снижает вероятность динамических проявлений горного давления на этих участках при действии максимальных сжимающих напряжений по длинной оси карьера

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

