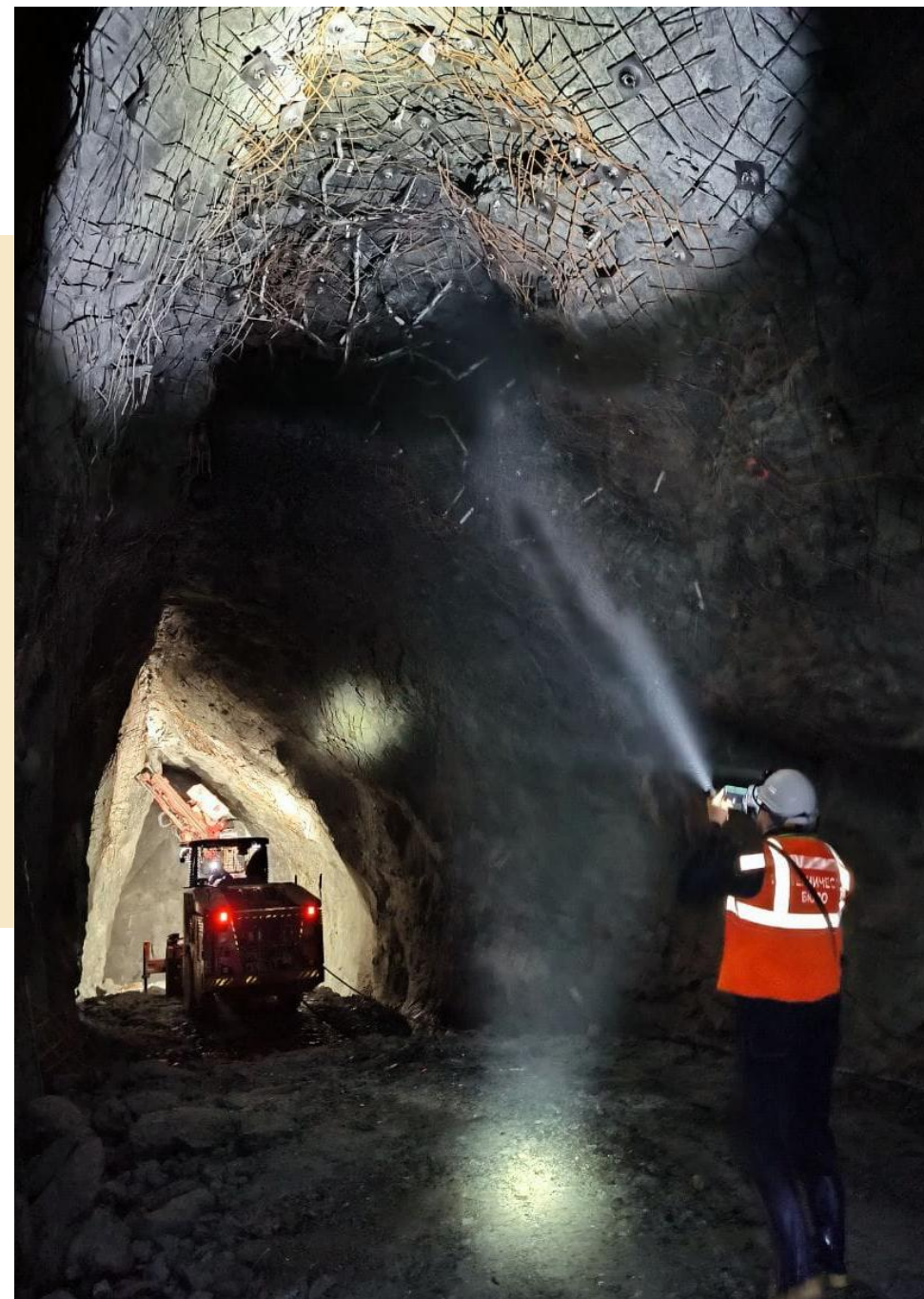


«Безопасность при проходке и эксплуатации горных выработок, на основе комплексного изучения условий и цифровизации процесса обоснования способов их поддержания»

Докладчик:

Заместитель генерального директора – главный инженер  
ООО «Геотехническое бюро»

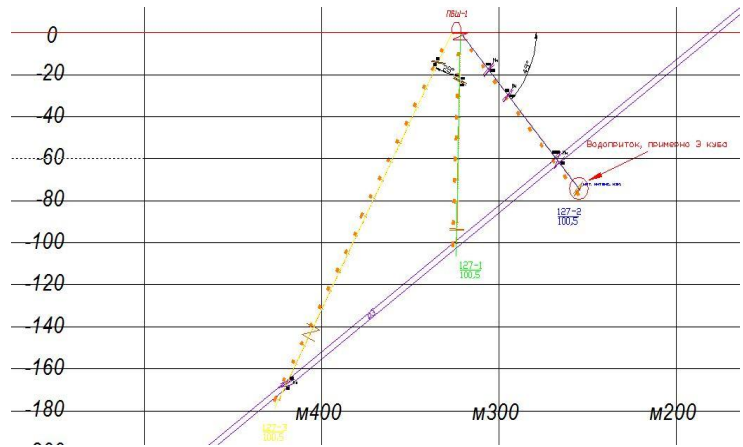
к.т.н. Максимов Антон Борисович



# Комплекс проведенных исследований направленных на обоснование способов поддержания горных выработок

| Теоретические и аналитические исследования                                                                                                                                                                                                                                                                     | Лабораторные исследования                                                                                                                                                                                                                                                                      | Натурные (шахтные) исследования                                                                                                                                                                                                                                        | Численное моделирование                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Основные задачи исследований                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Изучение особенностей развития геомеханических и геодинамических процессов в породном массиве</li> <li>Обоснование теоретических положений прогноза геомеханических и геодинамических процессов на стадии проведения горных выработок и ведения горных работ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Определение физико-механических свойств руд и пород</li> <li>Исследования механического поведения строительных материалов, как элементов крепей горных выработок</li> <li>Изучение работы новых видов крепей при различных видах воздействия</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Определение напряжений</li> <li>Определение размеров нарушенных зон</li> <li>Определение смещений контура выработок</li> <li>Изучение структурной нарушенности</li> <li>Изучение форм проявлений потери устойчивости</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Прогноз изменения НДС при ведении горных работ</li> <li>Прогноз начального поля напряженного состояния породного массива</li> <li>Расчет зон хрупкого разрушения на участках перенапряженного породного массива</li> <li>Оценка влияния горных работ на состояние крепей горных выработок</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Обосновать геомеханические модели поведения породных массивов и разработаны критерии их оценки</li> <li>Определить количественную взаимосвязь между основными факторами влияния и устойчивостью выработок</li> <li>Разработать критерии выбора и расчета параметров крепей горных выработок</li> </ul> |

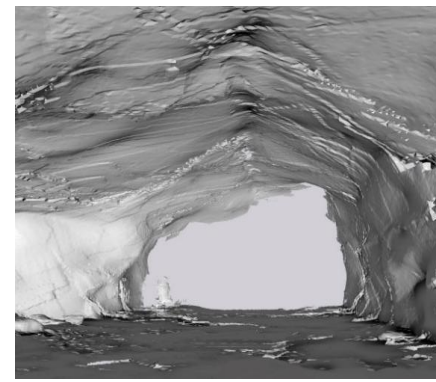
# О накапливаемом объеме данных



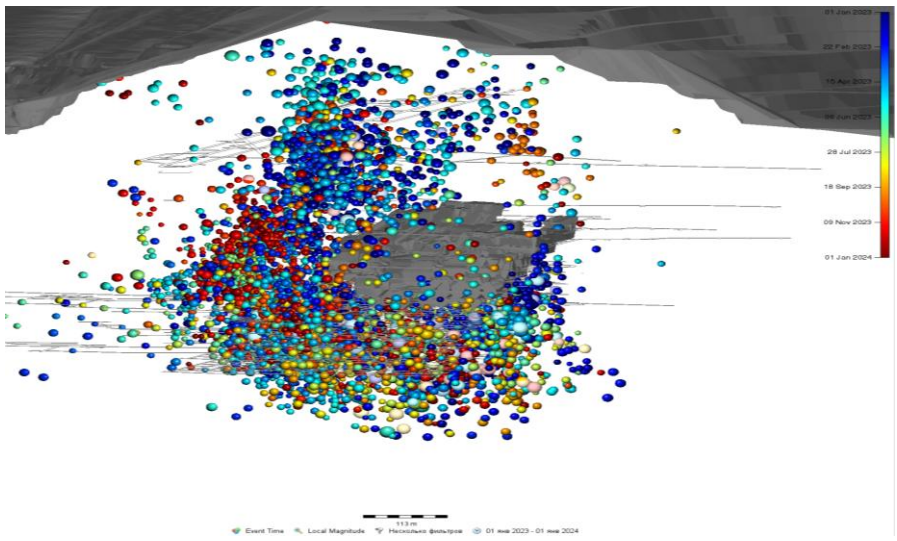
Геологические данные



Фиксация нарушений в элементах отработки

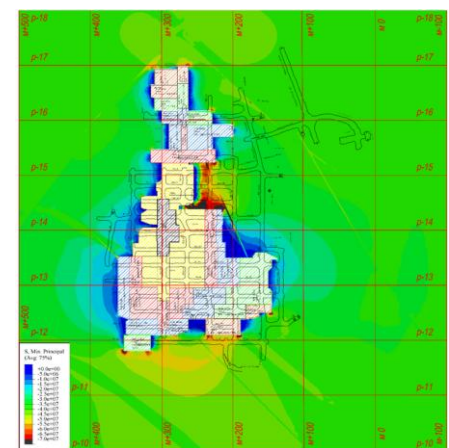


Динамика смещений породных обнажений



Сейсмический мониторинг

Распределение сейсмических событий, зафиксированных АСКСМ АО «СЗФК» в районе производственной деятельности

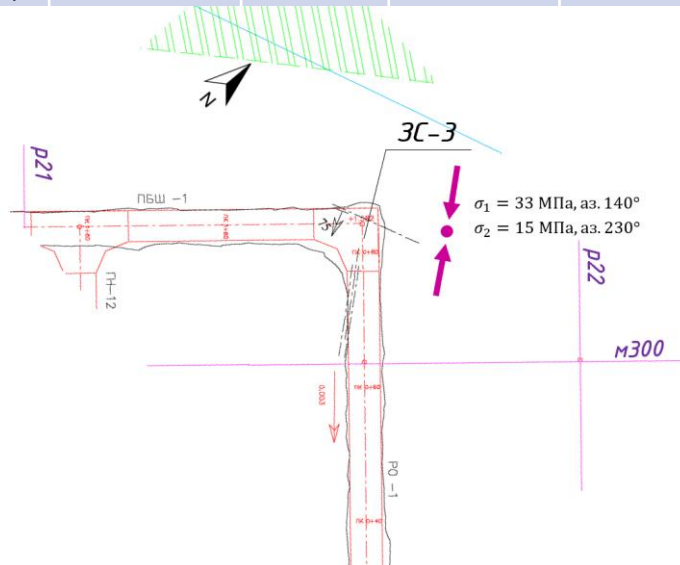


Результаты прогноза

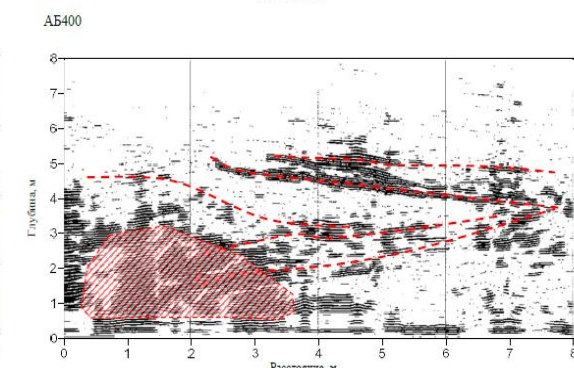
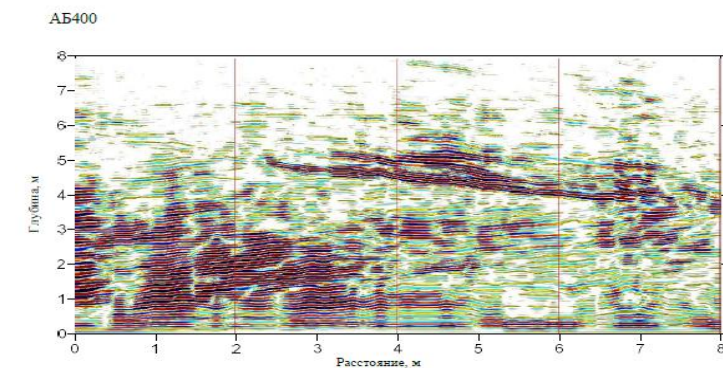
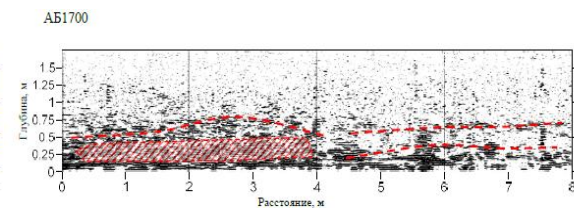
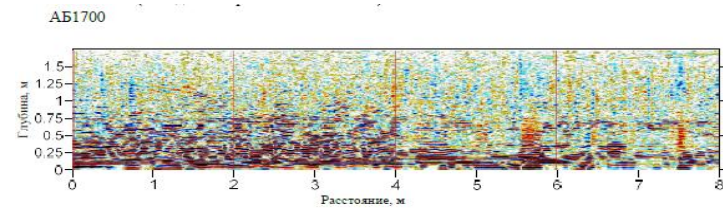
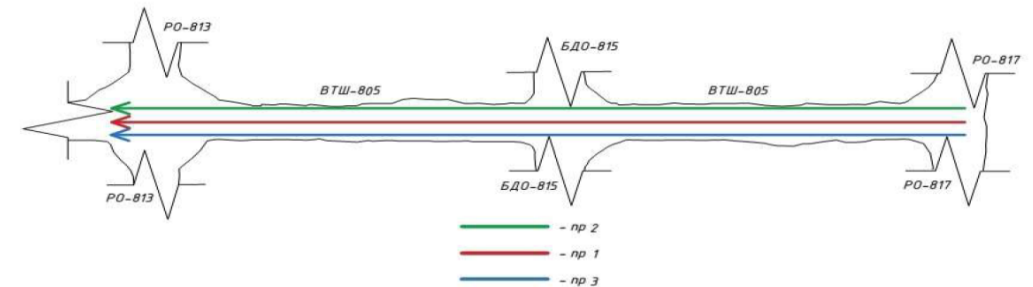
# Комплекс натурных и экспериментальных исследований

## МЕТОД РАЗГРУЗКИ КЕРНА

| $\sigma_1$ , МПа | $\sigma_2$ , МПа | $\sigma_3$ , МПа | Простирание $\sigma_1$ | Падение $\sigma_1$ | Модуль упругости, МПа | Коэффициент Пуассона | Прочность при одноосном сжатии, МПа |
|------------------|------------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 36               | 23               | 18,1             | 147°                   | 3°                 | 67000                 | 0,17                 | 160                                 |
| 27               | 15               | 14               | 122°                   | 0°                 | 69000                 | 0,16                 | 180                                 |
| 33               | 15               | 15,7             | 140°                   | 2°                 | 55000                 | 0,15                 | 145                                 |



## МЕТОД ГЕОРАДИОЛАКАЦИИ



# методы определения структурной нарушенности массива

## Методы оценки:

- Оценка структурной нарушенности породного массива по СП 91.13330.2012 и СП 122.13330.2012
- Оценка структурной нарушенности породного массива по методике О.В. Тимофеева
- Оценка структурной нарушенности породного массива по методике Дири (RQD)
- Геомеханическая классификация породного массива Бенниавского (рейтинговая система RMR)
- Геомеханическая классификация породного массива Бартона (рейтинговая система Q)

## РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА RMR

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B,$$

где  $J_{A1}$  – показатель, который зависит от прочности породы в условиях одноосного сжатия;

$J_{A2}$  – показатель, который зависит от значения показателя RQD;

$J_{A3}$  – показатель, который зависит от расстояния между трещинами;

$J_{A4}$  – показатель, учитывающий качество контакта по трещинам;

$J_{A5}$  – показатель, учитывающий обводненность трещин;

$J_B$  – показатель, учитывающий направление трещиноватости.

| Параметры/свойства породного массива       | Величина критерия RMR  |                          |                         |                           |                         |
|--------------------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                                            | 100 – 81               | 80 – 61                  | 60 – 41                 | 40 – 21                   | < 20                    |
| Категория устойчивости                     | I                      | II                       | III                     | IV                        | V                       |
| Классификация горных пород по устойчивости | Очень устойчивые       | устойчивые               | Средне устойчивые       | неустойчивые              | Весьма неустойчивые     |
| Среднее время устойчивого состояния        | 10 лет, пролет до 15 м | 6 месяцев, пролет до 8 м | 1 неделя, пролет до 5 м | 10 часов, пролет до 2.5 м | 30 минут, пролет до 1 м |

## РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА Q

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF},$$

где  $RQD$  – показатель качества горной породы ( $RQD$  – rock quality designation);

$J_n$  – показатель количества систем трещин;

$J_r$  – показатель шероховатости трещины;

$J_a$  – показатель трансформации контактных условий по трещине;

$J_w$  – показатель, учитывающий влияние обводненности трещины на условие контакта по трещине;

$SRF$  – показатель, учитывающий соотношение между напряжениями, действующими в породном массиве и прочностью породы.

| Класс породного массива | Описание породного массива     | Значение показателя Q |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| A                       | Невероятно хорошее состояние   | 400 – 1000            |
|                         | Экстремально хорошее состояние | 100 – 400             |
|                         | Очень хорошее состояние        | 40 – 100              |
| B                       | Хорошее состояние              | 10 – 40               |
| C                       | Среднее состояние              | 4 – 10                |
| D                       | Плохое состояние               | 1 – 4                 |
| E                       | Очень плохое состояние         | 0.1 – 1               |
| F                       | Экстремально плохое состояние  | 0.01 – 0.1            |
| G                       | Невероятно плохое состояние    | 0.001 – 0.01          |

# Комплексный подход к изучению и прогнозу напряженного состояния массива

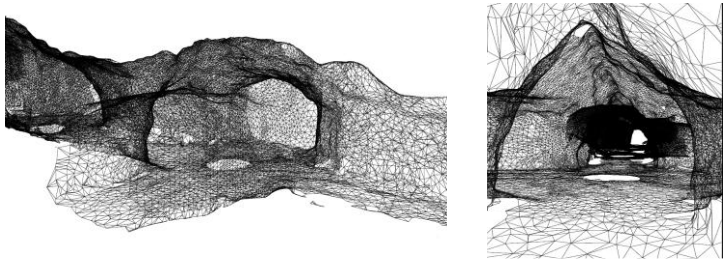
Состав комплексного исследования на месторождении Олений Ручей:

1. Массовые натурные исследования по формированию зон хрупкого разрушения.
2. Уточнение полученных результатов методом торцевой разгрузки керна.
3. Уточнение полученных результатов методом решения обратной задачи на основе смещений контура горных выработок.
4. Проверка полученных показателей на массовых натурных исследованиях по формированию зон хрупкого разрушения и анализ полученных результатов.

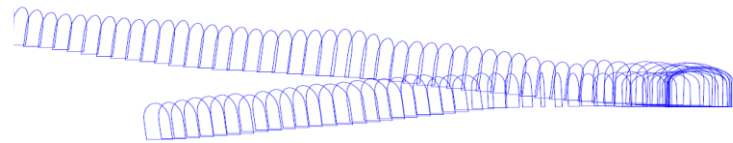


# Массовые натурные исследования и решение обратной задачи по формированию зон хрупкого разрушения

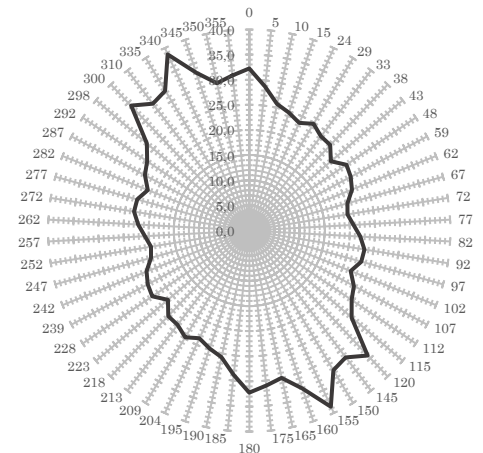
Пример 3D съемки участка с хрупким разрушением контура горной выработки



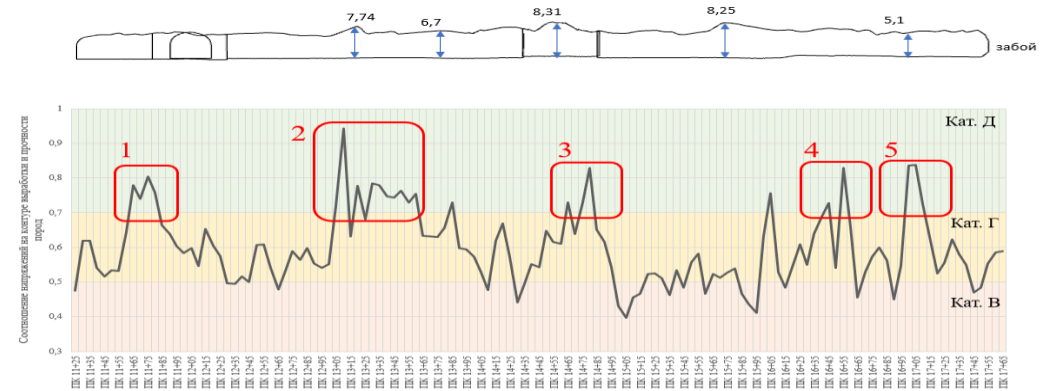
Пример 2D съемки участка горной выработки



Круговой график изменения компонент напряжений



Пример съемки участка горной выработки с нарушениями



Зависимость для определения напряжений сформировавшихся определенные зоны хрупкого разрушения\*:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3}{3} + \frac{\sigma_{сж}}{3,75} \left( \frac{R_f}{a} - 0.49 \pm 0.1 \right)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  – соответственно главные максимальные и минимальные нормальные напряжения;

$\sigma_{max}$  – максимальные напряжения;

$\sigma_{сж}$  – прочность породы в условиях одноосного сжатия;

$a$  – эквивалентный радиус горной выработки;

$R_f$  – эквивалентный радиус зоны хрупкого разрушения.

\*Martin, C.D., Read, R.S., and Martino, J.B. 1997

# Характерные формы потери устойчивости горных выработок на ПОДЗЕМНОМ руднике ГОК «Олений ручей»

1

Формирование свода обрушения в слабоустойчивых породах (раздробленные/перемятые породы)

2

Образования вывалов породных блоков по естественной и техногенной нарушенности

3

Хрупкое разрушение пород в приконтурной зоне, сопровождаемое геодинамическими процессами

4

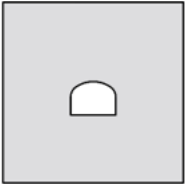
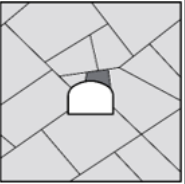
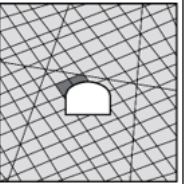
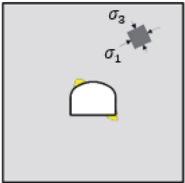
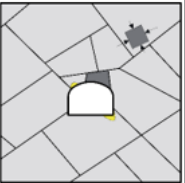
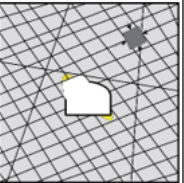
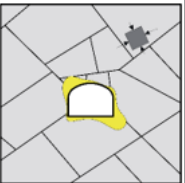
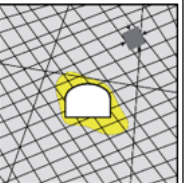
Разрушения от влияния сейсмических волн различной природы

\*Примечание:

Все эти четыре формы должны рассматриваться при выборе типа крепей и определении их параметров

Классическое представление о потере устойчивости применяемое на рудниках заключается в использовании Первой формы потери устойчивости (формирование нарушенной зоны) с условным учетом некоторых других форм. Что приводило к тому, что параметры крепей выработок были необоснованно завышенными, либо наоборот не обеспечивали требуемую безопасность ведения работ и эксплуатации выработок

# Разработка геомеханических моделей породного массива для типовых условий подземного рудника

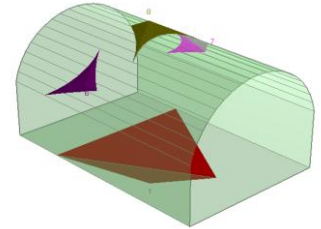
| Характеристика напряженного состояния породного массива       | Характеристика породного массива по трещиноватости                                                                 |                                                                                                                                                            |                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                               | Массивный ( $RMR > 75$ )                                                                                           | Средне трещиноватый ( $50 > RMR > 75$ )                                                                                                                    | Сильнотрещиноватый ( $RMR < 50$ )                                                                                      |
| Слабонапряженный,<br>$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \leq 0.15$    |                                   |                                                                           |                                       |
|                                                               | Линейный отклик породного массива                                                                                  | Возможно выпадение или соскальзывание блоков породы под собственным весом                                                                                  | Высыпание блоков породы из породного массива в выработку                                                               |
| Средненапряженный<br>$0.15 < \frac{\sigma_1}{\sigma_c} < 0.4$ |                                   |                                                                           |                                       |
|                                                               | Хрупкое разрушение породы в приконтурной области                                                                   | Локальное хрупкое разрушение породы в приконтурной области с последующим деформированием породного массива за счет смещения блоков относительно друг друга | Локальное хрупкое разрушение породы с последующим обрушением породных блоков по поверхностям ослабления                |
| Высоконапряженный<br>$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} > 0.4$        |                                 |                                                                         |                                     |
|                                                               | Хрупкое разрушение породы в окрестности обнажения, которое может охватывать значительные области породного массива | Хрупкое разрушение породы в окрестности обнажения с последующим смещением блоков относительно друг друга                                                   | Деформирование породного массива как пластического тела, сопровождающееся значительными деформациями породного контура |

- при сплошном вывалообразовании

$$\text{жесткопластическая среда} \quad h_B = k_{\text{усл}} k_n \frac{B}{0.2 R_{\text{сж}} k_{\text{стр}}},$$

- при обрушении по трещинам, среднетрещиноватый массив

$$\sigma_1 = \sigma_3 + R_{\text{сж}} \left( m_b \frac{\sigma_3}{R_{\text{сж}}} + s \right)^a$$



- пластическое деформирование сильно- и среднетрещиноватого породного массива

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}.$$

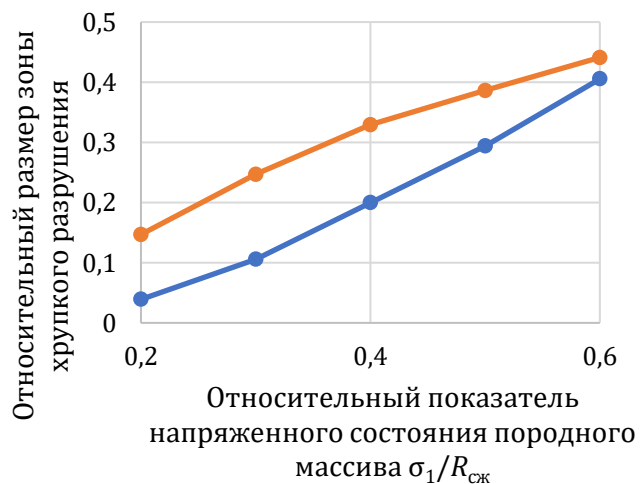
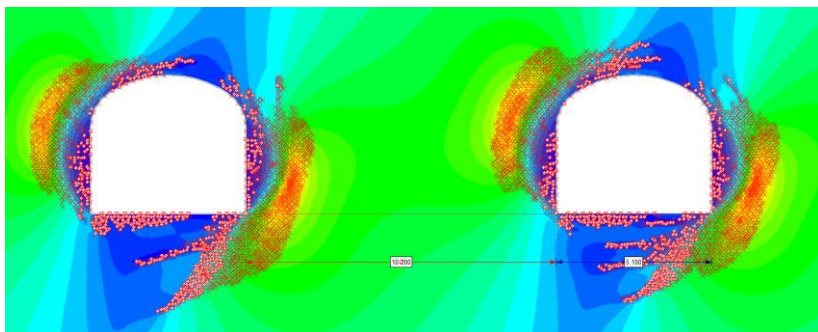
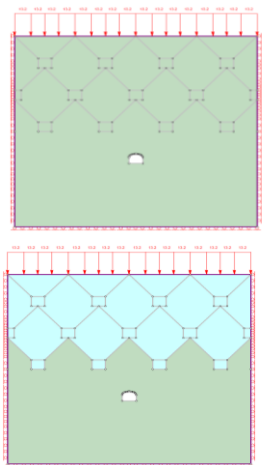
- при хрупком разрушении пород

$$l_f = R_f - a;$$

$$\frac{R_f}{a} = 0.49(\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{c,i}};$$

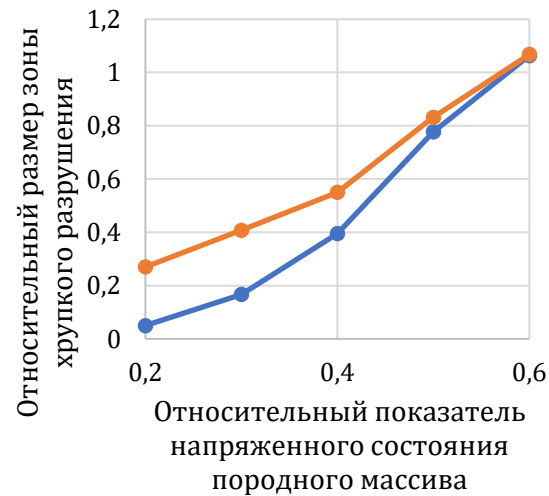
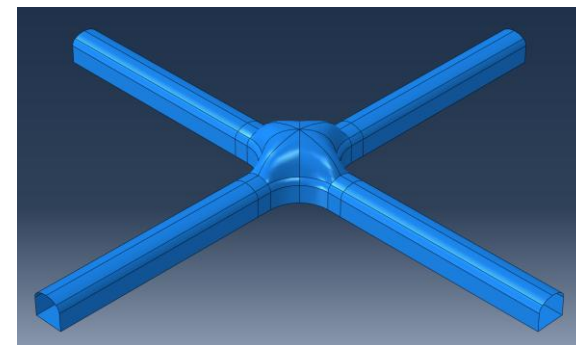
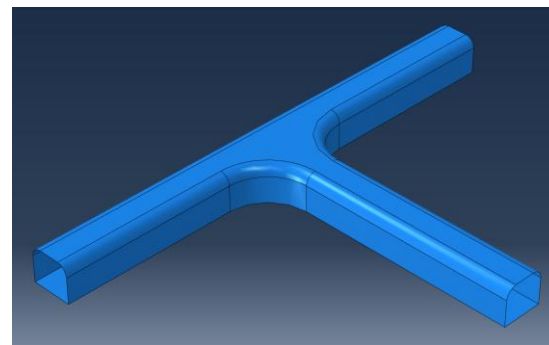
# Прогноз геомеханических процессов в массиве в окрестности горных выработок. Расчет напряженного состояния крепей

- для одиночной выработки

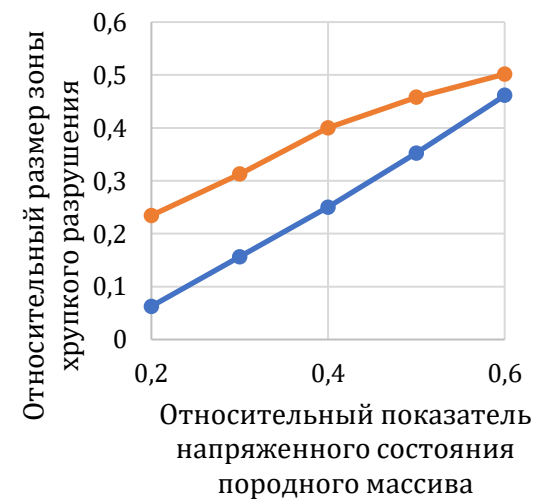


—●— Нижний предел —●— Верхний предел

- для сопряжений выработок



—●— Нижний предел —●— Верхний предел

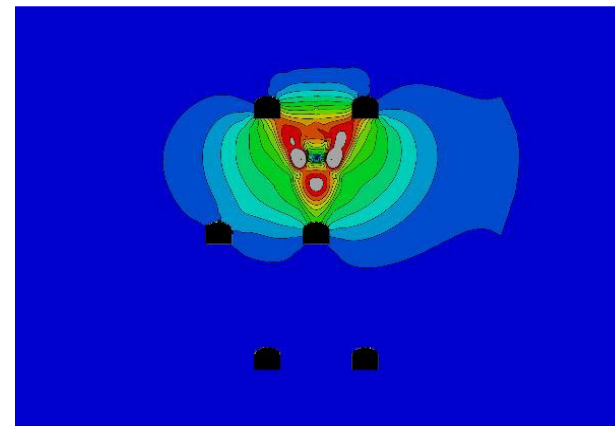
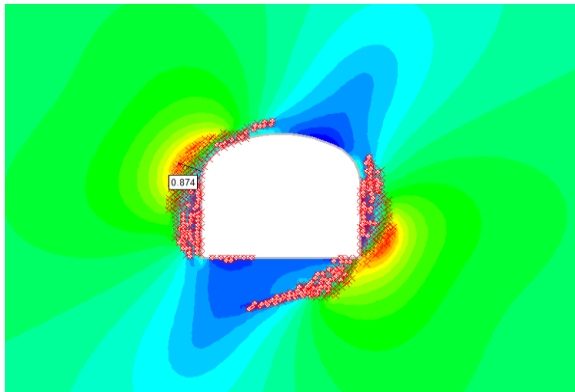


—●— Нижний предел —●— Верхний предел

# Представление об устойчивом состоянии горных выработок на рудниках Хибинских месторождений

Геодинамические факторы

- 1. Перенапряженный массив
- 2. Локальные горные удары
- 3. Горно-тектонические удары

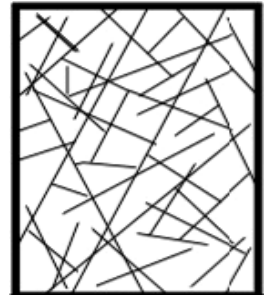
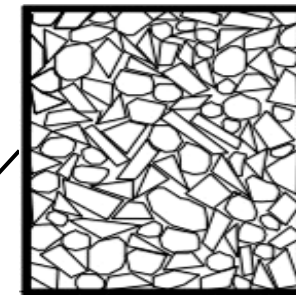


Влияние очистных работ

- 1. Перераспределение напряжений
- 2. Влияние взрывных работ

Факторы, влияющие на устойчивое состояние горных выработок

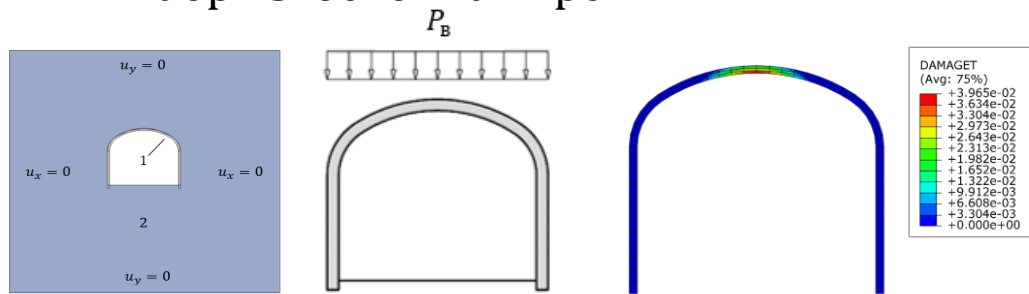
Слабоустойчивые и  
сильнотрещиноватые породы



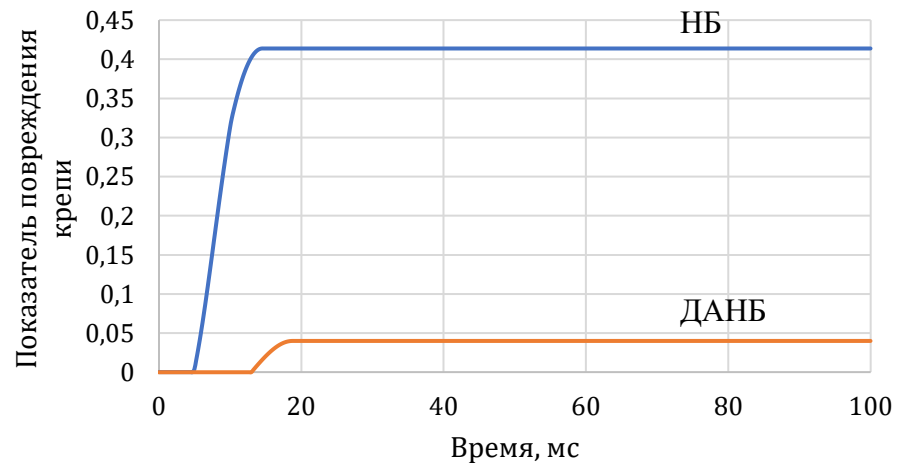
Геологические включения  
(дайки, жилы и другие)

# Прогноз геомеханических процессов в массиве в окрестности горных выработок. Расчет напряженного состояния крепей

- Набрызгбетонная крепь



Картина повреждения крепи закреплённой НБ и ДАНБ 10 см



- Анкерная крепь

