

В.А. Еременко

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РУДНИКА ПРИ СООСНОЙ ОТРАБОТКЕ ТРЕХ ЭТАЖЕЙ КАМЕРНОЙ СИСТЕМОЙ РАЗРАБОТКИ (В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MAP3D)

**Аннотация.** Показаны результаты научно-исследовательской работы, посвященной моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) горнотехнической системы подземного рудника в программном комплексе Map3D при соосной отработке трех этажей камерной системой разработки. Представлены результаты исследований по количественной оценке состояния массива (по методу Бартона) отрабатываемого комбайнами и буровзрывным способом, а также результаты калибровки численной модели с использованием полученных данных в натуральных условиях при картировании массива и программ Dips и RocData. Определение на стадии проектирования горных работ возможности совместной поэтапной отработки трех этажей камерной системой разработки с оставлением ленточных целиков МКЦ с большей степенью точности обеспечивается моделированием НДС горнотехнической системы подземного рудника в программном комплексе Map3D. Полученные результаты исследований по количественной оценке состояния массива (по методу Бартона) отрабатываемого комбайнами и буровзрывным способом используются для калибровки численной модели с использованием полученных данных в натуральных условиях при картировании массива и программ Dips и RocData. Предлагаемый подход рекомендуется использовать для геотехнической оценки состояния массива горных пород в условиях применения систем разработки различного класса — с естественным и искусственным поддержанием очистного пространства, а также систем с обрушением руды и породы. В сложных горно-геологических условиях, в условиях повышенного горного давления, обильного притока воды, повышенной трещиноватости пород модель калибруется с учетом проведения геотехнической оценки состояния массива и уточняется с использованием программ Rocscience — Dips и RocData.

**Ключевые слова:** камерная система разработки, численное моделирование, количественная оценка состояния массива горных пород, Q-индекс, система Бартона, камера, этаж, горизонт, междукамерный целик — МКЦ.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-5-17

## Введение

Равномерное сдвигание налегающей толщи в условиях подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых обеспечивается применением обоснованных параметров камерной системы разработки с оставлением

ленточных целиков, оставлением достаточных размеров потолочного целика между добычными горизонтами, соосным расположением междукамерных целиков на смежных этажах, а также при необходимости закладкой участков, обработанных с оставлением междука-

мерных целиков, подверженных интенсивным деформациям [1–5].

Создание численной модели напряженно-деформированного состояния (НДС) горнотехнической системы подземного рудника при соосной отработке трех этажей камерной системой разработки проводилось в программном комплексе Mar3D на примере отработки мощного крутопадающего соляного купола покрытого в верхней части рыхлыми песчано-галечниковыми отложениями [5, 6]. Применяемая система разработки камерная с оставлением ленточных целиков. Рассматривались два варианта отработки: первый — с применением буровзрывного способа проходки выработок и ведения очистных работ; второй — комбайновый. Верхняя граница горнотехнической системы рудника (кровля камер верхнего этажа) находилась на глубине 250 м от земной поверхности, нижняя на глубине 390 м (почва камер нижнего этажа). Размеры камер и целиков на верхнем этаже: высота камер и целиков — 30 м, ширина камер — 30 м, ширина МКЦ — 25 м; в среднем этаже: высота камер и целиков — 30 м, ширина камер — 29 м, ширина МКЦ — 26 м; на нижнем этаже: высота камер и целиков — 30 м, ширина камер — 28 м, ширина МКЦ — 27 м. Высота двух междуэтажных целиков — 25 м. Шахтное поле разделяется на пять участков: Юго-Западный, Северо-Западный, Центральный, Северо-Восточный и Южный. Участки между собой разделяются разгрузочными панельными целиками шириной — 80 м (верхний этаж); 81 м (средний этаж) и 82 м (нижний этаж).

В природных условиях на месторождении каменной соли проводилась по методу Бартонa количественная оценка состояния массива обрабатываемого комбайнами и буровзрывным способом, а также калибровка модели с использованием полученных данных при кар-

тировании массива и программ Dips и RocData [7–11].

Для минимизации риска незапланированного сдвижения налегающей толщи и потери устойчивости МКЦ необходимо обеспечить плавный характер деформирования массива каменной соли МКЦ с установившимися скоростями на весь период отработки рудника. Горизонтальные смещения контура и приконтурного массива каменной соли могут быть вызваны реологическими деформациями каменной соли без образования трещин отжима в стенках горных выработок и камер.

#### **Количественная и качественная оценка состояния массива каменной соли. Исследование глубины деформирования краевой зоны МКЦ**

Для создания численной модели напряженно-деформированного состояния (НДС) горнотехнической системы подземного рудника с оптимальными характеристиками приближенными по своим значениям к реальным условиям выполнена комплексная количественная и качественная оценка состояния массива на месторождении каменной соли при осмотре камер, целиков и выработок с помощью международной рейтинговой системы по методу Бартонa [12, 13]. Определено качество массива каменной соли  $Q$  — индекс, учитывающий параметры:  $RQD$  — коэффициент, характеризующий качество массива каменной соли (показатель качества каменной соли);  $J_n$  — коэффициент, характеризующий число систем трещин;  $J_r$  — коэффициент, характеризующий шероховатость поверхности трещин;  $J_a$  — коэффициент, характеризующий измененность стенок трещин;  $J_w$  — коэффициент, характеризующий присутствие воды в трещинах;  $SRF$  — коэффициент, характеризующий разрушение породы вследствие избы-

точного горного давления или уменьшенного обжимающего напряжения вблизи поверхности.

Значение индекса  $Q$  рассчитывалось на основе 6 установленных параметров по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1).$$

Оценка качества массива каменной соли проводилась с определением коэффициента  $RQD$  на обнажениях выработок и камер в массивах разрабатываемом буровзрывным способом ( $RQD'$ ), а также в массивах, разрабатываемых комбайнами ( $RQD$ ).

Коэффициент  $RQD$  рассчитывается по формуле:

$$RQD = \frac{L_\Sigma}{L} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $L_\Sigma$  — сумма длин расстояний более 10 см между трещинами на исследуемом участке обнажений длиной, м;  $L$  — общая длина исследуемого участка, м.

С учетом проведенных натурных наблюдений и измерений получены расчетные средние коэффициенты  $RQD = 95$  и  $RQD' = 80$ . Согласно классификации значение коэффициента  $RQD = 95$  характеризует массив каменной соли как очень высокопрочный и не трещиноватый;  $RQD' = 80$  — высокопрочный и средне трещиноватый (0–8 трещин на 1 пог. м).

Определен средний коэффициент, характеризующий число систем трещин в массивах, разрабатываемых комбайнами  $J_n = 0,5$ ; разрабатываемых буровзрывным способом  $J_n' = 3$ . Согласно классификации значение коэффициента  $J_n = 0,5$ , характеризует массив каменной соли как монолитный и без трещин;  $J_n' = 3$  — массив имеющий одну систему трещин и дополнительно могут картироваться случайные трещины.

Рассчитан средний коэффициент, характеризующий шероховатость поверхности стенок трещин в массивах разра-

батываемых комбайнами  $J_r = 4$ ; разрабатываемых буровзрывным способом  $J_r' = 3$ . Согласно классификации значение коэффициента  $J_r = 4$  характеризует массив каменной соли как монолитный и без трещин, соответственно, шероховатость отсутствует;  $J_r' = 3$  — массив имеет прерывистые поверхности трещин, разрывные или сложнопрофильные трещины.

Определен средний коэффициент, характеризующий измененность стенок трещин в массивах разрабатываемых комбайнами  $J_a = 0,75$ ; разрабатываемых буровзрывным способом  $J_a' = 1$ . Согласно классификации значение коэффициента  $J_a = 0,75$  характеризует массив каменной соли как монолитный и без трещин, непроницаемое заполнение;  $J_a' = 1$  — массив имеет неизменные стенки трещин.

Рассчитан коэффициент, характеризующий отсутствие воды в массиве и трещинах в сухих выработках и камерах рассматриваемого месторождения  $J_w = J_w' = 1$ .

Установлен средний коэффициент  $SRF$ , учитывающий естественное напряженное состояние массива каменной соли. Для рассматриваемого месторождения каменной соли в условиях наличия выжимающих вертикальных нагрузок в упруго-пластичных массивах каменной соли, разрабатываемых комбайнами  $SRF = 1$ ; разрабатываемых буровзрывным способом  $SRF' = 2$ . Согласно классификации значение коэффициента  $SRF = 1$  характеризует действие в массиве средних сжимающих напряжений, имеются также надработанные массивы;  $SRF' = 2$  — характеризует действие в массиве низких сжимающих напряжений и высоких вертикальных напряжений, имеются подработанные массивы, может оказывать и негативное влияние на устойчивость в зависимости от ориентации напряжений относительно направления

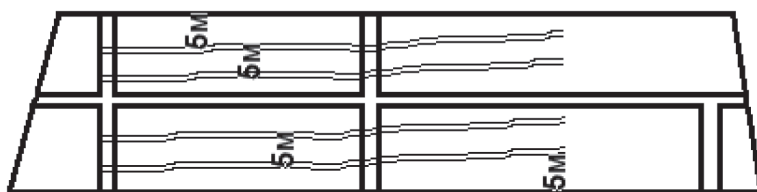


Рис. 1. Схема расположения трещин в целике на расстоянии  $\approx 5$  м и  $\approx 10$  м от обнажения  
 Fig. 1. Pattern of fractures in pillar at a distance of 5 and 10 m from exposure

трещинообразования и плоскостей ослабления.

После проведенных расчетов рейтинг массива каменной соли, разрабатываемого комбайнами на рассматриваемом месторождении, составил  $Q = 1000$ , что является максимальным значением индекса  $Q$ , который изменяется в диапазоне от 0,001 до 1000 — характеризует его как максимально ненарушенный и устойчивый массив каменной соли.

Рейтинг массива каменной соли, разрабатываемого буровзрывным способом, составил  $Q' = 39,9$ , что характеризует его как ненарушенный и устойчивый, кровля камер устойчивая (в т.ч., которые отработаны 40—50 лет назад), наблюдаются отслоения отдельных кусков породы в нижней части междукамерных целиков на высоту 8—10 м от подошвы камеры и выработок, локальные разрушения сопровождаются обрушением отдельных кусков породы, допускается стояние обнажений без крепления. В условиях пластичного течения горных по-

род возникает большое количество переменных факторов. Необходимо учитывать срок эксплуатации выработок и камер, ожидаемую конвергенцию и др. Как показали многолетние наблюдения и результаты измерений разгрузочные целики как правило сохраняют свою устойчивость. Для сохранения устойчивости и несущей способности МКЦ также может применяться консолидированная закладка из дробленой каменной соли. В МКЦ между камерами отработанными буровзрывным способом регистрируются крупные трещины (рис. 1, 2), на контуре камер и выработок наблюдается отжим массива каменной соли на глубину до 0,5 м от обнажения с характерным образованием трещин по направлению параллельно и субпараллельно плоскости обнажения (рис. 3). После проведенных расчетов рейтинга массива каменной соли, разрабатываемого комбайнами и буровзрывным способом, полученные данные по рейтингу, деформированию массива и развитию тре-

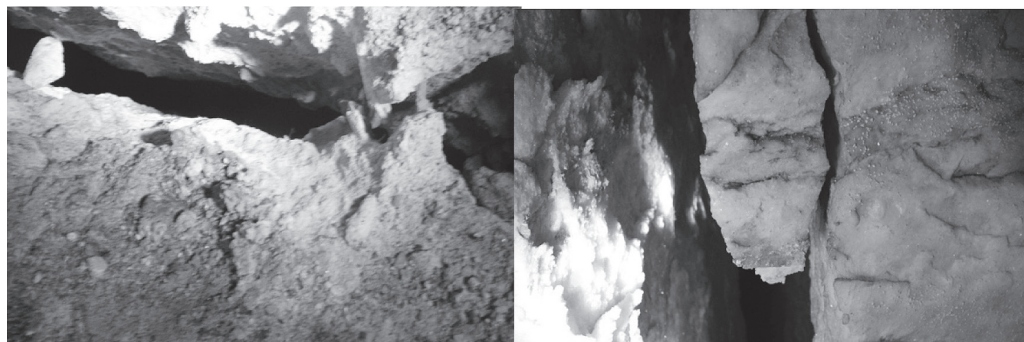


Рис. 2. Наблюдаемые трещины в МКЦ  
 Fig. 2. Observable joints in RP



Рис. 3. Отжим массива каменной соли на контуре камер и выработок на глубину до 0,5 м от обнажения с характерным образованием разрывных трещин

Fig. 3. Rock salt squeezing at the boundary of stopes to a depth up to 0.5 m from the exposure with the typical initiation of tensile fractures

щиноватости использовались для калибровки численной модели, построенной в программном комплексе Map3D.

### Численное моделирование напряженно-деформированного состояния горнотехнической системы рудника и калибровка численной модели. Определение минимального коэффициента запаса прочности МКЦ

Численное моделирование проводилось методом граничных интегральных уравнений с использованием программного комплекса Map3D [5, 6, 14–19].

Результаты моделирования позволили определить минимальный коэффициент запаса прочности в МКЦ в процессе поэтапной отработки запасов камер.

Для расчетов и анализа использовался программный пакет Map3D, встроенный САПР для построения сложных трехмерных моделей, анализ и визуализация горного давления и упругих деформаций на контуре выработок (камер) и в целиках, при различных критериях нарушенности массива каменной соли.

Для оценки степени нарушенности целиков в результате действия избыточного напряжения (т.е. напряжения, превышающего предельное) при упругом анализе использовался критерий прочности Хука-

Брауна, который является функцией максимального и минимального главных напряжений, а также прочностных свойств массива каменной соли. Этот критерий особенно хорошо подходит для оценки устойчивости гомогенного массива, которым является каменная соль.

В качестве критерия нарушенности междукамерных целиков применяется коэффициент запаса прочности КЗП (SFA — английская версия аббревиатуры КЗП, программная), определяемый следующим образом:

$$SFA = \frac{\text{Прочность}}{\text{Давление}} = \frac{(\sigma_c + q\sigma_3)}{\sigma_1},$$

где  $\sigma_c$  — предел прочности каменной соли на одноосное сжатие в массиве, МПа;  $\sigma_1$  — главное максимальное напряжение, МПа;  $\sigma_3$  — главное минимальное напряжение, МПа;

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения породы в массиве, град.

Исходные параметры модели, построенной в программном комплексе Map3D представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Прочность массива каменной соли была определена по обобщенному критерию Хука-Брауна с использованием

Таблица 1

**Исходные параметры первоначальной модели**  
**Input parameters of initial model**

| Параметр                                    | В образце       | В массиве |
|---|-----------------|-----------|
| Предел прочности на сжатие, МПа             | 35              | 20        |
| GSI (индекс геологической прочности)        | 90              | —         |
| Структурный индекс                          | $m_i = 10$      | $m_b = 7$ |
| Модуль деформации (Юнга), ГПа               | 30              | 28,8      |
| Коэффициент Пуассона                        | 0,35            | 0,35      |
| Сцепление, МПа                              | —               | 4,5       |
| Угол внутреннего трения, °                  | —               | 41,3      |
| Плотность соли, кг/м <sup>3</sup>           | 2134            | 2134      |
| Режим природных напряжений                  | литостатический |           |
| Отметка земной поверхности, м               | +118            |           |
| Природные напряжения на отметке -160 м, МПа | 5,64            |           |
| Градиент роста напряжений с глубиной        | 0,0209          |           |

программы RocData (рис. 5) [7, 15]. При расчетах задавался исходный параметр *GSI* (индекс геологической прочности массива, диапазон значений которого в классификации изменяется от 0 до 100). *GSI* = 90 характеризует массив каменной соли как максимально ненарушенный и устойчивый ( $Q = 1000$ ). При расчетах задавался также исходный пара-

метр *D* (индекс нарушенности массива).  $D = 0$  — для условия применения комбайнов.

С учетом проведенных натурных наблюдений и расчетов рейтинга массива каменной соли численная модель калибровалась. Так как в массивах отработываемых буровзрывным способом наблюдаются крупные трещины и пред-

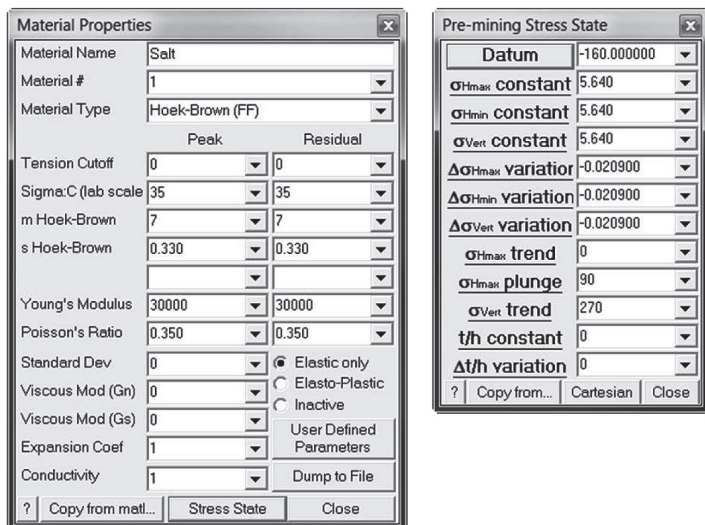


Рис. 4. Исходные параметры для моделирования в программе Map3D: свойства массива каменной соли и тензор природных напряжений

Fig. 4. Input parameters for modeling in Map3D: properties of salt rock mass and tensor of natural stresses

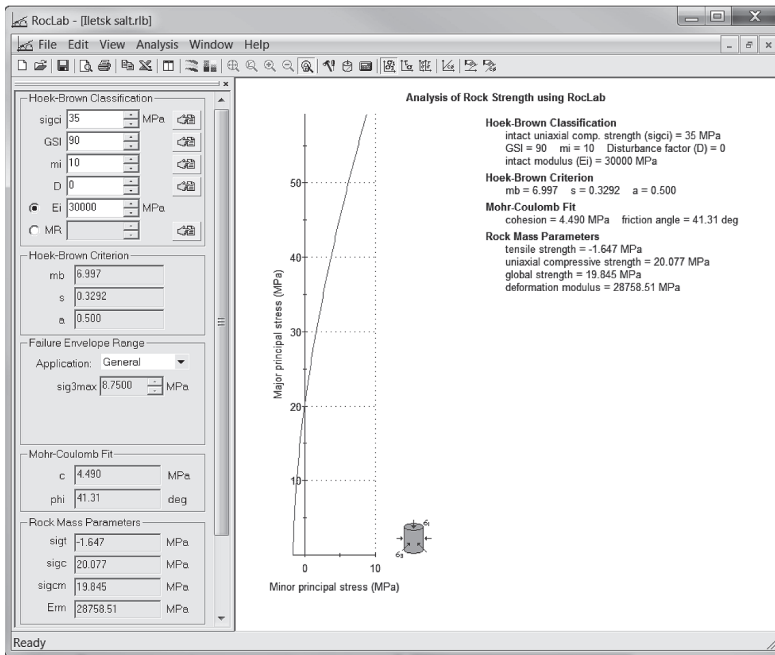


Рис. 5. Паспорт прочности массива каменной соли Илецкого месторождения  
 Fig. 5. Strength chart for salt rock mass at the Ilets deposit

положительно, прослеживаются на всю высоту МКЦ, были изменены некоторые исходные параметры модели (табл. 2).

При расчетах задавался исходный параметр  $GSI = 78$ , характеризующий массив каменной соли как ненарушен-

Таблица 2

**Исходные параметры с учетом калибровки модели**  
**Input parameters after model calibration**

| Параметр                                    | В образце       | В массиве   |
|---|-----------------|-------------|
| Предел прочности на сжатие, МПа             | 33              | 7,6         |
| GSI (индекс геологической прочности)        | 78              | —           |
| Структурный индекс                          | $m_i = 9$       | $m_b = 3,2$ |
| Модуль деформации (Юнга), ГПа               | 25              | 14          |
| Коэффициент Пуассона                        | 0,35            | 0,35        |
| Сцепление, МПа                              | —               | 2,5         |
| Угол внутреннего трения, °                  | —               | 35,4        |
| Плотность соли, кг/м <sup>3</sup>           | 2134            | 2134        |
| Режим природных напряжений                  | литостатический |             |
| Отметка земной поверхности, м               | +118            |             |
| Природные напряжения на отметке -160 м, МПа | 5,64            |             |
| Градиент роста напряжений с глубиной        | 0,0209          |             |

массива для условий применения буровзрывного способа.

На рис. 7 представлена построенная горнотехническая система рудника состоящая из трех этажей обрабатываемых камер с их соосным расположением.

С учетом полученных результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива каменной соли при условии отработки трех этажей, получены следующие результаты:

- Исходные входные параметры численной модели достоверные, следовательно, степень точности полученных результатов численного моделирования можно считать высокой.
- Допустимым коэффициентом запаса прочности МКЦ при условии высокой

степени достоверности исходных входных параметров считается КЗП  $\geq 1,5$ .

- Рассчитан минимальный коэффициент запаса прочности КЗП  $> 1,7$  МКЦ после полной отработки камер (с учетом этапов отработки) (рис. 8).
- Максимальное главное напряжение ( $\sigma_1$ ) в МКЦ не превышает 14 МПа, что говорит о том, что напряжения не превысят предельно допустимых значений для массива каменной соли (рис. 9).
- Минимальное главное напряжение ( $\sigma_3$ ) в бортах камер находятся в диапазоне от 2 до 10 МПа, что говорит о том, что релаксации (возможного расслоения массива в бортах камер) не прогнозируется.

На основе полученных при моделировании в программном комплексе Map3D

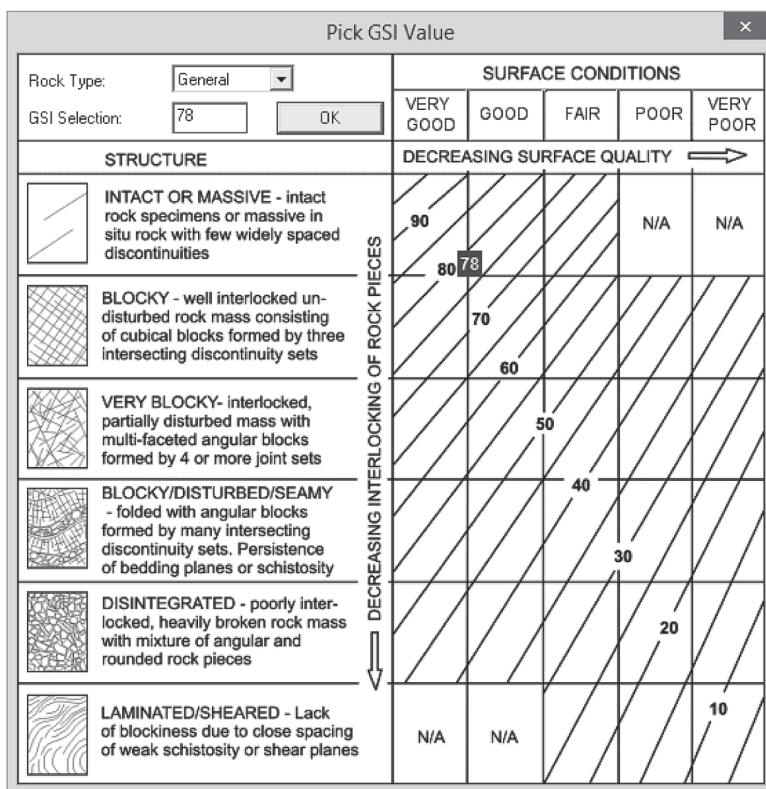
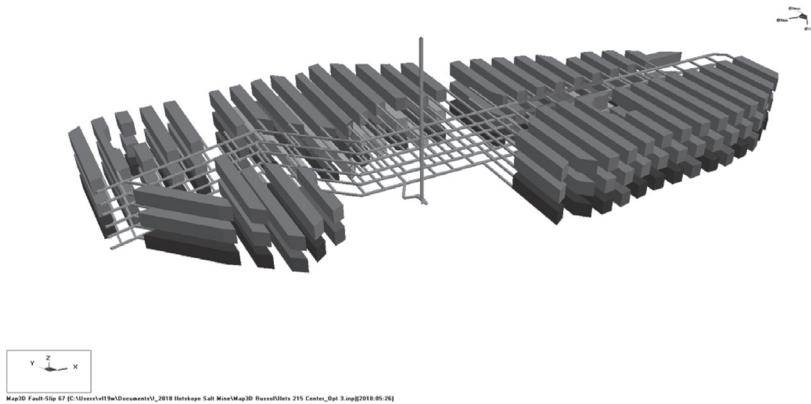


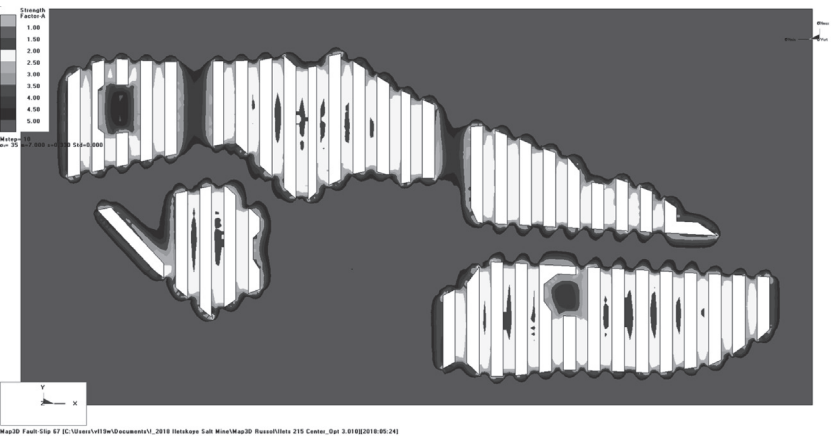
Рис. 6. Определение индекса геологической прочности GSI массива каменной соли, разрабатываемого буровзрывным способом

Fig. 6. Determination of Geological Strength Index GSI for salt rock mass under drilling-and-blasting



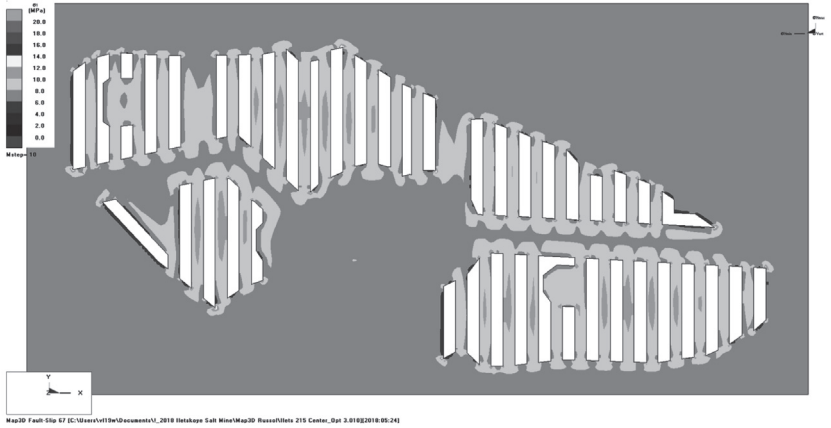
Map3D Fault Slip 67 [C:\Users\11\Documents\1\_2018\Шахта Сап Мина\Map3D\Rusoffiles\215 Center\_Opt 3.jpg(2018-05-26)]

Рис. 7. Горнотехническая система рудника состоящая из трех этажей обрабатываемых камер с их соосным расположением  
 Fig. 7. Mine-geotechnical system of coaxial stoping on three levels



Map3D Fault Slip 67 [C:\Users\11\Documents\1\_2018\Шахта Сап Мина\Map3D\Rusoffiles\215 Center\_Opt 3.016(2018-05-24)]

Рис. 8. Минимальный коэффициент запаса прочности КЗП > 1,7 МКЦ после полной отработки камер  
 Fig. 8. Minimum Safety Factor SF > 1.6 for RP after complete mining-out of stopes



Map3D Fault Slip 67 [C:\Users\11\Documents\1\_2018\Шахта Сап Мина\Map3D\Rusoffiles\215 Center\_Opt 3.016(2018-05-24)]

Рис. 9. Максимальное главное напряжение ( $\sigma_1$ ) в МКЦ  
 Fig. 9. Maximum principal stress ( $\sigma_1$ ) in RP

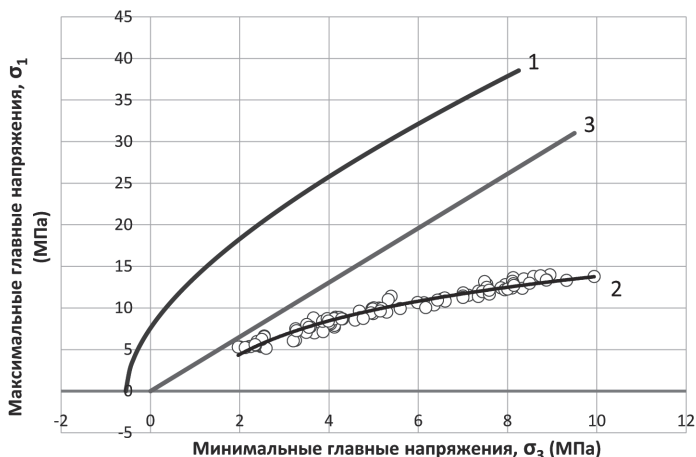


Рис. 10. График распределения действующих главных максимальных ( $\sigma_1$ ) и минимальных ( $\sigma_3$ ) напряжений (кривая 2), паспорт прочности массива каменной соли (кривая 1) и линия Можи (линия 3)  
 Fig. 10. Diagram of strength (curve 1), actual maximum  $\sigma_1$  and minimum  $\sigma_3$  principal stresses (curve 2) and Mogi's line (curve 3) in salt rock mass under analysis

значений действующих главных максимальных ( $\sigma_1$ ) и минимальных ( $\sigma_3$ ) напряжений и паспорта прочности массива каменной соли установлено, что значения действующих напряжений (рис. 10, кривая 2 на графике) не превышают предела прочности массива каменной соли (рис. 10, кривая 1 на графике) и не приводят к его разрушению на всех этапах отработки, так как установленные значения действующих напряжений (кривая 2) находятся ниже кривой 1. Для определения прочностных характеристик массива использовалась программа RocData [7]. Определено также, что значения действующих напряжений (рис. 10, кривая 2 на графике) находятся ниже линии Можи (рис. 10, линия 3 на графике), которая характеризует массив каменной соли как упруго-пластичный (выше линии Можи — массив с упругими свойствами, ниже — упруго-пластичными).

### Выводы

Определение на стадии проектирования горных работ возможности совместной поэтапной отработки трех этажей камерной системой разработки с оставлением ленточных целиков МКЦ с

большой степенью точности обеспечивается моделированием НДС горнотехнической системы подземного рудника в программном комплексе Mar3D [15]. Полученные результаты исследований по количественной оценке состояния массива (по методу Бартона) отрабатываемого комбайнами и буровзрывным способом используются для калибровки численной модели с использованием полученных данных в натуральных условиях при картировании массива и программ Dips и RocData.

Предлагаемый подход рекомендуется использовать для геотехнической оценки состояния массива горных пород в условиях применения систем разработки различного класса — с естественным и искусственным поддержанием очистного пространства, а также систем с обрушением руды и породы. В сложных горно-геологических условиях, в условиях повышенного горного давления, обильного притока воды, повышенной трещиноватости пород модель калибруется с учетом проведения геотехнической оценки состояния массива и уточняется с использованием программ Rocscience — Dips и RocData [15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меры охраны шахты от затопления и объектов на земной поверхности от вредного влияния горных работ. — Пермь: Галургия, 2007. — 85 с.
2. Сытник Е. В., Злебова А. Е. Прогнозная оценка влияния разработки месторождений калийных солей на состояние поверхностных и подземных вод // Горный журнал. — 2014. — № 2. — С. 97–101.
3. Протосеня А. Г., Вербилло П. Э. Оценка прочности блочного массива методом численного моделирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 4. — С. 47–54.
4. Ермашов А. О. Численное моделирование деформирования и разрушения образцов соляных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2014. — № 7. — С. 74–81.
5. Захаров В. Н., Еременко В. А., Федоров Е. В., Лагутин Д. В. Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли на Илецком месторождении // Горный журнал. — 2018. — № 2. — С. 41–47.
6. Map3D. Available at: <http://www.vap3d.com/>
7. Rocscience. Available at: <https://www.rocscience.com/>
8. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, 1974, 6(4): pp. 183–236.
9. Barton N. Application of Q-System and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses. Workshop on Norwegian Method of Tunneling. New Delhi, 1993. pp. 66–84.
10. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Trans. S. Afr. Inst. Min. Metal.*, 9(10). 1990.
11. Terzaghi K., Peck R. B. Soil mechanics in engineering practice. Wiley, New York. 1967.
12. Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Бабкин Е. А. Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 1. — С. 5–17.
13. Лушников В. Н., Сэнди М. П., Еременко В. А., Коваленко А. А., Иванов И. А. Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 11–16.
14. Козырев А. А., Семенов И. Э., Земцовский А. В. Определение безопасных параметров приповерхностного целика при подземной выемке запасов перспективного месторождения Партомчорр в Хибинском массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 5. — С. 30–39.
15. Еременко В. А. Курсы подготовки геомехаников (геотехников), геологов и горных инженеров по программам Map3D и Rocscience (Dips, RocData, Unwedge) // Горный журнал. — 2018. — № 2. — 2 с.
16. Bahrani N., Hadji-georgiou J. Influence of Stope Excavation on Drift Convergence and Support Behavior: Insights from 3D Continuum and Discontinuum Models // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. pp. 1–19.
17. Paul A., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach // *Current Science*, 114(10), 2018. pp. 2167–2174.
18. Souley M., Renaud V., Al Heib M., Lahaie F., Nyström A. Numerical investigation of the development of the excavation damaged zone around a deep polymetallic ore mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, 2018. pp. 165–175&
19. Cheng G., Chen C., Li L., Dai F., Ren B. Numerical modelling of strata movement at footwall induced by underground mining // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108, 2018. pp. 142–156. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Еременко Виталий Андреевич — доктор технических наук, профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладной геомеханики и конвергентных горных технологий» МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: [prof.eremenko@gmail.com](mailto:prof.eremenko@gmail.com).

## Stress state modeling of coaxial three-level open stoping in Map3D

Eremenko V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor of Russian Academy of Sciences, Director of the Research Center

«Application of Geomechanics and Mining of Convergent Technologies», Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

**Abstract.** The article describes the research results of stress state modeling in the geotechnical system composed of an underground mine and adjacent rock mass in Map3D in case of coaxial concurrent stoping on three mine levels. The rock mass quality rating (by Barton) is determined for the methods of mining with shearing and drilling-and-blasting. The numerical model is calibrated using the data of actual in-situ rock mass mapping and outcomes of Dips and RocData software. Feasibility of concurrent stage-by-stage stoping with rib pillars on three mine levels is sufficiently accurately determined at the mine planning and design stage by numerical modeling of stress state in the rock mass-and-mine system in Map3D. The determined Q-index of rock mass (by Barton) under shearing and drilling-and-blasting is used in calibration of the developed numerical model together with the data of in-situ rock mass mapping and outcomes of software Dips and RocData. The proposed approach is recommended for the geotechnical assessment of rock mass subjected to mining using different methods—with artificial and natural support of mined-out stopes, as well as with caving. Under difficult ground conditions, higher rock pressure, rush of water and high-density jointing, the model is calibrated based on the data of geotechnical assessment and then is refined using Rocscience software—Dips and RocData.

**Key words:** stoping, numerical modeling, rock mass quality rating, Q-index, Barton's system, room, level, horizon, rib pillar—RP.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-5-17

## REFERENCES

1. Mery okhrany shakhty ot zatopeniya i ob'ektov na zemnoy poverkhnosti ot vrednogo vliyaniya gornyykh rabot [Mine flood prevention and protection of ground surface objects from impact of mining], Perm, Galur-giya, 2007, 85 p.
2. Sytnik E.V., Zlebova A.E. Prognoznaya otsenka vliyaniya razrabotki mestorozhdeniy kaliynykh soley na sostoyanie poverkhnostnykh i podzemnykh vod [Predictive estimate of influence of potash salt mining on surface and ground water], *Gornyy zhurnal*. 2014, no 2, pp. 97–101. [In Russ].
3. Protosenya A.G., Verbilo P.E. Otsenka prochnosti blochnogo massiva metodom chislennogo modelirovaniya [Strength assessment of jointed rock mass by numerical modeling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2016, no 4, pp. 47–54. [In Russ].
4. Ermashov A.O. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya obraztsov solyanykh porod [Numerical modeling of deformation and failure of salt rock specimens]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2014, no 7, pp. 74–81. [In Russ].
5. Zakharov V.N., Eremenko V.A., Fedorov E.V., Lagutin D.V. Geomekhanicheskoe obespechenie proektirovaniya otrabotki zapasov kamennoy soli na lletskom mestorozhdenii [Geomechanical support of salt rock mine planning and design at the llets deposit], *Gornyy zhurnal*. 2018, no 2, pp. 41–47. [In Russ].
6. Map3D. Available at: <http://www.vap3d.com/>
7. Rocscience. Available at: <https://www.rocscience.com/>
8. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, 1974, 6(4): pp. 183–236.
9. Barton N. *Application of Q-System and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses. Workshop on Norwegian Method of Tunneling*. New Delhi, 1993. pp. 66–84.
10. Laubscher D.H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Trans. S. Afr. Inst. Min. Metal.*, 9(10). 1990.
11. Terzaghi K., Peck R.B. *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley, New York. 1967.
12. Eremenko V.A., Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Babkin E.A. Otsenka sostoyaniya massiva gornyykh porod na rudnikakh ZF OAO «GMK «Noril'skiy nikel'» [Rock mass assessment in mines of NorNickel's Polar Division], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 1, pp. 5–17.
13. Lushnikov V.N., Sendi M.P., Eremenko V.A., Kovalenko A.A., Ivanov I.A. Metodika opredeleniya zony rasprostraneniya povrezhdeniya porodnogo massiva vokrug gornyykh vyrabotok i kamer s pomoshch'yu chislennogo modelirovaniya [Numerical modeling procedure to determine damaged zones in rock mass around stopes], *Gornyy zhurnal*. 2013, no 12, pp. 11–16. [In Russ].

14. Kozyrev A. A., Semenov I. E., Zemtsovskiy A. V. Opredelenie bezopasnykh parametrov pri poverkhnostnogo tselika pri podzemnoy vyemke zapasov perspektivnogo mestorozhdeniya Partomchorr v Khibinskoy massive [Safe parameters of near-surface pillar in underground extraction of promising reserves of the Partomchorr deposit in the Khibiny Massif], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 5, pp. 30–39. [In Russ].

15. Eremenko V. A. Kursy podgotovki geomekhanikov (geotekhnikov), geologov i gornyykh inzhenerov po programmam Map3D i Rocscience (Dips, RocData, Unwedge) [Training courses for geomchanics (geotechnical engineers), geologists and mining engineering on Map3S and Rocscience (Dips, RocData, Unwedge) software suites], *Gornyy zhurnal*. 2018, no 2, 2 p. [In Russ].

16. Bahrani N., Hadjigeorgiou J. Influence of Stope Excavation on Drift Convergence and Support Behavior: Insights from 3D Continuum and Discontinuum Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. pp. 1–19.

17. Paul A., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach. *Current Science*, 114(10), 2018. pp. 2167–2174.

18. Souley M., Renaud V., Al Heib M., Lahaie F., Nyström A. Numerical investigation of the development of the excavation damaged zone around a deep polymetallic ore mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, 2018. pp. 165–175&

19. Cheng G., Chen C., Li L., Dai F., Ren B. Numerical modelling of strata movement at footwall induced by underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108, 2018. pp. 142–156.



---

## РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

### ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАЗГРУЗОЧНЫХ ЗОНАХ ПОЙМ РЕК ДЛЯ УСЛОВИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КУСКОВОЙ СОРТИРОВКИ

(№ 1159/11–18 от 12.09.2018; 17 с.)

Хакулов Виктор Алексеевич<sup>1</sup> — доктор технических наук, зав. кафедрой, директор НОЦ Автоматизации геотехнологических систем ИГД СО РАН, e-mail: vkh21@ya.ru, Шаловалов Виталий Александрович<sup>1</sup> — кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: vitalyforit@yandex.ru,

Шогенова Залина Асланбековна<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: shogenova.88@mail.ru,

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова.

Рассмотрены экологически безопасная эксплуатация ресурсов в поймах нагорных рек, совершенствование технологии добычи, регенерации запасов инертных материалов с использованием автоматизированной кусковой сортировки добываемого минерального сырья.

Ключевые слова: поймы рек, регенерации запасов, добыча инертных материалов, паводковый период, гравийно-валунный материал автоматизированная кусковая сортировки, RGB датчик, щебень.

### TECHNOLOGY OF FORMING THE QUALITY OF INERT MATERIALS IN UNLOADING ZONES OF FLOODPLAINS OF RIVERS FOR CONDITIONS OF AUTOMATED LUMP SORTING

Khakulov V.A.1, Doctor of Technical Sciences, Head of Chair, Director of REC Automation of Technical Systems, Institute of Mining SB RAS, e-mail: vkh21@ya.ru,

Shapovalov V.A.1, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, e-mail: vitalyforit@yandex.ru,

Shogenova Z.A.1, Senior Lecturer, e-mail: shogenova.88@mail.ru,

<sup>1</sup> Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, 360004, Nalchik, North Caucasian Federal district, Kabardino-Balkarian Republic, Russia.

The task of forming of different-quality-tions flows of rock mass requires a new approach to selective extraction. This approach is implemented on the basis of a higher level of information support of processes of mining operations. Complication of algorithm of work in the mine when forming flows of different quality of rock mass requires robotization of this process. For the formation of the material composition of streams of different quality rock mass in the production of the nth good use, cyclic or separate processing, it is advisable to use hydraulic-cal excavators equipped with special geophysical equipment and high-precision on-itinerary embedded microprocessor systems.

Key words: rock mass, excavator, highly accurate positioning, microprocessor, algorithm, field, variability of the ore.