

**Е.В. Кузьмин, В.С. Святецкий, А.В. Стародумов,  
А.М. Иоффе, Д.В. Величко**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА НА КОНТУРАХ ВЫЕМОЧНЫХ КАМЕР**

Установлена принципиальная возможность определения величины смещений контуров подземных выработок и камер путем моделирования на основе метода конечных элементов. Приведены теоретическое обоснование использования данного метода, результаты моделирования на примере выемочной камеры подземного рудника по добыче урановых руд и оценка размеров обрушений. Данный метод моделирования состояния массива горных пород позволяет прогнозировать поведение кровли и стенок камер, определять возможные опасные обрушения и может быть использован для определения состояния контуров проектных выемочных камер и поведения пород кровли и бортов, возможной устойчивости или развития обрушений, с оценкой величины вывалов.

Ключевые слова: геомеханика, состояние породного массива, моделирование методом конечных элементов, смещения контуров выемочных камер, обрушения боков и кровли, прогноз устойчивости камер.

**М**ассив горных пород Стрельцовского урановорудного поля представлен весьма разнообразными комплексами. Осадочно-вулканогенный комплекс пород, представленный фельзитами, конгломератами, гравелитами, трахидацитами, базальтами, андезит-базальтами и их лавовыми брекчиями в горнотехническом отношении характеризуется низкой устойчивостью.

Вмещающие породы и руды по крепости отличаются незначитель-

но, обладая высокими прочностными свойствами. Временное сопротивление сжатию изменяется в пределах от 90 до 350 МПа, коэффициент крепости по шкале Протодяконова от 16 до 20 для гранитов, 12–15 для сиенит-порфириров и 12–14 для доломитизированных известняков. Однако на устойчивость руд и вмещающих пород решающее влияние оказывает степень тектонической проработки их.

В соответствии с методикой ВНИМИ в качестве критерия устойчивости по-

Таблица 1

**Критерий устойчивости пород по значению их смещений на контуре поперечного сечения выработки (ВНИМИ [2])**

Категория устойчивости пород	Оценка состояния устойчивости пород	Смещение U, мм		
		Осадочные породы (песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, уголь и др.)	Изверженные породы (граниты, диориты, порфириды и др.)	Соляные породы (каменная соль, сильвинит, карналит и др.)
I	устойчивое	до 50	до 20	до 200
II	среднеустойчивое	св. 50 до 200	св. 20 до 100	св. 200 до 300
III	неустойчивое	>>200>>500	>>100>>200	>>300>>500
IV	очень неустойчивое	св. 500	св. 200	св. 500

Таблица 2

**Обобщенные критерии состояния породных массивов**

Категория устойчивости	Оценка состояния устойчивости	Характеристика состояния устойчивости
I	Устойчивое	Отсутствуют заметные смещения и разрушения пород или имеются мелкие локальные разрушения
II	Средне-устойчивое	Незначительное распространение нарушений пород вглубь массива, соответствующие начальной стадии общего развития зоны неупругих деформаций в окружающих выработку породах; возможно нарушение целостности пород в структурно ослабленных зонах с образованием небольших сводов обрушения. Деформации пород носят затухающий характер
III	Неустойчивое	Дальнейшее развитие зон деформаций и нарушений пород со значительными смещениями свободного контура выработки. Постепенный подход к слабо затухающим во времени деформациям пород
IV	Очень неустойчивое	Вокруг выработки развиваются большие зоны неупруго деформирующихся пород с их разрушением. Смещения свободного (или при малом отпоре крепи) контура выработки носят слабо затухающий и незатухающий характер

род принимаются величины их смещений на контуре поперечного сечения выработки, за весь срок ее эксплуатации без крепи, согласно разделению горных пород по устойчивости, табл. 1 [1].

Отнесение выработки к той или иной категории устойчивости следует проводить по абсолютному значению максимальных смещений пород на контуре поперечного сечения. Обоб-

щенные критерии этих состояний приведены в табл. 2 [2].

Основные исходные параметры очистных блоков, их элементов и предельные обнажения пород при камерных системах разработки месторождений Стрельцовского рудного поля приведены в табл. 3.

Для расчетов по оценке устойчивости незаложенных подземных выработок использованы современные

Таблица 3

**Параметры выемочных камер**

Параметры	Норма
Высота блока, м, до	60
Высота камеры	по высоте рудного тела (по высоте этажа)
Длина блока, м, не более	100
Длина камеры, м	от 12 до 50
Ширина блока	по мощности рудной залежи
Ширина камеры	зависит от мощности рудного тела,
Высота подэтажа, м	от 10 до 20 (исходя из морфологии рудных тел)
Ширина рудных МКЦ, м	от 12 до 15
Ширина породных МКЦ, м	определять по приложению 1

программные продукты, базирующиеся на методике Хука-Брауна [3]:

*Phase 2* – эласто-пластичная реализация метода конечных элементов, позволяющая рассчитывать нагрузки и смещения вокруг подземных выработок и полостей, может быть использована для решения широкого спектра задач, возникающих при отработке месторождений полезных ископаемых.

*RockData* – универсальный программный инструмент, который может быть использован для всестороннего анализа прочностных характеристик горных пород. В пакет *RockData* входит также база данных свойств горных пород *RockProp*, которая также может использоваться для хранения пользовательских результатов исследования свойств горных пород.

*Unwedge* – программный продукт, используемый для простой интерактивной оценки геометрии и устойчивости вывалов, образуемых пересекающимися структурными нарушениями массива горных пород, окружающих горную выработку.

Хуком и Брауном представлен критерий устойчивости, как обоснование аналитических данных для проектирования подземных горных выработок. Критерий выведен Хуком по результатам исследований хрупкого разрушения ненарушенных пород, с учетом моделей Брауна, описывающих поведение трещиноватой горной породы [5].

Оригинальное соотношение, описывающее критерий Хука-Брауна, записывается в виде:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

где  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_3$  действующие максимальные и минимальные напряжения,  $\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие,  $m$  и  $s$  – константы, зависящие от типа материала,  $s = 1$  для ненарушенного массива.

## Обобщенный критерий Хука-Брауна

Соотношение напряжений, действующих в массиве, описывается следующей формулой:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

где  $m_b$  – сниженное значение константы массива, определяемое по выражению

$$m_b = m_i e^{\left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right)}, \quad (3)$$

где  $s$  и  $a$  – константы для горных пород, задаваемые соотношениями

$$s = e^{\left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right), \quad (5)$$

$D$  – фактор, зависящий от степени нарушенности горного массива, вызванной взрывными повреждениями и разгрузкой напряжений, изменяемый от 0 – для цельного горного массива и до 1 – для весьма нарушенного массива.

Нормальные сжимающие и растягивающие напряжения определяются через главные напряжения по уравнениям, описанным Балмером [4]

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \frac{d\sigma'_1 / d\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1 / d\sigma'_3 + 1} \quad (6)$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1 / d\sigma'_3}}{d\sigma'_1 / d\sigma'_3 + 1} \quad (7)$$

## Модуль деформации

Модуль деформации для  $\sigma_{ci} \leq 100$  МПа задается следующим соотношением:

$$E_m = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{(GSI-10/40)} \quad (8)$$

Для  $\sigma_{ci} > 100$  МПа соотношение будет следующим:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{(GSI-10/40)} \quad (9)$$

Одним из основных показателей, используемых данной методикой, является показатель степени нарушения, сцепления блоков-отдельностей породного массива между собой – GSI, значения которого приведены в табл. 4 [5].

Расчеты геомеханических моделей выполнены на базе метода конечных элементов в соответствии с исходными данными, приведенными в табл. 1. В качестве исходных данных приняты параметры залегания рудных тел на месторождениях Аргунское и Жер-

ловое, проектируемых к отработке Рудником № 6. Рудные тела, залегающие с крутым падением и мощностью зонами до 50 м сконцентрированы на небольшом участке, протяженностью менее 1000 м, шириной – от 50 до 200 м, с крутым падением.

В пределах горизонтов +380 – -30, для панелей 1, 2, 3, 4 и геологических блоков 9, 10, 11, 17, 23, 24 С1, разработаны и построены геомеханические модели, по вертикальным разрезам, полученным через 2–5 м. Высота блоков находится в пределах 17–60 м, ширина составляет 5–21 м, угол падения лежачего и висячего боков изменяется от 500 до 690. Общее число

Таблица 4

**Определение сцепления блоков – отдельностей массива между собой – параметра GSI**

	Состояние поверхности обнажения				
	Очень хорошее	Хорошее	Среднее	Плохое	Очень плохое
<b>Структура</b>	Ухудшение состояния поверхности →				
 Ненарушенная или массивная – ненарушенная блоковая или массивная с несколькими редкими нарушениями, расположенными на большом расстоянии	90	80	70	N/A	N/A
 Блочная – хорошо сцементированная ненарушенная горная масса, состоящая из кубических блоков, образованных тремя пересекающимися наборами трещин	80	70	60	50	40
 Сильно блочная – сцементированная, частично нарушенная масса с многогранными, угловатыми блоками, образованными 4 и большим количеством систем трещин	70	60	50	40	30
 Блочная/нарушенная/слоистая – сложенная угловатыми блоками, образованными большим числом трещин. Присутствие горизонтальных слоев или сланцев	60	50	40	30	20
 Дезинтегрированная – слабосцементированная, сильно нарушенная горная масса, состоящая из угловатых и круглых фрагментов пород	50	40	30	20	10
 Слоистая/разделенная – небольшое количество блоков ввиду сильной слоистости или наличия поверхностей сдвига	N/A	N/A	30	20	10

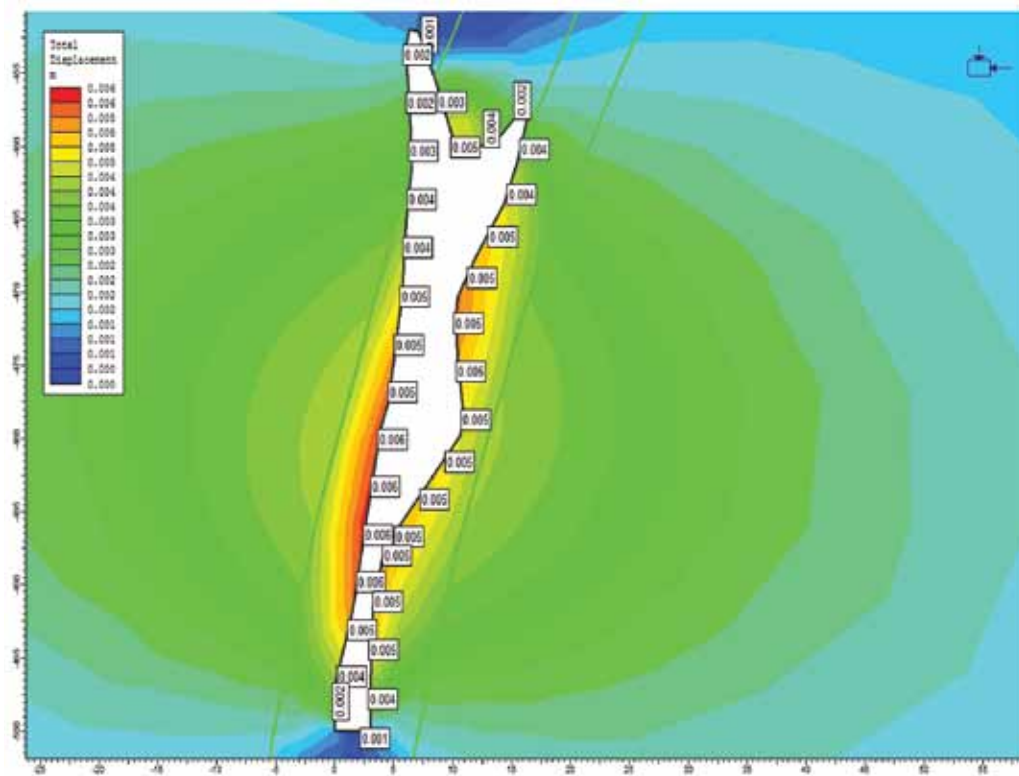


Рис. 1. Полные смещения по сечению 19

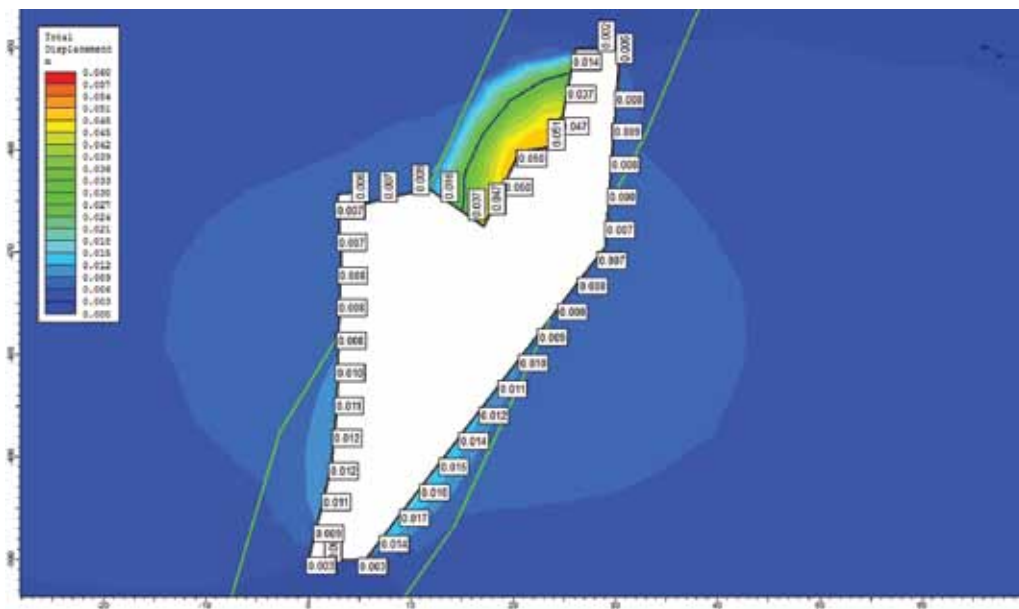


Рис. 2 Полные смещения по сечению 34

моделей составило около 650, наиболее наглядная часть из них с результатами расчетов приведена на рис. 1–6.

По построенным моделям принятых вертикальных разрезов проведены многовариантные расчеты, с анализом напряженно-деформированного состояния массива (НДС) и смещений породного массива в окрестности выработок, определены значения коэффициента запаса по контуру проектных выработок.

### Анализ результатов моделирования НДС и смещений породного массива

1) Панель 1 блок 4С1 гор.+270 (рис. 1, 2, 3), вертикальный разрез: высота камеры 17 м, ширина 13,7 м; вмещающие породы относятся к 4-й категории устойчивости (ВН),  $GSI = 30$  (по табл. 4).

По результатам моделирования установлено:

- максимальные напряжения по потолочине  $\sigma_1 = 5,9$  МПа (рис. 1);

- максимальные смещения поисячему и лежащему боку 19–15 мм,
- коэффициент запаса поисячему боку составляет  $K_3 = 0,96–1,0$ ,
- коэффициент запаса по потолочине  $K_3 = 0,93$ .

Соответственно, поисячему боку и потолочине камеры будут развиваться обрушения.

Панель 1 блок 4С1 гор. -30 (рис. 4), высота камеры 60 м, ширина 6 м; вмещающие породы относятся к 3-ей категории (НУ),  $GSI = 40$ .

По результатам моделирования установлено:

- максимальные напряжения по потолочине составляют  $\sigma_1 = 19$  МПа (рис. 4); – максимальные смещения поисячему боку изменяются снизу вверх 50–102 мм, (в центральной части) до 48 мм,
- максимальные смещения по лежащему боку снижаются снизу вверх от 59 до 24 мм,
- по потолочине смещения незначительны, составляют всего 9 мм.

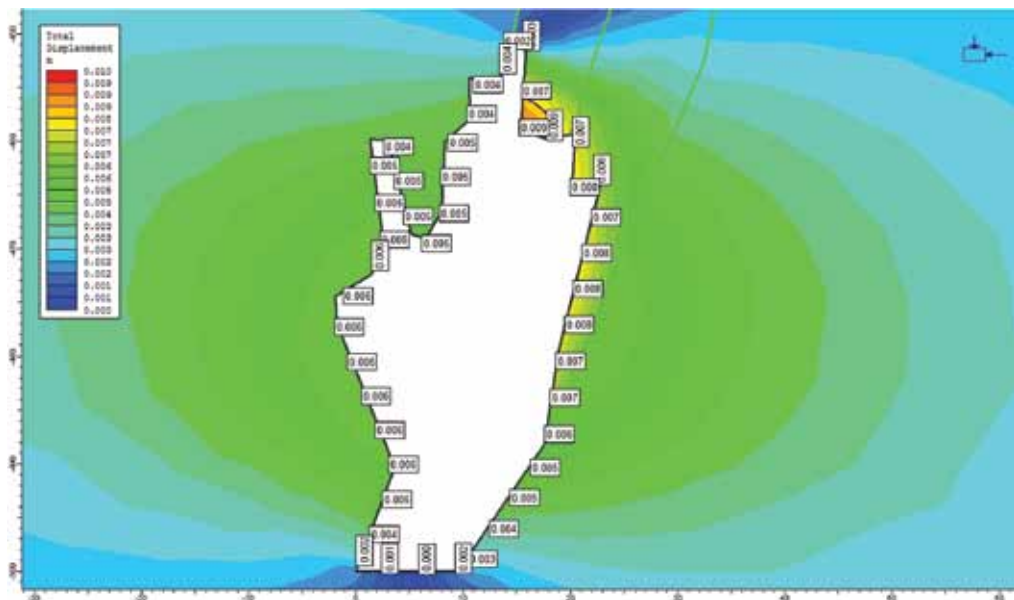
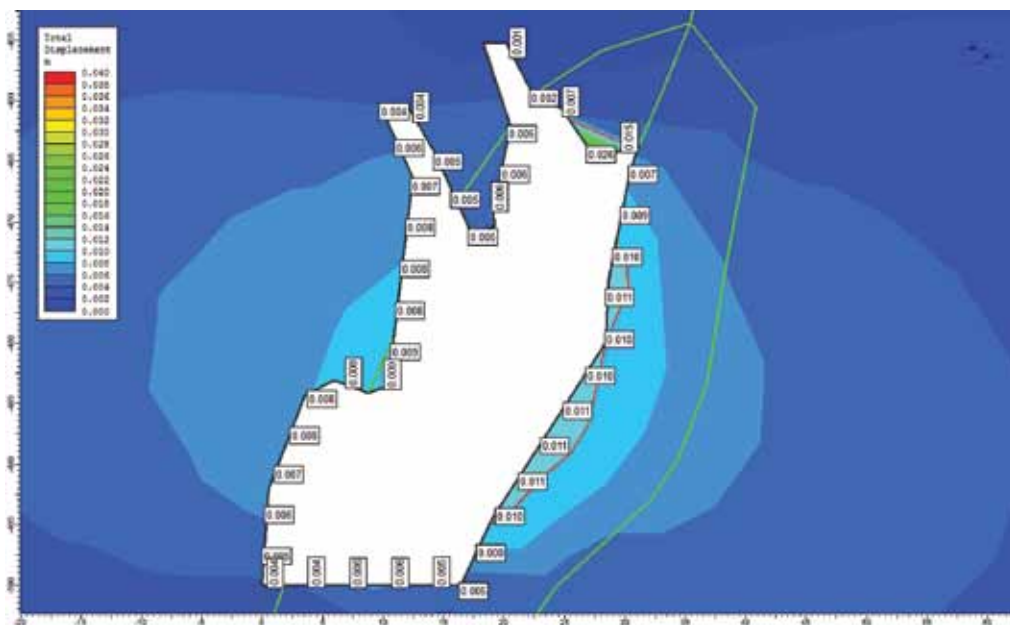


Рис. 3. Полные смещения по сечению 44



**Рис. 4. Полные смещения по сечению 73**

Таким образом устойчивость потолочины и лежачего бока обеспечивается, по центральной части висячего бока будет развиваться затухающее во времени обрушение пород (рис. 4).

Выполнено моделирование, которое показало, что с учетом воздействия взрывов устойчивость висячего бока практически по всей высоте резко снижается, поскольку смещения достигают предельных значений для категории НУ и составляют 190 мм; устойчивость потолочины сохраняется, поскольку ее смещения не превышают 17 мм.

Панель 3 блок 11С1 гор. 270 (рис. 6), высота камеры 60 м, ширина 13,7 м; вмещающие породы относятся к 3-ей категории (НУ), GSI = 40. Максимальные смещения по висячему боку достигают 171 мм и лежачему боку – 80 мм, по потолочине смещения не превышают 27 мм. При высоте камеры 28 м и ширине 11,2 м смещения по бокам составляют 22–18 мм, по потолочине -8 мм. При высоте 50 м и ши-

рине 16,1 м, гор. 330. Максимальные смещения по висячему боку достигают 118 мм и лежачему боку – 61 мм, по потолочине смещения не превышают 25 мм. Таким образом при высоте камеры 50–60 м устойчивость висячего бока не обеспечивается.

Панель 6 Блок20С1 гор. 380 (рис. 7), высота камеры 57 м, ширина 15,2 м; вмещающие породы относятся к 3-ой категории (НУ), GSI = 40.

Смещения по висячему боку снизу вверх изменяются в интервале 79–200–154 мм, по лежачему боку не превышают 9 мм, по потолочине –34 мм. Устойчивость висячего бока камеры не обеспечивается. На начальном этапе выпуска руды смещения постепенно возрастают до 9 мм. При GSI = 30 смещение боков резко возрастает до 830 мм уже на начальном этапе выпуска руды.

Анализ состояния контуров камер в различных сечениях выполнен для множества сечений. При этом выявлены участки, наиболее подверженные



Рис. 5. Полные смещения по сечению 102

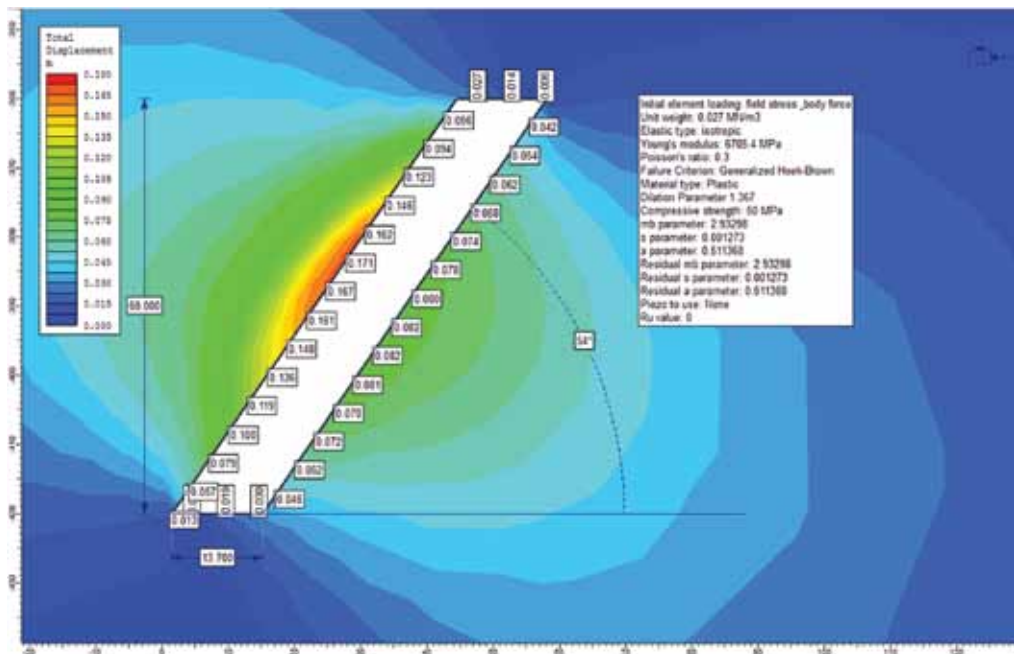
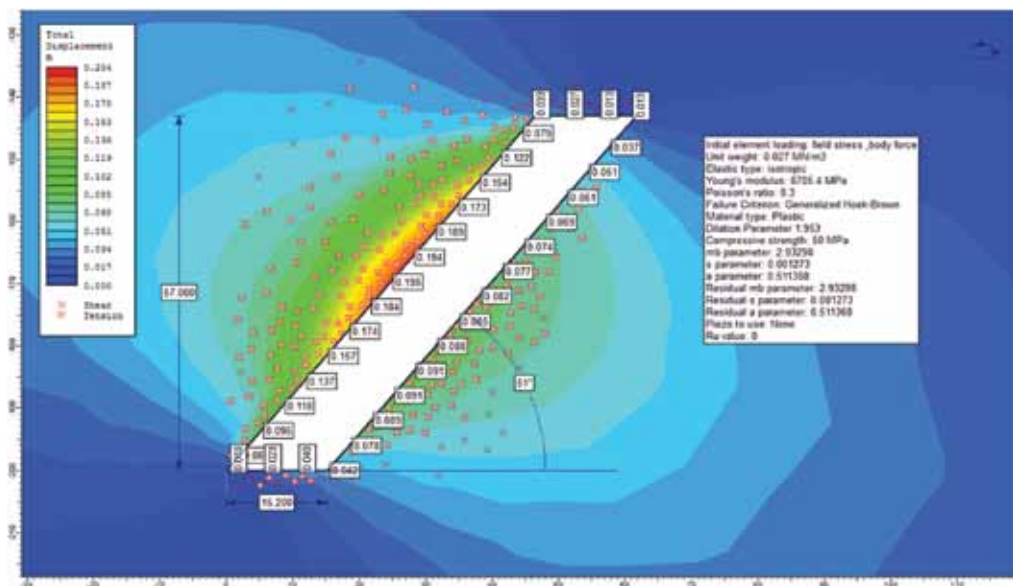


Рис. 6. Блок 11 С1 3 панель горизонт +270





**Рис. 7. Блок 20С1 6 панель горизонт +380**

возможному обрушению, результаты анализа приведены в выводах.

### **Выводы**

1. В результате анализа геомеханического состояния пород на контурах выемочных камер очистных блоков Рудника № 6 установлено, что многие участки (разрезы) имеют смещения, превышающие 100 мм, означающие высокую вероятность обрушения пород кровли и боков по контурам камер.

2. В интервале от 39 до 82 сечения условия устойчивости потолочины заметно ухудшаются. Причем, наиболее неустойчивы участки потолочины, имеющие выступы. Так, по сечению 39 смещения на выступе достигают 109 мм, а по сечению 82 – 123 мм.

При такой величине смещений участки потолочины относятся к неустойчивым, что приведет к быстрому развитию деформаций и их обрушению.

3. Стенки камеры практически по всей длине сохраняют устойчивость. Максимальные смещения по стенкам достигают 6–20 мм. Причем, минимальные значения смещений характерны для участков стенок вне зоны влияния разлома, максимальные – в зоне его влияния.

4. Ширина камеры изменяется от 2–12 м до 30 м, что свидетельствует о невозможности развития процесса самообрушения. Это подтверждается результатами расчета по двум методам – Д. Лобшира (ширина камеры должна быть не менее 40 м) и Хука-Брауна на основе МКЭ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Методические указания по определению физико-механических свойств и трещиноватости горных пород... А-96735. Фонды предприятия –разработчика 1981.

2. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94–80. 2012.

3. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002

Edition. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267–271.

4. Balmer G. 1952. A general analytical solution for Mohr's envelope. Am. Soc. Test. Mat. 52, 1260–1271.

5. Hoek E., Karakas A. Practical rock engineering // Environmental and Engineering Geoscience. – 2008. – Т. 14. – № 1. – P. 55–58. **IVIAS**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

Кузьмин Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории,

Святецкий Виктор Станиславович – директор,

Стародумов Алексей Владимирович – зам. директора по производству

Иоффе Александр Менделевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «ВНИПИпромтехнологии»;

Величко Дмитрий Владимирович – старший преподаватель,

Российский государственный геологоразведочный университет

имени Серго Орджоникидзе (МГРИ–РГГУ), e-mail: office@mgri-rggu.ru.

---

UDC 622.272:622.831

## **ESTIMATE OF GEOMECHANICAL STATE PARAMETERS IN STOPE-ADJACENT ROCKS**

Kuz'min E.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory,

Svyatetskii V.S., Director,

Starodumov A.V., Deputy Director for Production,

Ioffe A.M., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,

OJSC VNIPIpromtehnologii;

Velichko D.V., Senior Lecturer,

Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU),

e-mail: office@mgri-rggu.ru.

---

*The author has found it feasible to estimate wall displacements in underground excavations based on finite element modeling. The suggested method is theoretically substantiated, and the modeling results are presented in terms of an underground excavation in a uranium ore mine. Based on the accepted stability conditions, it appears that major portion of roof and sidewalls of the excavation undergoes post-limit displacements verging into the large-scale rock fall. The sizing of the rock falls is given as an index of ore dilution with wall rocks. The presented modeling method for rock mass conditions enables forecasting roof and wall rock behavior and estimating potential hazardous rock falls. This method can be used in assessment of wall conditions in design excavations, behavior of roof and wall rocks, stability potential or caving development with sizing of falls.*

*Key words: geomechanics, rock mass conditions, finite element modeling, excavation wall displacements, sidewall and roof fall, excavation stability forecasting.*

## **REFERENCES**

1. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv i treshchinovatosti gornykh porod... A-96735. Fondy predpriyatiya –razrabotchika (Instructional guidelines on estimate of physico-mechanical properties and jointing of rocks. A-96735. Designer resources), 1981.

2. Podzemnye gornye vyrabotki. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-94–80 (Underground mine workings. Actualized version of Construction Norms and Regulations II-94–80), 2012.

3. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267–271.

4. Balmer G. 1952. A general analytical solution for Mohr's envelope. Am. Soc. Test. Mat. 52, 1260–1271.

5. Hoek E., Karakas A. Practical rock engineering. Environmental and Engineering Geoscience, 2008, vol. 14, no 1, pp. 55–58.