

УДК 623.55

**Чжун Чан, В.И. Голик, Д.А. Мельков**

## **ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*Исследована роль рудных целиков в управлении горным давлением в массиве дискретных пород. Предложена физико-математическая модель состояния массива в процессе техногенного вмешательства. Определены закономерности механизма разрушения целика в зависимости от напряжений. Предложен метод оценки состояния целика с учетом сейсмического коэффициента – отношения полного давления в массиве к давлению без учета сейсмической составляющей.*

*Ключевые слова: горные породы, массив, напряжения, геодинамика, деформация, целики, пролеты, сейсмика, устойчивость, управление.*

**Н**енарушенный горными работами массив горных пород обладает совокупностью напряжений, формирующихся в недрах под воздействием естественных факторов: сил гравитации, движений земной коры и процессов денудации. Техногенное вмешательство в недра характеризуется вторичными напряжениями, возникающими в окрестностях выработок, скважинах, целиках и крепи в результате действия гравитационных и тектонических сил, изменения температуры слоев земной коры, развития горного давления и т.п. факторов.

Деформация пород происходит в результате статических (горное давление) или динамических нагрузок (тектонические деформации), механического нагружения, взрывного, термического, электрического и магнитного воздействий в процессе добычи руд [1].

Динамические явления в подземных выработках представляют собой внезапно возникающее и протекающее с высокой скоростью движение пород, газов или жидкостей, сопро-

вождающееся динамическим эффектом.

Главную роль в управлении горным давлением играют рудные целики и заменяющие их искусственно создаваемые массивы закладки. Их функции сводятся к предотвращению чрезмерного развития зоны неупругих деформаций и обрушения пород. При достаточно большой жёсткости конструкции работают в режиме заданной деформации. При малой жёсткости её смещения велики, поэтому породы зоны неупругих деформаций отслаиваются от окружающих пород, нагружая конструкции в режиме заданной нагрузки. В режиме заданной деформации горное давление тем меньше, чем меньше жёсткость крепи.

При прогнозировании устойчивости массив рассматривается как дискретная среда, образованная несущими балками, плитами или шарнирными блоками, пригруженными гравитационными породными системами.

Параметрами управления состоянием массива являются:  $h$  - высота зоны влияния горных работ на массив,  $m$ ;  $b$  - ширина целика, разделяю-

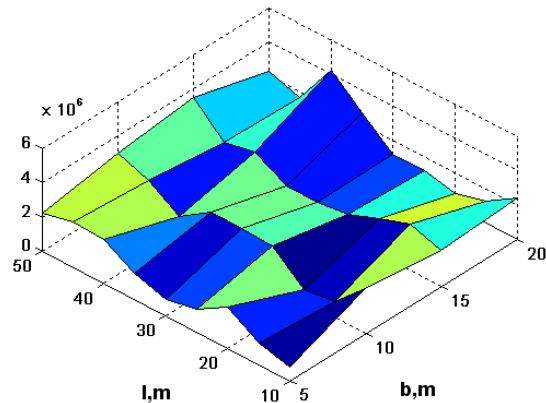
шего массив на участки, м;  $l$  - пролет безопасного участка заклинивания пород, м.

В зависимости от степени деформирования пород в массиве сосуществуют несколько областей разрушения. Вблизи контура возникает зона нарушенных пород с минимальной прочностью. За ней следуют зона ослабленных пород с возрастанием прочности по мере удаления от пустот и зона нетронутых пород. Максимальная сохранность массива обеспечивается при увеличении доли третьей зоны.

Для описания состояния массива в процессе техногенного вмешательства нами предложена физико-математическая модель [2]:

$$\sum_1^n K_n \sum_{\sigma}^{1,2,3} \leq \sigma_{кр} = \begin{cases} \sigma_{кр}^h = \int_{\min}^{L_{\max}} f_x(h = \frac{l}{V}) \\ \text{при } l = \int_{\min}^{\max} d_l (\frac{\sigma_{сж}}{H\gamma} - 1) \\ \sigma_{кр}^b = \int_{\min}^{\max} dx (b = \frac{l\gamma(H - 2/3h)}{\sigma_{сж} - \gamma H}) \end{cases}$$

где  $\sigma_{1,2,3}$  - главные напряжения, МПа;  $K_n$  - факторы структурного ослабления массива;  $\sigma_{кр}$  - критические напряжения в массиве, МПа;  $\sigma_{кр}^h$  - критические напряжения в зоне влияния выработки, МПа;  $\sigma_{кр}^b$  - критические напряжения в несущих элементах, МПа;



**Рис. 1. Динамические напряжения  $\sigma_0$ , МПа при воздействии 9 баллов**

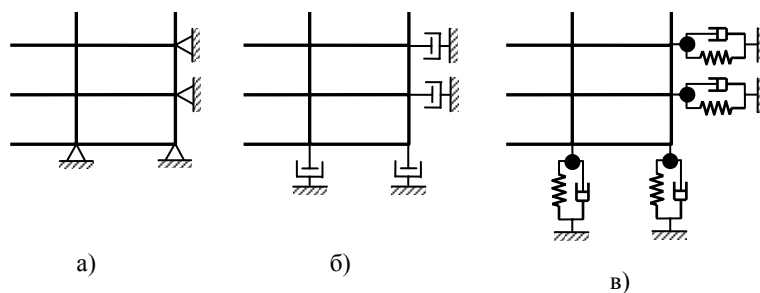
$l$  - пролет плоского обнажения кровли выработки, м;  $V$  - коэффициент устойчивости пород;  $\gamma$  - масса пород, т/м<sup>3</sup>;  $H$  - глубина работ, м;  $\sigma_{сж}$  - предел прочности пород сжатию, МПа.

Состояние массива закономерно ослабляется при уменьшении размеров целиков, увеличении пролетов выработок и превышении горизонтальных размеров породных блоков над вертикальными размерами.

В процессе разработки месторождения создается сложная система целиков и очистных камер, которая обладает определенными свойствами. Как любая система она обладает собственными (резонансными) частотами колебаний.

Зависимость динамических напряжений при воздействии от параметров управления  $l$  или  $b$  иллюстрируется рис. 1 [3].

При работе целиков в динамическом режиме задача прочности целиков описывается системой линейных дифференциальных уравнений второго порядка, и ее решение может быть получено с помощью стандартных



**Рис. 2. Типы границ, слева направо: простая граница; локальная граница; согласующаяся граница со сосредоточенными параметрами**

процедур решения дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Для задач динамического отклика и задач, рассматривающих систему грунт-сооружение, жёсткие границы, такие как породные включения, расположены на существенном расстоянии от рассматриваемой области, особенно в горизонтальном направлении.

Границы смещения элементов подразделяют на группы (рис. 2):

- простые границы – условия нулевого смещения в реальной толще пропускают волны из рассматриваемой области;

- локальные границы – используют вмещающие породы в качестве демпфирующих элементов;

- согласующиеся границы, которые могут поглощать все объёмные и поверхностные волны с различными углами падения и частотами.

Распределение напряжений в целике зависит, в первую очередь, от формы целика (рис. 3). Наибольшая величина сжимающих напряжений

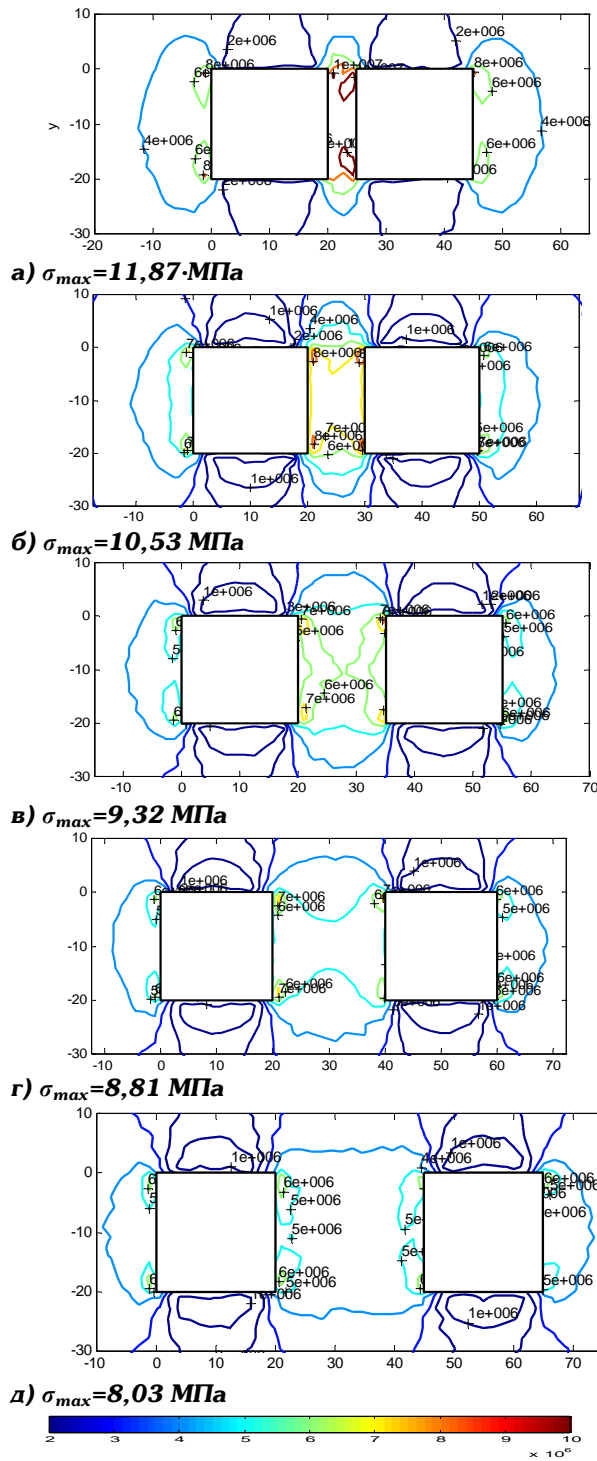
наблюдается вблизи углов камер на контактах целика с боковыми породами. К центру целика сжимающие вертикальные напряжения уменьшаются (рис. 3, д). При уменьшении ширины целика напряжённое состояние изменяется, а у контакта с потолочной образуются клиновидные области с меньшим уровнем напряжений по сравнению с центральной частью целика (рис. 3, л). При определенных условиях область максимальных напряжений в теле целика имеет х-образную форму (рис. 3, в). С дальнейшим уменьшением ширины целика напряжения увеличиваются (рис. 3, а, б).

Полученные распределения напряжений в целике определяют закономерности его разрушения (рис. 4).

Функция, описывающая увеличение напряжений в целике по сравнению с напряжением в нетронутом массиве  $f(b,l)$  для пород с параметрами: плотность  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$ , модуль Юнга  $E = 4,64 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,20$ , представлена нами в виде поверхности (рис. 5).

#### **Напряжения сейсмической волны**

Показатели	Интенсивность, балл		
	7	8	9
Скорость, м/с	0,08	0,16	0,32
Ускорение, м/с <sup>2</sup>	1	2	4
Напряжения, рассчитанные по скорости, МПа	0,47	0,94	1,87
Напряжения, рассчитанные по ускорению, МПа	0,37	0,74	1,49



**Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние целлика**

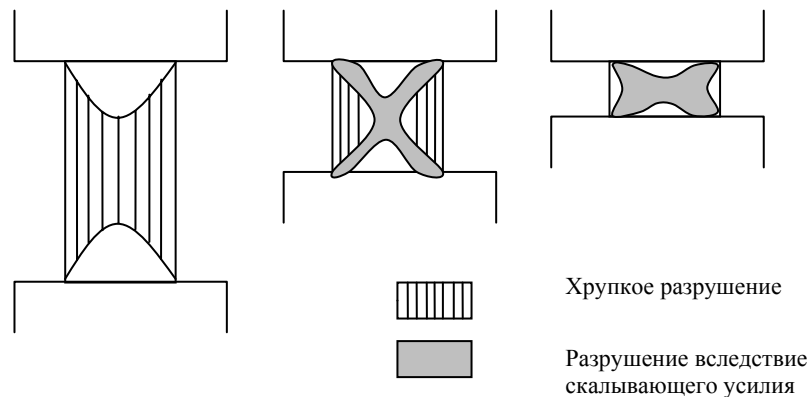
Новый фактор в модели управления массивом представлен нами в виде **сейсмического коэффициента** – отношения полного давления в массиве к давлению без учета сейсмической составляющей. В таблице сведены максимальные значения скоростей и ускорений, соответствующие интенсивности 7, 8 и 9 баллов согласно шкале MSK-64. Рассчитаны соответствующие динамические напряжения для горного массива при  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$ ,  $E = 4,64 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $\mu = 0,2$ .

Расчет параметров разработки производится, исходя из суммы статического и динамического давлений, обусловленных влиянием сейсмической составляющей.

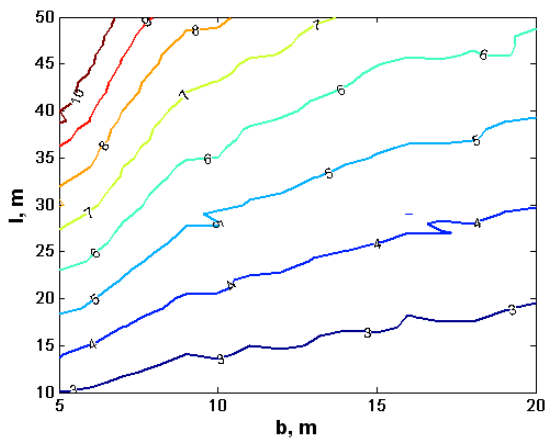
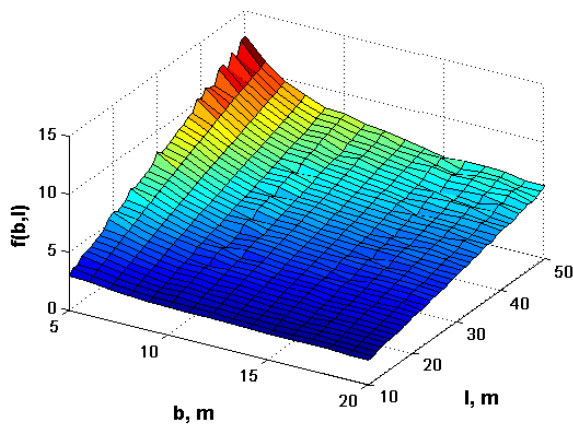
Сейсмический коэффициент представляет собой отношение полного давления к давлению без учета сейсмической составляющей:

$$K_c = 1 + \frac{\sigma_0}{\gamma H}$$

При  $\sigma_0$  0,5 МПа, 1 МПа и 2 МПа для интенсивности 7, 8 и 9 баллов, соответственно, зависимость сейсмического коэффициента  $K_c$  от глубины ведения работ иллюстрируется рис. 6.



**Рис. 4.** Разрушение цемента при различном соотношении его высоты и ширины



**Рис. 5.** Расчетная функция  $f(b, l)$ : а - 3d представление; б - линии уровня

Чем больше частота колебаний, тем меньше размер резонирующего элемента. Так, для низких частот размер воздействующего элемента среды будет большим.

Средние значения динамических напряжений, рассчитанных с помощью МКЭ:

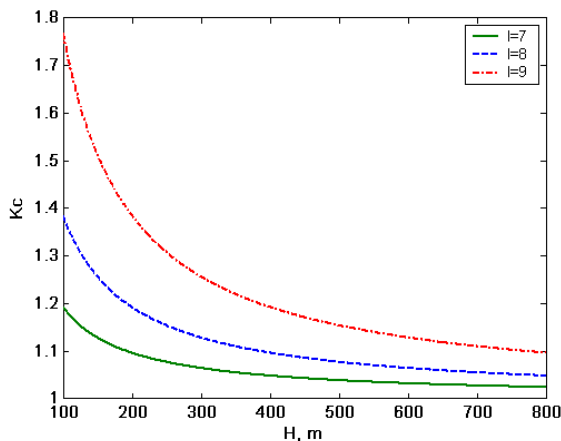
- а)
- для 7 баллов  $\sigma_0 = 0,48 \pm 0,35$  МПа
  - для 8 баллов  $\sigma_0 = 0,95 \pm 0,70$  МПа
  - для 9 баллов  $\sigma_0 = 1,42 \pm 1,05$  МПа

С увеличением интенсивности воздействия разброс значений увеличивается.

Устойчивость массива определяется из соотношения:

$$f(b, l) = \frac{\sigma_{пр} K_\phi(b, h)}{\sigma(H, \rho, l) K_3}$$

- б) где  $K_\phi$  – коэффициент формы;  $K_3$  – коэффициент

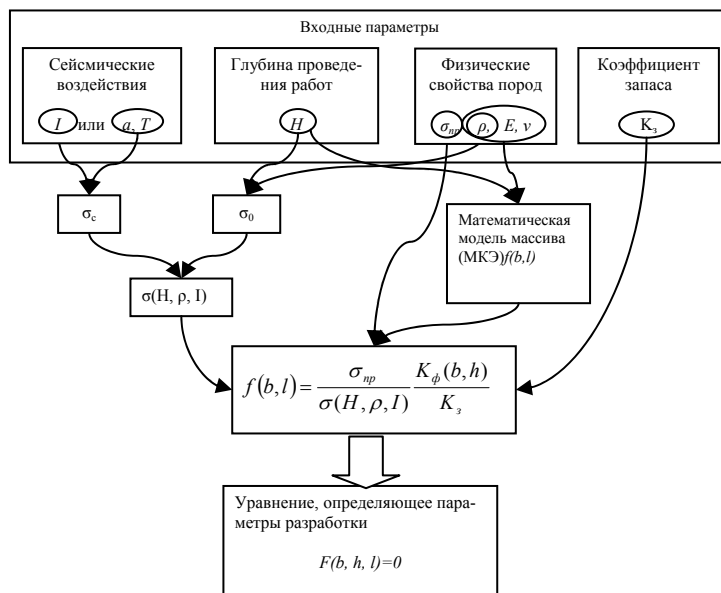


**Рис. 6. Зависимость сейсмического коэффициента  $K_c$  от глубины ведения работ при различной сейсмической интенсивности**

запаса;  $\sigma_{пр}$  – прочность материала целлика;  $\sigma$  – напряжение в массиве.

Взаимодействие параметров управления массивом описывается структурной схемой (рис. 7).

Из моделирования следует, что наибольшее влияние на напряженность массива оказывает величина



**Рис. 7. Геомеханическая модель управления массивом**

пролета обнажения пород кровли.

Эколого-экономическая эффективность обеспечения устойчивого состояния массива в процессе техногенного вмешательства описывается физико-экономи-коматематической моделью:

$$\sum_1^n K_n \sum_{\sigma}^{1,2,3} \leq 1,4 \gamma H \frac{1^{0,8}}{b^{0,6}}$$

$$\Pi_p = Q_{гм} \cdot \Xi_y = \frac{1 - \Pi}{1 - P} \cdot (\Pi_d - C_d) \Gamma$$

$$\Pi = f(b); \text{при } l = K_1(b) + K_2;$$

$$P = f(l)$$

де  $\sigma_{1,2,3}$  – главные напряжения, МПа;  $K_n$  – факторы структурного ослабления массива;  $\gamma$  – масса пород, т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина работ, м;  $b$  – размер целлика, м;  $l$  – размер плоского пролета обнажения пород кровли, м;  $\Pi_d$  – извлекаемая ценность добываемой рудной массы;

$C_d$  – затраты на добычу и переработку рудной массы, руб./т;  $\Pi$  – потери руды, доли ед.;  $P$  – разубоживание руды, доли ед.;  $k_1$  и  $k_2$  – функции величины, описывающей увеличение напряжения в целике при динамической нагрузке.

### Выводы

1. Рудные целики и искусственно создаваемые массивы при достаточно большой жёсткости работают в режиме

заданной деформации, смещения велики, а породы зоны неупругих деформаций отслаиваются от окружающих пород, нагружая конструкции.

2. В широких целиках распределение напряжений по сечению неравномерно, причем в крепких и хрупких породах напряжения концентрируются у стен, а в средней части широкого целика образуется ядро, находящееся в объёмном напряжённом состоянии, что повышает несущую способность целика.

3. Природные гравитационные и тектонические процессы и технологически наведенные напряжения имеют волновую природу и могут быть оптимизированы на основании результатов исследований их природы и параметров.

4. Зависимость полного давления в массиве от сейсмической составляющей описывается коэффициентом сейсмичности в виде отношения статических напряжений горных пород к динамическим.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В. И., Пагиев К.Х. Энергосберегающие технологии добычи руд.- Владикавказ: Терек, 1996.- 372 с.

2. Голик В.И., Разоренов Ю.И. Проектирование горных предприятий.- Новочеркасск: УПЦ «Набла».

3. Мельков Д.А. Использование метода конечных элементов для решения задач управления массивом. Горный информационно-аналитический бюллетень. МГТУ.М.; 2008.№12. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Чжун Чан – Китайский геологический университет (Пекин), , clockzc@mail.ru.

Голик В.И. – профессор, доктор технических наук, Центр геофизических исследований РАН, г.Владикавказ, РСО - Алания, v.i.golik@mail.ru.

Мельков Д.А. – кандидат технических наук, Центр геофизических исследований, г.Владикавказ, РСО- Алания, melkovd@mail.ru.



#### ДИССЕРТАЦИИ

#### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРО РАН</b>			
КОРОБОВ Станислав Владимирович	Исследование взаимодействия нефтегазовых скважин с геокриологической средой с целью совершенствования технологий их консервации в северных регионах	25.00.36	к.т.н.