

Б.Р. Раимжанов, В.В. Морозов, Б.Б. Бекмурзаев, А.В. Марков
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА
ПРИ ОТРАБОТКЕ КРУТОПАДАЮЩЕГО РУДНОГО ТЕЛА
ПОД ОХРАНЯЕМОЙ ЗОНОЙ

Исследовано напряженно-деформированное состояние массива и возникшие деформации при отработке крутопадающих рудных тел под охраняемой зоной. Выполнено приведение физико-механических свойств от образца к массиву с учетом трещиноватости, тектоники и других ослабляющих факторов. Определен размер безопасного целика, обеспечивающего устойчивое состояние массива горных пород под поселком.

Ключевые слова: напряжения, деформации, рудное тело, массив, трещиноватость, метод конечных элементов, охранная зона, целик.

Рудное тело относится к виду жильных и характеризуется выдержанностью параметров простирания и падения. Жила имеет простирание на западо-северо-запад и опирается восточным флангом в тектонический разлом Центральный.

Поселок расположен над западным флангом жилы. Вмещающие породы для жилы характеризуются как устойчивые и представлены граносиенитами рогообманково-биотитовыми, крупнозернистыми, порфиридовидными магматического происхождения (далее по тексту – граносиениты).

Над массивом коренной породы расположены породы четвертичных отложений, сложенные глинами, суглинками и супесями. В зоне поселка мощность рыхлых отложений колеблется в пределах от 8 до 22 м.

Плотность для рыхлых отложений (по глине) принята: $P = 2310 \text{ кг/м}^3$.

Механические характеристики коренной породы представлены в табл. 1 [1].

В целом на месторождении выявлено 5 систем трещин, разделяющих его на три типа участков (табл. 2). Наиболее частые углы падения трещин: от 210 до 400 и от 610 до 800.

Крупные тектонические разломы расположены на юго-востоке от рудного тела 2а. На руднике были проведены измерения напряжений в массиве. Средние значения напряжений приведены в табл. 3, при этом максимальное напряжение действует в крест простирания рудных тел.

Для получения механических свойств пород в массиве необходимо учесть основные факторы, влияющие на прочность.

Таблица 1

Механические характеристики граносиенитов в образце

Плотность P , кг/м ³	Пределы прочности		Козф. креп. по Протодья- конову, f	Модуль Юнга, E , МПа	Кoeffициенты		
	сжатие, σ_c , МПа	растяжение, σ_p , МПа			хрупкости, $k_{xp} = \sigma_c/\sigma_p$	Пуассона, ν	длительной прочности, ξ
2520	144,9	8,6	14,5	$4,8 \cdot 10^4$	16,8	0,23	0,8

Таблица 2

Характеристика трещиноватости месторождения

Трещиноватость		% от общего	Примечание
тип	модуль W, тр/м		
Слаботрещиноватые	1,4–1,6	90–85	
Среднетрещиноватые	2,6		
Сильнотрещиноватые	>5	10–15	в зоне разломов

Таблица 3

Тектонические напряжения центра месторождения

Направление действия	Величина, МПа
Вертикальное	2,1
Продольное	2,8
Вкрест рудных тел	2,9

Таблица 4

Значение k_c при растяжении

k_c	Характер трещиноватости
0	густая сеть трещин, полностью расчленяющих массив
0,01–0,1	закрытые макротрещины
0,05–0,2	микротрещиноватость

Методология усреднения свойства горных пород (X) комплекса по его (n) составляющим [2, 3]:

- Среднее скалярной или параллельно слоистости тензорной характеристики

$$X = \sum_{i=1}^n XiVi, \quad (1)$$

где Xi , Vi – соответственно, характеристика и объемная доля компонента.

- Тензорное свойство для статистической совокупности

$$\lg X = \sum_{i=1}^n Vi \lg Xi, \quad (2)$$

Используется обратная зависимость для корреляционной связи между пределом прочности и модулем Юнга [2, 3, 4]:

$$E[\text{МПа}] = \left(\frac{\sigma_c [\text{МПа}]}{42} + 1,06 \right) \cdot 10^4. \quad (3)$$

Уточнение расчета крепости по σ_c , кг/см² имеет вид [2]:

$$f = \frac{\sigma_c}{300} + \sqrt{\frac{\sigma_c}{30}}. \quad (4)$$

- Трещиноватость горных пород предопределяет расхождение значений σ_c и σ_p .

Коэффициент хрупкости определим по углу внутреннего трения [2] (ρ):

$$k_{xp} = \frac{4}{\sqrt{1 + tg^2 \rho} - tg \rho}. \quad (5)$$

По В.Д. Слесареву [2, 3], при определении горного давления значение k_c при сжатии не должно превышать значения: 0,35; при растяжении – в зависимости от характера трещиноватости (табл. 4).

В табл. 5 приведены механические характеристики граносиенитов в массиве.

Таблица 5

Механические характеристики граносиенитов в массиве

Плотность P , кг/м ³	Пределы прочности одноосного действия		Крепость по Протолюкко- нову, f	Модуль Юнга E , МПа	Коэффици- ент Пуассо- на, ν
	σ_c , МПа	σ_p , МПа			
2520	34,78	3,25	4,56	$1,888 \cdot 10^4$	0,23

Таблица 6

Допускаемые напряжения для условия прочности потолочены

Определение по пределу прочности	Формула	Значение $[\sigma]$, МПа
На сжатие	$\sigma_c/4$	$34,78/4 \approx 8,7$
На растяжение	$\sigma_p/4$	$3,25/4 \approx 0,81$

Коэффициент бокового распора выражается через коэффициент Пуассона.

$$\chi = \frac{\nu}{1 - \nu}. \quad (6)$$

Для анализа напряженного состояния деформируемых тел в настоящее время широко используются компьютерные программные комплексы, основанные на алгоритмах решения задач механики сплошной среды методом конечных элементов (МКЭ).

Для выполнения работы была использована система COSMOS/Works, интегрированная в среду трехмерного проектирования SolidWorks.

Модель для анализа МКЭ построена в верхней зоне коренных пород, охватывающей выемочное пространство. Влияние наносов учитывается как распределенная по верхней площадке коренных пород пригрузка интенсивности

$$q = \gamma_n \cdot M_0 = 22\,661,1 \cdot 22 = 498\,544 \text{ Па,}$$

$$\text{где } \gamma_n = 2310 \cdot 9,81 = 22\,661,1 \text{ н/м}^3.$$

Кроме того, предварительные расчеты эпюры вертикальных смещений показали (рис. 1), что отношение горизонтальных проекций массива по падению и восстанию должно быть не менее трех, что и было учтено в табл. 6 при построении расчетной схемы.

Так как прочность вмещающего массива должна обеспечиваться не менее чем с четырехкратным запасом по пределам прочности на одноосное растяжение-сжатие, условие прочности можно записать в виде:

$$\chi_1 = ([\sigma] - |\sigma_{\max}|) \geq 0, \quad (7)$$

где $|\sigma_{\max}|$ определено отдельно на растяжение и сжатие (табл. 6); χ_1 – значение невязки условия прочности.

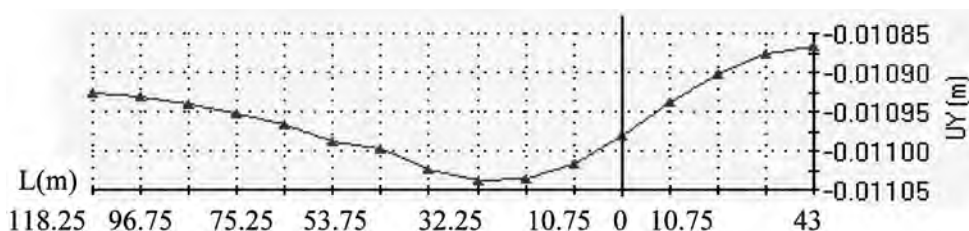


Рис. 1. Зависимость вертикальных смещений поверхности от расстояния (м) до средней вертикали (позиция - 0) сечения выемки вкрест простирания

Условие сохранности поселка можно представить в виде:

$$\chi_2 = ([\varepsilon] - |\varepsilon_{\max}|) \geq 0, \quad (8)$$

где $[\varepsilon] = 3 \cdot 10^{-3}$ – допустимое значение нормальной деформации [1], $|\varepsilon_{\max}|$ – абсолютная величина максимальной деформации на поверхности массива, определяемая анализом модели МКЭ; χ_2 – значение невязки условия охраны поселка.

Оптимальный объем выемки руды соответствует условию:

$$\chi_v = 0. \quad (9)$$

Для модели с потолочиной $B = 62$ м проведены расчеты МКЭ. Получены следующие результаты (табл. 7).

На основании результатов моделирования установлено, массив имеет повышенный запас прочности, что по-

зволяет уменьшить мощность охранной потолочины.

Вторая модель напряженно-деформированного состояния массива рассчитывалась с мощностью охранной потолочины $B = 40$ м (табл. 8).

Результаты исследования МКЭ для модели $B = 40$ м (табл. 9).

Поскольку значение прочности на растяжение отрицательно, следует увеличить мощность потолочины B до величины:

$$40 + (62 - 40) \cdot 0,003 / 0,21 = 40,31 \text{ м.}$$

Следовательно, оптимальный запас прочности будет при мощности охранной потолочины $B = 41$ м.

Для проверки полученного результата была рассчитана модель напряженно-деформированного состояния

Таблица 7

Проверочные данные модели

$\varepsilon_{p,\max} \cdot 10^{+4}$	$\varepsilon_{с,\max} \cdot 10^{+4}$	χ^2	$\sigma_{p,\max}$, МПа	χ_1 , МПа	$\sigma_{с,\max}$, МПа	χ_1 , МПа	V_{\max}^* , мм
+0,021	-0,23	$2,98 \cdot 10^{-3}$	0,63	0,21	-6,32	2,6	11,1

* Примечание: V_{\max} – компонента смещения точек модели, мм.

Таблица 8

Размеры модели МКЭ ($B = 40$ м)

Параметр	Выражение	Значение, м
B (потолочина-целик)		40
Высота слоя отработки с закладкой	$M_k - B$	44
l' (Горизонтальная проекция)	$(M_k - B) / \text{tg} \alpha + m / \sin \alpha$	17,82
L_n	(10)	19
По простиранию	$L + 2 \cdot 2 \cdot L_n$	460
Вкрест простирания по восстанию	$l' / 2 + 2 \cdot L_n$	$8,91 + 2 \cdot 19 \approx 47$
Вкрест простирания по падению	$3 (l' / 2 + 2 \cdot L_n)$	$3 \cdot 47 = 141$
Глубина по коренным породам	$M_k + 2 \cdot L_n$	120

Таблица 9

Проверочные данные модели

$\varepsilon_{p,\max} \cdot 10^{+4}$	$\varepsilon_{с,\max} \cdot 10^{+4}$	χ_2	$\sigma_{p,\max}$, МПа	χ_1 , МПа	$\sigma_{с,\max}$, МПа	χ_1 , МПа	V_{\max} , мм
0,08	-0,25	0,002975	0,845	-0,003	-8,427	0,28	-11,6

Таблица 10

Размеры модели МКЭ ($B = 41$ м)

Параметр	Выражение	Значение, м
B (потолочина-целик)		41
Высота слоя отработки с закладкой	$M_k - B$	43
l' (Горизонтальная проекция)	$(M_k - B)/\text{tg}\alpha + m/\text{sin}\alpha$	17,46
L_n	(10)	19
По простиранию	$L + 2 \cdot 2 \cdot L_n$	460
Вкрест простирания- по восстанию	$l'/2 + 2 \cdot L_n$	$8,73 + 2 \cdot 19 \approx 47$
Вкрест простирания- по падению	$3(l'/2 + 2 \cdot L_n)$	$3 \cdot 47 = 141$
Глубина по коренным породам	$M_k + 2 \cdot L_n$	120

Таблица 11

Проверочные данные модели

$\varepsilon_{p,\max} \cdot 10^{+4}$	$\varepsilon_{c,\max} \cdot 10^{+4}$	χ_2	$\sigma_{p,\max}$, МПа	χ_1 , МПа	$\sigma_{c,\max}$, МПа	χ_1 , МПа	V_{\max} , мм
0,073	-0,249	0,00298	0,755	0,06	-7,157	1,55	-11,6

массива с мощностью охранной потолочины $B = 41$ м.

Размеры исследуемого массива приведены в табл. 10.

Для модели ($B = 41$ м) анализом МКЭ получено (табл. 11).

Выполненный расчет показывает, что при мощности потолочины $B = 41$ м обеспечивается прочность неукрепленного массива и сохранность поселка.

На рис. 2 представлены деформации массива в сечениях по простиранию и вкрест.

Вкрест простирания горизонтальные смещения показаны на рис. 3. Интервал их изменения от +1,44 мм (кровля) до -1,03 мм (почва).

По простиранию горизонтальные смещения показаны на рис. 3. Максимумы их значений не превышают 0,33 мм и приурочены к флангам.

В отличие от рассмотренных выше вертикальных смещений, для анализа состояния прочности массива важна полная величина напряжений.

Эпюры главных напряжений показаны на рис. 4 (красным цветом оконтуривается зона растяжения) и на рис. 5.

Выводы

1. Определена мощность охранной потолочины по коренным породам: 41 м.

2. Построены эпюры: деформированной поверхности, вертикальных напряжений нетронутого массива, вертикальных смещений нетронутого массива вдоль вертикали, вертикальных, горизонтальных смещений массива с выемкой, главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, опорного давления.

3. Анализ модели с мощностью потолочины 41 м показывает, что принятые в ней размеры выемочного пространства и глубина работ соответствуют прочности вмещающего массива горных пород и условию охраны поселка при закладке этого пространства любым доступным материалом.

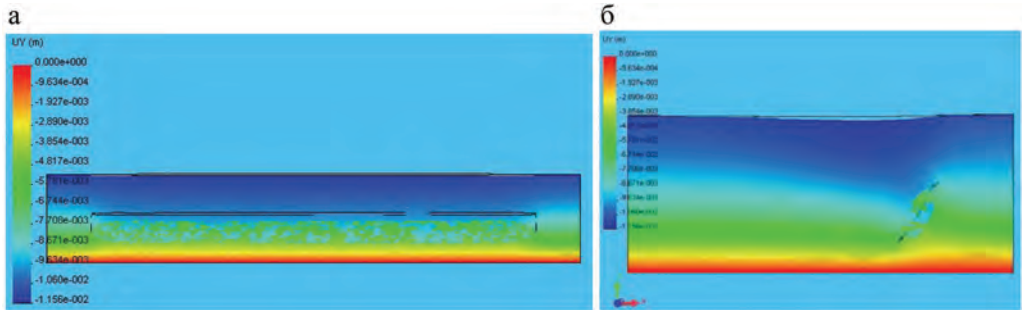


Рис. 2. Деформация поверхности массива в сечении по простиранию (а) и вкрест простирания (б) рудного тела

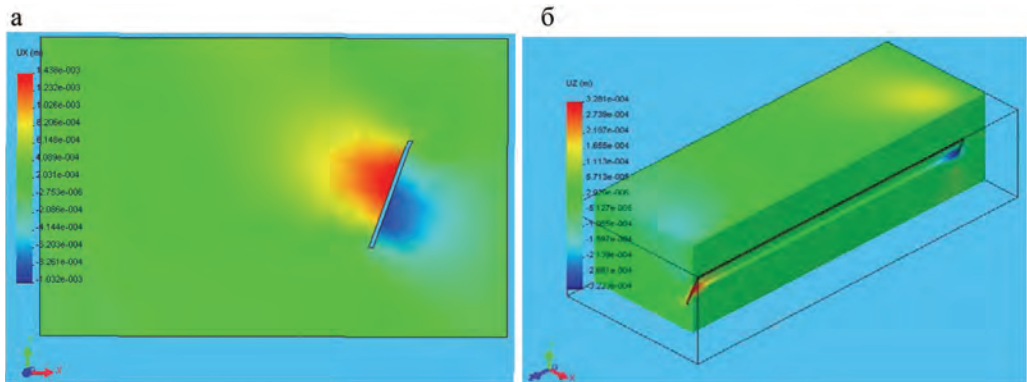


Рис. 3. Эпюра горизонтальных смещений вкрест (а) и по простиранию (б)

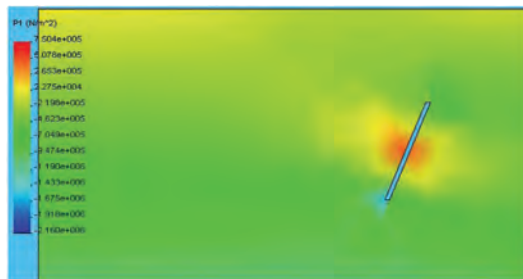


Рис. 4. Эпюра главного напряжения σ_1 . Направлены вкрест выемки

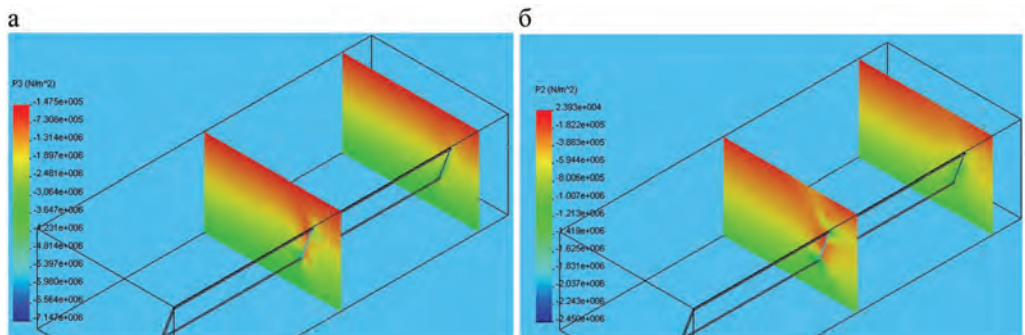


Рис. 5. Эпюра главного напряжения σ_3 . Направлены вкрест выемки (а) и по простиранию выемки (б)

1. Арипова Ф.М. Физико-механические свойства горных пород некоторых месторождений Средней Азии. – Ташкент: Фан, 1977.
2. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. 4. – М.: Недра, 1984. – 360 с.
3. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. 2. – М.: Недра, 1973. – 285 с.
4. Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. Деформируемость и прочность массивов горных пород. – Днепропетровск: НГУ, 2008. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Раимжанов Баходир Раимжанович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке, e-mail: info@georang.uz,
Морозов Валерий Викторович – кандидат технических наук, начальник лаборатории, e-mail: info@georang.uz,
Бекмурзаев Бурибай Бойтураевич – кандидат экономических наук, директор, Марков Анатолий Васильевич – инженер, e-mail: info@georang.uz, ГУП «O'zGEORANGMETLITI».

UDC 622.232

RESEARCH OF THE IS INTENSE-DEFORMED CONDITION OF THE FILE AT WORKING OFF OF ABRUPTLY FALLING ORE BODY UNDER THE PROTECTED ZONE

Raimzhanov B.R.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director on Science, e-mail: info@georang.uz,
Morozov V.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: info@georang.uz,
Bekmurzaev B.B.¹, Candidate of Economical Sciences, Director, Markov A.V.¹, Engineer, e-mail: info@georang.uz, State Unitary Enterprise O'zGEORANGMETLITI, 100070, Tashkent, Uzbekistan.

The is intense-deformed condition of a file and the arisen deformations is investigated at working off of abruptly falling ore bodies under protected zones. Reduction of physicommechanical properties the sample to a file in view of infringement, tectonics and other weakening factors is executed. The size of the safe sight providing a steady condition of a file of rocks under settlement is certain.

Key words: pressure, deformations, an ore body, a file, infringements, a method of final elements, a security zone, a sight.

REFERENCES

1. Aripova F.M. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornyx porod nekotorykh mestorozhdeniy Sredney Azii* (Physico-mechanical properties of rocks at some deposits in Middle Asia), Tashkent, Fan, 1977.
2. Rzhavskiy V.V., Novik G.Ya. *Osnovy fiziki gornyx porod*. Izd. 4 (Basic physics of rocks, 4th edition), Moscow, Nedra, 1984, 360 p.
3. Rzhavskiy V.V., Novik G.Ya. *Osnovy fiziki gornyx porod*. Izd. 2 (Basic physics of rocks, 2nd edition), Moscow, Nedra, 1973, 285 p.
4. Shashenko O.M., Sdvizhkova O.O., Gapeev S.M. *Deformiruemost' i prochnost' massivov gornyx porod* (Rock mass deformability and strength), Dnepropetrovsk, NGU, 2008.

