

УДК 622.274

DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20712

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ РУД МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

© 2016 О.Г. Бурдзиева, к.г.н., В.И. Голик, д.т.н., проф.

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а; e-mail: cgi\_ras@mail.ru

Статья посвящена исследованию состояния рудовмещающих массивов, сложенных несвязанными между собой элементами дискретной среды, в которых под воздействием горных работ развиваются техногенные напряжения. Приведены результаты моделирования поведения массива при изменении параметров напряженности методом фотоупругости. Осуществлено ранжирование напряжений в рудовмещающем массиве по степени опасности разрушения от критических напряжений. Подтверждена эффективность использования геофизических методов прогнозирования поведения массивов, как инструмента природоохранной и ресурсосберегающей разработки рудных месторождений.

**Ключевые слова:** массив, техногенные напряжения, моделирование, фотоупругость, разрушение, геофизические методы, прогнозирование, месторождение, руда.

### Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых сопряжена с техногенным воздействием на земную кору [Бурдзиева, 2009; Бурдзиева, Заалишвили, 2009; Заалишвили и др., 2013а; 2013б]. Большие объемы перемещаемых пород и концентрация добычи на ограниченных площадях способствует формированию напряженно-деформированного состояния земной коры вплоть до ее разрушения с эффектом землетрясения [Бурдзиева и др., 2012].

Техногенная сейсмика – реакция массива на происходящие в его недрах технологические процессы. Соседство наведенных геомеханических процессов с естественными геодинамическими процессами нарушает первоначальное равновесие в верхней части земной коры, что активизирует на земной поверхности оползни, обвалы, просадку грунтов, создает условия для формирования селей и снежных лавин и т.д. [Бурдзиева, 2010; Бурдзиева и др., 2010].

Между масштабами горных работ и параметрами проявления горного давления существует корреляция. При ее определении применяют моделирование поведения горных пород в напряженном состоянии.

При добыче руды в целиках, разделяющих очистные камеры, проявляются остаточные деформации горных пород, способные привести к разубоживанию руды заложным материалом, и возникают критические напряжения, угрожающие потерей устойчивости целиков и разрушением массива вплоть до выхода на земную поверхность.

Среди технологий подземной разработки до недавнего времени лидировали варианты с обрушением налегающих пород, обеспечивающие высокие темпы разра-

ботки при сравнительно небольших затратах. Для многих регионов эти технологии оказались неприемлемыми, так как они выводят из сельскохозяйственного оборота земли, которые являются основой продовольственной безопасности России.

Максимальная сейсмическая безопасность обеспечивается при закладке пустот твердеющими смесями. Такие технологии характеризуются хорошими показателями качества руд, но требуют высоких затрат на изготовление твердеющих закладочных смесей. Критическим звеном диверсификации производства становится обеспечение твердеющими смесями для заполнения технологических пустот.

Исследованиями состояния рудовмещающих массивов установлено, что в условиях сложного трехосного сжатия, структурные блоки слагающих массивы пород ведут себя как несвязанные между собой элементы дискретной среды. При изменении величины тензора главных напряжений в незначительных диапазонах угол внутреннего трения адекватно изменяется, что говорит о подвижности и неустойчивости массива.

Такое состояние нарушенного породного массива не отвечает требованиям надежности управления состоянием массива и делает разработку месторождений полезных ископаемых подземным способом технологически некорректной.

Устойчивость скальных массивов определяется уровнем напряжений на контуре очистных выработок. Одно из направлений повышения надежности управления массивом – заполнение пустот равнопрочным монолитным материалом, например, твердеющими смесями.

Выбор параметров твердеющей закладки в каждом конкретном случае требует обоснования, в том числе, геомеханического. Задачей такого рода исследований является определение эффективности технологии с закладкой по сравнению с базовой технологией с открытым выработанным пространством. Одним из методов решения задачи является моделирование поведения массива при изменении параметров напряженности методом фотоупругости [Зуев, 2014].

### **Объекты и методы исследования**

Наиболее сложна отработка запасов руд, локализованных в мощных месторождениях, имеющих выход на земную поверхность. Такие месторождения нередко разрабатывают комбинированным способом, совмещая во времени и пространстве открытый и подземный способы разработки. Основным критерием совмещения является исключение развития напряжений в массивах до критических значений [Golik et al., 2015].

Методика организации исследования включала этапы:

- подбор оптически активных материалов для моделирования и низко модульного материала для имитации закладки в моделях незаложённых камер для установления механизма выхода воронки разрушения в дно карьера;

- разработка устройств, позволяющих нагружать модели под различными углами наклона главного силового вектора, что дает возможность изучать влияние рельефа местности на напряжения в зоне очистных камер и других выработок. Нагрузочные устройства позволяют создавать в моделях различные боковые распоры;

- разработка методики исследования моделей из низкомолекулярных материалов без разрушения при их нагрузке с фоторегистрацией результатов моделирования.

Модели изготавливали из оптически активного материала – полиуретана с це-

ной 1 полосы 7,6 МПа на одну полосу для условий: глубина заложения выработки от дневной поверхности 350 м, объемный вес налегающих пород 3,02 т/м<sup>3</sup>. Для измерения нормального напряжения на контуре выработки  $\sigma_1$  или  $\sigma_2$  достаточно номер порядка полосы умножить на цену полосы. Для выявления устойчивости заданной точки контура анализируется условие прочности:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \geq \sin\delta(\sigma_1 + \sigma_2) + \sigma_{сж} + (1 - \sin\delta),$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – напряжения в точке контура;  $\delta$  – угол внутреннего трения, 30°;  $\sigma_{сж}$  – прочность породы, 1400-1600 МПа при коэффициенте крепости пород 14-16 по Протодьяконову.

Нагрузку моделей производили с учетом коэффициентами бокового распора, что учитывает природные и техногенные особенности залегания месторождений. Так, Тырнаузское месторождение находится в зоне активности системы Эльбруса.

Бока камер испытывают влияние естественных напряжений массива, особенно при соотношении высоты камеры к ее ширине, превышающем 1 (в модели это соотношение принято 70/35=2). На контуре выработки одно из главных напряжений, нормальное к контуру, равно нулю, а другое, касательное к контуру, оценивается количественно.

Напряжения измерены в проекции на вертикальную плоскость и вертикальном разрезе камеры.

Напряжение в натуре:

$$G_H = \gamma H \frac{G_H}{\sigma_E},$$

где  $\gamma$  – плотность руды и вмещающих пород, т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина залегания точки от дневной поверхности, м.;  $\sigma_E$  – напряжение в модели.

Для определения напряжений в любой точке модели используется выражение:

$$\sigma_M = \sigma^{1.0} \times n,$$

где  $\sigma^{1.0} = 0,1$  кгс/см<sup>2</sup> на одну полосу;  $n$  – номер полосы в интересующей точке модели.

В характерных точках модели цифрами указаны номера полос.

Для получения напряжений в модели и в натуре используется выражение:

$$G_H = \gamma H \frac{G_M}{k},$$

где  $G_H$  – напряжение в натуре, МПа;  $G_M$  – напряжение в модели, МПа;  $k$  – коэффициент подобия;  $\gamma$  – плотность руды и пород, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина залегания точки от дневной поверхности.

Исследовали состояние массива при условии:

- боковой распор 0,5; 1,0; 1,5;
- угол наклона главного силового вектора к вертикальной оси  $\alpha = 0$  при каждом

значении бокового распора;

- модуль закладки  $E = 0,1$  МПа, вмещающих пород – 1,4 МПа;
- камеры без закладки и с закладкой.

Анализ нормальных растягивающих или сжимающих напряжений выполняется для свободного контура выработки. На поле изохром в этих местах одно из максимальных напряжений, нормальное к контуру, равно нулю, другое, касательное к контуру, равно номеру полосы, умноженному на цену полосы.

При моделировании состояния выемочных камер без закладки пустот преследуется цель – получить максимальные значения напряжений для обеспечения безопасности совместной разработки. Такой подход правомерен, так как на ряде месторождений заложена сухой закладкой камера при кусковатости до 200 мм может образовать полость высотой около 25 м, т.е. 30% высоты камеры, что грозит опасностью [Амвросов, 2014].

### Результаты исследований

Исследованные варианты управления массивом характеризуются величиной напряжений, измеренных в двух направлениях: камеры и междукамерный целик опытного блока и на вертикальном разрезе камеры.

При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 0,5$  (рис. 1) максимальные напряжения в зонах замков свода и стенках камер равны  $7,6 \times 7,5 = 57$  МПа, а вершине свода потолочины  $7,6 \times 2 = 15$  МПа.

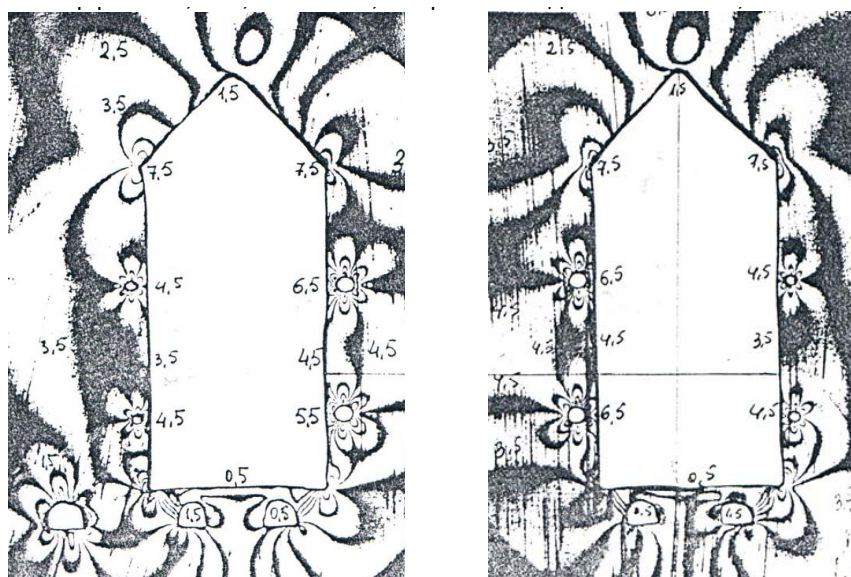


Рис. 1. Поля изохром при коэффициенте бокового распора 0,5:  
слева – открытая камера; справа – заложённая камера

В междукамерном целике максимальные сжимающие напряжения:  $7,6 \times 6,5 = 49$  МПа.

При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,0$  в зонах замков свода, потолочине и стенках камеры (рис. 2) напряжения составляют:  $7,6 \times 6,5 = 49$  МПа. Такие же напряжения и в своде потолочины камеры. В междукамерном целике (МКЦ) макси-



максимальные напряжения снижаются:  $7,6 \times 5,5 = 42$  МПа.

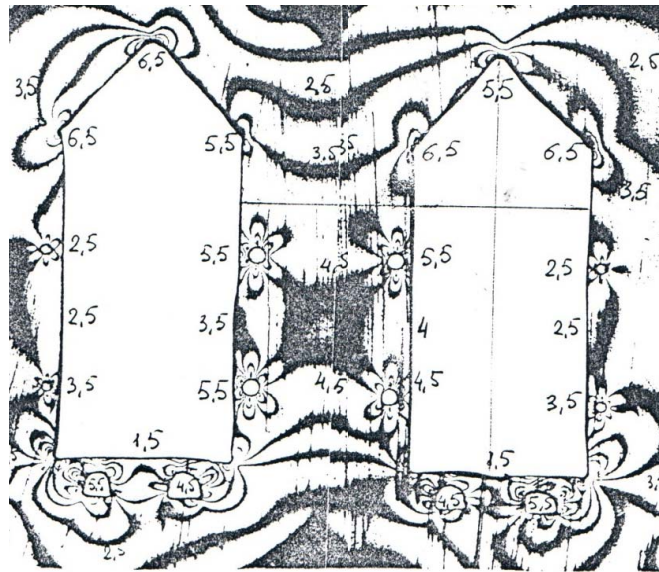


Рис. 2. Поля изохром при коэффициенте бокового распора 1,0: слева – открытая камера; справа – заложенная камера

При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,5$  в зонах замков свода потолочины и стенки камеры (рис. 3) напряжения составляют  $7,6 \times 6,5 = 49$  МПа, а в своде потолочины до  $7,6 \times 8,5 = 64$  МПа против 15 при коэффициенте бокового распоре 0,5.

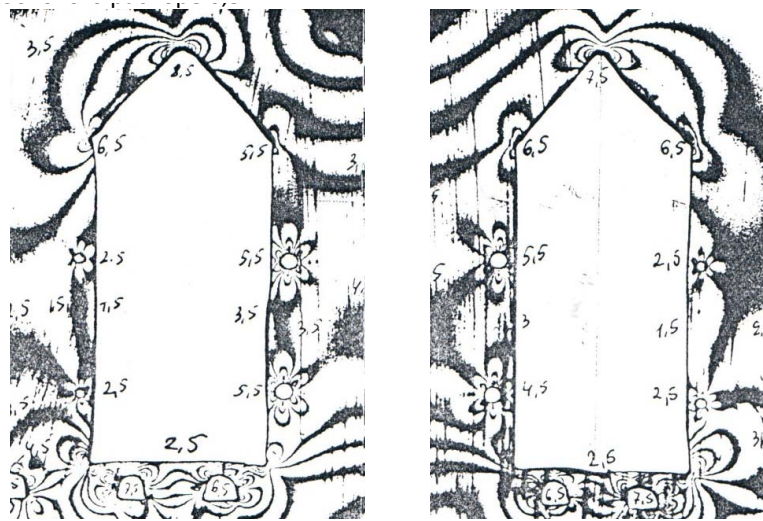


Рис. 3. Поля изохром при коэффициенте бокового распора 1,5: слева – открытая камера; справа – заложенная камера

Характерными зонами максимальных напряжений являются свод потолочины и днище. Измеренные напряжения составили:

- при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 0,5$   $7,6 \times 5,5 = 41$  МПа;
- при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,0$   $7,6 \times 13,5 = 102$  МПа;
- при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,5$   $7,6 \times 18,5 = 140$  МПа.

Максимальные напряжения развиваются при коэффициенте бокового распора 1,5. На этом основании можно утверждать, что конфигурация выемочных полостей

важна при выборе наиболее безопасных условий их эксплуатации.

Это подтверждает проверка по условию прочности в зоне максимального напряжения при  $\sigma_{ср} = 140$  МПа при коэффициенте прочности по Протодыяконову 14:  
 $1400 = \sin 30^\circ \times 1400 + 1400 \times (1 - \sin 30)$

Такие напряжения могут привести к разрушению массива.

В табл. 1 приведены количественные значения измеренных напряжений на контурах камеры и в замках потолочины.

Таблица 1

### Напряжения в элементах геомеханической системы, МПа

Коэффициент распора	Открытое выработанное пространство	Заложено твердеющей смесью
потолочина блока		
0,5	3	2
1,0	7	5
1,5	13	9
левый замок свода		
0,5	5	6
1,0	4	5
1,5	3	4
правый замок свода		
0,5	5	5
1,0	5,5	6,5
1,5	6	8

Моделировали состояние двух очистных камер без закладки и одной камеры с закладкой. На рис. 4 изображены поля напряжений в массиве в зоне свода пород над очистной камерой.

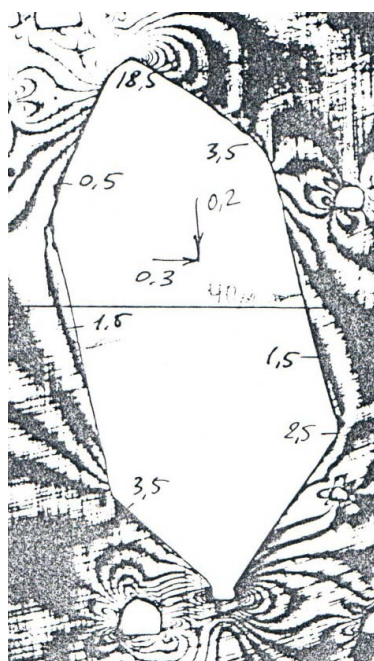


Рис. 4. Изохромы напряжений в своде очистной камеры

### Обсуждение результатов

Количественные параметры сейсмического действия горных работ устанавливаются на основании закономерностей распространения сейсмических колебаний по допустимой скорости смещения (табл. 2).

Таблица 2

#### Допустимая скорость смещения сооружений для основных типов пород

Наименование горных пород	Скорость продольных волн, м/с*10 <sup>3</sup>	Допустимая скорость смещения для сооружений по классам, см/с			
		I	II	III	IV
Рыхлообломочные отложения и наносы	1-2	4	8	12	20
Сильно трещиноватые с глиной и высокой пористостью	2-3	7	14	20	34
Скальные с естественной трещиноватостью	3-4	10	19	30	47
Относительно монолитные с отдельными трещинами	4-5	12	25	37	60
Монолитные, слабо-трещиноватые	5-6	15	30	45	75
Очень крепкие и монолитные без трещин	6-7	18	35	53	90

Наиболее эффективным методом управления параметрами сейсмических волн является изменение параметров поля напряжений путем заполнения техногенных пустот твердеющими смесями. Это сопряжено с повышенными затратами, поэтому в каждом конкретном случае обосновывается исследованиями [Голик и др., 2014].

Сейсмическое действие горных работ на сооружения оценивают по допустимой скорости колебаний, при которой сохранность сооружений гарантирована, а локальные деформации не превышают прогнозируемые. При возбуждении в массиве пород скорости колебаний выше допустимой величины сохранность зданий или сооружений не гарантируется. Критической считается такая скорость колебаний, выше которой сохранность сооружений реализуется с вероятностью менее 0,5 [Ляшенко, Кислый, 2015].

Допустимая деформация горных пород в пределах упругости устанавливается в соответствии с классификацией защищаемых сооружений по их ответственности и сроку эксплуатации (табл. 3).

Таблица 3

#### Допустимая деформация земной поверхности

Класс	Характеристика сооружений и срок эксплуатации	Срок службы	Допустимая деформация	Уровень надежности	Коэффициент надежности
I	Особо ответственные сооружения: стволы шахт, капитальные штольни, камеры водоотлива, ЦПП, руддворы	≥20	0,0001	0,99	1,52
II	Ответственные сооружения со сроком эксплуатации более 5-10 лет: целики, капитальные квершлагги, борта и уступы карьеров	10÷12	0,0002	0,94	1,44
III	Кратковременно эксплуатируемые сооружения (от 1 до 5 лет): камеры, уступы, штреки	5÷7	0,0003	0,89	1,36
IV	Неответственные сооружения со сроком эксплуатации до 1 года	1÷3	0,0005	0,84	1,3

Приемлемые скорости смещения: 1 см/с – для нарушенных зданий и комфортного проживания населения, 3 см/с – для жилых зданий, находящихся в хорошем состоянии, 5 см/с – для сохранения водного объекта.

Сейсмически безопасная технология включает элементы [Никитин и др., 2012]:

- сейсмические сотрясения не должны превышать допустимые пределы скорости смещения: для зданий в хорошем состоянии – 3,0 см/с; в удовлетворительном – 2,0 см/с; в неудовлетворительном и ветхом – 1,0 см/с;

- очистные блоки располагают так, чтобы ветхие здания на поверхности находились по отношению к плоскости сейсмических волн или с фронтальной стороны, или с фланга;

- экранирование сейсмозрывных волн при отбойке руд;

- ограничение массы заряда на одновременное взрывание;

- обеспечение интервала замедления между взрывами.

## Выводы

Исследование моделей из низкомолекулярных материалов с фоторегистрацией результатов моделирования позволяет оценить уровень техногенных напряжений и позволяет оптимизировать параметры горных работ по фактору сохранения земной поверхности от разрушения.

По результатам исследований возможно ранжирование напряжений в окрестностях очистных выработок и рудовмещающем массиве по степени опасности разрушения:

1. Наиболее напряжены потолочины и днища камер.

2. Закладка камер снижает уровень напряжений до 2 раз.

3. При вариантах без закладки в зоне междукамерного целика концентрация напряжений близка к критической, поэтому излечение целиков опасно деформацией массива вплоть до разрушения массива и земной поверхности над ним.

Геофизические методы прогнозирования поведения массивов в условиях развития техногенных напряжений являются инструментом природоохранной и ресурсосберегающей разработки рудных месторождений подземным и комбинированным способом.

## Литература

1. Амвросов А.Ф. Мониторинг опасных геологических процессов при недропользовании. ГИАБ. 2014. №7. С.45-50.

2. Бурдзиева О.Г. Механизм влияния хвостов обогащения на окружающую среду // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Труды III Кавказской международной школы-семинара молодых ученых. Центр геофизических исследований ВНИЦ РАН и РСО-А; под ред.: Николаев А.В., Заалишвили В.Б.. 2009. С. 361-365.

3. Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Исследование влияния хвостохранилища на окружающую среду в условиях высокой сейсмической опасности // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Труды III Кавказской международной школы-семинара молодых ученых. Центр геофизических исследований ВНИЦ РАН и РСО-А; под ред.: Николаев А.В., Заалишвили В.Б.. 2009. С. 355-360



4. Бурдзиева О.Г. Рациональное недропользование в регионе РСО – Алания (проблемы и пути их решения) // Уголь. 2010. № 7 (1011). С. 70-71
5. Бурдзиева О.Г., Шевченко Е.В., Ермишина Е.Б. Механизм возникновения техногенных катастроф под влиянием горного производства // В сборнике: Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Труды Центра геофизических исследований; под ред. Заалишвили В.Б. 2010. С. 157-161.
6. Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б., Бериев О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Об экологических аспектах современной урбанизированной территории при сильных землетрясениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012. № 3. С. 62-67
7. Голик В.И., Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г. Геофизический мониторинг подземной разработки месторождений. М.ГИАБ. 2014. №2. С.34-39.
8. Заалишвили В.Б., Бериев О.Г., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Онкозаболеваемость населения г. Владикавказа и его взаимосвязь с различными факторами // Геология и геофизика Юга России. 2013а. № 3. С. 29-38.
9. Заалишвили В.Б., Бекузарова С.А., Бурдзиева О.Г. Оценка техногенного загрязнения территории // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Труды V Кавказской международной школы-семинара молодых ученых; под ред. В. Б. Заалишвили. 2013б. С. 353-355
10. Зуев Б.Ю. Физическое моделирование геомеханических процессов в блочно-иерархических массивах на основе единого комплексного условия подобия. ГИАБ. М. 2014. №4. С.67-73.
11. Ляшенко В.И., Кислый П.А. Обоснование сейсмобезопасных параметров взрывов при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой // Известия вузов. Горный журнал. 2015. №2. С.54-93.
12. Никитин Р.Я., Васильев А.В., Хон В.И., Черных Е.Н. Сейсмометрические исследования воздействия массовых взрывов в карьере на охраняемые объекты рудника «Интернациональный». М. Горный журнал. 2012. №2. С.79-85.
13. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No.4. pp. 321-324.

DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20712

## **SIMULATION OF TENSION ROCKYMASSIF FTUNDERDGROUND EXTRACTION OF ORES PHOTOELASTICITY METHOD**

**© 2016 O.G. Burdzieva, Sc. Candidate (Geog.), V.I. Golik,  
Sc. Doctor (Tech.), prof.**

Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of  
Sciences; e-mail: cgi\_ras@mail.ru

The article investigates the state of the ore-bearing massifs composed unrelated elementami discrete medium in which under the influence of mining activities are develop-

ing man-made stress. The results of the simulation of the behavior of the array when you change the parameters of tension metodomphotoelasticity. Implemented rankings stresses in the ore-hosting an array of the degree of danger of destruction of critical stress. It confirmed the effectiveness of use of geophysical methods for predicting the behavior of arrays, as a tool for environmental protection and resource development of ore deposits.

**Keywords:** solid, man-made stress modeling, photoelasticity, destruction, geophysical methods, forecasting, deposit, ore.