

**М.Г.ПОПОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *mice8@yandex.ru*  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

**M.G. POPOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *mice8@yandex.ru*  
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ НАРУШЕННЫХ ЗОН ПОРОДНОГО МАССИВА

Разработана пространственная модель, предусматривающая проходку выработки через зону ослабления. Представлены результаты математического моделирования на основе метода конечных элементов нелинейно-деформируемого рудного тела с выработкой сводчатого очертания, проведение которой осуществляется по стадийно вквост зоны ослабления.

**Ключевые слова:** моделирование, рудный массив, выработка, метод конечных элементов, зона ослабления.

## PREDICTION OF THE MINE WORKING STABILITY IN THE MASSIF WHICH ARE CROSSING ZONE OF WEAKENING

The volumetric model taking into consideration the driving of the mine through zone of weakening. The results of mathematical modeling on the basis of the method of finite elements of a non-linear deformed ore body with the working out of a vaulted contour are represented. The carrying out of the working is implemented step-by-step transversely to the weakness zone.

**Key words:** modeling, ore massif, mine working, finite elements method, zone of weakening.

Формирование напряженно-деформированного состояния вокруг горных выработок связано со многими факторами, наиболее определяющими из которых являются строение массива, физико-механические характеристики пород, наличие тектонических нарушений и схема расположения выработок. В большинстве случаев в геологическом разрезе любого месторождения полезных ископаемых можно выделить ряд пород, обладающих различными прочностными и деформационными свойствами. Реальный геологический разрез характеризуется неоднородностью строения: чередованием различных руд, наличием большого количества межруд-

ных прослоек. Данную картину можно увидеть на рис.1, где представлена часть геологического разреза Яковлевского месторождения.

Исследования проводились по результатам решения пространственной конечно-элементной модели, которая представляет собой участок нелинейно-деформируемого рудного массива размером 50×80×40 м с выработкой сводчатого очертания, проведение которой осуществляется по стадийно вквост зоны ослабления (рис.2).

Размеры модели подбирались, исходя из условия незначительности влияния граничных условий на картину распределения напряжений и деформаций. Зона ослабления

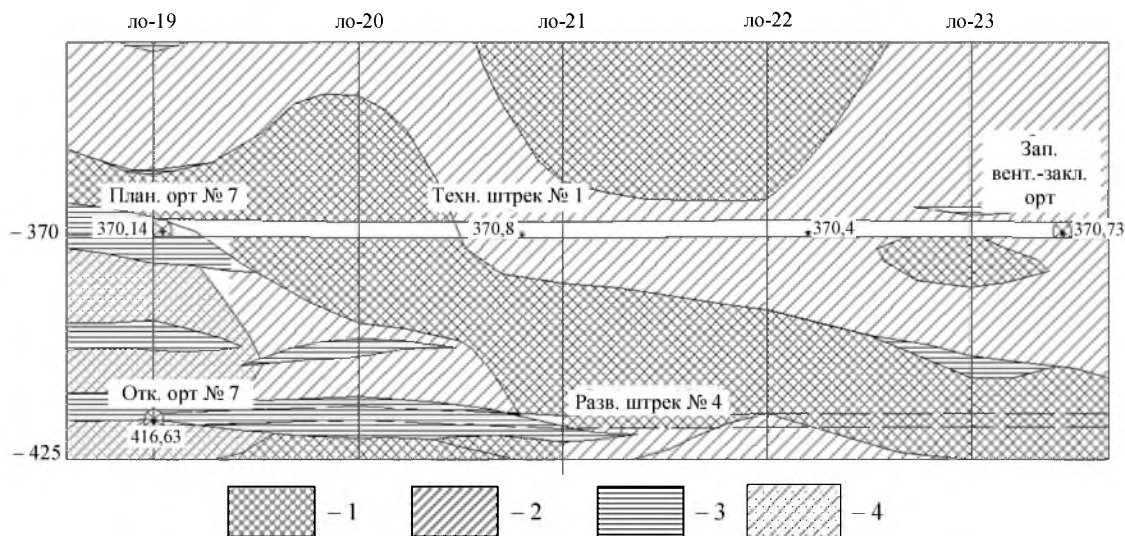


Рис.1. Геологический разрез по технологическому штреку № 1  
 1 – руда железнослудовая; 2 – руда гидрогематитовая; 3 – межрудный сланец; 4 – кварцит

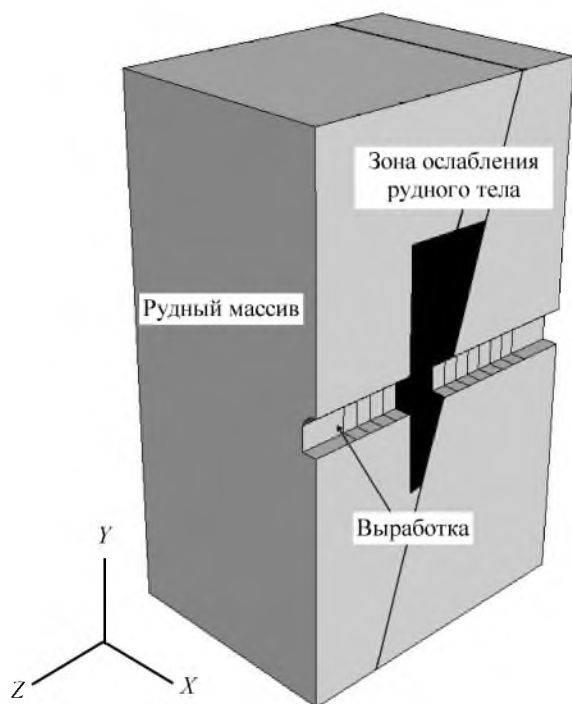


Рис.2. Конечно-элементная модель массива пород с выработкой

с моделирована таким образом, что она является составной частью массива, но с другими деформационными свойствами. Прочностные свойства и деформационные харак-

теристики рудного массива, принятые при моделировании, приведены в таблице.

**Прочностные и деформационные характеристики рудного массива**

Характеристика	Руда	Руда рыхлая
Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	34	33
Модуль упругости, МПа	1,3·10 <sup>3</sup>	0,3·10 <sup>3</sup>
Коэффициент Пуассона	0,37	0,41
Угол внутреннего трения, град.	28	10
Сцепление, МПа	1,1	0,3
Примечание	–	Зона разуплотнения и ослабления

Граничные условия задавались следующим образом: боковым граням запрещались перемещения по оси Z, нижней грани – по оси Y, торцевым граням – по оси X.

Напряженное состояние определялось, исходя из того, что выработка расположена на глубине 500 м, и задавалось полем напряжений, распределенным по всему объему вмещающего массива, с составляющими:

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda\gamma H, \sigma_y = \gamma H, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельный вес пород;  $H$  – глубина заложения выработки;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора пород,

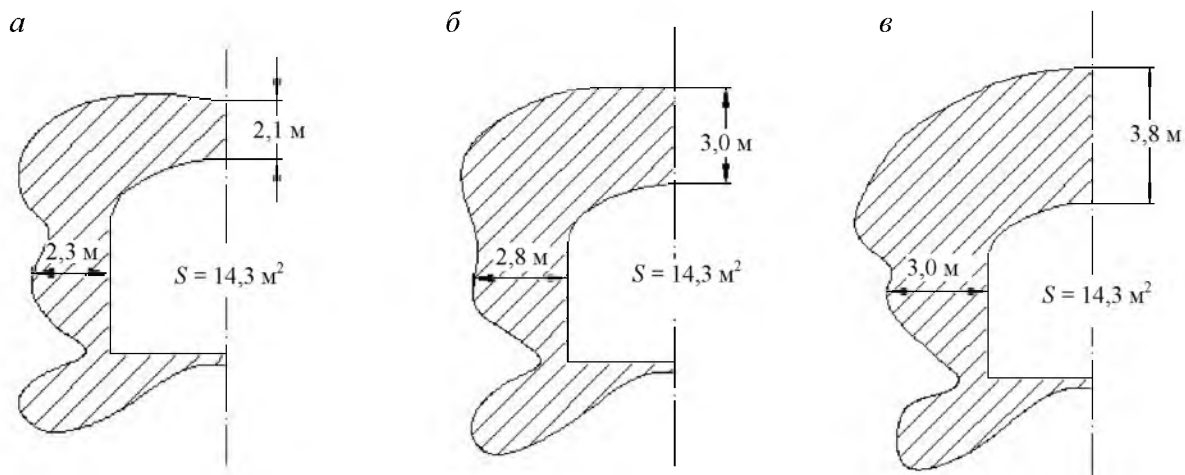


Рис.3. Формирование области предельного состояния: а – вокруг выработки в однородном рудном массиве (сечение 1); б – в переходной зоне (сечение 2); в – в зоне ослабления (сечение 3)

$$\lambda = \operatorname{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2}, \quad (2)$$

$\varphi$  – угол внутреннего трения.

Модель разбивалась на 108000 объемных 8-узловых элементов, размер которых в районе выработки составлял 0,2 м, а по мере удаления увеличивался и на границах модели доходил до 2 м. Предельное состояние рудного тела в зоне ослабления описывается условием предельного состояния Кулона\*.

Анализ конфигурации области предельного состояния вокруг орта при пересечении зоны ослабления позволяет выделить три характерных сечения: 1 – перед зоной ослабления; 2 – переходный участок (4 м до границы с нарушением); 3 – в зоне ослабления.

Форма и размеры областей предельного состояния вокруг выработки на трех участках по ее трассе приведены на рис.3.

Анализируя рис.3, можно заметить, что активный рост размеров области предельного состояния начинается за 4 м до

нарушения. Сечение 1 характеризует форму и размеры области предельного состояния для протяженных участков горных выработок, пройденных по однородному рудному массиву. В кровле пластические деформации развиваются менее интенсивно, чем в боках и в пяте свода, где размер области доходит до 2,3 м.

В переходной зоне от однородного массива до ослабления (сечение 2) характерно увеличение области предельного состояния в кровле выработки. В боках выработки рост неупругих деформаций тоже заметен, но он менее интенсивен (22 %), по сравнению с кровлей (43 %). Двигаясь к контакту с зоной ослабления, область предельного состояния вокруг выработки будет плавно увеличиваться. В зоне ослабления (сечение 3) наблюдается наибольший рост области предельного состояния в сводовой части выработки, которая достигает значений 3,8 м, что на 0,8 м больше, чем в сечении 2. В боку этот рост менее активен – 3,0 м, что на 0,2 м больше по сравнению с сечением 1.

На базе результатов моделирования была построена зависимость отношения высоты свода обрушения к ширине выработки от расположения зоны ослабления по трассе выработки (рис.4). Показана дополнительная вертикальная ось со значениями вертикальной нагрузки  $P$  на крепь выработки. Из рис.4 видно, что максимальная величина  $h_c/B$  находится в зоне ослабления, а также на контакте под

\* Попов М.Г. Использование экспериментально-численного метода прогноза смещений вокруг выработки в рудном массиве / М.Г.Попов, В.Ю.Синегубов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2011. Вып.6.

Popov M.G., Sinigubov V.Yu. Usage of experimental and numerical method for prediction of displacements around the development in an ore massif: News of the higher education institutions. Mining Journal. 2011. Iss.6.

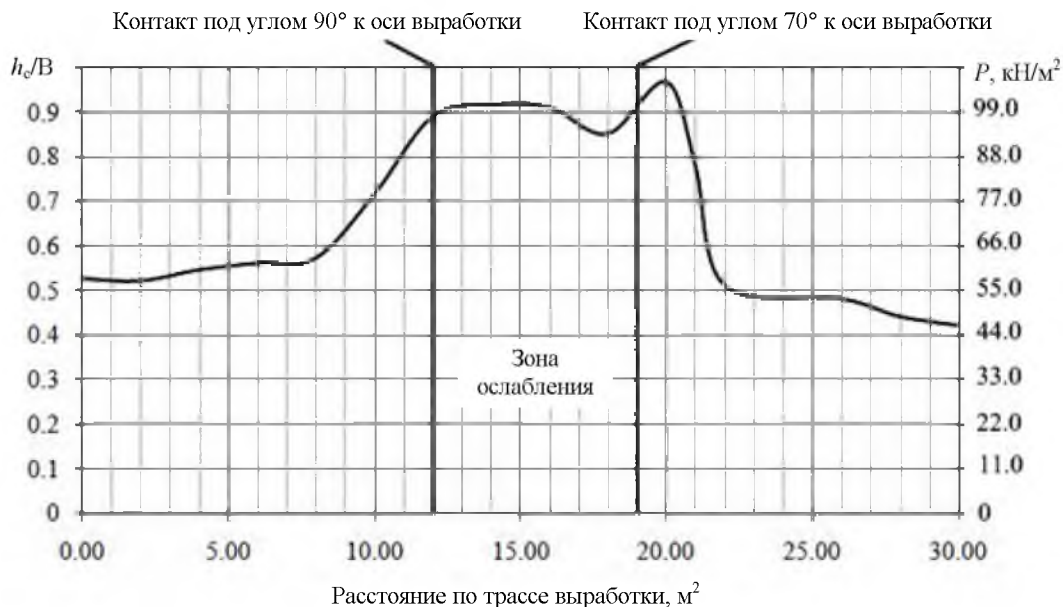


Рис.4. Зависимость отношения высоты свода обрушения к ширине выработки от расположения зоны ослабления по трассе выработки

углом  $70^\circ$  к оси выработки при выходе из этой зоны. Перед зоной ослабления интенсивный рост  $h_c/B$  начинается за 4 м и протекает линейно вплоть до границы с ней. Здесь контакт расположен под углом  $90^\circ$  к оси выработки. При пересечении контакта, расположенного под углом  $70^\circ$  к оси выработки,  $h_c/B$  со значения 0,95 падает до 0,49 на расстоянии 3,5 м от границы с зоной ослабления.

В ходе проведенного исследования установлено, что зона ослабления существен-

но влияет на распределение напряжений и смещений вокруг горной выработки. Предложенная конечно-элементная модель может быть использована при расчетах напряженно-деформированного состояния и формирования нагрузок на крепь выработок при пересечении ослабленных участков массива. Это позволит своевременно изменять параметры крепления выработки при приближении к опасным участкам и снижать риски вывалообразований.