

# УЧЕТ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа

## Accounting for the scale effect in designing parameters of mining technology

O. G. Latyshev, D. V. Prishchepa

Designing the parameters of technology of development of mineral deposits is based on rock properties, usually determined in laboratory conditions on the samples of small volume. When considering the processes involving significant amounts of rock one should account for the scale effect. Applied to strength characteristics of rocks, this effect consists in nonlinear decrease in strength with an increase in volume, and its assessment bases on the statistics of extreme values determined by the probability nature of crack distribution by size. Based on the method of fluorescent inspection, authors studied the characteristics of the fracture structure of rocks. Authors found out that Cauchy distribution describes the probability characteristics of cracks. Taking into account the parameters of this distribution, authors suggest the equation of scale effect, which takes into account the heterogeneity of fractured structure of rocks. One can find the results of experimental studies showing adequacy of the proposed method for evaluating the scale effect. The results allow evaluating strength of the rock mass of various volumes in designing the processes of mining technology.

**Keywords:** observation station of areal type; reverse linear resection; indirect trigonometric leveling; areal graph of displacement velocities; shear velocity.

Проектирование параметров технологии разработки месторождений полезных ископаемых базируется на свойствах горных пород, определяемых, как правило, в лабораторных условиях на образцах малого объема. При рассмотрении процессов, охватывающих значительные объемы породного массива необходимо учитывать масштабный эффект. Применительно к прочностным характеристикам пород он заключается в нелинейном снижении прочности с увеличением объема, и его оценка основывается на статистике экстремальных значений, определяемой вероятностным характером распределения трещин по размерам. В работе на основе люминесцентного метода дефектоскопии изучены характеристики трещинной структуры скальных пород. Установлено, что вероятностные характеристики трещин описываются распределением Коши. С учетом параметров данного распределения предложено уравнение масштабного эффекта, учитывающего неоднородность трещинной структуры пород. Приведены результаты экспериментальных исследований, показывающих адекватность предложенного способа оценки масштабного эффекта. Полученные результаты позволяют оценивать прочность породного массива различного объема при проектировании процессов горной технологии.

**Ключевые слова:** горные породы; трещинная структура; масштабный эффект; способ оценки.

Любые процессы горной технологии связаны с разрушением породного массива. В связи с этим основной характеристикой является прочность горных пород, которая входит практически во все расчеты по проектированию параметров большинства процессов горной технологии. Однако повсеместно прочностные характеристики определяются на малых по размеру образцах в лабораторных условиях. Поэтому при расчетах реальных параметров горной технологии, охватывающей достаточно большие объемы, необходимо учитывать масштабный эффект.

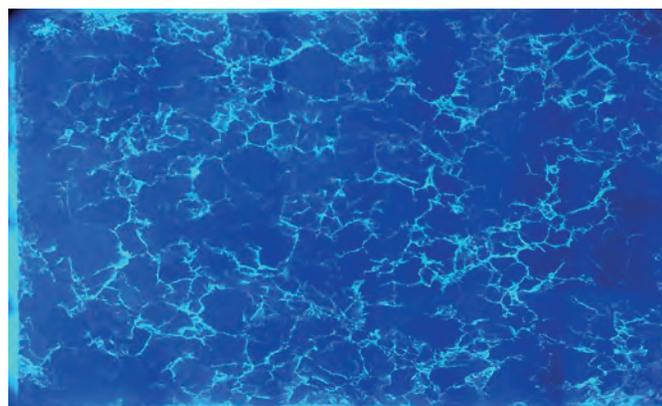


Рисунок 1. Микротрещины образца туфа Североуральских месторождений.

Масштабный эффект проявляется в зависимости свойств тел от их объема. При этом с увеличением объема прочность нелинейно снижается, асимптотически приближаясь к некоторому пределу  $\sigma_{min}$ . Известно довольно много способов учета масштабного эффекта, отличающихся как общим подходом к проблеме, так и видом уравнений эффекта [1, 2]. Необходимо найти более общую процедуру учета масштабного эффекта.

Общепризнано, что масштабный эффект имеет вероятностную природу. В соответствии с теорией Гриффитса [3] разрушение тела определяется наличием наиболее слабого звена – развитием «магистральной» трещины. В соответствии с теорией академика М. А. Садовского [4] породный массив представляет собой самоподобную иерархическую структуру. В простейшем случае каждый уровень иерархии  $i$  определяется путем удвоения длины каждого структурного элемента. Это свидетельствует об инвариантности геометрии трещин в горных породах относительно масштаба разрушения. Тогда можно переносить результаты исследований трещин на микроуровне на мезо- и макроуровень. В связи с этим изучение трещиноватости горных пород на образцах дает ценную информацию о трещинной структуре породных массивов.

На основе разработанного авторами люминесцентного метода дефектоскопии горных пород выполнены исследования трещинной структуры представительных горных пород Урала [5]. В качестве примера на рис. 1 приведена электронная фотография образца туфа с выявленной под микроскопом системой трещин.

Для оценки распределения трещин выделены интервалы их размеров с логарифмическим шагом и определено количество трещин в каждом интервале. Графическое представление данной процедуры для 6 образцов туфа представлено на рис. 2.

Следующей задачей является оценка закона распределения трещин и его параметров. При условии, что количество трещин в горной породе велико, и они распределены независимо и случайно, плотность распределения трещин по размерам можно описать уравнением Коши [6]:

$$F(l) = \exp\left\{-\left(l/U\right)^{-\alpha}\right\},$$

где  $U$ ,  $\alpha$  – параметры распределения.

Для указанных ранее данных параметры распределения:  $\alpha = 1,83$ ;  $U = 912$ . График распределения показан на рис. 3.

Коэффициент вариации опытных данных от полученных по уравнению Коши составляет 2,3 %.

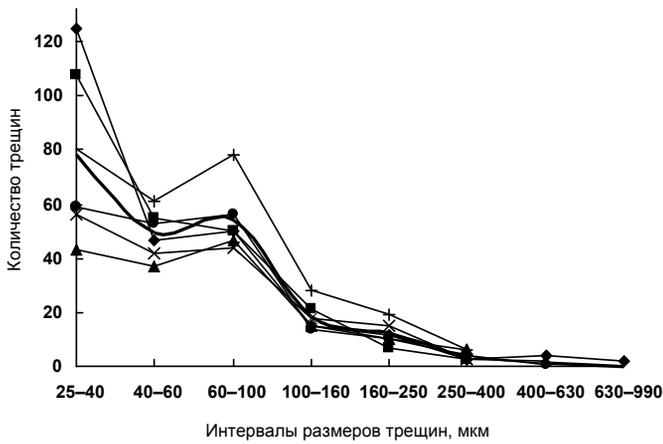


Рисунок 2. Распределение трещин по размерам в образцах туфа (жирной линией указано среднее содержание трещин каждой фракции).

Полученные данные являются базой вероятностно-статистического подхода к оценке влияния масштабного эффекта на прочность горных пород. Как правило, данный подход сводится к статистике экстремальных значений [7], основные положения которой можно представить в следующем виде:

- для любого материала при данном напряженном состоянии существует определенная функция вероятности его разрушения;
- любой по объему материал состоит из *n* первичных элементов (элементарных объемов), закон распределения прочности которых известен;
- материал считается разрушенным тогда, когда разрушается хотя бы один первичный элемент из всей совокупности.

Развивая данный подход, В. Т. Глушко [8] использовал закономерности распределения трещин и критерий хрупкого разрушения А. Гриффитса. В предположении, что количество трещин в массиве велико и их распределение по размерам описывается уравнением Коши, им обосновано уравнение масштабного эффекта в виде:

$$\sigma_V = \sigma_{\min} + \beta / V^{1/k},$$

где  $\sigma_V$  – прочность образца данного объема *V*;  $\sigma_{\min} = \mu + \beta(-\ln P)^{1/k}$  – показатель, характеризующий минимальное статистически вероятное значение частного результата прочности при  $V \rightarrow \infty$ , соответствующее прочности неограниченного массива;  $\beta$  – параметр масштабного фактора, имеющий размерность напряжения; *k* – коэффициент однородности горной породы; *P* – принятый уровень значимости.

При расчетах процессов горного производства требуется оценить степень снижения прочности пород за счет масштабного эффекта. Эту величину предлагается определять уравнением:

$$\lambda = \sigma_V / [\sigma] = \lambda_0 + m/V^{1/k}, \tag{1}$$

где  $[\sigma]$  – прочность породы, определяемая в лабораторных экспериментах на образцах;  $\lambda_0$  – предельное снижение прочности при  $V \rightarrow \infty$ ; *m* – параметр масштабного фактора.

**Масштабный эффект для известняков.**

Объем образцов, см <sup>3</sup>	Количество образцов	Размер грани куба, см	Прочность при сжатии, МПа			Отклонение, %
			опытная	расчетная		
			$\sigma_{\min} - \sigma_{\max}$	$[\sigma]$	$\sigma_V$	
8	12	2,0	69–141	113	114	0,9
1	10	1,0	105–257	179	177	1,1
64	5	4,0	71–99	87	79	10,1
408	3	7,4	46–64	58	60	3,3

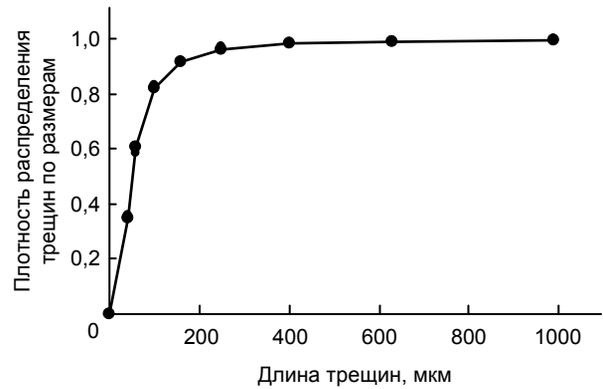


Рисунок 3. Интегральная функция распределения трещин по размерам.

Указанные величины определяются параметрами распределения прочности конкретных пород. Методика их определения дается в работе [9]. Анализ баз данных по прочности пород Урала, имеющихся на кафедре шахтного строительства УГГУ, позволил установить уравнения масштабного эффекта для изучаемых пород. Так, для горных пород Североуральских бокситовых месторождений параметры уравнения (1):

- порфириты:  $\lambda_0 = 0,40$ ;  $m = 1,14$ ;  $k = 3,22$ ;
- вулканогенно-обломочные породы:  $\lambda_0 = 0,31$ ;  $m = 1,21$ ;  $k = 3,48$ ;
- известняки:  $\lambda_0 = 0,29$ ;  $m = 1,285$ ;  $k = 3,69$ ;
- бокситы:  $\lambda_0 = 0,61$ ;  $m = 0,71$ ;  $k = 2,05$ .

Для проверки применимости данной методики оценки масштабного эффекта была выполнена серия экспериментов по определению прочности при сжатии светло-серого известняка на кубических образцах разного объема. Результаты представлены в таблице.

Приведенные данные показывают хорошую сходимость опытных и расчетных величин прочности – относительное расхождение не превышает 10 %. Такую точность следует считать приемлемой, а уравнения масштабного эффекта достаточно адекватными для скальных пород Урала.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Койфман М. И. Скоростной комплексный метод определения механических свойств горных пород // Механические свойства горных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 73–84.
2. Чирков С. Е. Влияние масштабного фактора на прочность углей. М.: Наука, 1969. 151 с.
3. Griffith A. A. The theory of rupture // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft, 1924. P. 55–63.
4. Садовский М. А., Голубева Т. В., Писаренко В. Ф., Шнирман М. Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 2. С. 3–15.
5. Латышев О. Г., Корнилков М. В. Исследование трещинной структуры горных пород как фрактального объекта. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 156 с.
6. Глушко В. Т., Кирничанский Г. Т. Инженерно-геологическое прогнозирование устойчивости выработок глубоких угольных шахт. М.: Недра, 1974. 176 с.
7. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 452 с.
8. Глушко В. Т., Борисенко В. Г. Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений. М.: Недра, 1978. 254 с.

9. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 672 с.

## REFERENCES

1. Koifman M. I. 1963, *Mekhanicheskie svoystva gornykh porod* [Mechanical properties of rocks], Moscow, pp. 73–84.
2. Chirkov S. E. 1969, *Vliyaniye masshtabnogo faktora na prochnost' ugley* [Influence of the scale factor on the strength of coal], Moscow, 151 p.
3. Griffith A. A. 1924, The theory of rupture. Proceedings of the first International Congress for Applied Mechanics, Delft, pp. 55–63.
4. Sadovskiy M. A., Golubeva T. V., Pisarenko V. F., Shnirman M. G. 1984, *Kharakternye razmery gornoj porody i ierarkhicheskie svoystva seysmichnosti* [The characteristic dimensions of the rock and hierarchical properties of seismicity]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli* [Proceedings of the USSR Academy. Physics of the Solid Earth], no. 2, pp. 3–15.
5. Latyshev O. G., Kornilkov M. V. 2015, *Issledovanie treshchinnoy struktury gornykh porod kak fraktal'nogo ob'ekta* [Study of fracture structure of rocks as a fractal object], Saarbrücken, 156 p.
6. Glushko V. T., Kimichanskiy G. T. 1974, *Inzhenerno-geologicheskoe prognozirovaniye ustoychivosti vyrobotok glubokikh ugol'nykh shakht* [Engineering and geological forecasting of sustainability of workings in deep coal mines], Moscow, 176 p.
7. Gumbel' E. 1965, *Statistika ekstremal'nykh znacheniy* [Statistics of extreme values], Moscow, 452 p.
8. Glushko V. T., Borisenko V. G. 1978, *Inzhenerno-geologicheskie osobennosti zhelezorudnykh mestorozhdeniy* [Geotechnical characteristics of iron ore deposits], Moscow, 254 p.
9. Latyshev O. G. 2007, *Razrusheniye gornykh porod* [Destruction of rocks], Moscow, 672 p.

**Олег Георгиевич Латышев,**  
gtf.shs@ursmu.ru  
**Дмитрий Вячеславович Прищепа,**  
Уральский государственный горный университет  
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

**Oleg Georgievich Latyshev,**  
gtf.shs@ursmu.ru  
**Dmitriy Vyacheslavovich Prishchepa,**  
Ural State Mining University  
Ekaterinburg, Russia