

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ НАРУШЕННОСТИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Л. А. Назаров¹, Л. А. Назарова¹, П. А. Цой¹, Л. В. Цибизов²

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия, E-mail: leonid@misd.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

На основе совместного анализа микродеформаций, полученных методом спекл-фотографии при испытании образцов горных пород по схеме “бразильская проба”, и рассчитанных аналитически упругих полей напряжений и деформаций показано, что существуют значимые кросскорреляционные зависимости между нарушенностью отдельных частей исследуемой области и уровнем внешней нагрузки. При наличии верифицированной геомеханической модели, адекватно описывающей эволюцию поля напряжений рассматриваемого объекта, это создает предпосылки для оценки степени нарушенности различных участков объекта, контролируя состояние только одного из них.

Лабораторный эксперимент, породный образец, бразильский метод, спекл-фотография, деформация, нарушенность, корреляционный анализ

Для большинства систем мониторинга состояния породного массива при ведении горных работ входной информацией является сейсмическая эмиссия [1–5]. Анализ зарегистрированных *in situ* данных проводится, как правило, на основе теории накопления повреждений и концентрационного критерия прочности [6, 7] либо с помощью поиска эмпирических закономерностей миграции гипоцентров динамических событий в пределах шахтного поля [8, 9].

Современная тенденция развития подходов к интерпретации сейсмической информации — разработка методов для выявления связей в пространстве и времени между параметрами сейсмической эмиссии и напряженно-деформированного состояния породного массива. В лабораторных условиях найдены зависимости между суммарным счетом, скоростью счета акустической эмиссии (АЭ) и напряжениями при одно- и двухосном нагружении образцов горных пород [10–12], при этом пространственная локализация источников АЭ не проводилась.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-06977).

В [13–18] с целью прогноза динамических событий в массиве горных пород предпринимались попытки установить связь между интегральными показателями теоретически рассчитанного поля напряжений и уровнем сейсмичности (использовались как синтетические [13–16], так и *in situ* [17, 18] данные). В [19] предложен подход, позволяющий установить корреляционные связи между пространственно-временным распределением параметров техногенной сейсмичности (числом и энергией динамических событий — стохастическая информация) и полем напряжений (максимальным касательным напряжением — детерминированная информация). Основные элементы этого подхода и использовались для интерпретации экспериментальных данных в настоящей статье, цель которой — установление количественных связей между нарушением различных частей испытанных образцов горных пород, находящихся в неоднородном поле напряжений, а также величиной внешней нагрузки.

СХЕМА ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов “бразильская проба” из керна диаметром $2r_0 = 30$ мм (выбурены из блока мрамора) изготавливались диски толщиной 10 мм. На боковой поверхности дисков создавались диаметрально противоположные параллельные площадки длиной $l = 5$ мм, которые контактировали с плитами испытательной машины (рис. 1). Выполнялось жесткое нагружение со скоростью 0.2 мм/с, замерялось давление P в гидросистеме. Одновременно в области $S = \{-X \leq x \leq X, -Y \leq y \leq Y\}$ на поверхности образца методом спекл-фотографии (WLSP — White Light Speckle Photography) регистрировались микросмещения, по которым с помощью триангуляции S рассчитывались микродеформации e_{xx} , e_{xy} и e_{yy} .

Метод WLSP широко применяется для исследования в окрестности свободных поверхностей эволюции механических полей на микроуровне при испытаниях различных материалов [20–22] и горных пород [23]. Для последних интерпретация получаемых данных сводится к расчету микродеформаций с последующим качественным описанием процесса зарождения, роста и слияния микротрещин вплоть до образования макротрещины [24].

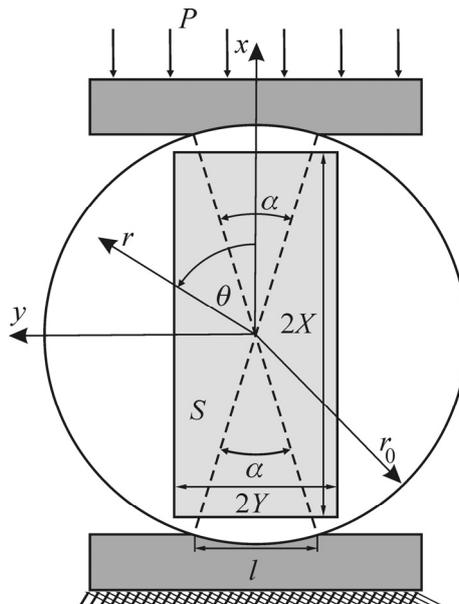


Рис. 1. Схема эксперимента и область S регистрации поверхностных микросмещений; (x, y) и (r, θ) — декартовы и цилиндрические координаты

Разрешающая способность использованной WLSР аппаратуры 65×25 точек, запись осуществлялась в диапазоне нагрузок $0 \leq P \leq P_f$, где $P_f = 0.75P_t$, а P_t — давление, при котором рассчитывалась прочность σ_t на растяжение [25, 26], оказавшаяся равной 12 МПа (данные по 5 образцам). Всего получали $M = 300$ кадров при $X = 14.5$ мм, $Y = 5.5$ мм.

Испытания оставшейся части керна по стандартной методике [27] позволили найти значение модуля Юнга $E = 37$ ГПа и коэффициента Пуассона $\nu = 0.11$.

ПОЛЯ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ДИАМЕТРАЛЬНОМ СЖАТИИ ДИСКА

Аналитическое решение упругой задачи о напряженном состоянии круглой области при диаметральном ее сжатии при $\alpha \neq 0$ было получено, по-видимому, в 50-х годах прошлого века в виде бесконечных рядов [28]. Для частного случая $\theta = 0$ эти ряды были просуммированы в [29]. Здесь найдены аналитические выражения для компонент тензора напряжений при произвольном θ :

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= (P/\pi)(\alpha - R_1 + R_2), \\ \sigma_{\theta\theta} &= (P/\pi)(\alpha + R_1 + R_2), \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{2P}{\pi}(\xi^2 - 1) \frac{(1 - \xi^4) \cos 2\theta}{D_+ D_-} \sin \alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\xi = r/r_0$; $R_1 = 2(\xi^2 - 1) \frac{(1 + \xi^4) \cos 2\theta - 2\xi^2 \cos \alpha}{D_+ D_-} \sin \alpha$; $D_{\pm} = 1 - 2\xi^2 \cos(2\theta \pm \alpha) + \xi^4$;

$$R_2 = \arctan F_+ - \arctan F_-; \quad F_{\pm} = \frac{\xi^2 \sin(2\theta \pm \alpha)}{1 - \xi^2 \cos(2\theta \pm \alpha)}.$$

Необходимо отметить, что аналитическое решение задачи о действии системы сосредоточенных сил на контуре упругой области, ограниченной окружностью, приведено в [30].

На рис. 2а показаны изолинии вычисленного по (1) максимального касательного напряжения τ_{\max}/P . Для сравнения на рис. 2б приведено распределение τ_{\max} , полученное в [31] методом фотоупругости: можно видеть хорошее качественное соответствие изображений. На рис. 3а, б представлены линии уровня горизонтальной $E\varepsilon_{yy}/P$ и главной $E\varepsilon_1/P$ деформаций в области S , рассчитанных по (1) при $\nu = 0.11$ (тоном выделены зоны удлинения).

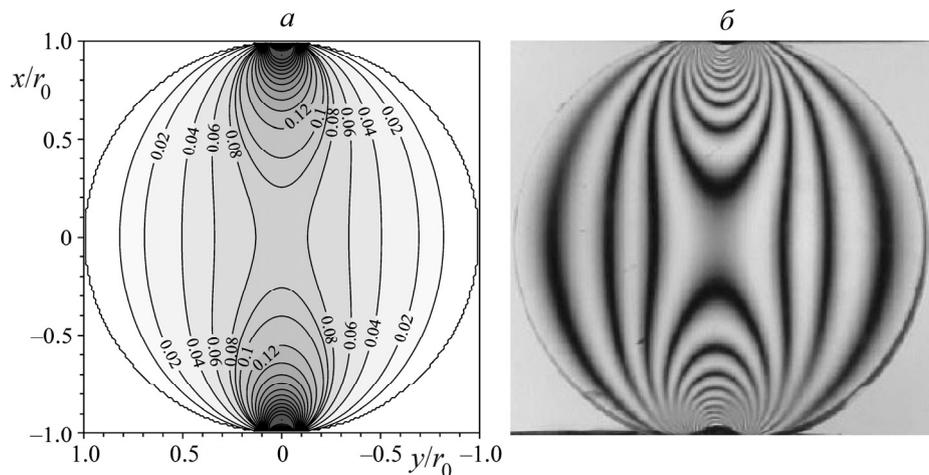


Рис. 2. Линии уровня максимального касательного напряжения, отнесенного к P (аналитическое решение) — а; распределение τ_{\max} , полученное методом фотоупругости (по [31]) — б

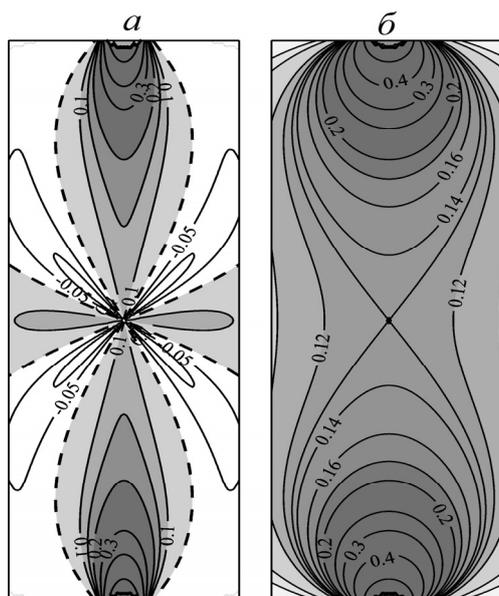


Рис. 3. Распределение в области S : a — горизонтальной деформации $E\varepsilon_{yy}/P$; b — максимальной главной деформации $E\varepsilon_1/P$

ЭВОЛЮЦИЯ НАРУШЕННОСТИ ОБРАЗЦА ПРИ НАГРУЖЕНИИ ПО ДАННЫМ СПЕКТЛ-ФОТОГРАФИИ

Интерпретация АЭ, возникающей при нагружении образцов горных пород, основана на ассоциации каждого импульса с актом образования новой или продвижением уже существующей микротрещины [10, 32]. Критерии прочности и/или роста трещин при этом не принимаются во внимание, поскольку практически невозможно на уровне микроструктуры учесть масштабный эффект [33].

Здесь принят следующий критерий: возникновение микронарушения сплошности происходит, если

$$e_* < e_1, \quad (2)$$

где $e_1 = 0.5(e_{xx} + e_{yy}) + \sqrt{0.25(e_{xx} - e_{yy})^2 + e_{xy}^2}$ — максимальная главная деформация, вычисленная по WLSP данным, а эмпирический предел прочности на растяжение e_* для каждого образца подбирался так, чтобы при $P = P_f$ условие (2) выполнялось для всех точек в центральной части линии $Y = 0$. Область S разбивалась (рис. 3а) по вертикали на одинаковые подобласти B_k ($k = 1, \dots, K$), в которых на каждой стадии нагружения m ($P(m) = mP_f/M$, $m = 0, \dots, M$) подсчитывалось число точек $N_k(m)$, где выполнен критерий (2).

На рис. 4а–в приведены расположения “очагов” микронарушений при $P = 0.075P_t$, $0.225P_t$, $0.375P_t$ ($m = 30, 90, 150$), которые качественно соответствуют распределению деформаций ε_1 (см. рис. 3б). На рис. 5 представлены зависимости $N_k(m)$ при разбиении S на три блока ($K = 3$). Отметим, что в среднем блоке B_2 устойчивый рост N_2 начинается с уровня внешней нагрузки около $0.25P_t$.

Рассчитаем коэффициенты корреляции b_k между числом микронарушений $N_k(m)$ и уровнем нагрузки $P(m)$:

$$b_k(N_k(m), P(m)) = \frac{\sum_{n=0}^m Q_{kn} T_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^m Q_{kn}^2 \sum_{n=0}^m T_n^2}},$$

где $Q_{kn} = N_k(n) - \bar{N}_k$; $T_n = P(n) - \bar{P}$, черта означает среднее значение соответствующей величины при $0 \leq n \leq m$. На рис. 6 ($K = 3$) сплошными линиями показано изменение b_k в зависимости от нагрузки, штриховая линия – коэффициент корреляции b между общим числом микронарушений $N(m) = N_1(m) + \dots + N_K(m)$ и $P(m)$.

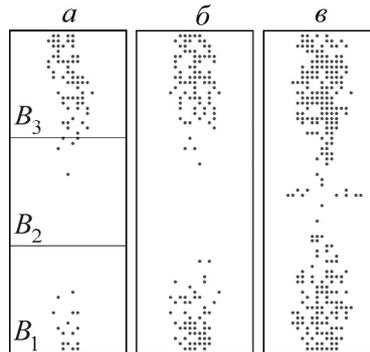


Рис. 4. Расположение “очагов” микронарушений на различных стадиях нагружения: a — $P = 0.075P_t$; $б$ — $P = 0.225P_t$; $в$ — $P = 0.375P_t$

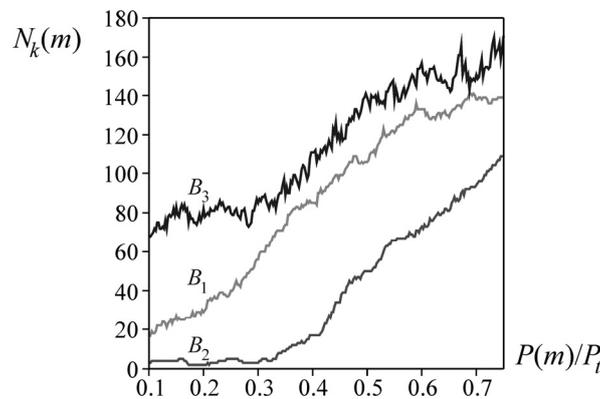


Рис. 5. Зависимость числа “очагов” микронарушений в различных частях исследуемой области от уровня нагружения

Величина $b > 0.9$ даже при невысоких значениях P , что является ожидаемым результатом, если провести аналогию с зависимостью суммарного счета АЭ в породном образце от осевого напряжения. Но для отдельных блоков B_k значимая корреляционная связь между N_k и P возникает только при уровне внешней нагрузки P_c , составляющей примерно $0.5 P_t$.

На рис. 7 показаны кросскорреляционные коэффициенты:

$$c_{ki}(N_k(m), N_i(m)) = \frac{\sum_{n=0}^m Q_{kn} Q_{in}}{\sqrt{\sum_{n=0}^m Q_{kn}^2 \sum_{n=0}^m Q_{in}^2}} \quad (i = 1, \dots, K),$$

характеризующие связь между степенью нарушенности отдельных частей области S . Заметим, что при $P > P_c$ коэффициенты c_{ki} стабильно выше 0.8. Это указывает на принципиальную возможность оценки уровня нарушенности всей исследуемой области, контролируя состояние только ее части.

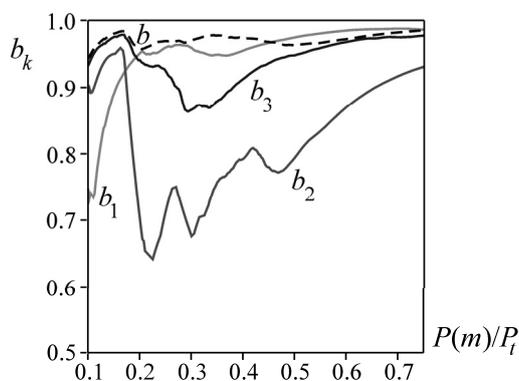


Рис. 6. Коэффициенты корреляции между числом микронарушений N_k в различных частях области S и внешней нагрузкой

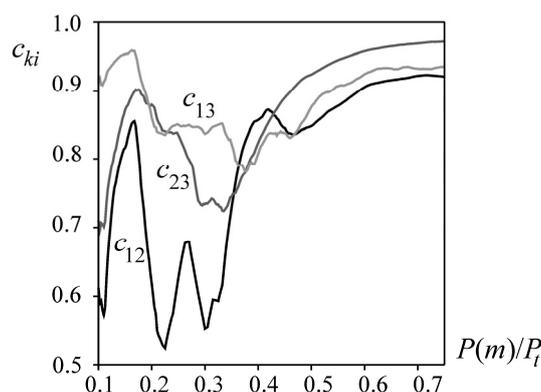


Рис. 7. Кросскорреляционные коэффициенты между числом микронарушений в различных частях области S

При разбиении области S на большее число блоков (рассмотрены случаи $K = 4$ и $K = 5$) выявленные корреляционные зависимости остаются прежними, лишь незначительно меняются значения коэффициентов b_k и c_{ki} .

ВЫВОДЫ

Анализ микродеформаций, полученных методом спекл-фотографии при испытании образцов горных пород по схеме “бразильская проба” (стохастическая информация), и рассчитанных аналитически упругих полей напряжений и деформаций (детерминированные данные) показал, что существуют значимые кросскорреляционные зависимости между нарушенностью отдельных частей исследуемой области, а также уровнем внешней нагрузки и нарушенностью этих частей. Это дает принципиальную возможность (при наличии геомеханической модели, адекватно описывающей эволюцию поля напряжений рассматриваемого объекта):

— оценить степень нарушенности различных участков объекта, контролируя состояние только одного из них;

— выполнить прогноз приращения нарушенности этих участков по известному изменению напряженного состояния (рассчитанному, например, в соответствии планом горных работ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **McGarr A., Simpson D., and Seeber L.** Case histories of induced and triggered seismicity, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, 2002, Vol. 81A.
2. **Li T. B., Xiao X. P.** Comprehensive integrated methods of rockburst prediction in underground engineering, *Advance in Earth Science*, 2008, Vol. 23(5).
3. **Zhenbi L., Baiting Zh.** Microseism monitoring system for coal and gas outburst, *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, Vol. 9, Issue 5. No. 1.
4. **Urbancic T. I., Trifu C.-I.** Recent advances in seismic monitoring technology at Canadian mines, *Journal of Applied Geophysics*, 2000, Vol. 45.
5. **Захаров В. Н.** Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 2002.
6. **Куксенко В. С.** Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов // ФТТ. — 2005. — Т. 47. — № 5.
7. **Гор А. Ю., Куксенко В. С., Томилин Н. Г., Фролов Д. И.** Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов // ФТПРПИ. — 1989. — № 3.
8. **Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / В. Н. Опарин, А. Д. Сашурин, А. В. Леонтьев и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
9. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. 1 // ФТПРПИ. — 2004. — № 4.
10. **Mogi K.** *Experimental rock mechanics*, Taylor and Francis, London, 2007.
11. **Шкуратник В. Л., Николенко П. В.** Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционном материале для контроля критических напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 4.
12. **Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В.** Акустоэмиссионный эффект памяти в образцах угля при трехосном осесимметричном сжатии // ФТПРПИ. — 2006. — № 3.
13. **Djadkov P. G., Mel'nikova V. I., Nazarov L. A., Nazarova L. A., and San'kov V. A.** Increase of seismotectonic activity in the Baikal region in 1989-95: results of experimental observations and numerical modeling of changes in the stress-strained state. *Geology and geophysics*, 1999, Vol. 40, No. 3.
14. **Vallejos J. A., MacKinnon S. D.** Correlation between mining and seismicity for re-entry protocol development, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2010, Vol. 48.
15. **Линьков А. М.** Численное моделирование сейсмических и асейсмических событий в геомеханике // ФТПРПИ. — 2005. — № 1.
16. **Al Heib M.** Numerical and geophysical tools applied for the prediction of mine induced seismicity in French coalmines, *Int. J. of Geosciences*, 2012, Vol. 3, No. 4A.
17. **Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г.** Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
18. **Cai M., Kaiser P. K., Morioka H. et al.** FLAC/PFC couple numerical simulation of AE in large-scale underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 44.
19. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Ярославцев А. Ф. и др.** Эволюция геомеханических полей и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
20. **Разумовский И. А.** Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.

21. **Larsson L., Sjudahl M., Thuvander F.** Microscopic 3-D displacement field measurements using digital speckle photography, *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, Vol. 4, No. 5.
22. **Choi S. and Shah S. P.** Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation, *Experimental Mechanics*, 1997, Vol. 37, No. 3.
23. **Jacobsson L., Enqvist B.** Deformation measurement on rock specimen during brazilian test using white light speckle photography, *SP Technical Notes*, 2004, Vol. 38. Building Technology and Mechanics Boras.
24. **Nguyena T. L., Halla S. A., Vacherb P., Viggianib G.** Fracture mechanisms in soft rock: Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation, *Tectonophysics*, 2011, Vol. 503, No. 1-2.
25. **ГОСТ 21153.3-85.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985.
26. **Бетоны.** Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90 / Межгосударственный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2006.
27. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1984.
28. **Jaeger J. C., Cook N. G. W.** Theory and application of curved jacks for measurement of stresses, *State of stress in the Earth's crust*, W.R.Judd (Ed.) Elsevier, New York, 1964.
29. **Hondros G.** The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete, *Australian Journal of Applied Science*, 1959, Vol. 10.
30. **Мухелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966.
31. **Gomez J. T., Shukla A., Sharma A.** Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2001, Vol. 36.
32. **Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л.** Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. — М.: МГГУ, 2004.
33. **Сукнев С. В., Новопашин М. Д.** Применение градиентного подхода для оценки прочности горных пород // ФТПРПИ. — 1999. — № 4.

Поступила в редакцию 2/XI 2015