



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ ПРЯМОМ СДВИГЕ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД С НАРУШЕНИЯМИ СПЛОШНОСТИ**

О. М. Усольцева, В. И. Востриков, П. А. Цой, В. Н. Семенов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: usoltseva57@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Выполнен анализ параметров сигналов микросейсмической эмиссии: количества сигналов, накопленных за десятисекундный интервал, их амплитуды и частоты в соответствии со стадией нагружения диаграммы “касательное напряжение – время” при сдвиговом деформировании образцов горных пород. Эксперименты проведены на сплошных образцах из глинистой коры выветривания и образцах туфопесчаника, содержащих нарушения сплошности с различной шероховатостью поверхности. Показано, что процесс сдвигового нагружения можно разделить на следующие стадии: линейный участок зависимости “касательное напряжение – время”, нелинейный в окрестности пиковой нагрузки и постпиковый. Установлено, что каждой стадии соответствуют определенные закономерности изменения параметров сигналов микросейсмической эмиссии, которые могут быть использованы для прогнозных оценок начала разрушения горной породы.

Сдвиг, нарушение сплошности, прочность, микросейсмическая эмиссия

**INVESTIGATIONS OF MICROSEISMIC EMISSION SIGNAL PARAMETERS
UNDER DIRECT SHEAR OF ROCK SAMPLES WITH JOINTS**

O. M. Usol'tseva, V. I. Vostrikov, P. A. Tsoi, and V. N. Semenov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
E-mail: usoltseva57@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

This paper analyzes parameters of microseismic emission signals: the number of signals accumulated over an interval of 10 s; their amplitudes and frequencies in accordance with the loading stage of the “shear stress – time” diagram when rock samples are loaded by direct shear. The experiments were carried out on intact samples from clayey weathering crust and samples from tuff sandstone with joints having different values of surface roughness. Analysis of MSE signals’ parameters and the shear deformation of rock samples revealed that the “shear stress – time” diagram can be divided into the stages which correlate with its “linear”, non-linear, and the post-peak portions. Each of these stages is associated with specific variations in of MSE signals, which therefore can be used for prediction of failure-time of rocks.

Shear loading, rock joint, strength, microseismic emission

Массив горных пород представляет собой неоднородную среду, состоящую из блоков, слоев различной прочности, разрывов различной формы и размеров, залегающих горизонтально и наклонно или в виде сложных складок в земной коре, и характеризуется большой сложностью строения. Сдвиг по ослабленной плоскости является одной из основных причин разрушения подземных тоннелей и горных выработок, скважин, бортов глубоких карьеров. Понимание механизма сдвигового поведения массива горных пород позволяет прогнозировать

его геомеханическое состояние, оптимально разрабатывать технологии добычи полезных ископаемых, проектировать конструкции карьеров, подземных сооружений и т. д. Имеется ряд публикаций, посвященных исследованию влияния различных факторов на процессы сдвигового деформирования горных пород и эквивалентных материалов с нарушениями сплошности: граничных условий, величины нормальной сжимающей силы, морфологии поверхности, скорости сдвига и т. д., а также изучению характера изменения параметров сигналов микросейсмической эмиссии в процессе сдвигового нагружения [1 – 15].

В данной работе исследования геомеханических свойств нарушений сплошности горных пород при прямом сдвиге проводились на испытательно-измерительном комплексе на базе сервогидравлического пресса “Инстрон 8802”. Для реализации граничного условия “постоянная нормальная нагрузка” использовалось специально разработанное оборудование. Комплекс оснащен системой регистрации сигналов микросейсмической эмиссии (МСЭ). Эксперименты выполнялись по методике Международного общества механики горных пород ASTM D5607-08 [16, 17]. Испытательно-измерительный комплекс и методика подробно описаны в [13].

Прочность на сдвиг нарушений сплошности горных пород определяется с помощью одно- и многоступенчатого сдвигового нагружения [16, 17]. В случае одноступенчатого сдвига различные значения постоянной нормальной силы (силы, действующей в направлении, перпендикулярном сдвиговой нагрузке) прикладываются к нескольким образцам (от трех до пяти), отобранным из одного и того же нарушения сплошности в массиве горных пород. Если не удастся выбрать несколько однотипных образцов, осуществляется многоступенчатый сдвиг. Для одного и того же образца с нарушением сплошности проводится от трех до пяти циклов сдвигового нагружения при различных постоянных значениях нормального напряжения, возрастающих для каждого цикла.

Для экспериментов выбраны два типа горных пород: туфопесчаник и глинистая кора выветривания. Предварительно образцы из этих пород испытывались на одноосное сжатие и растяжение. Значения предела прочности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Деформационно-прочностные характеристики образцов туфопесчаника и глинистой коры выветривания, полученные при одноосном сжатии и растяжении, паспорт прочности

Горная порода	Предел прочности, МПа		Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
	одноосное сжатие	растяжение				
Туфопесчаник	76.7	19.3	19.313	0.155	18.5	37
Глинистая кора выветривания	0.26	0.14	0.013	0.31	0.07	21

В ходе экспериментов на сдвиг в компьютерный файл непрерывно регистрировались сдвиговые и нормальные усилия и перемещения. Для исследования характеристик сигналов МСЭ использовался комплекс для микросейсмических измерений “Пульс” фирмы “Брюль и Кьер” и акселерометры KD91. Датчики KD91 приклеивались с помощью специального клея на части образца с нарушением сплошности (или в средней части сплошного образца) и находились в зазоре между двумя частями срезной коробки при сдвиговом деформировании.

Образцы глинистой коры выветривания при сдвиговом нагружении испытывали в цельном виде. Образцы туфопесчаника были разделены на две части двумя способами: распилены по плоскости естественной трещиноватости породы, шероховатость поверхности по калибровочной шкале ASTM D 5607 составила приблизительно $JRC = 0$ [18], и расколоты по плоскости естественной трещиноватости, шероховатость $JRC = 3.1$. Для “цементирования” двух частей образца в срезной коробке использован стоматологический гипс, предел прочности которого

при одноосном сжатии — 70 МПа. В каждом испытании на сдвиг выполнено по три цикла нагружения, значения нормальных напряжений составляли 5, 7.5, 10 МПа для образцов туфопесчаника и 0.015; 0.03 и 0.045 МПа — для глинистой коры выветривания. Результаты испытаний образцов на сдвиг приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытаний образцов туфового песчаника и глинистой коры выветривания при нагружении прямым сдвигом

Горная порода	Коэффициент шероховатости, JRC	Цикл сдвигового нагружения	Предельное сдвиговое напряжение, МПа	Нормальное напряжение, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
Туфопесчаник	3.1	1	4.78	5	1.93	30
		2	6.45	7.5		
		3	7.7	10		
Туфопесчаник	0	1	2.47	5	0.26	24
		2	3.56	7.5		
		3	4.67	10		
Глинистая кора выветривания	—	1	0.06	0.015	0.063	24
		2	0.066	0.03		
		3	0.075	0.045		

Сравнение значений сцеплений в табл. 1 и 2 показало, что сцепление для туфопесчаника по результатам испытаний на одноосное сжатие и растяжение (18.5 МПа) значительно превышает сцепление, полученное при испытаниях на сдвиг. Шероховатость поверхности также существенно влияет на эту характеристику: сцепление равно 1.93 МПа при JRC = 3.1, и 0.26 МПа — при JRC = 0. Угол внутреннего трения несколько уменьшается и составляет 37° по данным испытаний на сжатие и растяжение, и 30 и 24° — по данным экспериментов при прямом сдвиге для образцов с JRC = 3.1 и JRC = 0 соответственно. Значения сцепления и угла внутреннего трения для образцов глинистой коры выветривания, полученных при одноосном сжатии, испытаниях на растяжение и прямой сдвиг, различаются на 10 и 15 % соответственно.

В процессе сдвигового нагружения регистрировались сигналы МСЭ. На рис. 1а показана зависимость количества N сигналов МСЭ, накопленных за десятисекундный интервал, от времени эксперимента t в соответствии с диаграммой “касательное напряжение τ – время t ”, приведенной на рис. 1б, для образца глинистой коры выветривания на первом цикле сдвигового нагружения.

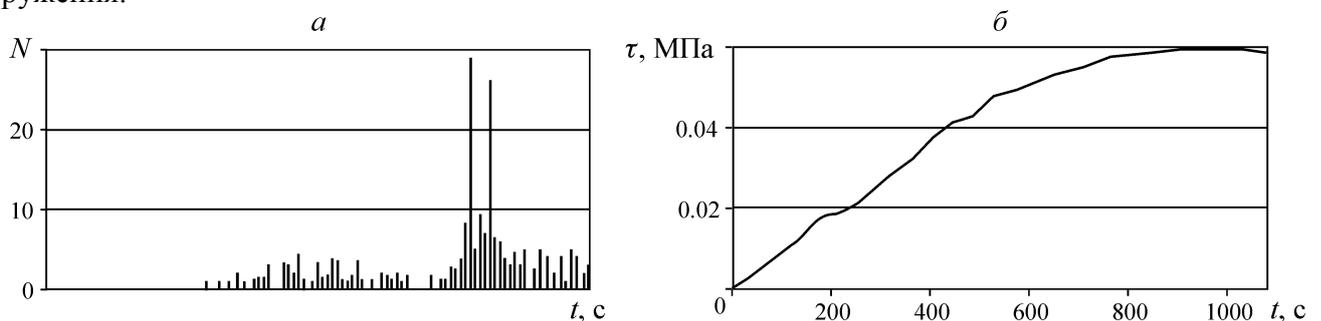


Рис. 1. Количество N сигналов МСЭ, накопленных за десятисекундный интервал (а) и диаграмма “напряжение сдвига τ – время t ” (б) для образца глинистой коры выветривания на первом этапе сдвигового нагружения

Видно, что первые сигналы МСЭ появляются при касательных напряжениях около 0.03 МПа, что составляет 50 % от значения прочности на сдвиг (0.06 МПа). Количество сигналов незначительно, амплитуда ускорения составляет 1–2 м/с², спектр частот широкополосный от 2 до

32 кГц. На рис. 2 приведены параметры сигналов микросейсмической эмиссии для образца глинистой коры выветривания в момент образования магистральной трещины (рис. 2а, в) и в момент проскальзывания одной части образца по другой (рис. 2б, г). Из рис. 1, 2 видно, что при значениях напряжений, близких к пределу прочности на сдвиг, количество сигналов значительно возрастает (до 25–30), амплитуда ускорений увеличивается до 30–42 м/с², их энергия также растет, частотный спектр сужается и смещается к низким частотам до $f = 32–34$ кГц. При приблизительно постоянном напряжении сдвига перемещение сдвига продолжает увеличиваться, образец распадается на две части, которые начинают перемещаться одна относительно другой. На этом этапе продолжают регистрироваться сигналы МСЭ, их количество значительно меньше, чем в окрестности пиковой нагрузки, однако больше, чем на стадии нелинейного сдвигового деформирования. Амплитуды сигналов составляют 2–5 м/с², что несколько выше значений амплитуд на нелинейном участке.

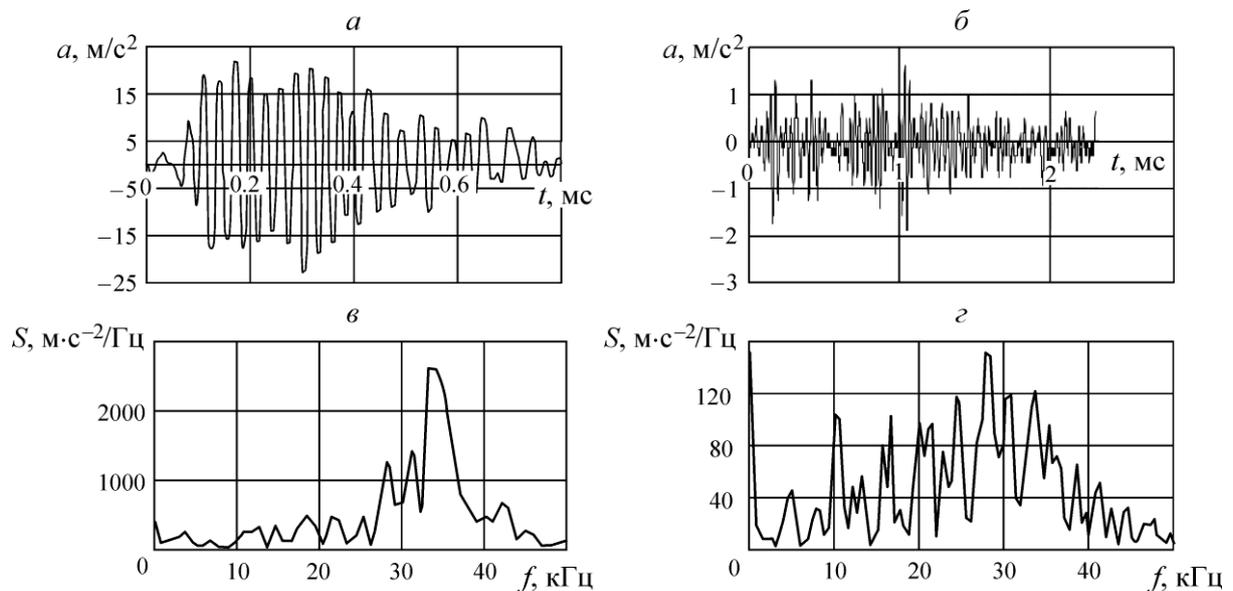


Рис. 2. Параметры сигналов МСЭ для образца глинистой коры выветривания: а, в — в момент образования магистральной трещины; б, г — в момент проскальзывания одной части образца по другой

Можно заключить, что амплитуда сигнала при разрыве образца значительно больше сигнала при скольжении частей образца относительно друг друга. Разрыв характеризуется малой длительностью процесса. Амплитуда максимальной спектральной составляющей сигнала при образовании магистрального разрыва значительно превышает амплитуду спектра при скольжении; основная энергия сигнала лежит в узком частотном диапазоне со средней частотой, примерно равной 34 кГц. При скольжении спектр расширяется в сторону низких частот и при отношении 65 % к гармонике с максимальной амплитудой ширина находится в пределах 10–35 кГц. Следует также отметить, что сигналы МСЭ с наибольшим значением амплитуды и наименьшим значением частоты регистрировались в момент, предшествующий образованию основного разрыва образца, что может быть диагностикой начала разрушения.

На рис. 3а показана зависимость количества сигналов МСЭ, накопленных за десятисекундный интервал, от времени эксперимента в соответствии с диаграммой “касательное напряжение τ – время t ”, приведенной на рис. 3б, для образца туфопесчаника с $JRC = 3.1$ на первом цикле сдвигового нагружения.

Первые сигналы МСЭ стали появляться практически с самого начала процесса нагружения, причем их количество для образца туфопесчаника значительно больше, чем для глинистой коры выветривания. Ускорение составило 6–9 м/с², широкополосная частота 5–28 кГц на участке диаграммы “напряжение сдвига τ – время t ” в окрестности предела прочности нарушения сплош-

ности. При касательных напряжениях, близких к пределу прочности на сдвиг (4.78 МПа), количество сигналов увеличилось до 30–50, частотный спектр — до 10–20 кГц, амплитуда ускорения — до 8–16 м/с². На стадии постпиковой нагрузки также наблюдалось большое количество сигналов МСЭ. Необходимо отметить, что каждый всплеск числа сигналов МСЭ соответствовал резкому снижению напряжения сдвига и проскальзыванию одной части образца по другой.

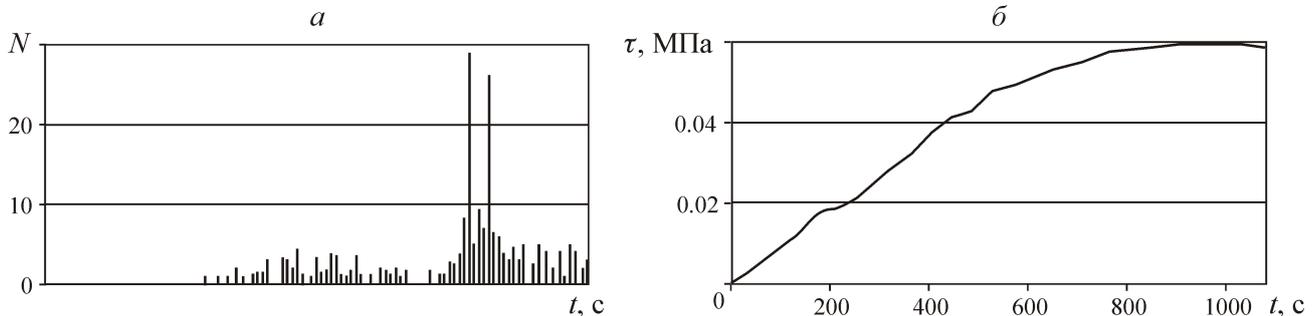


Рис. 3. Количество N сигналов МСЭ, накопленных за десятисекундный интервал (a) и диаграмма “напряжение сдвига τ – время t ” (b) для образца туфопесчаника с $JRC = 3.1$ на первом этапе сдвигового нагружения

При испытании на сдвиг образца туфопесчаника с $JRC = 0$ зафиксировано незначительное количество сигналов МСЭ на до- и постпиковой стадиях нагружения.

ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование деформационно-прочностных свойств образцов двух типов горных пород при сдвиговом нагружении: глинистой коры выветривания (предел прочности менее 2 МПа) и туфопесчаника (предел прочности 60–100 МПа) с различной шероховатостью поверхности $JRC = 0, 3.1$ показало, что поведение горных пород определяется не только свойствами ненарушенной породы, но в большей степени механическими и геометрическими свойствами нарушений сплошности. Так, значения сцепления, полученные в результате испытаний на одноосное сжатие и растяжение образцов туфопесчаника, превышают фиксируемые при испытаниях на прямой сдвиг образцов с нарушениями сплошности и $JRC = 3.1$ в 9.6 раза. Кроме того, шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на сцепление, которое увеличивается в 7.4 раза для туфопесчаника с ростом JRC от 0 до 3.1.

Анализ характеристик сигналов МСЭ, наблюдаемых при мониторинге процесса сдвиговой деформации образцов горных пород, свидетельствует, что начало скольжения сопровождается всплеском сейсмической активности, значительным увеличением амплитуды ускорения и уменьшением частоты. Постпиковая стадия также сопровождается высокой сейсмической активностью, каждый всплеск числа сигналов МСЭ соответствует резкому снижению напряжения сдвига и проскальзыванию одной части образца по другой. Сигналы МСЭ с наибольшей амплитудой и частотой регистрировались в момент, предшествующий образованию основного разрыва образца, что может быть диагностикой начала разрушения горной породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Gao Y. and Wong L. N. Y. A Modified correlation between roughness parameter Z_2 and the JRC , Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, vol. 48, issue 1, pp. 387–396.
2. Atapour H. and Moosavi M. The influence of shearing velocity on shear behavior of artificial joints, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, vol. 47, issue 5, pp. 1745–1761.
3. Meng F., Zhou H., Wang Z., et al. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, vol. 86, pp. 210–223.

4. **Mirzaghobanali A., Nemic J., and Aziz N.** Effects of cyclic loading on the shear behaviour of infilled rock joints under constant normal stiffness conditions, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, issue 4, pp. 1373–1391.
5. **Hencher S. R. and Richards L. R.** Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, iss.3, pp. 883–905.
6. **Jang H. S. and Jang B. A.** New Method for Shear Strength Determination of Unfilled, Unweathered Rock Joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, issue 4, pp. 1515–1534.
7. **Indraratna B., Thirukumar S., Brown E. T., and Zhu S. P.** Modelling the shear behaviour of rock joints with asperity damage under constant normal stiffness, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, issue 1, pp. 179–195.
8. **Mohd-Nordin M. M., Song K. I., Cho G. C., and Mohamed Z.** Long-wavelength elastic wave propagation Across Naturally Fractured Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, issue 2, pp. 561–573.
9. **Moradian Z. A., Ballivy G., and Rivard P.** Correlating acoustic emission sources with damaged zones during direct shear test of rock joints, *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, vol. 49, issue 6, pp. 710–718.
10. **Vergara M. R., Kudella P., and Triantafyllidis T.** Large scale tests on jointed and bedded rocks under multi-stage triaxial compression and direct shear, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, issue 1, pp. 75–92.
11. **Jiang Y., Xiao J., Tanabashi Y., and Mizokami T.** Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2):275–286.
12. **Shrivastava A. K. and Rao K. S.** Shear behaviour of rock joints under CNL and CNS boundary conditions, *Geotech. and Geol. Ing.*, 2015, vol. 33, issue 5, pp. 1205–1220.
13. **Usol'tseva O. Vostrikov V., Tsoi P., and Semenov V.** Investigation of strength and microseismic emission characteristics of rock joints under shear loading in 18th International multidisciplinary scientific geoconference, *SGEM 2018 Conference Proceedings 18 (1.3) (Bulgaria, Albena, Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2018)*, pp. 521–528.
14. **Xia C. C., Tang Z. C. G., Xiao W. M., and Song Y. L.** New peak shear strength criterion of rock Joints based on quantified surface description, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, issue 2, pp. 387–400.
15. **Zhou H., Meng F. Z., Zhang C. Q., et al.** Investigation of the acoustic emission characteristics of artificial saw-tooth joints under shearing condition, *Acta Geotechnica*, 2014, vol. 11, issue 4, pp. 925–939.
16. **ASTM D 5607 – 9502.** Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force, Standard by ASTM International, 2008.
17. **Muralha J., Grasselli G., Tatone B., Blumel M., Yujing P., and Chryssanthakis J.** ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, issue 1, pp. 291–302.
18. **Tse R. and Cruden D.** Estimating joint roughness coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining, Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, vol. 16, issue 5, pp. 303–307.