



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД,  
РАЗРУШЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ**

**П. А. Цой, О. М. Усольцева**

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

Представлены демонстрационные результаты расчета коэффициента шероховатости JRC для образцов горных пород в зависимости от положения профиля нарушения сплошности в условиях одноосной нагрузки. Для этого сканировались сдвиговые поверхности разрушения испытанных образцов. Используя дополнительную программную обработку, поверхности разрежали на множество профилей в направлении приложения нагрузки. В зависимости от среза для каждого профиля рассчитывался коэффициент JRC, затем определялось его среднее значение по всей поверхности, которое было рекомендовано для оценки шероховатости.

*Коэффициент шероховатости, одноосное сжатие, горные породы, профиль нарушения сплошности, 3D-сканирование*

**DETERMINATION OF JOINT ROUGHNESS COEFFICIENT  
FOR ROCK SPECIMENS FORMED UNDER UNIAXIAL COMPRESSION**

**P. A. Tsoi and O. M. Usol'tseva**

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

Demonstration results of calculating joint roughness coefficient (JRC) for rock specimens are presented depending on the position of the discontinuity profile under uniaxial load conditions. To obtain these results, shear failure surfaces of test specimens were scanned. Using additional software processing, the surfaces were cut into multiple profiles in the direction of load applied. Depending on the shear cut, the JRC was calculated for each profile, its average value was determined for the entire discontinuity surface, which was recommended for estimating roughness.

*Joint roughness coefficient, uniaxial compression, rocks, discontinuity profiles, 3D-scanning*

Как правило, горная порода представляет собой объект, который характеризуется высокой степенью неоднородности материала. Неоднородность, в свою очередь, является одним из основных триггеров для образования нарушений сплошности по ослабленным границам структурных составляющих породы. Поэтому при оценке прочности горных пород важен учет нарушений сплошности. В международной практике уровень шероховатости горных пород принято оценивать с помощью шкалы Бартона-Чуби, которая характеризуется тем, что видимый профиль нарушения сплошности коррелирует с соответствующим значением коэффициента шероховатости JRC (joint roughness coefficient). А коэффициент шероховатости учитывается при построении паспорта прочности. В ряде работ [1–3], посвященных влиянию JRC на прочностные характеристики образцов, испытанных при одноосном сжатии предполагается,

что профиль нарушения видим на поверхности образца. В данной работе коэффициент JRC рассматривается не только как видимое нарушения сплошности, но и как множество значений, которое можно определить с соответствующего множества профилей, извлеченных со всей поверхности скола образца, испытанного в условиях одноосного сжатия, и таким образом выявить изменчивость JRC.

Сначала проводилось измерение длины каждого профиля нарушения сплошности, взятого из работы [4]. Отметим, что каждый профиль соответствует определенной величине JRC. Для измерения брался скриншот профиля и в заданном масштабе рассчитывалась его длина  $L$  (мм) по формуле:

$$L = \sum_{i=2}^n k \cdot \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент масштабирования;  $x_i, x_{i-1}$  — пиксельные координаты профиля по  $x$  текущего и предыдущего пикселя соответственно;  $y_i, y_{i-1}$  — пиксельные координаты профиля по  $y$  текущего и предыдущего пикселя соответственно;  $n$  — количество пикселей, содержащихся в изображении профиля.

Вычисленные величины  $L$  были поделены на  $D = 100$  мм (расстояние между двумя концами для всех профилей в рамках шкалы Бартона-Чуби) и таким образом получены безразмерные значения нормированных длин профилей  $L/D$ . Соответствие между  $L/D$  и JRC представлено гистограммой на рис. 1.

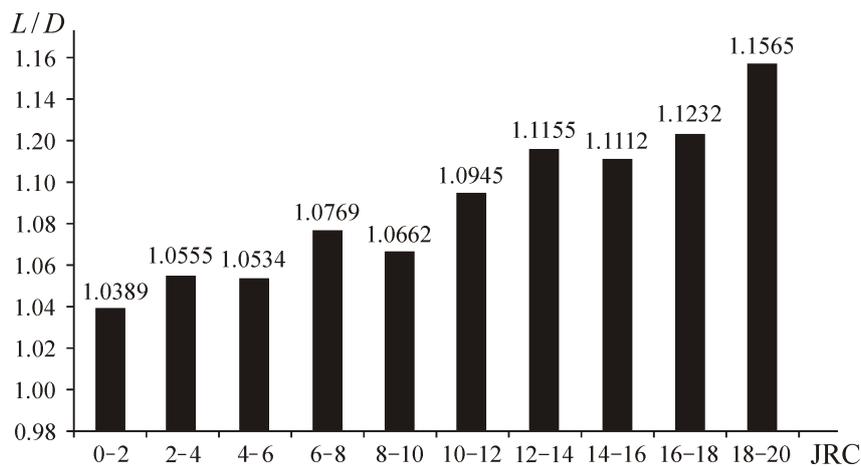


Рис. 1. Гистограмма соответствия  $L/D$  – JRC

Предположим, что  $JRC = \{0, 2, 4, \dots, 20\}$  покомпонентно соответствует  $L/D = \{1.0000, 1.0389, 1.0555, \dots, 1.1565\}$ , тогда на этой основе можно построить следующую регрессионную зависимость “JRC –  $L/D$ ” с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.96$ .

$$JRC = -8631.285 \left(\frac{L}{D}\right)^3 + 28005.3489 \left(\frac{L}{D}\right)^2 - 30107.0304 \left(\frac{L}{D}\right) + 10732.8132. \quad (2)$$

Для исследований использовались цилиндрические образцы алевролита, песчаника и сланца, расколотые на две части в результате одноосного сжатия (рис. 2). Исходная длина неразрушенных образцов составляла 60 мм, диаметр поперечного сечения — 30 мм.

Каждая часть расколотых образцов сканировалась с помощью 3D-сканера Einscan-SE. Затем с помощью приложения AutoDesk Netfabb из трехмерных изображений каждой отколотой части вырезалась поверхность (рис. 3), по которой произошел скол.

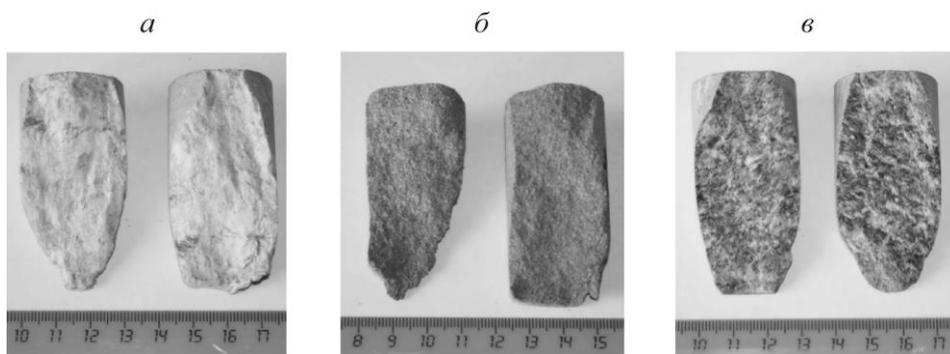


Рис. 2. Разрушенные образцы алевролита (а), песчаника (б) и сланца (в)

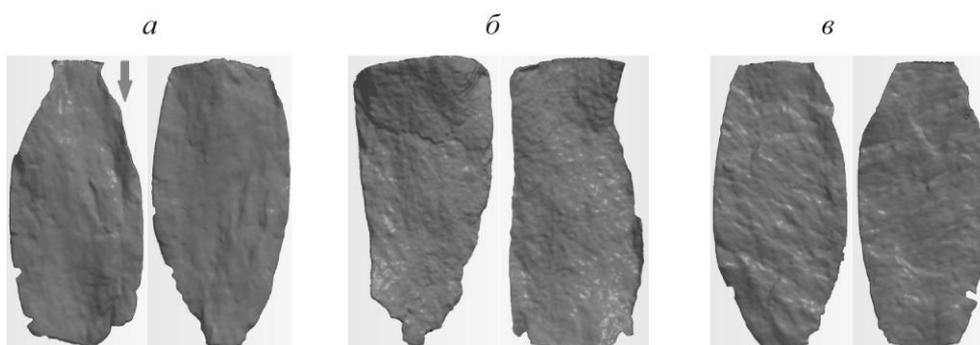


Рис. 3. Изображения поверхностей скола образцов алевролита (а), песчаника (б) и сланца (в)

С заданным шагом 0.5 мм на поверхности скола выделялись срезы (~ 60 срезов на одну поверхность) в направлении сдвига (рис. 3а, направление указано стрелкой). Каждый срез представлял из себя локальный профиль нарушения сплошности (рис. 4), для каждого из которых рассчитывалась длина нелинейной части  $L$  и расстояние  $D$  между двумя конечными точками кривой и затем значение  $L/D$ . Это отношение подставлялось в формулу (2), и таким образом JRC был получен для каждого локального профиля. В результате построены гистограммы “JRC – номер локального профиля” (рис. 5), которые показывают изменчивость значения JRC в зависимости от расположения профиля.

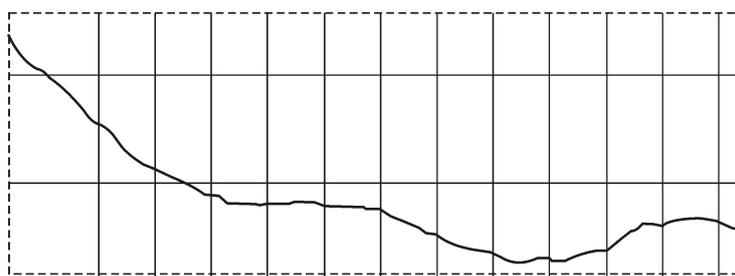


Рис. 4. Пример локального профиля нарушения сплошности (песчаник)

По построенным гистограммам проведены вычисления статистических показателей: минимального, максимального, среднего JRC и стандартного отклонения (таблица). Отметим, что среднее значение JRC для разных частей одного и того же образца примерно одно и то же. Это можно объяснить тем, что при разрушении образца мелкие куски откололись с поверхности частей. Поэтому для общей характеристики шероховатости образцов можно рассматривать осредненное значение JRC по двум частям, для алевролита оно будет 3.5, для песчаника — 11.5, для сланца — 6.43.

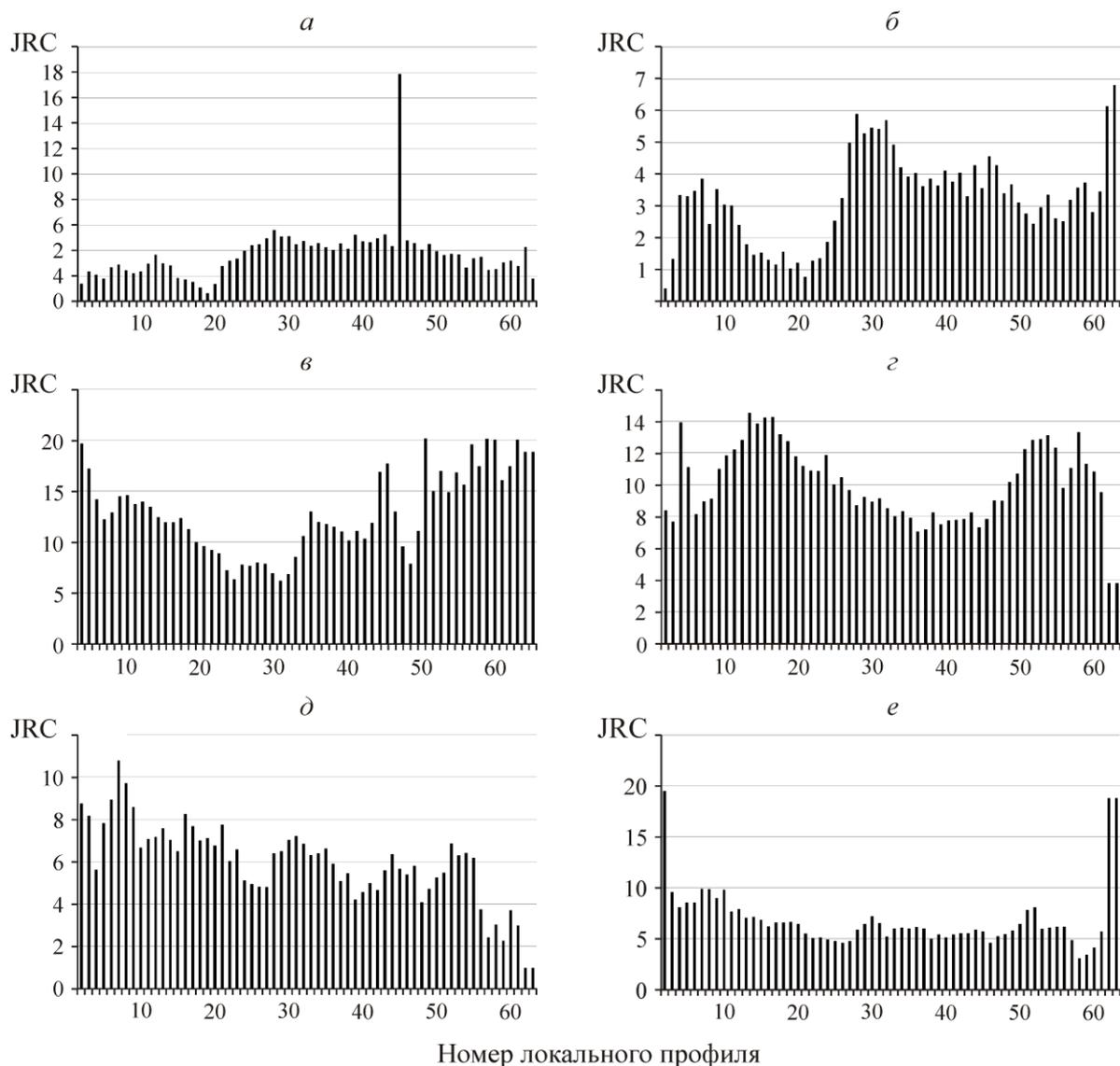


Рис. 5. Гистограммы “JRC – номер локального профиля” для двух поверхностей скола алевролита (а, б), песчаника (в, г), сланца (д, е)

Статистические показатели, относящиеся к гистограммам рис. 5

Номер гистограммы	JRC			Стандартное отклонение
	минимальный	максимальный	средний	
Рис. 5а	0.64	17.87	3.69	2.20
Рис. 5б	0.41	6.82	3.31	1.48
Рис. 5в	6.21	20.16	12.91	4.07
Рис. 5г	3.8	14.52	10.09	2.43
Рис. 5д	1.01	10.80	5.97	1.90
Рис. 5е	3.05	19.51	6.89	3.14

## ВЫВОДЫ

Проведено исследование по оценке коэффициента шероховатости JRC для образцов алевролита, песчаника и сланца, разрушенных в результате одноосного сжатия. Построена зависимость JRC от нормированной длины профиля на основе данных Бартон-Чуби по соответствию значений JRC виду профилей нарушения сплошности. С помощью 3D-сканера получено компьютер-

ное трехмерное изображение каждого разрушенного образца, затем в приложении выделены поверхности, по которым произошло сдвиговое разрушение. Каждая из поверхностей нарушения сплошности разбивалась на множество профилей, расположенных по направлению сдвига, для которых вычислялся коэффициент шероховатости. Построенные гистограммы “JRC – номер локального профиля” продемонстрировали изменчивость JRC по поверхности нарушения сплошности. Отмечено, что средние значения JRC для каждой из двух поверхностей скола не сильно отличаются друг от друга в рамках одного и того же образца, поэтому рекомендовано использовать их осредненные значения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Wen-Ling Tian, Shen-Qi Yang, Zhao-Liang Hu and Jia-Wei Lu.** Experimental study of the mechanical behavior of unfilled rough jointed specimens under uniaxial compression, *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13(164), 11 pp. [**Вэн-Линг Тиен, Шэн-Чи Янг, Чжао-Лянг Ху, Цзя-Вэй Лу.** Экспериментальное исследование механического поведения незаполненных шероховатых образцов при одноосном сжатии // *Arabian Journal of Geosciences*. — 2020. — Т. 13. — № 164. — 11 с.]
2. **Asadizadeh M., Hossaini M. F, Moosavi M., Masoumi H., and Ranjith P. G.** Mechanical characterisation of jointed rock-like material with non-persistent rough joints subjected to uniaxial compression, *Engineering Geology*, 2019, vol. 260(3), art. 105224, 13 pp. [**Асадизадэ М., Хоссаини М. Ф., Мусави М., Масуми Х., Ранджитх П. Г.** Механическая характеристика нарушенного скального материала с неустойчивыми нарушениями сплошности при одноосном сжатии // *Engineering Geology*. — 2019. — Т. 260. — № 3. — Ст. 105224. — 13 с.]
3. **Wasantha P. L. P., Ranjith P. G. and Luo L.** Effect of joint roughness on the compressive strength of singly-jointed rock, *Proceedings of International Conference of Geotechnical Engineering, Colombo-2015*, pp. 467–470. [**Васантха П. Л. П., Ранджитх П. Г., Луо Л.** Влияние шероховатости нарушений сплошности на прочность при сжатии пород, содержащих единственное нарушение сплошности // *Proceedings of International Conference of Geotechnical Engineering*. — Коломбою, 2015. — С. 467–470.]
4. **Хоек Е.** *Practical Rock Engineering*. Canada, 2007, pp. 153–157 [**Хоек Е.** *Практический инжиниринг горных пород*. — Канада, 2007. — С. 153–157.]