

## Оценка удароопасности горных пород на основе нескольких критериев

О.М. Усольцева<sup>1</sup>, Я.А. Воловик<sup>2</sup>✉<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация<sup>2</sup> АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Российская Федерация✉ [info@vnimi.ru](mailto:info@vnimi.ru)

**Резюме:** Для оценки склонности горных пород к ударам была проведена серия лабораторных испытаний для 50 образцов разных типов горных пород (песчаники, алевролиты, известняки, алевросланцы). Испытания проводились на сервогидравлическом прессе Instron 8802 в режиме одноосного сжатия со скоростью перемещения захвата прессы 0,1 мм/мин. Для каждой одноименной группы горных пород испытания проводились на пяти образцах. В результате были получены полные диаграммы «напряжение–деформация», включая постпиковый участок деформирования. Оценка удароопасности проводилась на основании нескольких критериев с целью сравнения их точности. Результаты расчетов показали, что разные критерии могут давать различные оценки склонности породы к удароопасности даже для одного типа породы. На основе анализа экспериментальных данных сделано заключение, что показатель удароопасности, основанный на энергии и определенный в виде разностного значения, охватывающего весь процесс разрушения породы, является наиболее достоверным.

**Ключевые слова:** лабораторный эксперимент, горная порода, удароопасность, напряжение – деформация, динамические явления, критерии удароопасности, модуль спада, модуль упругости

**Для цитирования:** Усольцева О.М., Воловик Я.А. Оценка удароопасности горных пород на основе нескольких критериев. *Горная промышленность*. 2024;(3S):48–52. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-48-52>

## Multi-criteria assessment of rock bump hazard

O.M. Usoltseva<sup>1</sup>, Ya.A. Volovik<sup>2</sup>✉<sup>1</sup> N.A. Chinalak Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation<sup>2</sup> VNIMI JSC, Prokopyevsk, Russian Federation✉ [info@vnimi.ru](mailto:info@vnimi.ru)

**Abstract:** A series of laboratory tests was carried out for 50 samples of different rock types (sandstones, siltstones, limestones, shaly silts) to evaluate the tendency of rocks to rock bumps. The tests were carried out using the Instron 8802 servohydraulic press in the uniaxial compression mode with the press clamp velocity travel of 0.1 mm/min. Five specimens were tested from each group of the same rock types. As the result, complete stress-and-strain diagrams including the post-peak deformation section were obtained. Evaluation of the rock bump hazard was performed using several criteria in order to compare their accuracy. Results of the calculations revealed that different criteria can give different estimates of the rock's tendency to bumps even for the same rock type. Based on analyzing the experimental data, it was concluded that the energy-based rock bump hazard indicator, defined as a difference value covering the entire rock fracture process, is the most reliable criterion.

**Keywords:** laboratory experiment, rock, rock bump hazard, stress-and-strain state, dynamic phenomena, rock bump hazard criteria, recession modulus, modulus of elasticity

**For citation:** Usoltseva O.M., Volovik Ya.A. Multi-criteria assessment of rock bump hazard. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):48–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-48-52>

**Введение**

В связи с постоянным увеличением добычи минеральных ресурсов увеличивается глубина проводимых работ, а также строительства подземных сооружений. Поэтому остро стоит проблема горных ударов, динамических явлений в массиве, которые обычно вызываются внезапным и сильным высвобождением энергии упругой деформации, накопленной в породе [1–4]. Имеется значительное количество российских и зарубежных работ, посвященных экспериментальному, теоретическому и численному исследованиям поведения и механизма горных ударов [5–8]. Одним из способов оценки склонности породы к удароопасности, охватывающим небольшую часть этой проблемы, является разрушение породы при лабораторных испытаниях.

В данной работе рассматривается оценка склонности горной породы к удароопасности на основе лабораторных испытаний кернов. Наиболее часто используемыми критериями оценки удароопасности горных пород в нашей стране являются критерии, описанные в методике ВНИИ<sup>1</sup>.

**Оборудование, испытательные образцы, методика экспериментов, критерии удароопасности**

Согласно указани<sup>2</sup> для испытаний горных пород с учетом запредельного деформирования необходимо использовать пресс для испытаний, имеющий высокую жесткость, или сервоуправляемый пресс, позволяющий проводить нагружение образца с заданной скоростью перемещения траверсы. Режим испытаний заключается в том, чтобы при нагружении поддерживать постоянную скорость продольного деформирования образца породы, что достигается в случае использования сервоуправляемого пресса автоматизированным режимом контролируемых продольных деформаций. Испытания проводятся в режиме одноосного сжатия с диапазоном скоростей деформирования от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>-8</sup> с<sup>-1</sup>.

Такой тип испытаний дает возможность получить запредельную область деформирования на кривой «напряжение–деформация» (рис. 1). По графику деформирования образца определяют предел прочности  $\sigma^B$ , модуль упругости  $E$ , модуль спада  $M$ , общую деформацию (в момент разрушения)  $\epsilon_{общ}$ . Упругая деформация рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_{упр} = \frac{\sigma^B}{E} \tag{1}$$

Для оценки хрупкости (удароопасности) горных пород необходимо определить следующие коэффициенты:

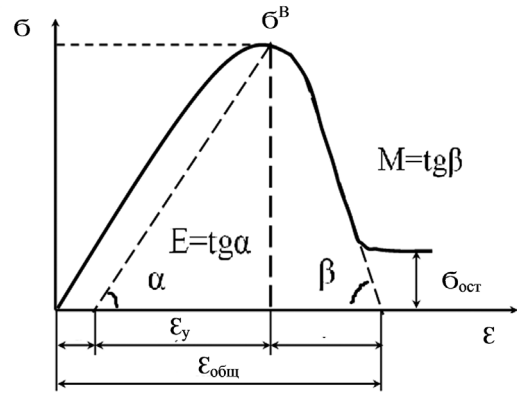
$$K_1 = \frac{E}{M} \tag{2}$$

$$K_2 = \frac{\epsilon_{упр}}{\epsilon_{общ}} \tag{3}$$

При  $K_1 \leq 1$  порода считается удароопасной; при  $K_1 > 1$  – неудароопасной.

При  $K_2 \geq 0,7$  – порода считается удароопасной; при  $K_2 < 0,7$  – неудароопасной.

Если хотя бы один коэффициент подтверждает ударо-



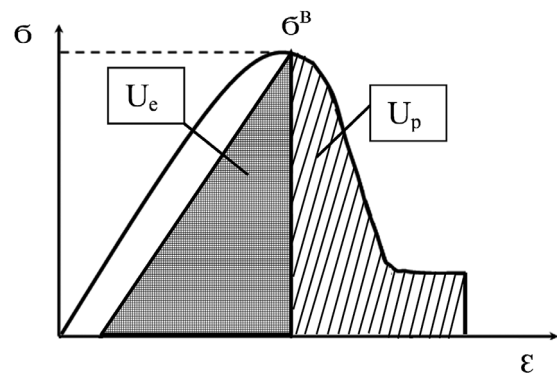
**Рис. 1**  
Схематическая диаграмма «напряжение–деформация» при одноосном сжатии, критерии удароопасности  $K_1$  и  $K_2$

**Fig. 1**  
A schematic stress-and-strain chart for uniaxial compression,  $K_1$  and  $K_2$  impact criteria

опасность горной породы, то выносится заключение о ее удароопасности.

Третий критерий, который был принят для исследования, это энергетический критерий, предложенный в работе [9]. Коэффициент энергетического воздействия пиковой прочности  $A$  (Peak-strength energy impact index) был определен как отношение плотности энергии пиковой упругой деформации к плотности энергии после пикового разрушения (рис. 2). Формула для критерия  $A$  выглядит следующим образом:

$$A = \frac{U_e}{U_p} \tag{4}$$



**Рис. 2**  
Схематическая диаграмма «напряжение–деформация» при одноосном сжатии, критерий удароопасности  $A$

**Fig. 2**  
A schematic stress-and-strain chart for uniaxial compression,  $A$  impact criterion

**Результаты испытаний**

Ниже представлены результаты испытаний 50 образцов горных пород (песчаники, алевролиты, известняки, алевросланцы). Испытания проводились на сервогидравлическом прессе Instron 8802 в режиме одноосного сжатия со скоростью перемещения захвата пресса 0,1 мм/мин. Для каждой одноименной группы горных пород испытания проводились на пяти образцах. Образцы были испытаны при одноосном сжатии в режиме «жесткого» сжатия, были построены диаграммы «осевое напряжение

<sup>1</sup> Методические указания по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам Санкт-Петербургского горного университета. 2011.

<sup>2</sup> Методические указания по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам Санкт-Петербургского горного университета. 2011.

**Таблица 1**  
**Оценка удароопасности образцов горных пород**
**Table 1**  
**Assessment of the rock samples for the rock bump hazard**

№ пробы и наименование	№ обр.	$K_2 = \epsilon_{\text{упр}} / \epsilon_{\text{общ}}$	$K_{\text{ш}} = E / M$	$A = U_e / U_p$	ЗаклЮчение об удароопасности
1 Песчаник	1-1	0,33	4,48	0,70	Неудароопасен
	1-2	0,32	1,81	0,57	Неудароопасен
	1-3	0,43	1,27	1,47	Неудароопасен
	1-4	0,53	0,76	2,18	Удароопасен
	1-5	0,40	1,40	1,04	Неудароопасен
2 Песчаник	2-1	0,33	0,75*	1,48*	(He) удароопасен?
	2-2	0,31	0,82*	0,86*	(He) удароопасен?
	2-3	0,43	0,93	2,13	Удароопасен
	2-4	0,40	1,16*	2,12*	(He) удароопасен?
	2-5	0,49	0,79	2,71	Удароопасен
3 Алевролит	3-1	0,19	2,18	0,41	Неудароопасен
	3-2	0,45	1,24	1,60	Неудароопасен
	3-3	0,37	1,13*	2,90*	(He) удароопасен?
	3-4	0,22	2,93	0,90	Неудароопасен
	3-5	0,43	1,18	1,94	Неудароопасен
4 Известняк	4-1	0,50	1,22	1,14	Неудароопасен
	4-2	0,43	1,65	1,40	Неудароопасен
	4-3	0,43	3,41	1,19	Неудароопасен
	4-4	0,44	1,87	1,51	Неудароопасен
	4-5	0,44	1,44	1,42	Неудароопасен
5 Алевролит	5-1	0,33	1,58	0,64	Неудароопасен
	5-2	0,28	1,59	1,91	Неудароопасен
	5-3	0,32	1,80	1,50	Неудароопасен
	5-4	0,29	2,19	1,35	Неудароопасен
	5-5	0,31	1,541	1,84	Неудароопасен
6 Песчаник	6-1	0,38	0,520	2,147	Удароопасен
	6-2	0,33	1,55	0,50	Неудароопасен
	6-3	0,46	1,48	1,32	Неудароопасен
	6-4	0,51	0,93	2,63	Удароопасен
	6-5	0,42	1,45	1,94	Неудароопасен
7 Алевросланцы	7-1	0,54	1,80	1,63	Неудароопасен
	7-2	0,40	1,21	1,95	Неудароопасен
	7-3	0,46	1,83	1,88	Неудароопасен
	7-4	0,44	1,43	1,58	Неудароопасен
	7-5	0,50	1,402	1,81	Неудароопасен
8 Песчаники	8-1	0,29	0,80	2,71	Удароопасен
	8-2	0,41	3,07	1,71	Неудароопасен
	8-3	0,42	0,88	2,65	Удароопасен
	8-4	0,50	0,97	2,74	Удароопасен
	8-5	0,32	0,77	2,66	Удароопасен
9 Алевросланцы	9-1	0,49	1,26	1,91	Неудароопасен
	9-2	0,30	1,67	0,72	Неудароопасен
	9-3	0,33	1,17	1,80	Неудароопасен
	9-4	0,33	1,88	1,93	Неудароопасен
	9-5	0,34	1,56	1,79	Неудароопасен
10 Алевросланцы	10-1	0,55	0,92	2,117	Удароопасен
	10-2	0,45	1,82	0,947	Неудароопасен
	10-3	0,46	0,81	1,069	(He) удароопасен?
	10-4	0,56	1,20	2,022	(He) удароопасен?
	10-5	0,43	1,32	2,002	(He) удароопасен ?

**Таблица 2**  
Оценка удароопасности образцов горных пород

№ образца	$E, \text{ГПа}$	$M, \text{ГПа}$	$K_1 = E/M$	$A = U_e / U_p$	Заключение об удароопасности
2-1	38,846	51,541	0,75	1,48	(He) удароопасен?
2-2	28,217	34,392	0,82	0,86	Неудароопасен
		11,651*	2,42*		
2-4	32,847	28,337	1,16	2,12	(He) удароопасен?
3-3	54,092	47,852	1,13	2,90	(He) удароопасен?
10-3	13,44	16,671	0,81	1,07	Неудароопасен
		10,388*	1,30*		
10-4	11,378	9,452	1,20	2,02	Удароопасен
		16,878*	0,67*		
10-5	9,224	6,981	1,32	2,00	Удароопасен
		11,684*	0,79*		

Примечание: \* исправленные значения модулей сдвига и коэффициентов  $K_1$

**Table 2**  
Assessment of the rock samples for the rock bump hazard

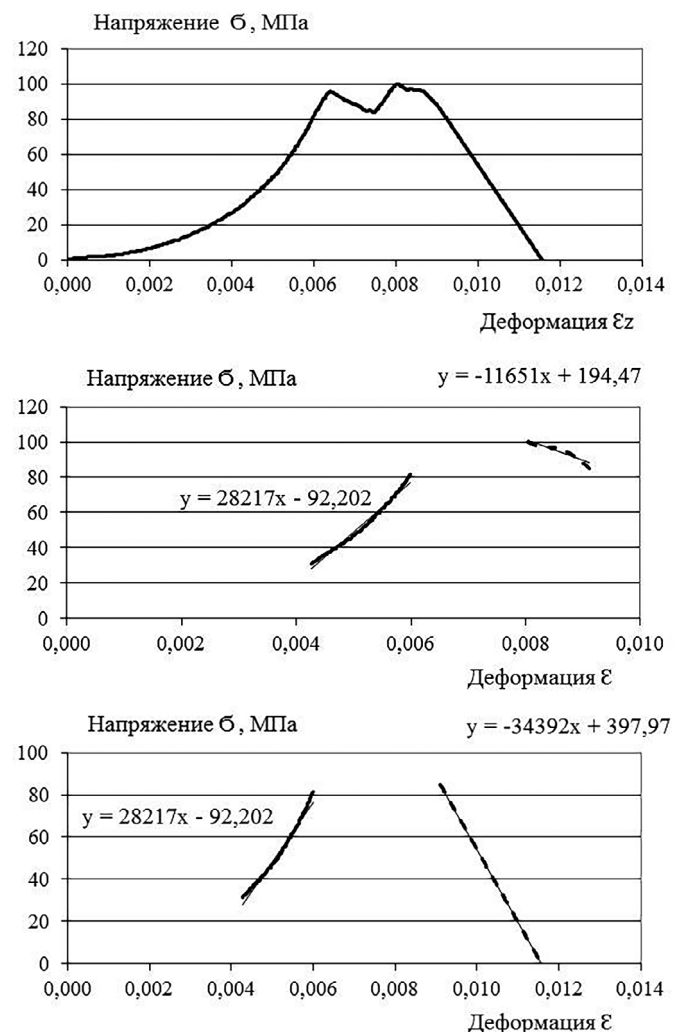
– осевая деформация». Определены значения пределов прочности  $\sigma_b$ , модулей Юнга  $E$ , модулей спада  $M$ , общей деформации  $\epsilon_{\text{общ}}$ , упругой деформации  $\epsilon_{\text{упр}}$ , плотности упругой энергии  $U_e$  и энергии постпикового разрушения  $U_p$ . Произведен расчет коэффициентов критериев удароопасности  $K_1$ ,  $K_2$  и  $A$ . Результаты обработки экспериментов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что согласно критерию  $K_2$  (отношение упругой деформации к общей) все образцы горных пород являются неудароопасными, т.к. для всех случаев  $K_2 < 0,7$ . По критерию  $K_1$  (отношение модуля упругости к модулю спада) 13 образцов горных пород являются удароопасными и 37 образцов – неудароопасными. По критерию  $A$  (отношение удельной плотности упругой энергии к постпиковой энергии) также 13 образцов горных пород являются удароопасными и 37 образцов – неудароопасными. Однако нужно отметить, что для критериев  $K_1$  и  $A$  имеется несовпадение результатов для семи случаев, они выделены дополнительно в табл. 2 и составляют 14%.

Эти случаи следует рассмотреть более подробно. Если значение коэффициента  $A$  определяется однозначно, т.к. это площадь под диаграммой «напряжение–деформация» на двух участках диаграммы (до и после предела прочности), то значение модуля упругости и модуля спада допускают некоторую субъективность в зависимости от выбора участков диаграммы, которые принимают для их расчетов. В особенности это касается модуля спада. На рис. 3 это проиллюстрировано для образца №2-2. Для остальных образцов значения исправленных модулей спада приведены в табл. 2.

Из рис. 3 видно, что постпиковая часть диаграммы «напряжение–деформация» образца №2-2 состоит из двух участков с наклонами, близкими к линейному: короткий участок в окрестности предела прочности соответствует значению модуля спада  $M = 11,651$  ГПа и последующий участок, имеющий значительно большую длину, соответствует модулю  $M = 34,392$  ГПа. Так как модуль упругости  $E = 28,217$  ГПа, то значения коэффициентов  $K_1$  в зависимости от выбора участка диаграммы для определения модуля спада будут принимать значения  $K_1 = 2,42$  (образец неудароопасен) или  $K_1 = 0,82$  (образец удароопасен).

Значение модуля спада, выбранное по участку вблизи пика прочности, дает результат, совпадающий с энергетическим критерием  $A$ .



**Рис. 3**  
Данные испытаний для образца № 2-2

**Fig. 3**  
Test results for specimen No. 2-2



## Выводы

Лабораторные испытания, проведенные для серии из 50 образцов горных пород (песчаники, алевролиты, известняки, алевросланцы) при одноосном сжатии до разрушения в режиме жесткого сжатия с целью сравнения трех критериев удароопасности показали:

- критерий, основанный на коэффициенте удароопасности, равном отношению упругой деформации к общей, показал, что все образцы являются неудароопасными;
- критерий, основанный на коэффициенте удароопасности, равном отношению модуля упругости к модулю

спада, показал хорошее совпадение с коэффициентом удароопасности, равным отношению плотности энергии пиковой упругой деформации к плотности энергии после пикового разрушения, расхождение составляет не более 14%. Если учесть, что определение модуля спада в случае нелинейного постпикового участка допускает некоторую субъективность, то желательно использовать оба вышеуказанных критерия для повышения достоверности заключения об удароопасности образцов горных пород.

## Список литературы / References

1. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В., Курсакин Г.А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения. *Записки Горного института*. 2019;238:392–398. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.392>  
Sidorov D.V., Potapchuk M.I., Sidlyar A.V., Kursakin G.A. Assessment of rock-burst hazard in deep layer mining at Nikolayevskoye field. *Journal of Mining Institute*. 2019;238:392–398. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.392>
2. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Вьюников А.А. Газодинамические явления при проходке выработок во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная». *Горная промышленность*. 2023;(S1):96–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>  
Moroz N.E., Gendler S.G., Vyunikov A.A. Gas-dynamic phenomena in tunnel driving through the host rocks of the 'International' kimberlite pipe. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):96–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>
3. Батугин А.С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры. *Горная промышленность*. 2023;(S1):14–21. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>  
Batugin A.S. Geodynamic effects of the critically stressed state of the earth's crust. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):14–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>
4. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь». *Уголь*. 2022;(12):88–93. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>  
Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I., Moroz N.E. Monitoring of the stress state by seismic and numerical methods at the mines of JSC "Vorkutaugol". *Ugol'*. 2022;(12):88–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>
5. Cook N.G.W. The basic mechanics of rockbursts. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1963;64:71–81.
6. Петухов И.М. (ред.) *Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках*. М.: Академия горных наук; 1997. 375 с.
7. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. *Экспериментальная физика и механика горных пород*. СПб.: Наука; 2001. 342 с.
8. Tarasov B.G., Randolph M.F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011;48(6):888–898. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.013>
9. Gong F.Q., Wang Y. L., Luo S. Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights. *Journal of Central South University*. 2020;27:2793–2821. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4511-y>

### Информация об авторах

**Усольтцева Ольга Михайловна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Воловик Яна Анатольевна** – заведующий лабораторией разрушающего контроля, АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

### Information about the authors

**Olga M. Usoltseva** – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Research Associate, N.A. Chinalak Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

**Yana A. Volovik** – Head of the Destructive Testing Laboratory, VNIMI JSC, Prokopyevsk, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 30.06.2024

### Article info

Received: 11.05.2024

Revised: 18.06.2024

Accepted: 30.06.2024