

О влиянии пространственной изменчивости прочности пород на удароопасность породных массивов

Б.Т. Ильясов¹✉, И.А. Ожиганов², А.В. Трофимов³

¹ ООО «Скиентия», г. Уфа, Российская Федерация

² Уральский филиал АО «ВНИМИ», г. Екатеринбург, Российская Федерация

³ ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ info@scientia.ru

Резюме: Существующие критерии и методы прогноза опасности горных ударов недостаточно надежны. Горные удары происходят не на всех месторождениях, которые отнесены к склонным и опасным по горным ударам согласно действующей нормативной документации. В связи с этим в статье сформулирована необходимость исследования условий удароопасности массивов горных пород, а не только образцов пород. В статье сформулирована гипотеза о влиянии однородности массива горных пород на его хрупкость и удароопасность. Перечислены предыдущие исследования, подтверждающие данную гипотезу. Описан мысленный эксперимент, объясняющий, как однородность массива может влиять на его хрупкость и удароопасность. Предложена оценка однородности породного массива по коэффициенту вариации прочности на одноосное сжатие и растяжение в локальных областях массива. Проведено исследование корреляции коэффициентов вариации прочности с удароопасностью массивов горных пород, для чего собраны фактические данные по 44 разновидностям пород с 18 различных объектов ведения горных работ. Сделаны выводы о наличии зависимости удароопасности массива от коэффициентов вариации. Предложены величины коэффициента вариации, которые свидетельствуют об опасности ударов на месторождении. Выполнен анализ влияния других факторов на коэффициент вариации и опасность горных ударов.

Ключевые слова: горный удар, удароопасность, однородность, изменчивость, прочность, горные породы, коэффициент вариации, хрупкость горных пород, критерий удароопасности

Благодарности: Авторы выражают глубокую признательность Макарову Александру Борисовичу, Киркину Александру Павловичу, Кузнецову Николаю Николаевичу за конструктивную дискуссию по теме статьи и содействие в сборе фактического материала.

Для цитирования: Ильясов Б.Т., Ожиганов И.А., Трофимов А.В. О влиянии пространственной изменчивости прочности пород на удароопасность породных массивов. Горная промышленность. 2024;(6):74–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-74-82>

Influence of the spatial variability of rock strength on the rock burst hazard in rock masses

B.T. Ilyasov¹✉, I.A. Ozhiganov², A.V. Trofimov³

¹ LLC Scientia, Ufa, Russian Federation

² Ural Branch of JSC VNIMI, Yekaterinburg, Russian Federation

³ LLC Gipronickel, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ info@scientia.ru

Abstract: The reliability of existing criteria and methods for predicting the hazard of rock burst occurrence is currently assessed as insufficient. Not all of the deep and large-scale deposits that are characterized as rock burst prone and hazardous by the current regulatory guidelines are experiencing rock bursts. This paper focuses on critical examination of the rock burst hazard in the rock masses, rather than solely relying on individual rock samples. The article proposes a hypothesis concerning how the homogeneity of a rock mass influences its brittleness and the rock bursts, referencing foundational research that supports this concept. A thought experiment is presented to clarify how the homogeneity of a rock mass can directly influence its brittleness and the rock burst hazard. In order to systematically assess the homogeneity of a rock mass, the proposed methodology involves quantifying the coefficient of variation of strengths in a localized rock mass zone under uniaxial compression and tension. A comprehensive evaluation was conducted to explore the correlation between the rock burst hazard of a rock mass and the coefficient of variation for compressive and tensile strengths, drawing upon empirical data collected from 44 rock varieties across 18 distinct mining locations. The study is concluded by revealing a correlation between the rock burst of rock masses and the coefficient of variation. Suggested threshold values for the coefficient of variation are provided, indicating the rock burst hazard of rock mass in situ. Furthermore, the influences of various factors on the coefficient of variation and of rock burst hazard are examined.

Keywords: rock burst, rock burst phenomena, homogeneity, variability, strength, rocks, coefficient of variation, rock brittleness, rock burst hazard factor

Acknowledgments: The authors express their deep gratitude to Aleksandr B. Makarov, Aleksandr P. Kirkin, Nikolai N. Kuznetsov for constructive discussion of the research topic and their assistance in collecting the factual evidences.

For citation: Ilyasov B.T., Ozhiganov I.A., Trofimov A.V. Influence of the spatial variability of rock strength on the rock burst hazard in rock masses. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):74–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-74-82>

Введение

В соответствии с пунктом 901 ФНиП №505¹ на всех разведываемых и разрабатываемых месторождениях, проектируемых и строящихся рудниках, шахтах, тоннелях и других подземных сооружениях должны быть выполнены работы по своевременному выявлению склонности горных пород к горным ударам.

Для оценки склонности к ударам месторождений в Методических рекомендациях по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам² (далее – Методические рекомендации) рекомендуется два метода:

- метод дискования кернов на участках наибольшей напряженности, выявленных с помощью геодинимического районирования месторождения;
- метод отношения модуля спада к модулю упругости для типовых пород, представленных на месторождении.

На практике кроме описанных выше для оценки склонности горных пород к ударам используются также многие другие критерии, такие как коэффициент хрупкости, критерий Кайзера, критерий Горного института КНЦ РАН, энергетический критерий и многие другие [1; 2].

При использовании указанных критериев многие типы пород самых различных месторождений показывают склонность к горным ударам, что отражено, например, в Приложении 3 к Методическим рекомендациям. Считается, что в случае действия высоких напряжений на данных месторождениях могут происходить динамические разрушения горных пород, в том числе горные удары.

При этом горные удары происходят не на всех месторождениях, в которых имеются породы, склонные к горным ударам. На некоторых месторождениях происходят сейсмические события лишь небольшой магнитуды, на других – разрушения пород в динамической форме вовсе не происходят. Известными примерами таких месторождений являются Гайское, Узельгинское, Юбилейное, Соколово-Сарбайское и др. Существующие критерии удароопасности не объясняют эти различия в поведении массивов горных пород на различных месторождениях.

В международной практике принято относить месторождения к удароопасным только после фактических случаев горных ударов, что, возможно, связано именно со сложностью прогнозирования удароопасности массива горных пород месторождения.

Можно отметить, что существующие критерии удароопасности основаны на изучении горных пород только

в образце, поэтому разумно предположить, что удароопасность, так же как и прочность, зависит от масштаба рассматриваемого объекта и поэтому сложно прогнозируется. Иначе говоря, удароопасность массива горных пород может зависеть не только от склонности к ударам породы в образце, но и от других факторов.

Формулировка гипотезы

Известно, что величина упругой энергии, которая высвобождается при разрушении участка породы, определяет магнитуду горного удара или иного сейсмического события. Чем больше объём накопленной энергии, тем больше площадь единомоментно образующихся трещин [3]. То есть, по сути, удароопасность месторождения – это способность пород месторождения разрушаться единомоментно с образованием большой суммарной поверхности разрушения, т.н. лавинообразное трещинообразование. Способность к накоплению энергии зависит от способности породы противостоять её диссипации из-за локальных разрушений.

В соответствии с условием Гриффитса для условно мгновенного роста трещины длиной $2l$ должно соблюдаться условие превышения критического напряжения на краю трещины [4]:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2e_s E}{\pi l}}$$

где E – модуль упругости и e_s – удельная поверхностная энергия породы.

Данное условие может не обеспечиваться вдоль всей потенциальной траектории трещины, если напряженное состояние и свойства материала на этой траектории будут изменчивы. То есть в однородном материале рост трещины будет происходить устойчиво, но если материал неоднороден и, следовательно, неоднородно напряженно-деформированное состояние материала, то критическое напряжение будет превышать лишь на локальных участках. Соответственно, рост трещины будет прерываться на менее напряженных или на более прочных участках. В таком случае дальнейший рост трещины будет требовать дополнительной работы внешних сил.

Склонность массива горных пород к горному удару можно понимать как склонность к мгновенному (кратковременному) разрушению, то есть чем более кратковременно происходит разрушение в массиве, тем более удароопасным является массив. Иначе говоря, если разрушение происходит с постепенным накоплением локальных нарушений, образованием трещин в массиве, то оно не будет хрупким и происходить в динамической форме.

Логично предположить, что чем более однородным является образец породы, то есть если он не содержит крупных зёрен, слабых включений, тем более однородным будет

¹ Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: приказ №505 от 8 дек. 2020 г. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 23.10.2024).

² Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: приказ Ростехнадзора №216 от 23 мая 2013 г. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»; 2016. 52 с.

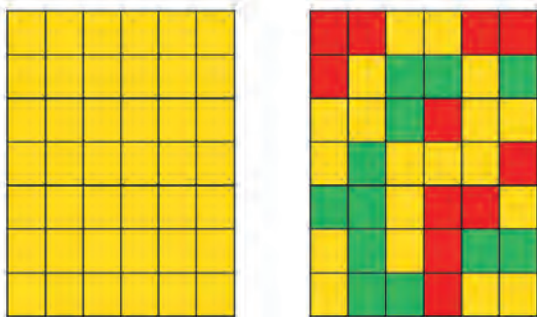
НДС в образце при его деформировании, следовательно, и трещинообразование с последующим разрушением такого образца будет происходить относительно более кратковременно. Уэзерсик и Фэйрхёрст утверждали, что существует влияние однородности породы на её хрупкость [5]. Такое влияние отмечается в широко известной работе Брэди и Брауна [6]. Численное моделирование также позволяет выявить данную зависимость. Например, выполнялись исследования с применением метода конечных элементов [7; 8] и метода дискретных элементов (distinct element method) [9], которые показали влияние однородности породного массива на его удароопасность и хрупкость. В исследовании Манучерьяна и Каи [8] упоминается более десятка аналогичных исследований на основе численного моделирования, подтверждающих указанную закономерность. В их же статье указано, что наблюдениями подтверждается большая опасность ударов в более однородных породах. Также можно отметить опыт автора статьи, который реализовал учёт изменчивости прочностных свойств при разработке ПО Prorock [10], так как это было

необходимо для моделирования реалистичного, нединамического разрушения бортов карьеров. Без учёта изменчивости свойств в модели долговременное деформирование борта карьера оканчивалось мгновенным и хрупким обрушением без проявления стадии прогрессирующего разрушения.

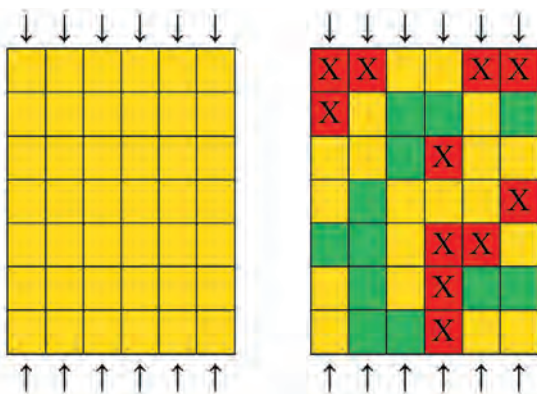
Для того чтобы лучше понять, как степень однородности массива может влиять на склонность к хрупкому, динамическому разрушению, можно провести мысленный эксперимент.

Мысленный эксперимент

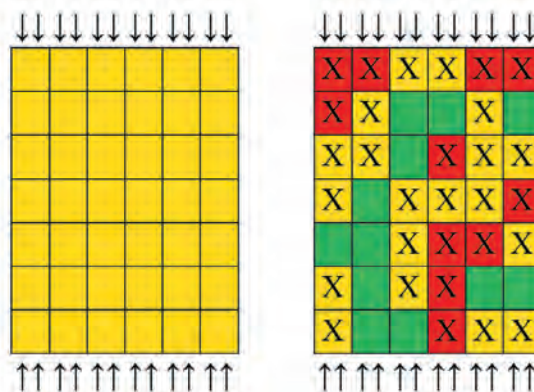
Представим область массива горных пород как сетку, состоящую из клеток (блоков, элементов). Допустим для удобства, что это целик, пригруженный вертикально, как показано на рис. 1. Левый целик состоит из одинаковых по прочности элементов, правый – из варьирующихся по прочности. Примем как допущение, что напряженное и деформированное состояние в целиках является однородным. Также опустим поперечное деформирование



1. Начальное состояние. Целики не нагружены. Ни один из элементов целиков не разрушен.

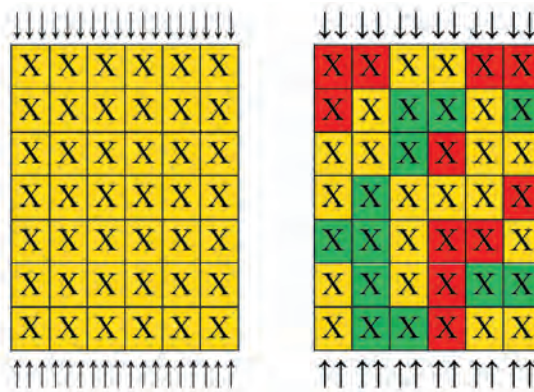


2. Начинается нагружение целиков. При увеличении напряжений в целике до величины, равной прочности наиболее слабых элементов, в правом целике происходит их разрушение. Порода во всех элементах левого целика целостна.



3. Разрушенные элементы в правом целике не воспринимают нагрузку. Происходит перераспределение напряжений, из-за чего напряжения концентрируются в ненарушенных элементах. Из-за этого происходит разрушение элементов средней прочности в правом целике при некоторой нагрузке, не достигающей величины средней прочности на сжатие. Объединение разрушенных элементов в протяженные трещины, пересекающие весь целик, приводит к разрушению неоднородного целика. Неоднородный целик теряет несущую способность.

Происходит разрушение наиболее прочных элементов неоднородного целика, принявших всю нагрузку на себя. Целик потерял несущую способность ранее и деформируется в запредельном режиме.



4. Однородный целик подвергается дальнейшему росту нагрузки до достижения ею величины средней прочности породы на одноосное сжатие, после чего происходит его мгновенное разрушение.

Рис. 1
Два массива: слева – абсолютно однородный, справа – с вариацией прочности на одноосное сжатие

Fig. 1
Two rock masses under uniaxial compression: an absolutely homogeneous rock mass (left); a rock mass with varying strengths (right)

элементов, чтобы не усложнять условия эксперимента.

Красным цветом обозначим наиболее слабые участки пород, желтым – средние по прочности, зелёным – наиболее прочные.

Прокомментировать описанный мысленный эксперимент можно следующим образом.

В неоднородном целике разрушения накапливаются постепенно, объём разрушений, происходящих одновременно, меньше, чем в однородном целике. То есть происходит постоянная диссипация энергии вследствие локальных разрушений в массиве. При разрушении неоднородного целика (при достижении нагрузками прочности целика) объём одномоментных локальных разрушений соответствует объёму элементов средней прочности.

В абсолютно однородном целике объём одномоментного разрушения равен всему объёму целика.

Если принимать, что объём разрушения породы (трещинообразования) пропорционален выбросу энергии, то неоднородный целик разрушается с меньшим выбросом энергии, чем левый. Иначе говоря, левый целик разрушается в большей степени динамически, чем правый. То же самое можно объяснить тем, что в левом целике перед разрушением действуют более высокие напряжения во всех элементах целика. А значит больше объём упругой энергии, ожидающей высвобождения.

И последнее, что следует отметить: в неоднородном целике присутствует допредельная пластическая и запредельная стадия деформирования из-за поочередного разрушения отдельных элементов, в отличие от однородного целика. То есть неоднородный целик ведёт себя как образец породы, менее склонной к хрупкому разрушению.

Таким образом, описанный мысленный эксперимент объясняет, как однородность может влиять на удароопасность массива горных пород.

В качестве меры однородности в описанном эксперименте была принята изменчивость прочностных свойств. То есть данный эксперимент показывает, что удароопасность породного массива может зависеть от изменчивости прочностных свойств. Иначе говоря, в масштабе массива для возникновения горных ударов, помимо хрупкости породы в образце, по-видимому, требуются низкие значения коэффициента вариации прочности.

Необходимо при этом обратить внимание, что вариативность прочностных свойств важна именно в пределах разрушающейся области. Массив, вероятно, может быть сильно неоднороден в пределах месторождения, но быть достаточно однородным в некоторой локальной области, размер которой достаточен для возникновения в ней удара.

Из всего вышесказанного можно предположить, что критерием удароопасности породного массива может служить низкий коэффициент вариации прочностных свойств в отдельных локальных областях массива. Для проверки данного предположения проведём анализ фактических данных по вариации прочностных свойств пород различных месторождений.

Анализ изменчивости механических свойств пород различных месторождений

Для поиска корреляции удароопасности породы в массиве с коэффициентом вариации прочности на одноосное сжатие проведён анализ изменчивости прочностных показателей внутри небольшой области массива по нескольким месторождениям.

Для выполнения лабораторных испытаний часто произ-

водится отбор керновой пробы, размеры которой позволяют изготовить несколько лабораторных образцов. Таким образом, свойства образцов могут показывать степень изменчивости в пределах небольшого интервала глубин скважины, соответствующего размеру пробы. Также, если известны координаты отбора проб, то можно оценить изменчивость прочностных свойств на различных базах.

Для анализа использованы лабораторные данные о свойствах пород различных месторождений. База данных составлена как для месторождений, на которых горные удары ранее фиксировались, так и для тех, на которых удары не наблюдались. Факт фиксации очагов горных ударов в тех или иных горных породах различных месторождений принят по каталогам горных ударов³ и другим открытым источникам. Месторождения для анализа отбирались наиболее глубокие, в которых горные удары могут происходить из условия склонности⁴:

$$\sigma \geq 0.8 UCS,$$

где σ – действующие при текущих глубинах отработки напряжения; UCS – прочность на одноосное сжатие.

Для анализа принимались результаты определений дисперсии на более чем 10 образцах. Размер области массива, в пределах которого отбираются образцы, ограничивался интервалом 2–100 м. В случае наличия нескольких подходящих совокупностей определений коэффициент вариации и величина интервала опробования по ним принимались средневзвешенными.

Описанным способом выполнен анализ данных по 16 месторождениям, обрабатываемым подземным способом (табл. 1).

Указанные в табл. 1 значения использованы для построения графика на рис. 2, на котором отмечены точечные значения коэффициента вариации прочности на сжатие. Цветом обозначается факт наблюдений в этих породах горных ударов.

Из рис. 2 можно увидеть наличие корреляции удароопасности массива горных пород с коэффициентом вариации прочностных свойств горных пород. При низком коэффициенте вариации прочностных свойств (ориентировочно $k_v \leq 32\%$) могут происходить сейсмические события различной магнитуды. Особенно опасными по потенциальной магнитуде ударов, по-видимому, являются месторождения, которым свойственны коэффициенты вариации по UCS $k_v \leq 20\%$. При $20\% \leq k_v \leq 32\%$ породному массиву свойственны сейсмические явления меньшей силы, такие как пристеночные удары и стрельяния.

При этом, по-видимому, чем больше размер области с низкой вариативностью свойств, тем более крупные сейсмические события могут наблюдаться в данном массиве. Последнее утверждение требует дополнительного подтверждения на большем объёме данных.

Представленный на рис. 2 график может, по нашему мне-

³ Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Таштагольское, Криворожское, Октябрьское (Норильск), Кукисвумчорское и другие месторождения. Л.: 1986. 186 с.; Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Североуральский бокситовый рудник. Л.: ВНИМИ; 1985. 258 с.; Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Североуральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкспорское, Кукисвумчорское (п.о. "Апатит"), Качкарское и др. месторождения. Л.: ВНИМИ; 1989. 182 с.

⁴ Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: приказ №505 от 8 дек. 2020 г. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 23.10.2024); Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: приказ Ростехнадзора №216 от 23 мая 2013 г. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»; 2016. 52 с.

Таблица 1
Коэффициенты вариации прочностей на сжатие и растяжение по породам различных месторождений

Table 1
Coefficients of variation for compressive and tensile strengths across rocks from various deposits

№ п/п	Месторождение	Литотип (литологическая разность)	UCS				UTS				Факт ударов
			сред., МПа	<i>k_v</i> , %	<i>n</i>	<i>L</i> , м	сред., МПа	<i>k_v</i> , %	<i>n</i>	<i>L</i> , м	
1	Ново-Кальинское	Боксит	93,7	18	54	5,8					у/о
2		глинисто-известняковые сланцы	117,0	11	12	4,0	4,5	15	8	4,0	у/о
3	Норильск-1	Базальт	151,1	50	160	36,8	11,0	46	18	42,7	н/о
4		Долерит	176,6	45	30	53,3	14,4	30	18	26,0	н/о
5		Песчаник	7,1	114	15	48,7					н/о
6		Алевролит с песчаником	9,1	79	10	61,7					н/о
7	Шахта им. Кирова [11]	Алевролит	34,2	23	36	2,0	1,7	23	36	2,0	у/о
8	Расвумчорр	Рисчоррит	183,1	9	12	66,6	16,2	10	12	66,6	у/о
9		Уртит	139,3	26	12	51,8	12,8	16	12	51,8	у/о
10	Оленегорское	Пегматит		22	18	1,5		18	19	1,5	нд
11		Гнейс биотитовый		17	29	2,5		16	40	2,5	нд
12	Юбилейное (Башкортостан)	Метасоматит	71,0	33	187	1,5	6,9	33	208	1,5	н/о
13		Базальт	124,4	32	330	1,5	11,7	37	394	1,5	н/о
14		Лавобрекчии базальтов	124,0	33	116	1,5	12,3	28	130	1,5	н/о
15		Метасоматит	71,0	35	136	24,8	6,9	34	154	24,8	н/о
16		Базальт	124,4	42	281	24,2	11,7	42	335	24,2	н/о
17		Лавобрекчии базальтов	124,00	38	116	23,1	12,3	32	130	23,1	н/о
18	Кукисвумчоррское	Ийолит	218,3	11	12	11,3	13,1	9	11	11,3	у/о
19		Уртиты пш. массивные ср/з	152,6	17	12	19,2	10,7	11	9	19,2	у/о
20		Уртит массивный ср/з	137,8	12	12	20,5	11,2	9	11	20,5	у/о
21		Уртит пш. массивный н/з	168,9	17	12	14,0	10,6	10	10	14,0	у/о
22	Ждановское	Диабаз	169,6	31	9	43,0	10,2	18	10	43,0	н/о
23		Рудный перидотит					9,9	15	10	25,6	н/о
24		Туфогенно-осадочная порода	69,3	21	8	25,6	8,7	21	10	9,2	н/о
25	JinPing II (tunnel) [12; 13]	Мрамор	122,7	8	20	3,0					у/о
26		Мрамор	122,7	8	45	15,0					у/о
27	Craig-Onaping [14]	Норит	188,9	19	68	>100	14,2	11	10	2,0	у/о
28	Hoyle pond [14]	Базальтовый коматит					7,9	26	27	1,5	н/о
29	Copper Cliff South [15]	Руда	154,8	29	43	11	12,3	31	12	2,0	у/о
30		н.д.	151,7	24	10	2					у/о
31		Трапп	126,9	33	10	2					у/о
32	Carrara [16–18]	Мрамор	96	2	10	2	6,8	7	29	1	у/о
33	Удачное	Известняк	63,5	33	26	15,7	5,18	25	26	18,4	н/о
34	Nordic [19]	Песчаник	229	20	377	6,5					нд
35	ВКМКС [20; 21]	Каменная соль	23,8	15	13	16,2	1,21	35	13	10	у/о
36		Сильвинит	23,7	14	13	15,9					у/о
37		Каменная соль между-пластий	26,1	19	762	>100					у/о
38		Сильвинит красный	26,1	14	491	>100					у/о
39	Denison [22]	Конгломерат (руда)	117,6	25	33	8,2	7,22	28	14	4,6	у/о

40	Октябрьское	Роговик	126,3	37	140	31,7	14,3	30	77	25,1	y/o
41		Медистая руда вкрапленная	91,6	30	25	16,3					y/o
42		Габбро-долерит	149,9	29	173	20,3	16,9	19	129	24,4	y/o
43		Ангидрит	68,6	34	163	11,2	10,1	21	110	34	n/o
44		Сплошная руда	77,3	29	78	18,1	7,7	18	78	18,9	y/o

Пояснения к таблице: UCS, UTS – прочность на одноосное сжатие и растяжение соответственно, k_v – коэффициент вариации, n – количество определений, L – размер интервала опробования (области изучения).

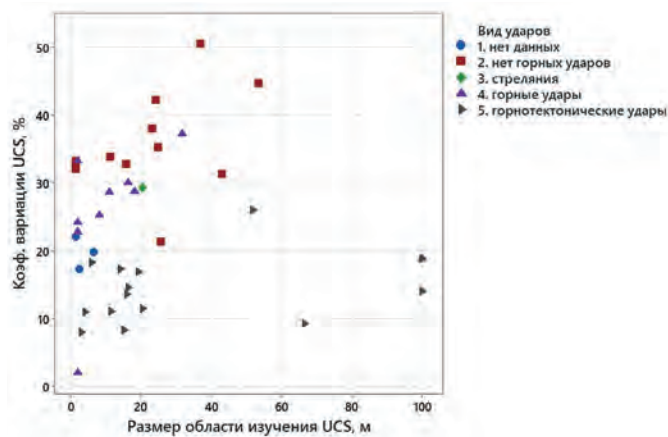


Рис. 2
Зависимость удароопасности массива горных пород от коэффициента вариации по UCS

Fig. 2
A correlation between the rock burst hazard of a rock mass and the coefficient of variation for UCS

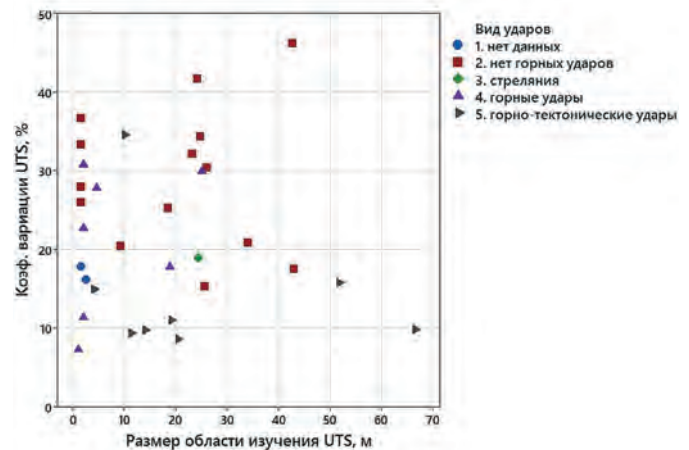


Рис. 3
Зависимость удароопасности массива горных пород от коэффициента вариации по UTS

Fig. 3
A correlation between the rock burst hazard of a rock mass and the coefficient of variation for UTS

нию, использоваться для прогноза удароопасности горных пород как дополнительный критерий, отражающий особенность массива.

При пользовании графиком на рис. 2 следует обратить внимание на исследования, показывающие, что разброс значений прочности при лабораторных испытаниях может зависеть от размеров образцов [23]. Результаты испытаний для анализа должны отбраковываться по наблюдаемому механизму разрушения.

Также может вызывать увеличение разброса значений низкое соотношение размера образца с размером зерна и несоблюдение нормативных документов по проведению испытаний⁵. Поэтому определение коэффициента вариации прочности важно выполнять на образцах стандартных размеров. В связи с этим следует отметить, что данные из табл. 1 по Юбилейному месторождению (№12–17 в табл. 1) были получены испытаниями образцов малых размеров.

Указанный выше предел удароопасности ($k_v \leq 20\%$) зависит от методики проведения испытаний. Предварительно можно сказать, что при выполнении испытаний в строгом соответствии с современными требованиями (особенно ISRM) коэффициенты вариации в среднем получаются ниже. Для таких испытаний наибольший коэффициент вариации, указывающий на удароопасность массива, по-видимому, может быть снижен ориентировочно до величины $k_v \leq 15\%$.

График вариации прочности на растяжение менее явно отражает удароопасные условия (см. рис. 3). Можно от-

метить, что при наиболее низких значениях коэффициента вариации прочности на растяжение ($k_v \leq 20\%$) массив горных пород представляет опасность по горным ударам. Переходная зона, где удары менее вероятны и могут происходить мелкие сейсмические события, находится в пределах $15\% \leq k_v \leq 35\%$.

Обращают на себя внимание отдельные уникальные данные.

Месторождение мрамора Каррара известно тем, что на нём происходят горные удары при достаточно низкой интенсивности горных работ и относительно небольшой глубине. Результаты испытаний показывают, что мрамор, добываемый на месторождении, аномально однороден по прочности. Коэффициент вариации прочности на одноосное сжатие составляет всего 2% при неизвестной, однако, базе определений [16].

Верхнекамское месторождение калийных солей известно тем, что на нём фиксировались сейсмические явления, которые классифицировались как техногенные землетрясения [24]. При этом горные породы данного месторождения не проявляют склонности к горным ударам в масштабах лабораторного образца [21]. Из табл. 1 и рис. 2 можно отметить значительную однородность пород месторождения по прочностным свойствам.

Октябрьское месторождение Норильского рудного района известно своей удароопасностью⁶, однако из рис. 2 можно увидеть, что породы месторождения характеризу-

⁵ STM D7012-14e1. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. 2023. 9 p. <https://doi.org/10.1520/D7012-14E01>; ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

⁶ Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Таштагольское, Криворожское, Октябрьское (Норильск), Кукивумчорское и другие месторождения. Л.; 1986. 186 с.; Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Северо-Уральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкспорское, Кукивумчорское (п.о. "Апатит"), Качкарское и др. месторождения. Л.: ВНИМИ; 1989. 182 с.

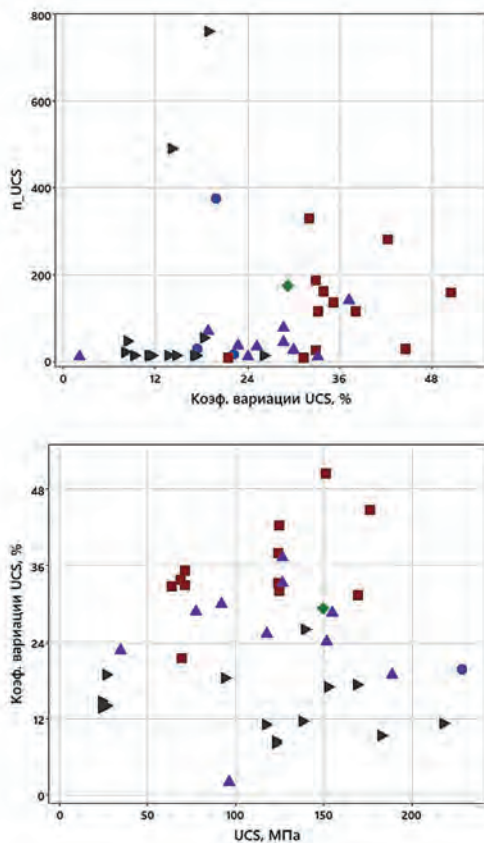


Рис. 4
Зависимости коэффициента вариации UTS, UCS от величин пределов прочности и количества испытаний

ются довольно большим коэффициентом вариации по UCS. Данное несоответствие, однако, объясняется значительной пространственной изменчивостью самого коэффициента вариации. Отмечается довольно большое количество областей, где коэффициент вариации составляет менее 20% и даже около 10% для сплошных руд. Такая изменчивость коэффициентов вариации в меньшей степени свойственна другим месторождениям. Иначе говоря, на месторождении имеются достаточно однородные области массива, в которых, по-видимому, могут происходить горные удары.

Анализ взаимовлияния факторов

Известно, что коэффициент вариации зависит от количества испытаний и от прочности горных пород [25–27]. В связи с этим необходимо проверить, не имеется ли более явной зависимости удароопасности месторождений, например, от прочности горных пород, а также является ли коэффициент вариации прочностью показателем, свойственным массиву, или же это показатель, зависящий только от принятой базы измерения и количества испытаний. Для этого построены графики зависимостей между указанными показателями (рис. 4).

Из представленного на рис. 4 графика можно увидеть, что удароопасность месторождений не зависит от прочности горных пород. Удароопасность наблюдается при любых значениях прочностей на сжатие и растяжение. В связи с этим можно сделать вывод, что удароопасность месторождений из рассматриваемой выборки коррелирует именно с величиной коэффициента вариации, а не с величиной прочности на сжатие.

Также можно заметить, что зависимость коэффициента

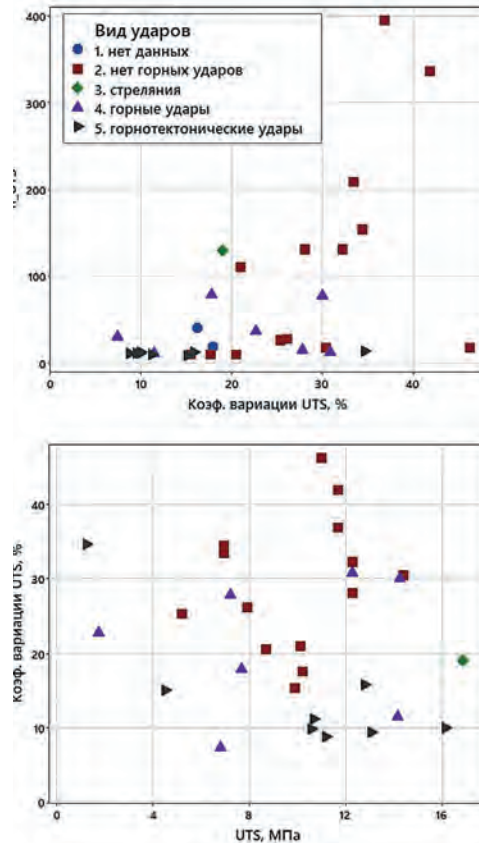


Fig. 4
Correlations between the coefficient of variation for UTS, UCS and the values of ultimate strengths and the number of tests

вариации от количества испытываемых образцов не является очевидной по представленным графикам. Тем самым подтверждается, что вариативность прочностных свойств действительно характеризует массив, его изменчивость, а не только объём выборки.

Заключение

В соответствии с представленными данными по типам сейсмических событий на различных месторождениях можно выделить на графике различные зоны опасности (рис. 5). Границы этих зон могут и должны уточняться при дальнейшем накоплении аналогичных данных профессиональным сообществом. В частности, требуется уточнение влияния размера области изучения свойств, которое на текущем этапе сложно оценить.

В статье показано, как однородность массива горных пород может влиять на его удароопасность. Приведены публикации, в которых показано наличие зависимости хрупкости горных пород от их однородности. Описан мысленный эксперимент, который объясняет возможный механизм влияния однородности массива, выраженной в виде вариации прочностных свойств, на его хрупкость и удароопасность.

Произведён анализ фактических данных об удароопасности горных пород в массиве в зависимости от величины коэффициента вариации прочности на сжатие и растяжение. На реальных данных показывается наличие корреляции удароопасности пород с величиной коэффициента вариации в ограниченной области массива.

Представленная методика с использованием графика на рис. 5 может быть полезна для уточнения прогноза уда-

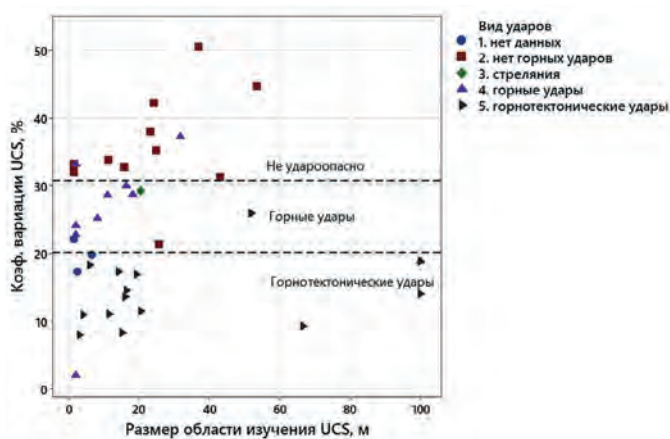


Рис. 5
Рекомендуемый график для
оценки удароопасности
массива горных пород

Fig. 5
Recommended thresholds
for assessing the rock burst
hazard of rock masses

роопасности месторождений на основе других, широко применяемых критериев. Для применения методики представляется полезным составление баз данных физико-механических свойств с пространственной привязкой проб.

Кроме того, предложенная методика, возможно, будет полезна также для районирования месторождений по степени удароопасности и прогноза горных ударов. Анализ изменчивости свойств пород методами неразрушающего контроля или лабораторными испытаниями керна или штучных проб может проводиться для оперативного контроля удароопасности выработок. Для проверки данного утверждения необходимы экспериментальные исследования на рудниках, на которых происходят горные удары.

Графики на рис. 2, 3, 5 необходимо уточнять путём пополнения новыми данными для повышения его точности. Из-за отсутствия первичных данных испытаний и координат отобранных проб для многих не представленных в статье месторождений не удалось собрать надежные данные по изменчивости прочности. Необходимо формировать базы данных физико-механических испытаний пород, в особенности на месторождениях с породами, склонными к горным ударам. Это позволит проверить и уточнить предложенный критерий удароопасности массива горных пород, а также выявить опасность конкретных типов пород или даже локальных участков массива. С этой же целью требуется накопление данных по месторождениям, на которых горные удары не происходят при прочих, подтверждающих удароопасность, условиях.

Список литературы / References

1. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Макаров А.Б. О критериях удароопасности горных пород. *Горная промышленность*. 2023;(S1):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-61-68>
2. Kozzyrev A.A., Kuznetsov N.N., Makarov A.B. On criteria of rockburst hazard. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-61-68>
3. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*. 2022;7(4):577–607. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008>
4. Петухов, И.М., Линьков, А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 280 с.
5. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. 1921;221:163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
6. Wawersik W.R., Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1970;7(5):561–575. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90007-0)
7. Brady B.H., Brown E.T. *Rock mechanics: For underground mining*. Springer Science & Business Media; 2006. 628 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9>
8. Tang C.A., Kaiser P.K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure – Part I: Fundamentals. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1998;35(2):113–121. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(97\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(97)00009-0)
9. Manouchehrian A., Cai M. Influence of material heterogeneity on failure intensity in unstable rock failure. *Computers and Geotechnics*. 2016;71:237–246. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.10.004>
10. Tan Y.-L., Guo W.-Y., Gu Q.-H., Zhao T.-B., Yu F.-H., Hu S.-C., Yin Y.-C. Research on the rockburst tendency and ae characteristics of inhomogeneous coal-rock combination bodies. *Shock and Vibration*. 2016;9271434. <https://doi.org/10.1155/2016/9271434>
11. Ильясов Б.Т. Прогнозирование деформаций массивов горных пород с применением ПК «Prorock». *Проблемы недропользования*. 2018;(1):39–51. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.039>
12. Плясов В.Т. Prognostication of rock mass deformations with using «Prorock» software. *Problems of Subsoil Use*. 2018;(1):39–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.039>
13. Кубрин С.С., Шек В.М. Геоинформационные системы для исследования опасных горнодинамических явлений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S5):103–112.
14. Kubrin S.S., Shek V.M. Geographic information system for the study of dangerous mountain dynamic phenomena. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2013;(S5):103–112. (In Russ.)
15. Jiang Q., Zhong S., Cui J., Feng X.-T., Song L. Statistical characterization of the mechanical parameters of intact rock under triaxial compression: An experimental proof of the Jinping marble. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(12):4631–4646. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1054-5>
16. Deng J., Li S., Jiang Q., Chen B. Probabilistic analysis of shear strength of intact rock in triaxial compression: a case study of Jinping II project. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;111:103833. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103833>

14. John M. *Study of Rock Burstability with Mechanical Property Testing and Microscopic Image Analysis* [M.S. thesis]. McGill University (Canada); 2022.
15. Herget G., Oliver P., Gyenge M., Yu Y.S. Strength of a mine pillar at Copper Cliff South Mine. *Mining Science and Technology*. 1984;2(1):1–16. [https://doi.org/10.1016/S0167-9031\(84\)90158-0](https://doi.org/10.1016/S0167-9031(84)90158-0)
16. Bewick R.P., Amann F., Kaiser P.K., Martin C.D. Interpretation of UCS test results for engineering design. In: *ISRM Congress 2015 Proceedings – Int'l Symposium on Rock Mechanics*, 2015, pp. 1–14.
17. Zou C., Wong L.N.Y. Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading. *Engineering Geology*. 2014;173:19–31. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.02.003>
18. Wong L.N.Y., Zou C., Cheng Y. Fracturing and failure behavior of Carrara marble in quasistatic and dynamic brazilian disc tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014;47(4):1117–1133. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0465-9>
19. Košťák V., Bielenstein H.U. Strength distribution in hard rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1971;8(5):501–521. [https://doi.org/10.1016/1365-1609\(71\)90015-3](https://doi.org/10.1016/1365-1609(71)90015-3)
20. Лабазина А.А. Определение физико-механических свойств горных пород 12 блока 18 ЮВП шахтного поля СКРУ-3 ВКМКС. В кн.: Файнбург Г.З., Литвиновская Н.А. (ред.) *Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 21–22 окт. 2021 г.* Пермь; 2021. С. 138–145.
21. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. *Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения*. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та; 2008. 199 с.
22. Gill D.E. *Uniaxial compression as an element in a classification of rocks* [M.S. thesis]. McGill University (Canada); 1963. 188 p.
23. Филатов В.В., Болотнова Л.А. О сейсмичности Верхнекамского месторождения калийных солей. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(1):60–67. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-60-67>
Filatov V. V., Bolotnova L. A. On the seismic activity of the Upper Kama potassium salt deposit. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):60–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-60-67>
24. Маловичко Д.А. Изучение механизма Соликамского землетрясения 5 января 1995 года. *Физическая мезомеханика*. 2004;7(1):75–90. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00209>
Malovichko D.A. The study of mechanism of the January 5, 1995 Solikamsk earthquake. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2004;7(1):75–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00209>
25. Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Токтогулов Ш.Ж., Пантелеев И.А., Панфилов П.Е. Влияние масштабного эффекта и неоднородности горных пород при определении их прочностных свойств. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(11):208–215.
Zaytsev D.V., Kochanov A.N., Toktogulov Sh.Zh., Panteleev I.A., Panfilov P.E. Influence of scale effect and heterogeneity of rocks to determine their strength properties. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(11):208–215. (In Russ.)
26. Кузнецов Н.Н. К вопросу об определении количества опытов, надежности и точности результатов при изучении физико-механических свойств горных пород. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2015;18(2):183–191. Режим доступа: https://vestnik.mauniver.ru/v18_2_n61/03_Kuznetsov_183-191.pdf (дата обращения: 14.10.2024).
Kuznetsov N.N. On the question of determining the amount of experiments, reliability and accuracy of the results in the study of physical-mechanical properties of rocks. *Vestnik of MSTU*. 2015;18(2):183–191. (In Russ.) Available at: https://vestnik.mauniver.ru/v18_2_n61/03_Kuznetsov_183-191.pdf (accessed: 14.10.2024).
27. Pepe G., Cevasco A., Gaggero L., Berardi R. Variability of intact rock mechanical properties for some metamorphic rock types and its implications on the number of test specimens. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017;76:629–644. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0912-4>

Информация об авторах

Ильясов Булат Тагирович – кандидат технических наук, технический директор, ООО «Скиентия», г. Уфа, Российская Федерация; e-mail: info@scientia.ru

Ожиганов Иван Андреевич – заместитель директора, Уральский филиал АО «ВНИМИ», г. Екатеринбург, Российская Федерация

Трофимов Андрей Викторович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией геотехники, ООО «Институт Гипроникель», действительный член Академии горных наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: trofimovav@nornik.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.09.2024

Поступила после рецензирования: 18.11.2024

Принята к публикации: 25.11.2024

Information about the authors

Bulat T. Ilyasov – Cand. Sci. (Eng.), Technical Director, LLC Scientia, Ufa, Russian Federation; e-mail: info@scientia.ru

Ivan A. Ozhiganov – Deputy Director, Ural Branch of JSC VNIMI, Yekaterinburg, Russian Federation

Andrey V. Trofimov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Geotechnical Laboratory at LLC Gipronickel, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: trofimovav@nornik.ru

Article info

Received: 22.09.2024

Revised: 18.11.2024

Accepted: 25.11.2024