

Оценка удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения (Кольский полуостров)

А.А. Козырев¹, Н.Н. Кузнецов¹✉, А.Н. Шоков²

¹ Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ kuznecov@ksc.ru

Резюме: В работе приведены результаты испытаний образцов скальных горных пород Ждановского месторождения в условиях одноосного и трехосного сжатия. Выполнена оценка склонности пород к разрушению в динамической форме (удароопасности) по двум критериям. В первом случае использован критерий А.Н. Ставрогина, для реализации которого необходимо проводить испытания образцов на «жестких» прессах. Во втором случае применен критерий, разработанный в Горном институте Кольского научного центра РАН, позволяющий оценивать удароопасность пород по результатам испытаний образцов на стандартных прессах. Показано, что исследуемые породы Ждановского месторождения являются склонными к разрушению в динамической форме по двум рассмотренным критериям. Установлено, что с переходом от условий одноосного сжатия к трехосному при боковом давлении до 40 МПа склонность пород к динамическому разрушению сохраняется.

Ключевые слова: удароопасность, скальные горные породы, одноосное сжатие, трехосное сжатие, модуль упругости, модуль спада, удельная энергия деформирования, хрупкое разрушение

Для цитирования: Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н. Оценка удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения (Кольский полуостров). *Горная промышленность*. 2022;(6):75–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-75-82>

Rockburst hazard assessment of hard rocks in the Zhdanovskoe deposit (Kola Peninsula)

A.A. Kozyrev¹, N.N. Kuznetsov¹✉, A.N. Shokov²

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ kuznecov@ksc.ru

Abstract: The paper presents the results of uniaxial and triaxial compression tests of hard rock samples from the Zhdanovskoe deposit. Two criteria were used to assess the tendency of rocks to fail in dynamic mode (rockburst hazard). In the first case, the A.N. Stavrogin's criterion was used, which requires testing of specimens using "rigid" presses. In the second case, the criterion developed at the Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences was applied to estimate the rockburst hazard of rocks based on the test results of samples using the standard presses. It is shown that the studied rocks of the Zhdanovskoe deposit are prone to failure in dynamic mode according to the two criteria considered. It was found that with the transition from uniaxial to triaxial compression conditions at the lateral pressures up to 40 MPa, the tendency of rocks to dynamic failure is maintained.

Keywords: rockburst hazard, hard rocks, uniaxial compression, triaxial compression, modulus of elasticity, post-peak modulus, specific strain energy, brittle failure

For citation: Kozyrev A.A., Kuznetsov N.N., Shokov A.N. Rockburst hazard assessment of hard rocks in the Zhdanovskoe deposit (Kola Peninsula). *Russian Mining Industry*. 2022;(6):75–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-75-82>

Введение

Проблема горных ударов при отработке месторождений полезных ископаемых не нова. Ей насчитывается более 200 лет [1]. Тем не менее она актуальна и по сей день [2–6]. За этот период времени исследователями различных стран мира выявлено, что для реализации динамических разрушений в массиве пород необходимо выполнение двух условий [4; 7–9]. Первое условие заключается в наличии в массиве горных пород, способных накапливать потенциальную упругую энергию при нагружении и реализовы-

вать ее мгновенно в динамической форме (хрупкое разрушение). Второе условие – действие высоких напряжений в массиве, близких по величине к пределу прочности пород при сжатии. В совокупности эти условия позволяют относить месторождения к склонным и опасным по горным ударам¹.

Как известно, Кольский регион является одним из наи-

¹ Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216.

более удароопасных в России. Вызвано это действием высоких тектонических напряжений, превышающих в несколько раз вертикальную компоненту напряжений на сравнительно небольших глубинах (до 300 м) [2; 10; 11]. Одним из перспективных для добычи в Кольском регионе является Ждановское месторождение медно-никелевых руд. Оно представлено несколькими рудными телами, имеющими пластообразную форму с раздувами и пережимами. Мощность рудных тел в среднем составляет порядка 23 м, а средний угол падения – около 40° [12–14]. Для Ждановского месторождения характерен гравитационно-тектонический тип напряженно-деформированного состояния, а установленная максимальная компонента (горизонтальная) главных напряжений достигает по величине 60 МПа [15]. Руда и вмещающие породы относятся преимущественно к прочным скальным породам, для которых зачастую характерно хрупкое разрушение. Следовательно, для таких пород необходимо выполнять оценку удароопасности.

На данный момент разработано несколько методов оценки удароопасности горных пород [16–21]. При этом основной метод, имеющий фундаментальное обоснование, заключается в сопоставлении модуля упругости при нагружении с модулем спада при разрушении пород в условиях одноосного сжатия (критерий А.Н. Ставрогина)² [17]. Однако реализация данного подхода на практике сдерживается отсутствием «жестких» прессов, необходимых для определения запредельных характеристик. В связи с этим предложен критерий, разработанный в Горном институте Кольского научного центра Российской академии наук (КНЦ РАН) [21]. Сущность этого критерия заключается в анализе графиков деформирования образцов скальных пород при одноосном сжатии до предела прочности и в сопоставлении величин их накопленной фактической и расчетной идеально упругой энергии деформирования. Получение таких характеристик возможно на стандартных прессах без привлечения «жесткого» испытательного оборудования.

Также немаловажной является оценка удароопасности пород по результатам испытаний образцов в условиях трехосного сжатия. В этом случае изменяется характер деформирования пород за счет действия бокового сжимающего давления, что может привести к изменению их склонности к разрушению в динамической форме [7; 18; 22; 23].

Таким образом, целью работы является оценка удароопасности пород Ждановского месторождения по результатам испытаний образцов в условиях одноосного и трехосного сжатия по критерию А.Н. Ставрогина и критерию, разработанному в Горном институте КНЦ РАН.

Методика испытаний

Для выполнения исследований отобраны керновые пробы трех основных типов скальных горных пород Ждановского месторождения – диабаз, рудного перидотита и туфогенно-осадочной породы. Представленные породы преимущественно имели мелко-среднезернистую структуру с прожилками кварц-карбоната и серпентинита.

Из отобранного керна изготавливали образцы в форме цилиндров (рис. 1) с диаметром 61 мм и высотой 122 мм (отношение высоты к диаметру 2:1). Количество изготовленных образцов для каждого типа горных пород состави-



Рис. 1
Образцы диабазы, подготовленные для проведения испытаний

Fig. 1
Diabase samples prepared for testing

ло не менее 6 шт. для испытаний при одноосном сжатии и не менее 8 шт. для испытаний при трехосном сжатии.

Испытания образцов исследуемых пород в условиях одноосного сжатия выполняли на сервогидравлической установке MTS 816 в режиме контролируемых деформаций (скорость деформирования 0,3 мм/с). В ходе нагружения образцов регистрировали значения их продольной и поперечной деформации, используя экстензометры фирмы MTS (рис. 2). По результатам испытаний строили полные графики деформирования горных пород и определяли значения их модуля упругости и спада.

Испытания в условиях трехосного сжатия проводили на сервогидравлической установке MTS 815. Скорость постоянного деформирования составляла 0,3 мм/с. В ходе испытаний по два образца каждой породы нагружали до разрушения при значениях бокового давления 10, 20, 30 и 40 МПа. На основании полученных данных строили пол-

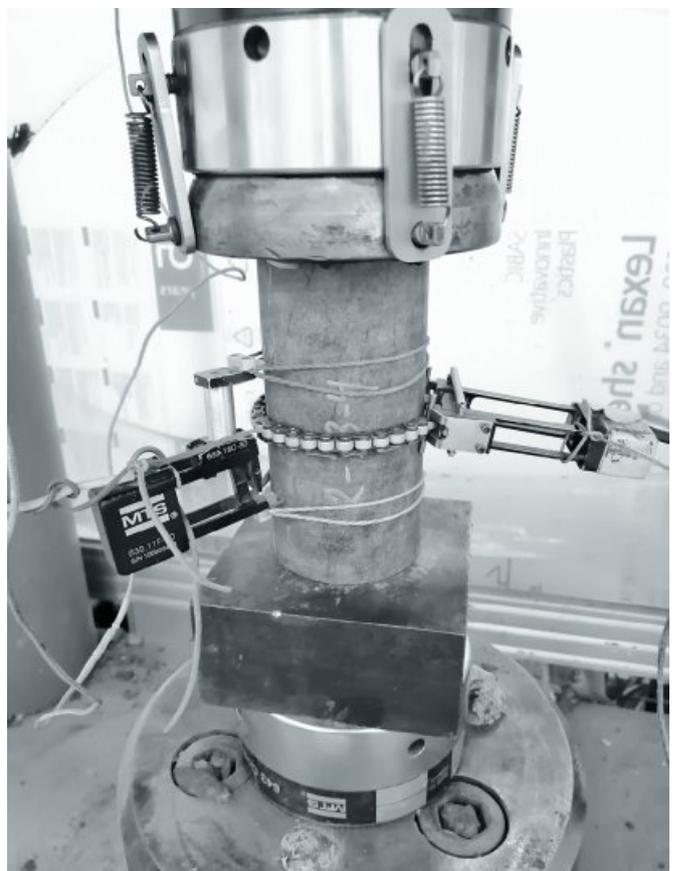


Рис. 2
Образец при нагружении в условиях одноосного сжатия

Fig. 2
A sample under uniaxial compression

² Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216.

ные графики деформирования образцов и определяли их деформационные характеристики до и за пределом прочности.

Оценку удароопасности исследуемых пород в первом случае выполняли по критерию А.Н. Ставрогина [17]. Согласно этому критерию необходимо рассматривать отношение модуля упругости и модуля спада (коэффициент удароопасности K_y) полного графика деформирования пород при одноосном сжатии. При этом, когда величина отношения модуля упругости к модулю спада меньше или равна единице, порода считается удароопасной (1). Если же величина коэффициента удароопасности больше единицы (2), то порода не является удароопасной:

$$K_y \leq E/M; \tag{1}$$

$$K_y > E/M, \tag{2}$$

где E – модуль упругости, МПа; M – модуль спада, МПа.

Во втором случае оценку удароопасности выполняли по критерию, разработанному в Горном институте КНЦ РАН [21]. Для этого по графику деформирования пород до предела прочности (рис. 3) определяли значения их фактически накопленной энергии (3) и энергии при идеально упругом деформировании (4). Затем выполняли сопоставление значений этих энергий и анализировали график деформирования пород:

$$W_p = \int_0^c \sigma(\varepsilon) d\varepsilon; \tag{3}$$

$$W_{ie} = S_{OAC} = \frac{OC \cdot CA}{2}. \tag{4}$$

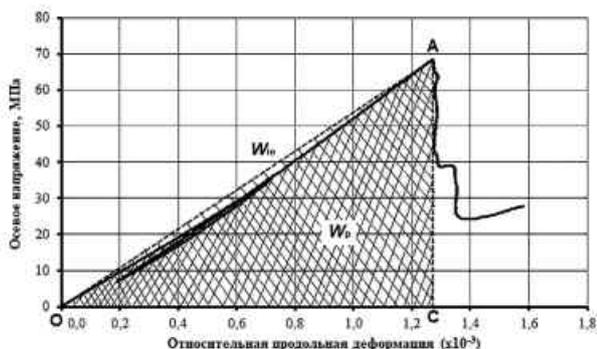


Рис. 3
График деформирования образца диабаза при одноосном сжатии

Fig. 3
A strain diagram of a diabase sample under uniaxial compression

Согласно критерию, если график деформирования до предела прочности имеет вогнутый вид, а разница значений расчётной идеально упругой и фактической энергий деформирования больше 10%, то порода должна быть отнесена к типу пород, разрушение которых происходит в статическом режиме. Для этих пород разрушения в динамической форме маловероятны, следовательно, такие породы не являются удароопасными.

Во всех остальных случаях, когда график деформирования образцов до предела прочности имеет выпуклый вид или близок к линии идеально упругого деформирования (график OA на рис. 3), а разница значений расчётной идеально упругой энергии и фактической энергии деформирования меньше 10% или же величина фактической энер-

гии превышает величину идеально упругой, то породы являются удароопасными.

Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальных исследований скальных горных пород Ждановского месторождения при одноосном сжатии получены полные графики деформирования образцов (рис. 4). Анализируя их, можно отметить, что участки графиков до предела прочности имеют прямолинейный вид или близки к нему. Участки графиков за пределом прочности обрываются достаточно круто и имеют субвертикальный вид. Подобный характер деформирования в основном присущ хрупким, удароопасным породам. По качественному признаку разрушение образцов всех исследованных типов пород происходило в динамической форме с разлетом осколков и сильным взрывоподобным звуком.

Значения пределов прочности пород при сжатии варьировались в следующем диапазоне. Для диабаза – от 124 до 211 МПа, для рудного перидотита – от 172 до 247 МПа, для туфогенно-осадочной породы – от 49 до 85 МПа. Наиболее прочной породой является рудный перидотит (среднее значение прочности 213 МПа), а наименее прочной – ту-

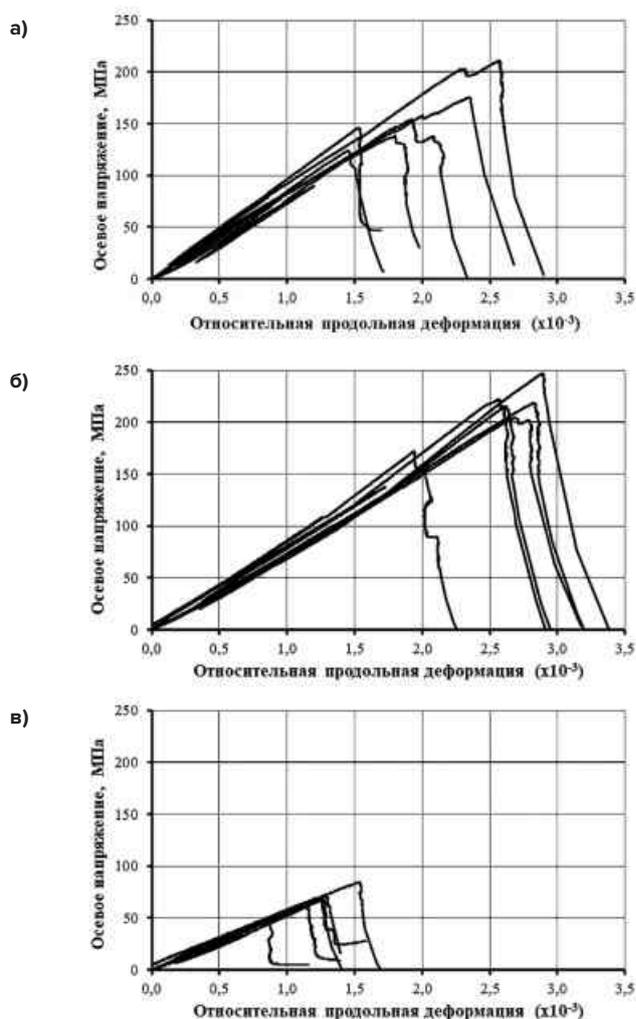


Рис. 4
Графики деформирования образцов при одноосном сжатии: а – диабаз, б – рудный перидотит, в – туфогенно-осадочная порода

Fig. 4
Strain diagrams of the samples under uniaxial compression: а – diabase, б – ore peridotite, в – tuffogenic sedimentary rock

Таблица 1

Результаты оценки удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения при одноосном сжатии (критерий А.Н. Ставрогина)

Table 1

Results of the rockburst hazard assessment of hard rocks from the Zhdanovskoye deposit under uniaxial compression (A.N. Stavrogin's criterion)

Наименование горной породы	Номер образца п/п	Модуль упругости, 10 ⁴ МПа	Модуль спада, 10 ⁴ МПа	Коэффициент удароопасности	Заключение об удароопасности
Диабаз	1	7,75	49,1	0,16	Удароопасен
	2	8,31	61,2	0,14	Удароопасен
	3	8,79	62,54	0,14	Удароопасен
	4	10,03	58,51	0,17	Удароопасен
	5	8,54	37,41	0,23	Удароопасен
	6	9,04	45,75	0,20	Удароопасен
Рудный перидотит	1	7,75	65,07	0,12	Удароопасен
	2	8,15	62,91	0,13	Удароопасен
	3	7,95	41,3	0,19	Удароопасен
	4	7,6	58,68	0,13	Удароопасен
	5	8,46	55,89	0,15	Удароопасен
	6	7,68	50,21	0,15	Удароопасен
Туфогенно-осадочная порода	1	6,10	18,93	0,32	Удароопасен
	2	5,62	61,36	0,09	Удароопасен
	3	5,77	41,31	0,14	Удароопасен
	4	5,76	41,39	0,14	Удароопасен
	5	6,19	46,6	0,13	Удароопасен
	6	6,72	14,52	0,46	Удароопасен

фогенно-осадочная порода (среднее значение прочности 67 МПа). Диабаз занимает промежуточное положение по прочности (среднее значение прочности 158 МПа).

Результаты оценки удароопасности исследуемых скальных пород по критерию А.Н. Ставрогина представлены в табл. 1.

Согласно полученным данным (табл. 1) значение модуля спада оказалось выше значения модуля упругости для всех испытанных образцов скальных пород. То есть коэффициент удароопасности во всех случаях оказался меньше единицы. Следовательно, диабаз, рудный перидотит и ту-

фогенно-осадочная порода относятся к категории удароопасных пород по критерию А.Н. Ставрогина.

Результаты оценки удароопасности скальных пород Ждановского месторождения по критерию, разработанному в Горном институте КИЦ РАН, представлены в табл. 2.

Как следует из полученных данных (табл. 2), разница значений идеально упругой и фактической накопленной энергии деформирования для всех образцов скальных пород не превышала 10%. Поскольку графики деформирования образцов до предела прочности имеют почти прямолинейный вид, а также выполняется второе условие

Таблица 2

Результаты оценки удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения при одноосном сжатии (критерий Горного института КИЦ РАН)

Table 2

Its of the rockburst hazard assessment of hard rocks from the Zhdanovskoye deposit under uniaxial compression (criterion of the Mining Institute of KSC RAS)

Наименование горной породы	Номер образца п/п	Идеально упругая энергия деформирования, МДж/м ³	Фактическая энергия деформирования, МДж/м ³	Разница значений идеально упругой и фактической энергии, %	Заклучение об удароопасности
Диабаз	1	0,0896	0,0905	-1	Удароопасен
	2	0,1247	0,1321	-6	Удароопасен
	3	0,1113	0,1119	-1	Удароопасен
	4	0,2709	0,2918	-7	Удароопасен
	5	0,1485	0,1434	4	Удароопасен
	6	0,2052	0,2149	-5	Удароопасен
Рудный перидотит	1	0,2814	0,2605	8	Удароопасен
	2	0,2842	0,2735	4	Удароопасен
	3	0,2705	0,2730	-1	Удароопасен
	4	0,3649	0,3370	8	Удароопасен
	5	0,2746	0,2683	2	Удароопасен
	6	0,3085	0,2995	3	Удароопасен
Туфогенно-осадочная порода	1	0,0336	0,0348	-3	Удароопасен
	2	0,0208	0,0214	-3	Удароопасен
	3	0,0417	0,0417	0	Удароопасен
	4	0,0435	0,0412	6	Удароопасен
	5	0,0451	0,0444	2	Удароопасен
	6	0,0651	0,0692	-6	Удароопасен

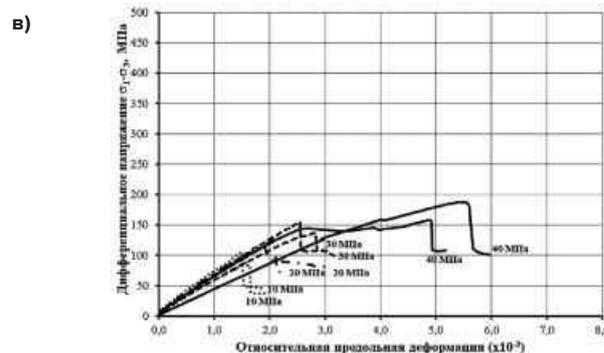
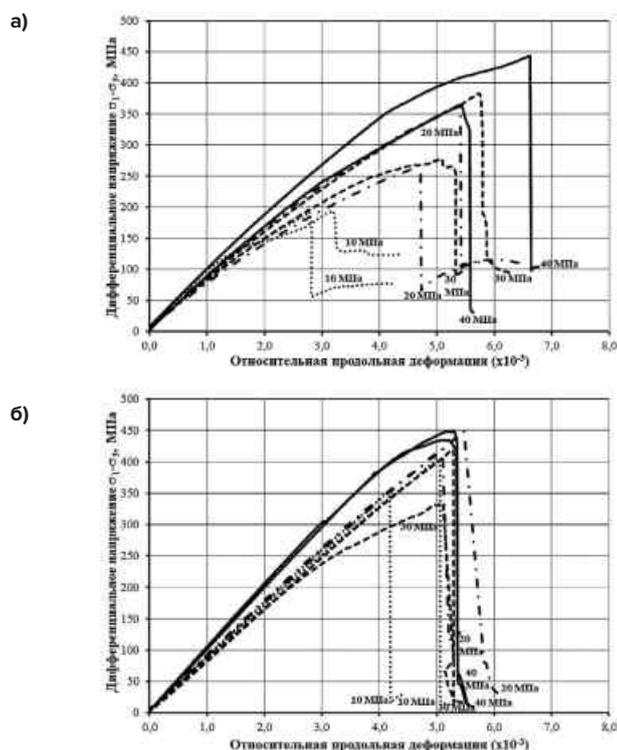


Рис. 5
Графики деформирования образцов при трехосном сжатии: а – диабаз, б – рудный перидотит, в – туфогенно-осадочная порода; пунктирная линия – боковое давление 10 МПа, штрихпунктирная линия – боковое давление 20 МПа, штриховая линия – боковое давление 30 МПа, сплошная линия – боковое давление 40 МПа

Fig. 5
Strain diagrams of samples under triaxial compression: а – diabase, б – ore peridotite, в – tuffogenic sedimentary rock; dotted line – lateral pressure of 10 MPa, dot-and-dash line – lateral pressure of 20 MPa, dashed line – lateral pressure of 30 MPa, full line – lateral pressure of 40 MPa

критерия о разнице значений энергий, то можно сделать заключение о том, что исследованные типы пород являются удароопасными.

При сопоставлении результатов оценки удароопасности скальных пород Ждановского месторождения по критерию А.Н. Ставрогина и критерию, разработанному в Горном институте КНЦ РАН, можно сделать вывод, что в обоих

случаях они совпали. Удароопасными в условиях одноосного сжатия оказались диабаз, рудный перидотит и туфогенно-осадочная порода.

На основании выполненных экспериментальных исследований скальных пород Ждановского месторождения в условиях трехосного сжатия получены следующие графики деформирования образцов (рис. 5).

Таблица 3
Результаты оценки удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения при трехосном сжатии (критерий А.Н. Ставрогина)

Table 3
Results of the rockburst hazard assessment of hard rocks from the Zhdanovskoye deposit under triaxial compression (A.N. Stavrogin's criterion)

Наименование горной породы	Номер образца п/п	Боковое давление, МПа	Модуль упругости, 10 ⁴ МПа	Модуль спада, 10 ⁴ МПа	Коэффициент удароопасности	Заключение об удароопасности
Диабаз	1	10	9,37	11,85	0,79	Удароопасен
	2	10	7,72	515,89	0,01	Удароопасен
	3	20	7,91	721,01	0,01	Удароопасен
	4	20	7,07	788,99	0,01	Удароопасен
	5	30	8,09	52,19	0,15	Удароопасен
	6	30	7,56	77,58	0,10	Удароопасен
	7	40	8,30	89,68	0,09	Удароопасен
	8	40	9,42	17,01	0,55	Удароопасен
Рудный перидотит	1	10	8,41	677,38	0,01	Удароопасен
	2	10	8,69	950,06	0,01	Удароопасен
	3	20	8,61	71,84	0,12	Удароопасен
	4	20	8,72	244,90	0,04	Удароопасен
	5	30	8,06	55,13	0,15	Удароопасен
	6	30	8,25	2444,16	0,01	Удароопасен
	7	40	9,84	77,87	0,13	Удароопасен
	8	40	10,23	63,85	0,16	Удароопасен
Туфогенно-осадочная порода	1	10	6,62	149,30	0,04	Удароопасен
	2	10	5,58	72,06	0,08	Удароопасен
	3	20	6,27	6,40	0,98	Удароопасен
	4	20	6,57	183,56	0,04	Удароопасен
	5	30	5,51	7,24	0,76	Удароопасен
	6	30	6,43	57,86	0,11	Удароопасен
	7	40	5,33	179,65	0,03	Удароопасен
	8	40	4,24	4,97	0,86	Удароопасен

В ходе анализа графиков деформирования скальных пород (см. рис. 5) выявлено, что для большей части образцов участки графиков до предела прочности имеют выпуклый вид. Участки графиков деформирования за пределом прочности обрываются круто, что свидетельствует о хрупком характере разрушения образцов. Это подтверждается качественно, поскольку все образцы разрушались с сильным взрывоподобным звуком.

Также для исследуемых пород характерно возрастание значений прочности с увеличением бокового давления. Для образцов диабазы при боковом давлении 40 МПа прочность в среднем увеличилась в 3 раза по сравнению с прочностью при одноосном сжатии, для рудного перидотита прочность возросла в 2 раза, а для туфогенно-осадочной породы – в 3 раза.

Интересной особенностью является то, что значения остаточной прочности образцов самой прочной из изучаемых пород (рудного перидотита) близки к нулю. При этом остаточная прочность диабазы изменяется в пределах от 30 до 130 МПа. Значения остаточной прочности для образцов туфогенно-осадочной породы возрастают с увеличением бокового давления и приближаются к пределу прочности при трехосном сжатии (рис. 5, в). В этом случае действие сжимающего бокового давления затрудняет процесс деформирования образцов в горизонтальной плоскости, в результате чего их графики деформирования выполняются на пределе прочности и разрушение образцов происходит с некоторой отсрочкой.

Оценку удароопасности исследуемых скальных пород в условиях трехосного сжатия выполняли по критерию А.Н. Ставрогина, поскольку критерий Горного института КНЦ РАН в этом случае нельзя использовать из-за изменения характера деформирования пород до предела прочности. Результаты проведенной оценки представлены в табл. 3.

Согласно полученным данным (см. табл. 3) образцы исследуемых скальных пород по критерию А.Н. Ставрогина являются удароопасными при всех заданных значениях бокового давления (10, 20, 30 и 40 МПа). Следовательно, при переходе от условий одноосного сжатия к трехосному (при боковом давлении до 40 МПа) удароопасность диабазы, рудного перидотита и туфогенно-осадочной породы не меняется. Эту особенность необходимо учитывать при ведении горных работ, поскольку даже при уменьшении разницы значений между компонентами действующих напряжений в массиве представленные скальные породы будут сохранять свою способность к разрушению в динамической форме.

Выводы

Таким образом, на основании выполненных экспериментальных исследований скальных горных пород Ждановского месторождения в условиях одноосного и трехосного сжатия установлено следующее.

Изученные скальные породы (диабаз, рудный перидотит и туфогенно-осадочная порода) являются удароопасными в условиях одноосного сжатия, что подтверждается сопоставлением значений их модуля упругости и модуля спада (критерий А.Н. Ставрогина). Такие же результаты получены при использовании критерия, предложенного Горным институтом КНЦ РАН. Это, в свою очередь, еще раз доказывает применимость предложенного Горным институтом КНЦ РАН подхода, для которого не требуется использовать жесткое испытательное оборудование. То есть оценивать удароопасность пород возможно по результатам испытаний образцов на стандартных прессах без определения задельных характеристик.

При переходе к условиям трехосного сжатия и боковом давлении до 40 МПа удароопасность диабазы, рудного перидотита и туфогенно-осадочной породы сохраняется, что подтверждается критерием А.Н. Ставрогина, а прочность пород увеличивается в 2–3 раза по сравнению с одноосным сжатием. Тем не менее для образцов туфогенно-осадочной породы наблюдается резкое изменение характера деформирования: выпуклая форма графиков деформирования до предела прочности, выполаживание графиков на пределе прочности и разрушение образцов с некоторой отсрочкой по времени. Также для образцов этой породы выявлено возрастание остаточной прочности с увеличением бокового давления. Все это может быть признаком того, что с возрастанием значений бокового давления (более 40 МПа) диабаз может перейти в категорию неудароопасной породы. Для остальных изученных пород эти значения должны быть существенно выше.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в массиве пород Ждановского месторождения представлены прочные скальные горные породы, способные к хрупкому разрушению и являющиеся удароопасными. Следовательно, при ведении горных работ на участках массива с такими типами пород при действии высоких напряжений возможны динамические проявления горного давления.

Список литературы

1. Авершин С.Г. *Горные удары*. М.: Углетехиздат; 1955. 236 с.
2. Козырев А.А. Геомеханическое обеспечение горных работ при отработке удароопасных месторождений в тектонически напряженных массивах. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах*: сб. науч. тр. Апатиты: КНЦ РАН; 1998. С. 11–25.
3. Рассказов И.Ю., Потапчук М.И., Аникин П.А., Гладырь А.В., Цициашвили Г.Ш. Исследование формирования очагов разрушения в удароопасных массивах горных пород месторождений востока России. В кн.: Курилко А.С. (ред.) *Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: Труды Второй Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН М.Д. Новопашина, г. Якутск, 17–19 сентября 2013 г.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2014. С. 23–29.

4. Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В., Пацкевич П.Г. Исследование удароопасности массива горных пород месторождения «Купол», отрабатываемого подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(9):118–127. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-0-118-127>
5. Kaiser P.K., Cai M. Rockburst damage mechanisms and support design principles. In: *Proceedings of the 8th International symposium on rockbursts and seismicity in mines, Russia, Saint-Petersburg, Moscow, 1–7 September 2013*. Obninsk: Geophysical Survey of RAS; Perm: Mining inst. of Ural branch of RAS; 2013, pp. 349–370.
6. Tarasov B.G., Randolph M.F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. 2011;48(6):888–898. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.013>
7. Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н., Пак А.К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(4):69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
8. Мухитдинов Ш.Р., Рахимов В.Р. Определение удароопасности горных пород месторождения Кочбулак. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(2):114–118. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2006/2/20_Muhitd_r2.pdf?yclid=lafetzvzds284878008
9. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina coalfield. *Procedia Engineering*. 2017;191:1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.289>
10. Козырев А.А., Панин В.И., Мальцев В.А., Аккуратов М.В. Прогноз горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на Хибинских апатитовых рудниках. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах*: сб. науч. тр. Апатиты: КНЦ РАН; 1998. С. 73–82.
11. Ловчиков А.В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(4):68–73.
12. Skufin P.K., Bayanova T.B. Early Proterozoic central-type volcano in the Pechenga structure and its relation to the ore-bearing gabbro-wehrlite complex of the Kola Peninsula. *Petrology*. 2006;14(6):609–627. <https://doi.org/10.1134/S0869591106060063>
13. Кулькова М.С. Применение аналитического и численного методов исследования для определения оптимальных параметров камер и целиков при отработке Ждановского месторождения. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;11(1):42–49. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.42-49>
14. Semenova I.E., Kulkova M.S. The stress distribution around the mining excavations under different tectonic loads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;833: 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012127>
15. Кулькова М.С. Земцовский А.В. Оценка устойчивости массива при стадийной отработке запасов линзы Ждановского месторождения по результатам моделирования его напряженно-деформированного состояния. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-2):103–110. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_103
16. Петухов И.М., Линьков А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 279 с.
17. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. *Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах*. М.: Недра; 1985. 271 с.
18. Tarasov B.G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. In: Van Sint Jan M., Potvin Y. (eds). *Proceedings of 5th International Seminar on Deep and High Stress Mining, Keynote Address. Deep Mining 2010, Santiago, Chile, October 6–8, 2010*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2010, pp. 119–133.
19. Singh S.P. Burst energy release index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1988;21(2):149–155. <https://doi.org/10.1007/BF01043119>
20. Kidybiński A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1981;18(4):295–304. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)91194-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)91194-3)
21. Кузнецов Н.Н., Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Земцовский А.В., Федотова Ю.В., Пак А.К. *Методика определения склонности скальных горных пород к разрушениям в динамической форме (хрупкому разрушению) по результатам лабораторных испытаний образцов*. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН; 2021. 20 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.454.9>
22. Xia M., Zhou K.-P. Particle simulation of the failure process of brittle rock under triaxial compression. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2010;17(5):507–513. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0350-4>
23. Shi G.-C., Chen G., Pan Y.-T., Yang X.-L., Liu Y., Dai G.-Z. Stress-drop effect on brittleness evaluation of rock materials. *Journal of Central South University*. 2019;26(7):1807–1819. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4135-2>

References

1. Avershin S.G. *Rockbursts*. Moscow: Ugletekhizdat; 1955. 236 p. (In Russ.)
2. Kozыrev A.A. Geomechanical provision at mining rockburst hazardous deposits in tectonically stressed rock mass. In: Melnikov N.N. (ed.) *Geomechanics in mining operations in highly stressed massifs*. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 1998, pp. 11–25. (In Russ.)
3. Rasskazov I.Yu., Potapchuk M.I., Anikin P.A., Gladyr A.V., Tsitsiashvili G.Sh. Study of fracture zone formation in rock mass of eastern Russian deposits. In: Kurilko A.S. (ed.) *Geomechanical and geotechnological challenges of efficient mining of solid mineral deposits in the northern and northeastern regions of Russia: Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Practical Conference in dedicated to the memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences M.D. Novopashin, Yakutsk, September 17–19, 2013*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2014, pp. 23–29. (In Russ.)
4. Aynbinder I.I., Ovcharenko O.V., Patskevich P.G. Analysis of rockburst hazard at the Kupol deposit under underground mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(9):118–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-0-118-127>
5. Kaiser P.K., Cai M. Rockburst damage mechanisms and support design principles. In: *Proceedings of the 8th International symposium on rockbursts and seismicity in mines, Russia, Saint-Petersburg, Moscow, 1–7 September 2013*. Obninsk: Geophysical Survey of RAS; Perm: Mining inst. of Ural branch of RAS; 2013, pp. 349–370.
6. Tarasov B.G., Randolph M.F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. 2011;48(6):888–898. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.013>

7. Kasparyan E.E., Kuznetsov N.N., Shokov A.N., Pak A.K. Dynamic failure conditions in strong rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(4):69–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
8. Mukhitdinov Sh.R., Rakhimov V.R. Determination of the rockburst hazard of the Kochbulak deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2006;(2):114–118. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2006/2/20_Muhtid_r2.pdf?ysclid=laf_eztzvs284878008
9. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina coalfield. *Procedia Engineering*. 2017;191:1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.289>
10. Kozyrev A.A., Panin V.I., Maltsev V.A., Akkuratov M.V. Prediction of mine-tectonic rockbursts and mine-induced earthquakes in the Khibiny apatite mines. In: Melnikov N.N. (ed.) *Geomechanics of mining operations in highly stressed massifs*. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 1998, pp. 73–82. (In Russ.)
11. Lovchikov A.V. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. *Journal of Mining Science*. 2013;49(4):572–575. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1062739149040072>
12. Skuf'in P.K., Bayanova T.B. Early Proterozoic central-type volcano in the Pechenga structure and its relation to the ore-bearing gabbro-wehrlite complex of the Kola Peninsula. *Petrology*. 2006;14(6):609–627. <https://doi.org/10.1134/S0869591106060063>
13. Kulkova M.S. The analytical and numerical research methods for determining the optimal parameters of stopes and pillars during the Zhdanovskoe deposit mining. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2019;11(1):42–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.42-49>
14. Semenova I.E., Kulkova M.S. The stress distribution around the mining excavations under different tectonic loads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;833: 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012127>
15. Kulkova M.S., Zemtsovsky A.V. Rock mass stability estimation in phased mining of Zhdanov lentil reserves by stress-strain modeling data. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-2):103–110. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_103
16. Petukhov I.M., Linkov A.M. The mechanics of rockbursts and rock bumps. Moscow: Nedra; 1983. 279 p. (In Russ.)
17. Stavrogin A.N., Protosyena A.G. *Rock strength and stability of mining workings at great depths*. Moscow: Nedra; 1985. 271 p. (In Russ.)
18. Tarasov B.G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. In: Van Sint Jan M., Potvin Y. (eds). *Proceedings of 5th International Seminar on Deep and High Stress Mining, Keynote Address. Deep Mining 2010, Santiago, Chile, October 6–8, 2010*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2010, pp. 119–133.
19. Singh S.P. Burst energy release index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1988;21(2):149–155. <https://doi.org/10.1007/BF01043119>
20. Kidybiński A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1981;18(4):295–304. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)91194-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)91194-3)
21. Kuznetcov N.N., Kozyrev A.A., Kaspariyev E.V., Zemtsovsky A.V., Fedotova Yu.V., Pak A.K. *Methods for determining the dynamic failure propensity of hard rocks (brittle failure) based on the laboratory test results of samples*. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2021. 20 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.454.9>
22. Xia M., Zhou K.-P. Particle simulation of the failure process of brittle rock under triaxial compression. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2010;17(5):507–513. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0350-4>
23. Shi G.-C., Chen G., Pan Y.-T., Yang X.-L., Liu Y., Dai G.-Z. Stress-drop effect on brittleness evaluation of rock materials. *Journal of Central South University*. 2019;26(7):1807–1819. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4135-2>

Информация об авторах

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела геомеханики Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8440-4971>

Кузнецов Николай Николаевич – кандидат технических наук, руководитель лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>; e-mail: kuznecov@ksc.ru

Шоков Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.10.2022

Поступила после рецензирования: 09.11.2022

Принята к публикации: 14.11.2022

Information about the authors

Anatoly A. Kozyrev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8440-4971>

Nikolai N. Kuznetcov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>; e-mail: kuznecov@ksc.ru

Anatoly N. Shokov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Physical-Mechanical Properties and Rock Destruction, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Article info

Received: 17.10.2022

Revised: 09.11.2022

Accepted: 14.11.2022