

УДК 622.02

А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова, Н. Н. Кузнецов

Оценка степени удароопасности скальных горных пород на основе результатов лабораторных испытаний

Актуальность проблемы определения степени удароопасности скальных горных пород обусловлена тем, что при разработке месторождений полезных ископаемых в скальных массивах происходят разрушения выработок в динамической форме. Основой обеспечения безопасности ведения горных работ являются знания о способности различных типов горных пород к хрупкому разрушению. В настоящее время разработаны экспериментальные методы установления деформационно-прочностных характеристик пород при различных режимах нагружения. Однако общий недостаток применяемых подходов заключается в том, что в них в явном виде не учтено главное условие возможности разрушения пород в динамической форме – способность массива пород накапливать энергию во время его нагружения. Целью проводимых исследований являлось изучение характера накопления упругой энергии в процессе нагружения и деформирования образцов различных пород в режиме одноосного сжатия для оценки степени их удароопасности. Оригинальность подхода заключалась в анализе вида кривой допредельного деформирования пород, которая может быть получена на любом стандартном оборудовании, т. е. без привлечения специализированных испытательных ("жестких") установок. По результатам проведенных исследований с использованием стандартных прессов были выявлены два режима деформирования для испытанных типов пород, что позволило сформулировать критерии отнесения пород к различным категориям по степени их склонности к разрушениям в динамической форме. Такой подход имеет практическую ценность, поскольку позволяет детализировать методику геомеханического районирования массива месторождений и более дифференцированно оценивать степень удароопасности конкретных участков разрабатываемых месторождений.

Ключевые слова: геомеханика, скальные горные породы, лабораторные испытания, одноосное сжатие, удароопасность, деформирование, упругая энергия, стандартные прессы

Информация о статье: поступила в редакцию 27.12.2018; получена после доработки 15.02.2019

Введение

Процессы разрушений материалов всегда были в центре внимания исследователей, но при этом большая часть выполненных работ была посвящена в основном определению параметров, при которых происходит разрушение, т. е. предельных значений напряжений (пределов прочности) или деформаций.

Классические теории прочности [наибольших нормальных напряжений (Галилей, 1638 г.), наибольших линейных деформаций (Э. Мариотт, 1682 г.), наибольших касательных напряжений (Ш. Кулон, 1773 г.)] позволяли прогнозировать разрушение материалов и тем самым оценивать устойчивость и долговечность конструкций из используемых материалов.

Позднее были предложены теории прочности, в которых совместно рассматривались напряжения и деформации, т. е. изучались комплексные критерии: потенциальная энергия или численно ей равная удельная работа деформаций. В энергетической теории Губера – Мизеса (1904–1925 гг.) учитывалась не вся потенциальная энергия деформирования, а только та ее часть, которая способствовала изменению формы элементарных объемов материала. Советскими учеными Н. Н. Давиденковым и Я. Б. Фридманом была разработана объединенная теория прочности (1946 г.), обобщающая современные воззрения на природу прочности твердых тел в их хрупком или пластичном состоянии [1].

Прогнозированию режима разрушения каких-либо материалов уделялось меньше внимания, за исключением вопросов, связанных с прогнозом горных ударов, т. е. разрушений горных пород в динамической форме. Условия возникновения данных опасных явлений исследуются уже на протяжении 200 лет. Первые официальные сведения о таких разрушениях относятся к 1738 г.; они были зафиксированы при разработке оловянных руд в Англии [2], а во второй половине XIX в. горные удары стали отмечаться на угольных месторождениях в странах Западной Европы. С этого времени проблеме горных ударов стали уделять все возрастающее внимание [3–6].

На месторождениях России первые горные удары были отмечены в 1944 г. на шахтах Кизеловского каменноугольного бассейна в условиях сильной тектонической нарушенности массивов и при наличии пород с высокими деформационными и прочностными характеристиками [2; 7]. Вследствие роста глубин и масштабов разработки месторождений, а также интенсификации ведения горных работ количество разрушений пород в динамической форме постоянно увеличивается [8–10]. Ранее горные удары и техногенные землетрясения фиксировались в зонах влияния очистных работ и тектонических нарушений в массивах

горных пород на подземных рудниках. В настоящее время они регистрируются даже в рабочих зонах карьеров, а также в зонах стыковки подземных рудников с карьерами.

Таким образом, разрушения в динамических формах, а следовательно, и горные удары, могут происходить при одновременном выполнении двух условий: достаточной степени напряженности массива пород и способности пород, слагающих массив, накапливать упругую энергию деформирования. В частности, именно по результатам оценок указанной склонности пород к аккумуляции энергии деформирования определяется степень удароопасности того или иного массива пород.

Материалы и методы

Большинство методов оценки степени удароопасности породных массивов основываются на результатах определения свойств слагающих их пород с использованием различных критериев.

Например, в работе [7] приводятся следующие критерии удароопасности:

$$K_{уд1} = (E_{упр}/E_{пол}) \cdot 100 \geq 70 \%, \quad (1)$$

$$K_{уд2} = (E_{упр}/E_{ост}) \geq 2, \quad (2)$$

$$K_{хр}^n = \sigma_{сж}/\sigma_p \geq 10, \quad (3)$$

где $K_{уд1}$, $K_{уд2}$, $K_{хр}^n$ – коэффициенты удароопасности и хрупкости пород; $E_{упр}$, $E_{пол}$, $E_{ост}$ – упругая, полная и остаточная деформации при одноосном сжатии; $\sigma_{сж}$, σ_p – пределы прочности пород при одноосном сжатии и растяжении.

По мере получения более детальной информации о процессах деформирования горных пород при их нагружении (в частности, о процессах взаимобмена энергией образцов пород с нагружающими устройствами) оказалось возможным получать полные диаграммы деформирования пород, включающие и деформирование за пределом прочности [11]. На рис. 1 представлена диаграмма, включающая следующие характерные участки: $0-a$ – участок изменения контактных условий испытываемого объема пород; $a-b$ – участок идеально упругого деформирования, $\sigma_1 a$ – максимальное значение напряжений, при которых стабилизируются контактные условия испытываемого объема пород, $\sigma_1 b$ – предел идеальной упругости; $b-c$ – участок неидеально упругого деформирования, $\sigma_1 c$ – предел упругости; $c-d$ – участок пластического деформирования, $\sigma_1 d$ – предел прочности; $d-e$ – участок запределного деформирования, $\sigma_1 e$ – остаточная прочность; $E_{ср}$ и $M_{ср}$ – соответственно средние значения модуля упругости и модуля спада.

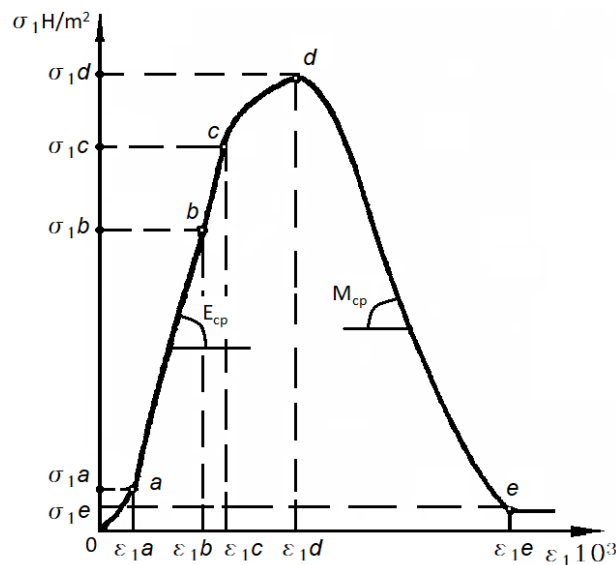


Рис. 1. Типовая схема деформирования твердых горных пород (полная диаграмма) в условиях одноосного напряженного состояния: σ_1 – нормальное напряжение; ε_1 – линейная (продольная) деформация

Fig. 1. Typical scheme of hard rock deformation (complete diagram) under uniaxial compression state: σ_1 – normal stress; ε_1 – linear (longitudinal) deformation

По соотношению модуля спада M (на запределной стадии деформирования) и модуля деформации E (на допределной стадии) $\xi = M/E$ можно судить о склонности пород к тому или иному режиму разрушения. Чем больше показатель ξ , тем больше вероятность разрушений с интенсивным выделением энергии, т. е. динамических проявлений горного давления (горных ударов, техногенных землетрясений и др.). Горные породы, для которых $\xi \rightarrow 0$, следует классифицировать как идеально пластичные, а при $\xi \rightarrow \infty$ – как идеально хрупкие.

В результате появляется возможность оценивать степень удароопасности горных пород по итогам сопоставления указанных модулей¹ [11, 12]:

$$K_1 = E/M_{\text{сп}}, \quad (4)$$

$$K_2 = \varepsilon_y/\varepsilon_{\text{общ}}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_y + \varepsilon_n + \varepsilon_3, \quad (6)$$

где E – модуль деформации; $M_{\text{сп}}$ – модуль спада, определяемый по запредельной ветви диаграммы "напряжение – деформация"; ε_y , $\varepsilon_{\text{общ}}$, ε_n , ε_3 – упругие, общие, остаточные на пределе прочности и необратимые деформации в запредельной области.

При $K_1 \leq 1$ и $K_2 \geq 0,7$ порода считается удароопасной даже в случае, если хотя бы один из коэффициентов K подтверждает ее удароопасность.

Однако выполнение данных оценок в настоящее время сдерживается отсутствием промышленного изготовления испытательных установок с повышенной жесткостью, что необходимо для получения запредельных характеристик. Вследствие этого очень часто месторождения относят к удароопасным по опыту проведения работ в аналогичных условиях.

Недостатком изложенного подхода к определению склонности пород к разрушениям в динамическом режиме является анализ отдельных параметров на различных участках кривой деформирования. С учетом указанного обстоятельства представляется более перспективным переходить к комплексным параметрам для характеристики всего процесса деформирования и разрушения пород.

В качестве такого параметра может быть применено понятие "энергия", которое является общей мерой различных форм движения и взаимодействия материи. Применительно к массивам горных пород основным рассматриваемым видом энергии является потенциальная. Она характеризует способность некоего тела совершать работу за счет своего нахождения в поле действия сил [13]. С практической точки зрения наиболее важной задачей является изучение предельных накопленных величин энергии, при которых наступает разрушение горных пород в массиве. В связи с этим было введено понятие "энергоемкость".

Энергоемкость горных пород можно охарактеризовать как величину накопленной энергии до разрушения тем или иным способом. На данный момент разработано множество подходов, позволяющих определять энергоемкость пород при их взрывании [14; 15], резании [16; 17], дроблении [14; 18], бурении [14; 19], динамическом скалывании [20].

Особый интерес для рассматриваемого направления исследований представляют испытания горных пород с использованием прессов, позволяющие устанавливать предельные величины энергии при различных режимах нагружения [12; 21–23].

В работах Б. З. Амусина [21] и В. Т. Глушко [22] был изучен процесс накопления потенциальной энергии упругого деформирования в образцах горных пород при нагружении их на испытательных установках с обычной и повышенной жесткостью. В ходе обсуждения полученных результатов авторы отмечали, что при нагружении образцов с невысокой прочностью на испытательных установках с обычной жесткостью разрушение проходило без динамических проявлений, а при нагружении прочных образцов – в динамической форме. При испытании на "жесткой" установке наблюдалось спокойное разрушение и для прочных образцов. Главной причиной, вызвавшей различия в характере разрушения таких образцов, по мнению авторов, была их способность к разупрочнению, которая влекла за собой разгрузку пресса. Так, если на деформирование образца тратится больше энергии, чем ее высвобождается в результате разгрузки пресса, то разрушение происходит спокойно. Если же разгрузка пресса высвобождает больше энергии, чем ее идет на деформирование образца, то разрушение будет носить динамический характер.

И. М. Петухов и А. М. Линьков [12] продолжили исследование энергетических процессов при нагружении образцов горных пород в "жестком" и "мягком" режимах. По результатам испытаний они установили, что опасными в плане динамических проявлений являются в основном не конкретные горные породы, а вся система "нагружающее устройство – образец горной породы". Так, при мягком режиме нагружения в момент разрушения образца в прессе реализуется мгновенная упругая деформация. В результате он разрушается в динамической форме с сильным разлетом осколков.

А. Н. Ставрогиным, А. Г. Протосеней и Б. Г. Тарасовым также велись работы в направлении исследования энергии упругого деформирования образцов скальных горных пород при их разрушении на установках с обычной и повышенной жесткостью в условиях одноосного и трехосного сжатия [11; 24]. Авторами было определено соответствие между этапами нагружения образца и изменением компонент баланса энергии. На основании полученных данных они установили, что неуправляемое разрушение возникает в том случае, когда величина модуля спада превышает коэффициент жесткости пресса. Таким образом, разрушение образца за пределом прочности происходит за счет запасенной в нагружающем устройстве энергии.

¹Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам // Утверждены приказом № 216 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.05.2013. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499022602>.

Главная проблема таких подходов заключается в том, что их реализация сдерживается отсутствием необходимого количества "жестких" прессов, которые должны изготавливаться в промышленных масштабах. Вместе с тем при проведении испытаний различных пород на одной и той же испытательной установке и при стандартной скорости нагружения (1–5 МПа/с) детальный анализ кривых деформирования пород позволяет получать относительную оценку процессов накопления энергии при деформировании пород, устанавливать пороговые значения энергии деформирования до разрушения и прогнозировать режимы разрушения пород в динамической или статической формах, в частности оценивать степень их удароопасности.

Исходя из этого, целью проведенных исследований являлось изучение характера накопления упругой энергии в процессе нагружения и деформирования образцов различных пород в режиме одноосного сжатия для оценки степени их удароопасности на стандартных прессах.

Для достижения поставленной цели были проведены испытания девяти типов скальных горных пород Мурманской области (рис. 2): апатит-нефелиновых руд, ийолитов и уртитов вмещающих пород Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений (Хибинский массив), карбонатит-магнетитовых руд Ковдорского месторождения (Ковдорский массив), гнейсов железорудного месторождения Куркенпахк (Займандровский железорудный район).



Рис. 2. Образцы исследуемых скальных горных пород: *a* – линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды; *b* – ийолита трахитоидного; *в* – уррита среднезернистого массивного; *г* – уррита неравномерно-зернистого; *д* – уррита пегматоидного; *e* – гнейса серого лейкократового; *ж* – гнейса серого апатит-карбонатно-магнетитовой руды; *з* – апатит-карбонатно-магнетитовой руды; *и* – кальцитового карбонатита

Fig. 2. The samples of the studied hard rocks: *a* – lenticular striped apatite-nepheline ore; *b* – trachytoid ijolite; *в* – medium-grained massive urtite; *г* – inequigranular urtite; *д* – pegmatoid urtite; *e* – gray gneiss; *ж* – leucocratic gray gneiss; *з* – apatite-carbonate-magnetite ore; *и* – calcite carbonatite

Разработка Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений проводится открытым и подземным способами, при этом условия проведения горных работ на глубинах ниже 300 м от дневной поверхности признаны опасными по горным ударам, и горные работы выполняются с обязательным использованием комплекса организационных и технических противоударных мероприятий. Разработка месторождений Ковдорское и Куркенпахк проводится открытым способом. По своим физическим свойствам некоторые породы данных месторождений также могут быть склонны к разрушениям в динамических формах с определенных глубин.

Испытания проводились на сервогидравлической установке MTS 816 (США). Образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру 2 : 1, а их количество составляло 4–5 шт. для каждого типа горной породы.

В ходе исследования образцы нагружали до 30 % от предела прочности на сжатие и разгружали. Затем их нагружали до разрушения с регистрацией величин продольных деформаций при помощи тензодатчиков. По результатам испытаний строили графики зависимости "напряжение – деформация" и рассчитывали величины энергии деформирования каждого образца. Полученные данные усредняли для каждого типа пород. Более подробно методика проведения испытаний представлена в работе [24].

Результаты и обсуждение

Типовые графики деформирования горных пород (рис. 3) принципиально могут иметь вогнутую и выпуклую форму относительно идеальной прямой линии (показана пунктиром), которая характеризует идеально упругое деформирование материала: ОВС – условная линия идеально упругого деформирования; ОАС – график неупругого деформирования; ОЕС – частный случай упругого деформирования с избытком упругой энергии; точка С – предел прочности при одноосном сжатии; точка D – величина продольной деформации, соответствующая пределу прочности при одноосном сжатии.

Величина энергии деформирования пород до предела прочности W_{Π} определяется как значение определенного интеграла:

$$W_{\Pi} = \int_0^D \sigma(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (7)$$

Величина энергии при идеально упругом деформировании $W_{иу}$ определяется как площадь треугольника OBCD в координатах σ – ϵ (рис. 3):

$$W_{иу} = S_{OBCD} = (OD \cdot DC) / 2. \quad (8)$$

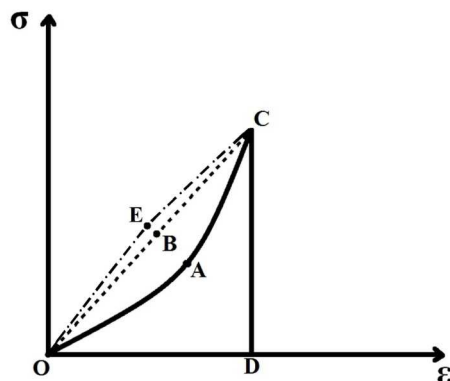


Рис. 3. Типовые графики деформирования скальных горных пород:
 σ – нормальное напряжение; ϵ – относительная продольная деформация
 Fig. 3. Hard rock deformation diagrams established on the basis of test results:
 σ – normal stress; ϵ – relative longitudinal deformation

В случае если кривая деформирования пород имеет вогнутую форму, энергия деформирования не накапливается, а реализуется в виде пластических деформаций в процессе деформирования, и при этом во все периоды времени энергия деформирования остается меньше величины энергии, соответствующей идеально упругому деформированию.

При выпуклой форме кривой деформирования упругая энергия деформирования накапливается и во все периоды времени превышает величину энергии, соответствующую идеально упругому деформированию.

Графики деформирования образцов трахитоидного ийолита и неравномерно-зернистого уррита (одних из самых прочных исследуемых горных пород) приведены на рис. 4.

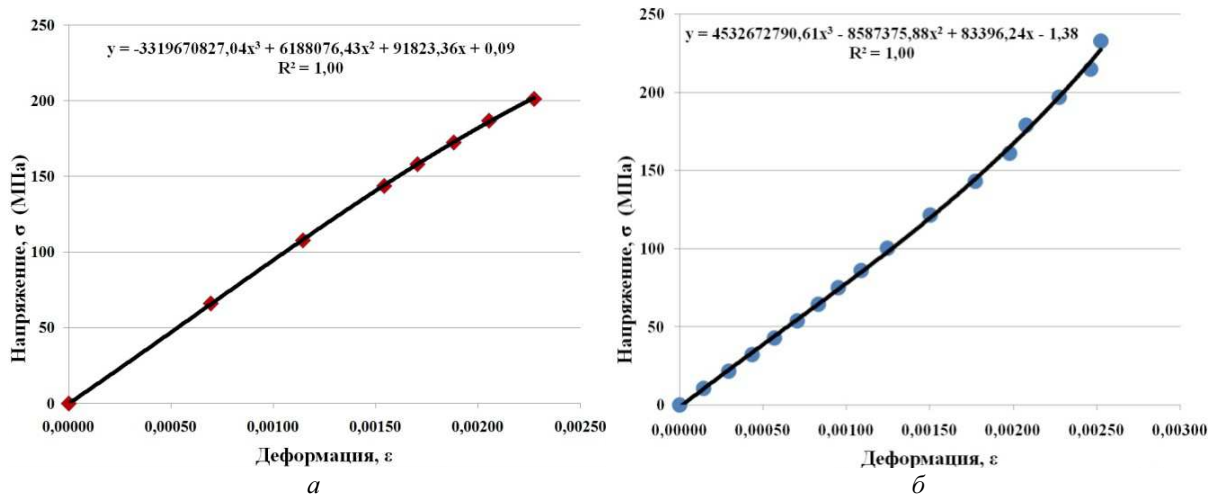


Рис. 4. Графики деформирования скальных горных пород Хибинского массива:
 a – уррита неравномерно-зернистого (образец 18); b – ийолита трахитоидного (образец 2Ит-3)
 Fig. 4. Deformation diagrams of hard rocks of Khibiny rock massif: a – inequigranular urtite (sample 18);
 b – trachytoid ijolite (sample 2It-3)

Из рис. 4 следует, что кривая деформирования уррита (образец 18) имеет слабо выпуклый вид, а кривая изменения ийолита (образец 2Ит-3) – слабо вогнутый. Обе кривые аппроксимируются полиномом третьей степени. При этом после нагрузки/разгрузки до 30 % от предела прочности на сжатие кривая вернулась в начальное положение, что свидетельствует о практически идеально упругом характере деформирования. Образцы разрушались в ярко выраженном динамическом режиме с интенсивным выделением энергии, сильным звуком и разлетом фрагментов.

Вычисленная величина энергии для образцов ийолита в среднем равна $W_{п} = 0,1856$ МДж/м³ (на 0,0160 МДж/м³ меньше величины $W_{иу}$, 8 %), а для образцов уррита неравномерно-зернистого – 0,2376 МДж/м³ (на 0,0022 МДж/м³ меньше $W_{иу}$, 1 %).

Для сравнения на рис. 5 приведены результаты испытаний одной из самых слабых исследуемых горных пород – кальцитового карбонатита Ковдорского массива (образец 33.43).

Кривая деформирования кальцитового карбонатита имеет вогнутый вид и аппроксимируется полиномом четвертой степени с высокой степенью достоверности. При этом кривая деформирования начинается не с нуля, из-за того что в ходе цикла нагрузки/разгрузки до 30 % от предела прочности на сжатие в образце произошли необратимые деформации. Разрушения происходили без разлета осколков в явно статическом режиме. Подобный характер деформирования был установлен для всех остальных исследуемых образцов карбонатита.

Деформирование уртитов, гнейсов, апатит-нефелиновой и апатит-карбонатно-магнетитовой руд происходило в некотором промежуточном режиме по сравнению с деформированием ийолитов и кальцитовых карбонатитов.

В частности, графики деформирования отдельных образцов уртитов имели выпуклую форму, приближались к идеальной прямой или даже имели слабую вогнутую форму, при этом величины реальной энергии деформирования $W_{\text{п}}$ и условно-расчетной энергии $W_{\text{и.у}}$ отличались в относительно небольших пределах (0–10 %). Образцы этих пород разрушались менее интенсивно, но разлет осколков имел место.

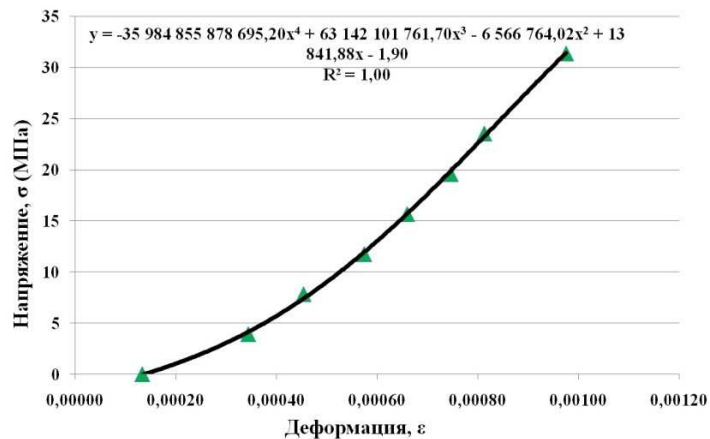


Рис. 5. График деформирования кальцитового карбонатита Ковдорского массива (образец 33.43)
Fig. 5. Diagram of calcite carbonatite sample deformation N 33.43 (Kovdor rock massif)

Результаты всех испытаний образцов различных типов пород и руд рассматриваемых месторождений и усредненные величины их основных физических параметров приведены в таблице.

Таблица. Результаты определения основных физических свойств исследуемых скальных горных пород

Table. The results of main physical properties determination of the studied hard rocks

Наименование горных пород	Прочность, МПа		Модуль Юнга, МПа · 10 ⁴	Коэффициент Пуассона	Удельная энергия, МДж/м ³		Разница между $W_{\text{и.у}}$ и $W_{\text{п}}$	
	на сжатие	на растяжение			идеально упругого деформирования $W_{\text{и.у}}$	деформирования при разрушении (реальная) $W_{\text{п}}$	МДж/м ³	%
Ийолит трахитоидный	230	13,1	8,89	0,22	0,1401	0,1298	0,0103	7
					0,2923	0,2619	0,0304	10
					0,1723	0,1650	0,0072	4
					0,2016	0,1856	0,0160	8
Уртит неравномерно-зернистый с эгирином	200	9,5	7,87	0,26	0,2543	0,2430	0,0112	4
					0,2281	0,2389	-0,0107	-5
					0,2422	0,2316	0,0105	4
					0,2347	0,2370	-0,0024	-1
Уртит средне-зернистый массивный	175	9,3	7,22	0,28	0,2398	0,2376	0,0022	1
					0,1426	0,1426	0,0000	0
					0,1591	0,1580	0,0011	1
					0,2015	0,1996	0,0019	1
					0,2010	0,2030	-0,0020	-1
					0,1760	0,1758	0,0002	0

Уртит пегматойдный	155	9,1	7,56	0,25	0,1073	0,0960	0,0113	11
					0,1922	0,1872	0,0051	3
					0,1260	0,1249	0,0011	1
					0,1191	0,1215	-0,0025	-2
					0,1361	0,1324	0,0037	3
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	145	5,2	6,56	0,20	0,1430	0,1197	0,0233	16
					0,1554	0,1507	0,0047	3
					0,1122	0,1120	0,0003	0
					0,1746	0,1642	0,0104	6
					0,0860	0,0763	0,0097	11
					0,1343	0,1246	0,0097	7
Гнейс серый	140	10,7	6,86	0,20	0,1451	0,1415	0,0036	2
					0,0946	0,0927	0,0019	2
					0,1795	0,1826	-0,0032	-2
					0,0840	0,0769	0,0071	8
					0,1258	0,1234	0,0024	2
Гнейс серый лейкократовый	190	11,6	7,56	0,17	0,1366	0,1275	0,0090	7
					0,1832	0,1642	0,0189	10
					0,0845	0,0770	0,0076	9
					0,0877	0,0741	0,0137	16
					0,1230	0,1107	0,0123	10
Кальцитовый карбонатит с включениями ийолита	80	4,6	4,88	0,22	0,0066	0,0054	0,0012	18
					0,0113	0,0079	0,0033	30
					0,0171	0,0129	0,0042	25
					0,0169	0,0125	0,0044	26
					0,0169	0,0109	0,0060	35
					0,0137	0,0099	0,0038	28
Апатит-карбонатно-магнетитовая руда	130	9,3	13,03	0,26	0,0502	0,0409	0,0012	2
					0,0470	0,0469	0,0001	0
					0,0412	0,0408	0,0004	1
					0,0405	0,0396	0,0009	2
					0,0432	0,0404	0,0028	6
					0,0444	0,0433	0,0011	2

Таким образом, в результате проведенных исследований были выявлены два режима деформирования для испытанных типов пород и определен критерий отнесения пород к различным категориям по степени склонности к разрушениям в динамической или статической формах.

В частности, если значение реальной энергии деформирования меньше условно-расчетной идеально упругой энергии на величину свыше 10 %, то порода может быть уверенно отнесена к типу пород, разрушение которых возможно только в статическом режиме. Для этих пород разрушение в динамической форме маловероятно, следовательно, такие породы должны быть отнесены к категории "неопасные породы по горным ударам".

Во всех остальных случаях, когда разница значений реальной энергии деформирования меньше условно-расчетной идеально упругой энергии на величину до 10 % или равна нулю, а также если значения реальной энергии превышают значения идеально упругой, то породы являются склонными к разрушениям в динамической форме, а массивы пород, включающие их, должны быть отнесены к склонным и опасным по горным ударам.

С целью апробации предложенного критерия оценки склонности горных пород к удароопасности и подтверждения достоверности полученных выводов были проведены дополнительные испытания образцов апатит-нефелиновой руды, уррита среднезернистого массивного и кальцитового карбонатита в Санкт-Петербургском горном университете с помощью прессы с повышенной жесткостью. По результатам испытаний были определены величины модуля упругости и модуля спада исследуемых пород. Сопоставление полученных данных позволило установить, что апатит-нефелиновая руда и уррит относятся к удароопасной категории, а карбонатит – к неудароопасной.

Согласно предложенному нами критерию и представленным в указанной выше таблице результатам энергия деформирования апатит-нефелиновой руды и уррита среднезернистого массивного меньше идеально упругой энергии до 10 % (разница 0 и 7 % соответственно), поэтому они относятся к удароопасным горным породам. Для карбонатита разница между идеальной упругой энергией и реальной энергией деформирования составляет 28 %. Следовательно, данная порода не является удароопасной.

Таким образом, предложенный нами критерий позволяет определять склонность горных пород к разрушениям в динамической форме аналогично критерию И. М. Петухова [12], но без использования специализированных "жестких" прессов.

Заключение

В результате проведенных исследований были установлены два режима деформирования для испытанных типов пород и определен критерий отнесения пород к различным категориям по степени склонности к разрушениям в динамической или статической формах:

1) если накопленная энергия деформирования образцов меньше расчетной упругой на величину свыше 10 %, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме. В этом случае в горных выработках могут иметь место лишь статические формы проявлений горного давления и потеря устойчивости выработок будет происходить преимущественно в виде отдельных вывалов;

2) если образцы деформируются упруго, то породы склонны к разрушениям в динамической форме, а при проведении горных работ нельзя исключить реализацию явлений типа горных ударов.

Анализ полученных данных показал возможность проведения испытаний с использованием стандартных прессов для определения склонности к разрушениям в динамической форме, а также установления относительной степени удароопасности пород. Наиболее удароопасными из испытанных пород Хибинских апатит-нефелиновых месторождений являются уртиты, несколько менее удароопасны ийолиты и апатит-нефелиновые руды; из пород Заимандровского железорудного района – удароопасны гнейсы; из пород Ковдорского месторождения – удароопасны апатит-карбонатно-магнетитовые руды и совершенно неудароопасны карбонатиты.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют более дифференцированно оценивать степень удароопасности конкретных участков разрабатываемых месторождений.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГоИ КНЦ РАН А. К. Паку и М. И. Потокину за помощь при выполнении экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов : в 2 ч. М. : Машиностроение, 1974. Ч. 1. 472 с.
2. Авершин С. Г. Горные удары. М. : Углетехиздат, 1955. 236 с.
3. Cook N. G. W. The basic mechanics of rockbursts // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1963. V. 64, Iss. 3. P. 71–81. URL: https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_3752.
4. Xie H., Pariseau W. G. Fractal character and mechanism of rock bursts // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*. 1993. V. 30, Iss. 4. P. 343–350. URL: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)91718-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)91718-X).
5. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. Л. : Недра : Ленингр. отд-ние, 1989. 488 с.
6. Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А., Аккуратов М. В. Прогноз горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на Хибинских апатитовых рудниках // *Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах = Geomechanics support in highly-stressed rock masses mining : [сб. ст.] / [отв. ред. акад. Н. Н. Мельников]. Апатиты : КНЦ РАН, 1998. С. 73–82.*
7. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / под ред. И. М. Петухова [и др.]. М. : Академия горных наук, 1997. 375 с.
8. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. V. 8, Iss. 2. P. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.002>.
9. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina Coalfield // *Procedia Engineering*. 2017. V. 191. P. 1144–1151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.289>.
10. Козырев А. А., Федотова Ю. В., Журавлева О. Г. Вероятностный прогноз сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17, № 2. С. 225–230.
11. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М. : Недра, 1985. 271 с.
12. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М. : Недра, 1983. 279 с.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : в 10 т. М. : Физматлит, 2004. Т. 1. 223 с.
14. Додис Я. М., Нифадьев В. И. Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Бишкек : КРСУ, 2006. 374 с.
15. Кононов В. М. Влияние формы зарядной полости на энергоемкость разрушения горных пород // *Горный журнал*. 2015. № 4. С. 66–70.

16. Falcão Neves P., Costa E Silva M., Navarro Torres V. F. Evaluation of elastic deformation energy in stone cutting of Portuguese marbles with a diamond saw // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2012. V. 112, Iss. 5. P. 413–418.
17. Вержанский П. М., Маслов М. И. Исследование энергоёмкости вибрационного воздействия рабочего органа при разрушении забоя резанием // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 5. С. 195–201.
18. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М. : Недра, 1978. 390 с.
19. Шадрин А. В., Кабанова Т. В. Исследование разрушения твердой горной породы энергией удара // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 6. С. 381–386.
20. Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М. : Машиностроение, 1968. 375 с.
21. Амусин Б. З., Линьков А. М. Применение метода переменных модулей в задачах линейно-наследственной ползучести // *Горное давление и горные удары : сб. науч. тр. / НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела. Л., 1973. Вып. 88. С. 180–184.*
22. Глушко В. Т., Виноградов В. В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М. : Недра, 1982. 193 с.
23. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб. : Наука, 2001. 342 с.
24. Кузнецов Н. Н., Пак А. К., Федотова Ю. В. Исследование характера деформирования и энергоёмкости разрушения образцов скальных пород Ковдорского месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № S56. С. 286–293.

References

1. Fridman Ya. B. *Mekhanicheskiye svoystva metallov [Mechanical properties of metals] : v 2 ch.* М. : Mashinostroyeniye, 1974. Ch. 1. 472 p.
2. Avershin S. G. *Gornyye udary [Mining attacks]*. М. : Ugletekhizdat, 1955. 236 p.
3. Cook N. G. W. The basic mechanics of rockbursts // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1963. V. 64, Iss. 3. P. 71–81. URL: https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_3752.
4. Xie H., Pariseau W. G. Fractal character and mechanism of rock bursts // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*. 1993. V. 30, Iss. 4. P. 343–350. URL: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)91718-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)91718-X).
5. Turchaninov I. A., Iofis M. A., Kaspar'yan E. V. *Osnovy mekhaniki gornykh porod [Basics of rock mechanics]*. L. : Nedra : Leningr. otd-niye, 1989. 488 p.
6. Kozыrev A. A., Panin V. I., Mal'tsev V. A., Akkuratov M. V. Prognoz gorno-tektonicheskikh udarov i tekhnogennykh zemletryaseniy na Khibinskikh apatitovykh rudnikakh [Forecast of mountain-tectonic impacts and man-made earthquakes on the Khibiny apatite mines] // *Geomekhanika pri vedenii gornykh rabot v vysokonapryazhennykh massivakh = Geomechanics support in highly-stressed rock masses mining : [sb. st.] / [otv. red. akad. N. N. Mel'nikov]. Apatity : KNTS RAN, 1998. P. 73–82.*
7. Prognoz i predotvrashcheniye gornykh udarov na rudnikakh [Forecast and prevention of rock bursts in mines] / pod red. I. M. Petukhova [i dr.]. М. : Akademiya gornykh nauk, 1997. 375 p.
8. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. V. 8, Iss. 2. P. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.002>.
9. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina Coalfield // *Procedia Engineering*. 2017. V. 191. P. 1144–1151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.289>.
10. Kozыrev A. A., Fedotova Yu. V., Zhuravleva O. G. Veroyatnostnyy prognos seismoopasnykh zon v usloviyakh udaroopasnykh mestorozhdeniy Khibinskogo massiva [Probabilistic forecast of seismic zones in the conditions of impact-hazardous deposits of the Khibiny massif] // *Vestnik MGTU*. 2014. V. 17, N 2. P. 225–230.
11. Stavrogin A. N., Protosyena A. G. Prochnost' gornykh porod i ustoychivost' vyrabotok na bol'shikh glubinakh [The strength of rocks and the stability of workings at great depths]. М. : Nedra, 1985. 271 p.
12. Petukhov I. M., Lin'kov A. M. *Mekhanika gornykh udarov i vybrosov [Mechanics of rock bursts and emissions]*. М. : Nedra, 1983. 279 p.
13. Landau L. D., Lifshits Ye. M. *Teoreticheskaya fizika [Theoretical Physics] : v 10 t.* М. : Fizmatlit, 2004. V. 1. 223 p.
14. Dodis Ya. M., Nifad'yev V. I. Razrusheniye gornykh porod pri burenii i vzryvanii [Destruction of rocks during drilling and blasting]. Bishkek : KRSU, 2006. 374 p.
15. Kononov V. M. Vliyaniye formy zaryadnoy polosti na energoyemkost' razrusheniya gornykh porod [The influence of the shape of the charging cavity on the energy intensity of rock destruction] // *Gornyy zhurnal*. 2015. N 4. P. 66–70.

16. Falcão Neves P., Costa E Silva M., Navarro Torres V. F. Evaluation of elastic deformation energy in stone cutting of Portuguese marbles with a diamond saw // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2012. V. 112, Iss. 5. P. 413–418.

17. Verzhanskiy P. M., Maslov M. I. Issledovaniye energoyemkosti vibratsionnogo vozdeystviya rabocheho organa pri razrushenii zaboya rezaniyem [Investigation of the energy intensity of the vibration effect of the working body in case of destruction of the face by cutting] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2015. N 5. P. 195–201.

18. Rzhhevskiy V. V., Novik G. YA. Osnovy fiziki gornyx porod [Fundamentals of rock physics]. M. : Nedra, 1978. 390 p.

19. Shadrina A. V., Kabanova T. V. Issledovaniye razrusheniya tverdogo gornoy porody energiyey udara [Investigation of the destruction of solid rock by impact energy] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2014. N 6. P. 381–386.

20. Zelenin A. N. Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami [Basics of soil destruction by mechanical methods]. M. : Mashinostroyeniye, 1968. 375 p.

21. Amusin B. Z., Lin'kov A. M. Primeneniye metoda peremennykh moduley v zadachakh lineynonasledstvennoy polzuchesti [Application of the method of variable modules in problems of linear hereditary creep] // *Gornoye davleniye i gornyye udary : sb. nauch. tr. / NII gornoy geomekhaniki i marksheyderskogo dela. L., 1973. Vyp. 88. P. 180–184.*

22. Glushko V. T., Vinogradov V. V. Razrusheniye gornyx porod i prognozirovaniye proyavleniy gornogo davleniya [Destruction of rocks and prediction of rock pressure]. M. : Nedra, 1982. 193 p.

23. Stavrogin A. N., Tarasov B. G. Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornyx porod [Experimental physics and mechanics of rocks]. SPb. : Nauka, 2001. 342 p.

24. Kuznetsov N. N., Pak A. K., Fedotova Yu. V. Issledovaniye kharaktera deformirovaniya i energoyemkosti razrusheniya obraztsov skal'nykh porod Kovdorskogo mestorozhdeniya [Investigation of the nature of deformation and the energy intensity of the destruction of rock samples from the Kovdorsky field] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2015. N S56. P. 286–293.

Сведения об авторах

Козырев Анатолий Александрович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, профессор

Kozyrev A. A. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Professor

Каспарьян Эдуард Варужанович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник

Kasparyan E. V. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Leading Researcher

Федотова Юлия Викторовна – ул. Тургенева, 51, г. Хабаровск, Россия, 680000; Институт горного дела ДО РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: fjulia@mail.ru

Fedotova Yu. V. – 51, Turgeneva Str., Khabarovsk, Russia, 680000; Mining Institute of the Far Eastern Branch RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher; e-mail: fjulia@mail.ru

Кузнецов Николай Николаевич – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: nikavalon@mail.ru

Kuznetsov N. N. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: nikavalon@mail.ru

A. A. Kozyrev, E. V. Kasparyan, Yu. V. Fedotova, N. N. Kuznetsov

Estimating the rockburst hazard of hard rocks based on laboratory test results

The relevance of the problem under study is based on the fact that dynamic fractures of mine workings occur in rock masses when developing mineral deposits. Safety assurance of mining depends on the awareness of proneness of various rock types to brittle failure. By now, experimental methods have been elaborated to determine rock deformation and strength properties under various loading conditions. A common drawback of the approaches in use is that they do not expressly consider the main condition of dynamic rock fracture – rock mass ability to accumulate energy when loaded. The studies have been conducted to analyze the nature of elastic energy accumulation during loading and deformation of samples of various rocks under uniaxial compression to estimate the degree of their rockburst hazard. The approach is original as it studies the deformation curve of rocks at the pre-peak stage that may be obtained with any standard equipment without the use of special-purpose test ("rigid") devices. Results of the studies conducted on standard test devices have allowed the authors to identify two different deformation patterns for the rock type tested with further establishment of criteria of rock classification by the degree of proneness to dynamic fractures. This approach is of practical value as it specifies the geomechanics zoning method of the rock mass and improves the assessment of rockburst hazard degree of specific areas at deposits being developed.

Key words: geomechanics, hard rocks, laboratory tests, uniaxial compression, rockburst hazard, deformation, elastic energy, standard test devices

Article info: received 27.12.2018; received in revised 15.02.2019