



О критериях удароопасности горных пород

А.А. Козырев¹, Н.Н. Кузнецов¹✉, А.Б. Макаров²

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

² SRK Consulting (Russia) Ltd Филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания), г. Москва, Российская Федерация

✉ n.kuznecov@ksc.ru

Резюме: К настоящему времени для оценки удароопасности горных пород предложено не менее десяти различных критериев. Часть из них используется только в определенных странах, а некоторые только на определенных месторождениях. В связи с этим возникает проблема выбора универсального критерия удароопасности пород, который можно использовать при наличии стандартного испытательного оборудования на различных месторождениях.

Для решения этой задачи выполнена оценка удароопасности горных пород месторождений России и Казахстана по критерию Кайзера, критерию Ставрогина, критерию Горного института Кольского научного центра РАН и энергетическому критерию. На основе полученных данных проведены анализ и сопоставление результатов оценки удароопасности горных пород по рассмотренным критериям. Установлены границы их применимости и взаимосвязь между полученными результатами. Выделены основные преимущества и недостатки критериев. Предложен универсальный подход к оценке удароопасности горных пород, заключающийся в совместном использовании нескольких критериев.

Ключевые слова: критерий удароопасности, горные породы, коэффициент хрупкости, модуль упругости, модуль спада, удельная энергия деформирования, одноосное сжатие

Для цитирования: 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>

On criteria of rockburst hazard

A.A. Kozyrev¹, N.N. Kuznecov¹✉, A.B. Makarov²

¹ Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

² SRK Consulting (Russia) Ltd (UK), Moscow, Russian Federation

✉ n.kuznecov@ksc.ru

Abstract: By now at least ten different criteria have been proposed to assess the rockburst hazard. Some of them are used only in certain countries and some only for certain deposits. This raises the problem of selecting a universal rockburst hazard criterion that can be used when standard test equipment is available at different deposits.

To solve this problem, the rockburst hazard assessment of rocks from the deposits in Russia and Kazakhstan has been performed according to the Kaiser criterion, the Stavrogin criterion, the criterion of the Mining Institute of the KSC RAS and the energy criterion. Based on the data obtained, the results of the rockburst hazard assessment were analyzed and compared according to the criteria considered. The limits of their applicability and the correlation between the results obtained are established. The main advantages and disadvantages of the criteria are highlighted. A universal approach to assessing the rockburst hazard has been proposed, consisting in the combined use of several criteria.

Keywords: rockburst hazard criterion, rocks, brittleness coefficient, elastic modulus, post-peak modulus, specific strain energy, uniaxial compression

For citation: Kozyrev A.A., Kuznecov 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>



Введение

При отработке месторождений полезных ископаемых в соответствии с действующими Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности¹ необходимо выполнять оценку склонности горных пород к горным ударам (удароопасности). В качестве базового метода для выполнения такой оценки на территории Российской Федерации используют критерий А.Н. Ставрогина² [1]. Данный критерий позволяет оценивать удароопасность пород исходя из сопоставления их деформационных характеристик до и за пределом прочности. Однако сложность в его применении связана с необходимостью использовать специализированное жесткое испытательное оборудование [2].

Учеными других стран также предложены различные критерии оценки удароопасности горных пород [3–10]. В основном все они базируются на результатах испытаний образцов на прессах, но оценку удароопасности пород выполняют исходя из различных данных. В некоторых критериях требуется определение деформационных параметров пород до и после разрушения. В других устанавливают энергию, накопленную при деформировании пород до разрушения, определяют соотношение прочности пород при сжатии и растяжении. Предложенные подходы к оценке удароопасности горных пород также имеют свои преимущества и недостатки. При этом часть из них применяется только в тех странах, в которых они разработаны, а некоторые только на определенных месторождениях.

В связи с вышеизложенным возникает вопрос о необходимости введения универсального критерия оценки удароопасности горных пород, который может быть использован на различных месторождениях полезных ископаемых.

В данной работе предпринята попытка поиска такого универсального критерия. С этой целью выбраны следующие критерии: критерий А.Н. Ставрогина [1], критерий Кайзера [7], критерий Горного института КНЦ РАН [11] и энергетический критерий [6; 12].

Оценку удароопасности выполняли для горных пород месторождений Кольского региона: апатит-нефелиновые месторождения Кукисвумчорское, Юкспорское и «Апатитовый цирк»; Ковдорское магнетит-apatит-бадделейтовое месторождение; Ждановское медно-никелевое месторождение. Также оценка выполнена для пород Новоширокского полиметаллического месторождения (Забайкальский край) и месторождения медных руд Жаман-Айбат (Республика Казахстан). Всего в ходе исследования проанализированы результаты испытаний порядка 650 образцов различных горных пород.

Критерии оценки удароопасности горных пород

В качестве базового критерия оценки удароопасности горных пород, относительно которого заверяли результаты оценок по другим методам, использовали критерий А.Н. Ставрогина [1]. Сущность его заключается в сопоставлении значений модуля упругости и модуля спада, получаемых при нагружении образцов пород в условиях одноосного сжатия. Так, если значение отношения модулей

(коэффициент удароопасности) меньше или равно единице (1), то порода является удароопасной. Если же значение коэффициента удароопасности больше единицы (2), то порода не является удароопасной:

$$K_y \leq E/M; \quad (1)$$

$$K_y > E/M, \quad (2)$$

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

Критерий Горного института КНЦ РАН [11] заключается в анализе графиков деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии до предела прочности и в сопоставлении величин их накопленной фактической и расчетной идеально упругой энергии деформирования.

В соответствии с критерием, если график деформирования до предела прочности имеет вогнутый вид (рис. 1, график ОАС), а разница значений расчетной идеально упругой (3) и фактической энергий деформирования (4) больше 10%, то порода не склонна к разрушению в динамической форме, то есть неудароопасна. Во всех остальных случаях породы являются удароопасными:

$$W_{ie} = S_{OBCD} = \frac{OD \cdot DC}{2}; \quad (3)$$

$$W_p = \int_0^D \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (4)$$

где $\sigma(\epsilon)$ – функция «напряжение-деформация».

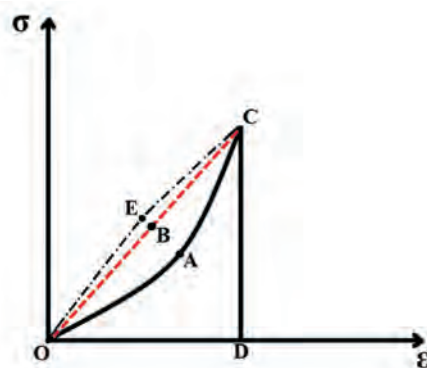


Рис. 1
Типовые графики деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии до предела прочности

Fig. 1
Typical strain diagrams of rock samples under uniaxial compression up to the strength limit

Критерий Кайзера [7] позволяет оценивать потенциал удароопасности горных пород по значениям их прочности при сжатии и коэффициентов хрупкости (5). В этом случае показатель прочности пород при сжатии определяет потенциальную энергию деформирования, накопленную в образцах к моменту их разрушения [7; 13]. Чем выше прочность, тем больше энергии будет накоплено в образцах и тем интенсивнее будет происходить процесс их разрушения. Коэффициент хрупкости определяет потенциал скалывания тонких пластин породы в результате отрыва [7; 13]:

$$K_{хр} = \sigma_{сж} / \sigma_p, \quad (5)$$

где $\sigma_{сж}$ – прочность при сжатии, МПа; σ_p – прочность при растяжении, МПа.

Оценку удароопасности горных пород выполняют по номограмме, представленной на рис. 2. Согласно этой номограмме, чем больше будут значения предела прочно-

¹ Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2013 г. №576.

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 г. №216.

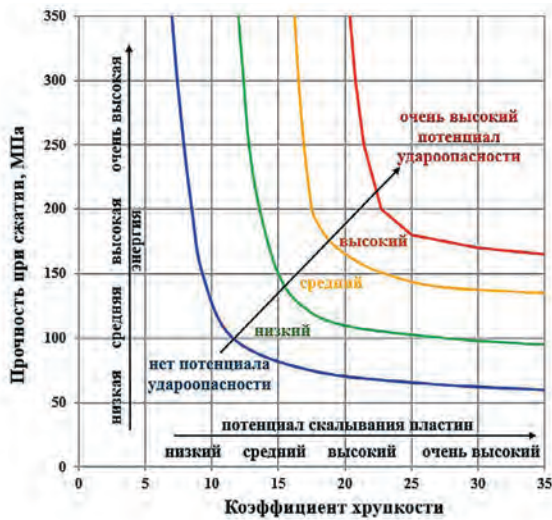


Рис. 2
Номограмма для оценки
потенциала удароопасности
горных пород (по [7])

Fig. 2
Nomogram for assessing the
rockburst potential (after: [7])

сти при сжатии пород и их коэффициента хрупкости, тем выше будет их потенциал удароопасности.

Энергетический критерий [6; 12] позволяет оценивать склонность горных пород к разрушению в динамической форме (удароопасность) на основании определения их критических значений удельной энергии деформирования при одноосном сжатии (6) и характера разрушения. Выделяют следующие диапазоны изменения критических значений энергии и соответствующие этим диапазонам виды разрушения пород (рис. 3). Ниже 0,05 МДж/м³ – статическое разрушение (породы не являются удароопасными), от 0,05 МДж/м³ до 0,15 МДж/м³ – слабо динамическое разрушение (породы потенциально удароопасны), от 0,15 МДж/м³ до 0,25 МДж/м³ – динамическое разрушение, выше 0,25 МДж/м³ – интенсивно динамическое разрушение (породы удароопасны):

$$W_{\text{крит}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^2}{2E} \quad (6)$$

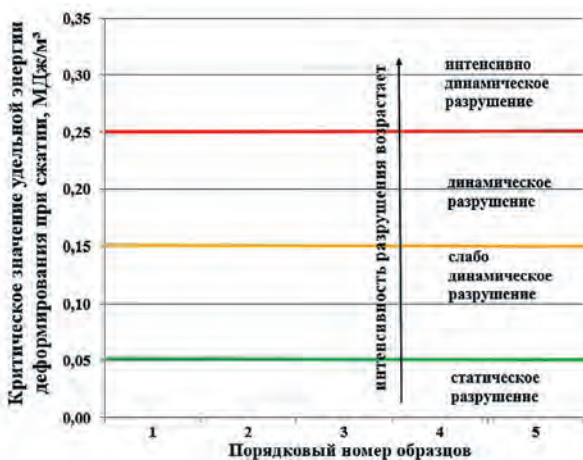


Рис. 3
Изменение характера
разрушения горных пород в
зависимости от их критического
значения удельной энергии
деформирования

Fig. 2
Changes in rock failure
behavior depending on the
critical value of their
specific strain energy

Результаты и обсуждение

В первую очередь оценку удароопасности выполнили для горных пород апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива. Всего проанализированы результаты испытаний порядка 300 образцов. В ходе анализа выявлено, что критерий Кайзера [7] и энергетический критерий [6; 12] оказались применимы для большей части образцов. Графически результаты оценки удароопасности горных пород по этим двум критериям представлены на рис. 4.

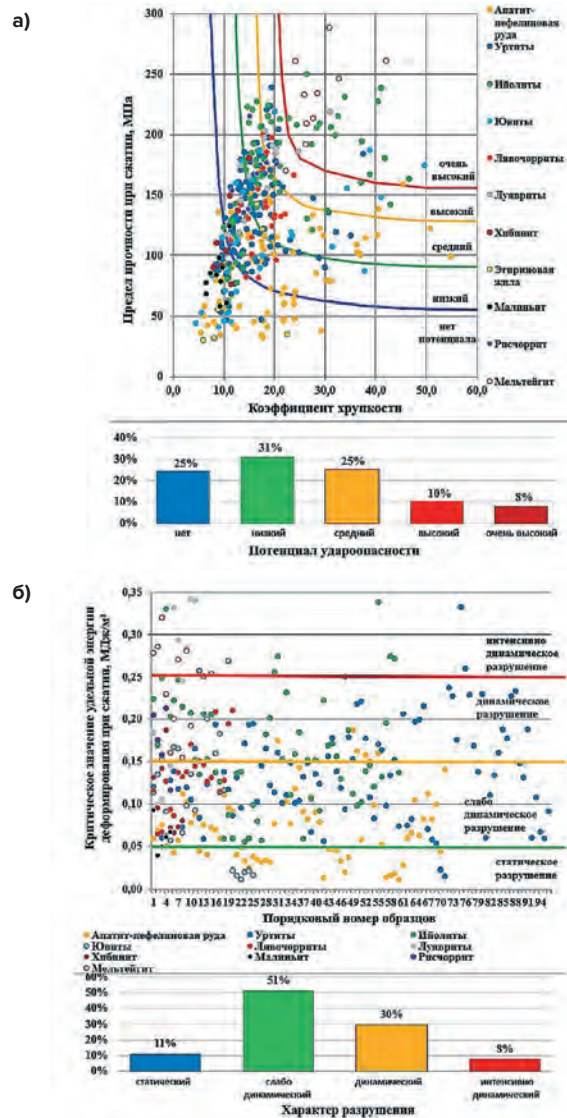


Рис. 4
Оценка удароопасности горных
пород месторождений
Кукисвумчоррское, Юкспорское и
«Апатитовый цирк» (Хибинский
горный массив, Кольский
регион): а – критерий Кайзера,
б – энергетический критерий

Fig. 4
Assessment of rockburst
hazard at the
Kukisvumchorr, Yukspor
and Apatitovy Tsirk deposits
(Khibiny rock mass, Kola
region): а – Kaiser criterion,
b – energy criterion

Согласно полученным данным (рис. 4, а) по критерию Кайзера у 25% образцов отсутствует потенциал удароопасности. В основном это богатые апатит-нефелиновые руды, ювиты с содовым налетом и малиньиты. Остальные 75% образцов являются потенциально удароопасными. При этом у 8% из них выявлен очень высокий потенциал удароопасности, а именно у ийолитов и мельтейгитов.

По энергетическому критерию установлено (рис. 4, б), что только 11% образцов имеют статический характер разрушения (неудароопасны). В этом случае такими порода-



ми оказались богатые руды и ювиты с содовым налетом. Для всех остальных образцов установлен динамический характер разрушения. Также выявлено, что 8% образцов разрушались в интенсивно динамической форме и имели критическое значение удельной энергии деформирования свыше 0,25 МДж/м³. Такими породами являются ийолиты, луявриты, мельтейгиты.

Оценка удароопасности по критерию Горного института КНЦ РАН [11] выполнена только для части пород (прочные апатит-нефелиновые руды, уртиты, ийолиты). Это связано с тем, что рассматриваемый критерий является более сложным в плане реализации по сравнению с критерием

Кайзера и энергетическим критерием. Для его применения необходимы данные о деформировании пород до разрушения. В результате оценки удароопасности пород по критерию Горного института КНЦ РАН выявлено, что прочные апатит-нефелиновые руды, уртиты и ийолиты являются удароопасными (табл. 1).

Критерий А.Н. Ставрогина [1] в сравнении с остальными рассматриваемыми подходами является самым сложным. В этом случае необходимо построение полных диаграмм деформирования пород и определения значений их модуля упругости и модуля спада. Тем не менее критерий А.Н. Ставрогина удалось применить для оценки удароопас-

Таблица 1
Усредненные результаты оценки удароопасности горных пород

Table 1
Averaged results of the rockburst hazard assessment

Наименование горной породы	Потенциал удароопасности по критерию Кайзера	Характер разрушения по энергетическому критерию	Удароопасность по критерию А.Н. Ставрогина	Удароопасность по критерию Горного института КНЦ РАН
Месторождения Кукисвумчорское, Юкспорское и «Апатитовый цирк» (Кольский регион)				
Апатит-нефелиновая руда	Низкий потенциал	Слабо динамический	Удароопасен	Удароопасен
Уртиты	Средний потенциал	Слабо динамический	Удароопасен	Удароопасен
Ийолиты	Высокий потенциал	Динамический	-	Удароопасен
Ювиты	Низкий потенциал	Слабо динамический	-	-
Лявочориты	Средний потенциал	Слабо динамический	-	-
Луявриты	Средний потенциал	Динамический	-	-
Хибинит	Низкий потенциал	Слабо динамический	-	-
Малиньит	Нет потенциала	Слабо динамический	-	-
Рисчоррит	Средний потенциал	Динамический	-	-
Мельтейгит	Очень высокий потенциал	Динамический	-	-
Ковдорское месторождение (Кольский регион)				
Фенит	Средний потенциал	Динамический	-	-
Твейтозиты	Нет потенциала	Слабо динамический	-	-
Карбонатиты	Нет потенциала	Статический	Не- удароопасен	Не- удароопасен
Пироксениты	Низкий потенциал	Слабо динамический	Удароопасен	Удароопасен
Магнетитовые руды	Низкий потенциал	Слабо динамический	-	Удароопасен
Переслаивание ийолитов с карбонатитом	Высокий потенциал	Динамический	-	-
Диопсид-пироксеновая порода	Низкий потенциал	Слабо динамический	-	-
Ждановское месторождение (Кольский регион)				
Диабаз	Средний потенциал	Слабо динамический	Удароопасен	Удароопасен
Рудный перидотит	Очень высокий потенциал	Интенсивно динамический	Удароопасен	Удароопасен
Туфогенно-осадочная порода	Нет потенциала	Статический	Удароопасен	Удароопасен
Новоширокинское месторождение (Забайкальский край)				
Андезит (воздушно-сухое состояние)	Нет потенциала	Динамический	Удароопасен	-
Андезит (водонасыщенное состояние)	Нет потенциала	Слабо динамический	-	-
Месторождение Жаман-Айбат (Республика Казахстан)				
Серые песчаники	Низкий потенциал	Интенсивно динамический	Удароопасен	-
Бурые песчаники	Нет потенциала	Слабо динамический	-	-
Красные алевролиты и аргиллиты	Нет потенциала	Статический	-	-
Медная руда	Очень высокий потенциал	Интенсивно динамический	-	-
Серый песчаник	Нет потенциала	Статический	-	-
Раймундовский песчаник	средний потенциал	Интенсивно динамический	-	-
Темно-серый алевролит	Высокий потенциал	Динамический	-	-
Красно-серый песчаник	Низкий потенциал	Слабо динамический	-	-
Красно-серый алевролит	Нет потенциала	Статический	-	-
Песчаник	Низкий потенциал	Интенсивно динамический	-	-
Аргиллит	Средний потенциал	Интенсивно динамический	-	-



ности прочной линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды и уртиты. В результате установлено, что эти породы являются удароопасными (табл. 1).

В табл. 1 представлены усредненные результаты оценки удароопасности всех исследуемых горных пород по четырем рассматриваемым критериям. На примере апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива можно сделать следующий вывод. Горные породы с низким потенциалом удароопасности и слабо динамическим характером разрушения являются удароопасными по критерию А.Н. Ставрогина. Также выявлено, что результаты оценки удароопасности пород по критерию А.Н. Ставрогина и критерию Горного института КНЦ РАН, полученные для прочной апатит-нефелиновой руды и уртитов, совпадают.

Для оценки удароопасности горных пород Ковдорского месторождения проанализированы результаты испытаний порядка 100 образцов. По критерию Кайзера установлено, что у большей части образцов отсутствовал потенциал удароопасности (в основном карбонатиты и пироксениты) либо был низкий (рис. 5, а). Только у 6% образцов горных пород, таких как фениты и ийолиты, потенциал удароопасности оказался очень высоким.

По энергетическому критерию выявлено, что для большей части образцов (50%) характерно слабо динамическое разрушение при одноосном сжатии (рис. 5, б). Статическое разрушение установлено преимущественно для карбонатитов, а интенсивно динамическое – для фенитов и ийолитов.

По критерию Горного института КНЦ РАН установлено, что удароопасными являются пироксениты и магнетитовые руды (см. табл. 1), а неудароопасными – карбонатиты.

Критерий А.Н. Ставрогина удалось применить только для оценки удароопасности пироксенитов и карбонатитов. В первом случае горная порода оказалась удароопасной, а во втором – нет (см. табл. 1).

Анализируя полученные результаты для пород Ковдорского месторождения, можно сделать вывод, что у большей части испытанных образцов либо нет потенциала удароопасности, либо он низкий, а преобладающий характер разрушения – статический и слабо динамический. Для образцов карбонатита установлено, что эта порода по все четырем критериям является неудароопасной. Для пироксенитов выявлено, что даже при низком потенциале удароопасности (критерий Кайзера) и слабо динамическом характере разрушения (энергетический критерий) они являются удароопасными по остальным двум критериям. Результаты оценки удароопасности пород Ковдорского месторождения по критериям А.Н. Ставрогина и Горного института КНЦ РАН, как и для случая с породами Хибинского массива, полностью совпали (см. табл. 1).

Со Ждановского медно-никелевого месторождения для проведения испытаний при одноосном сжатии отобраны и подготовлены образцы диабазы, рудного перидотита и туфогенно-осадочной породы. Всего испытано порядка 30 образцов.

Установлено, что у большей части образцов отсутствовал потенциал удароопасности, тогда как средний, высокий и очень высокий потенциал оказался примерно одинаковым у исследуемых пород (рис. 6, а). Преобладающего характера разрушения не было выявлено. Статический, слабо динамический и динамический характер разрушения установлен у одинакового количества образцов (рис. 6, б). Интенсивно динамический характер разрушения имели 17% образцов (рудный перидотит).

По критерию Горного института КНЦ РАН установлено,

что диабаз, рудный перидотит и туфогенно-осадочная порода являются удароопасными (см. табл. 1). Такие же результаты получены при оценке удароопасности этих пород по критерию А.Н. Ставрогина.

В ходе анализа полученных данных для пород Ждановского медно-никелевого месторождения выявлено, что диабаз и рудный перидотит являются удароопасными по всем критериям. Интересным является тот факт, что по критерию Кайзера и энергетическому критерию туфогенно-осадочная порода не является удароопасной, тогда как по двум другим критериям она удароопасна. При одноосном сжатии образцы этой породы разрушались в динамической форме с сильным звуком и разлетом осколков, что подтверждает результаты, полученные по критериям А.Н. Ставрогина и Горного института КНЦ РАН.

Оценку удароопасности на примере Новоширокинского месторождения (Забайкальский край) выполняли для вмещающей породы – андезита, представленного в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Всего проанализированы результаты испытаний порядка 130 образцов.

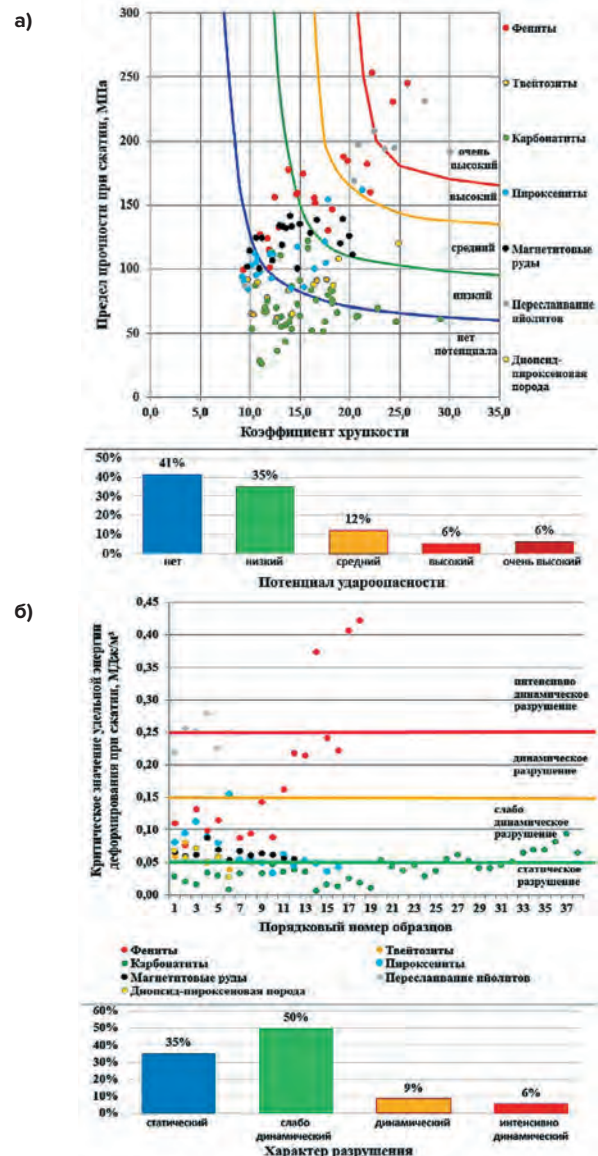


Рис. 5 Оценка удароопасности горных пород Ковдорского месторождения (Кольский регион): а – критерий Кайзера, б – энергетический критерий

Fig. 5 Assessment of the rockburst hazard at the Kovdor deposit (Kola region): а – Kaiser criterion, б – energy criterion

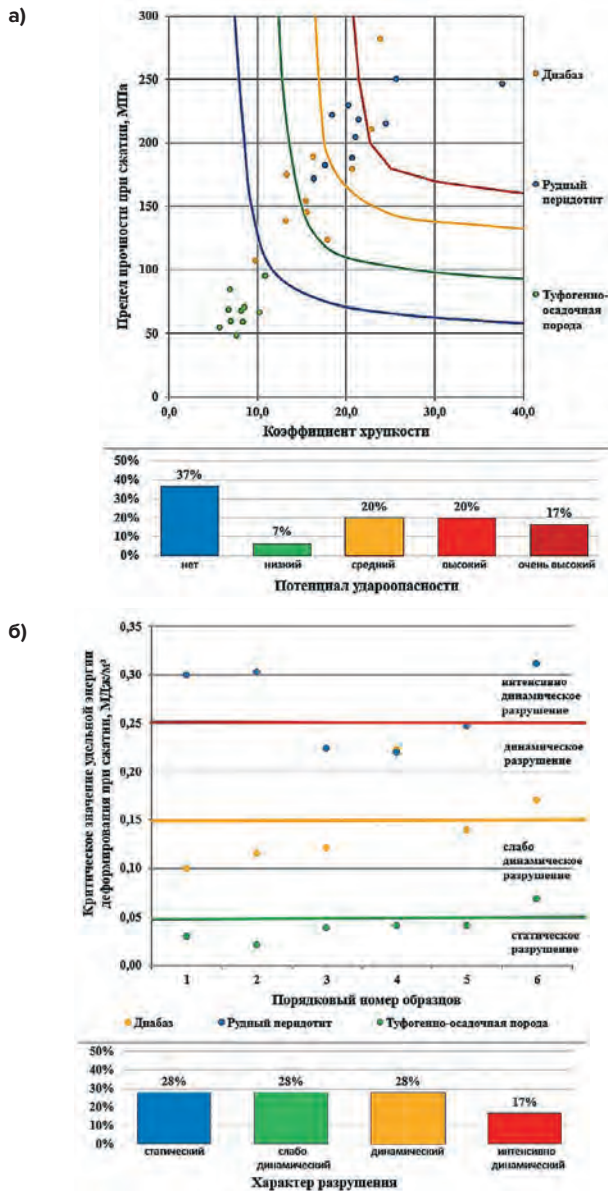


Рис. 6
Оценка удароопасности горных пород Ждановского месторождения (Кольский регион): а – критерий Кайзера, б – энергетический критерий

Fig. 6
Assessment of the rockburst hazard at the Zdanovskoe deposit (Kola region): а – Kaiser criterion, б – energy criterion

Установлено, что у большей части образцов (77%) отсутствовал потенциал удароопасности (преимущественно у андезита в водонасыщенном состоянии), и лишь у 1% он был очень высоким (рис. 7, а). Также большая часть образцов имела слабо динамический характер разрушения (рис. 7, б). Разрушались интенсивно динамически 18% из исследованных образцов, в основном андезит в воздушно-сухом состоянии.

Оценку удароопасности пород Новоширокинского месторождения по критерию Горного института КНЦ РАН не удалось выполнить, поскольку отсутствовали необходимые для этого данные.

По критерию А.Н. Ставрогина установлено, что андезит в воздушно-сухом состоянии является удароопасным (см. табл. 1).

На основе полученных данных (см. табл. 1) выявлено, что по критерию Кайзера андезит в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии не имеет потенциала удароопас-

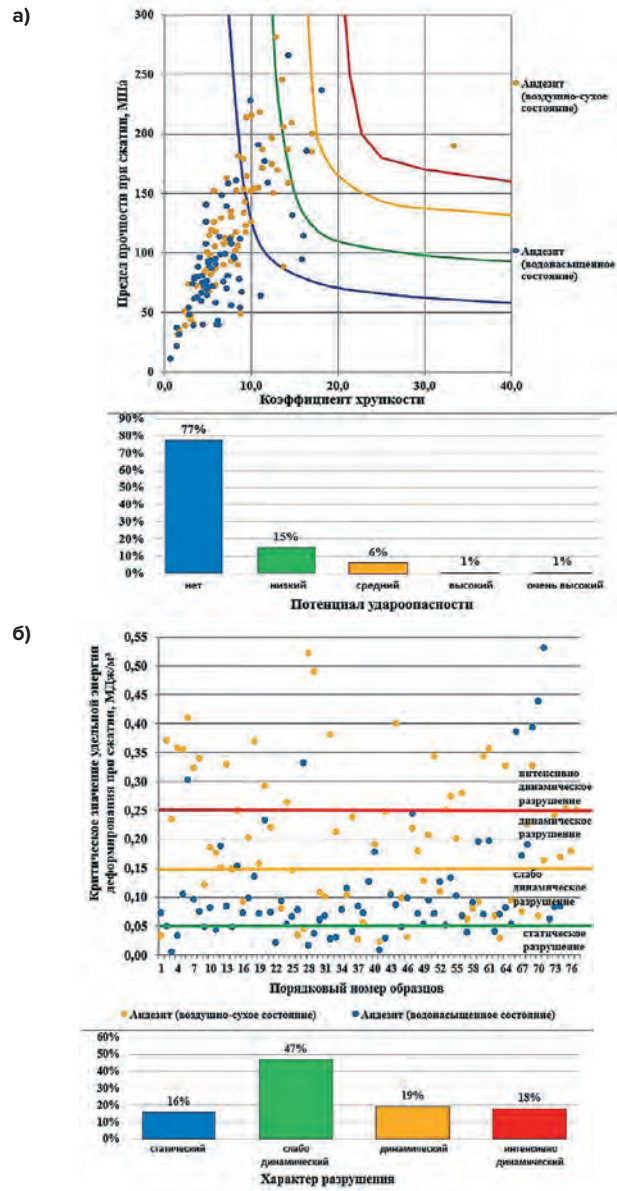


Рис. 7
Оценка удароопасности горных пород Новоширокинского месторождения (Забайкальский край): а – критерий Кайзера, б – энергетический критерий

Fig. 7
Assessment of the rockburst hazard at the Novoshirokinskoe deposit (Zabaykalsky District): а – Kaiser criterion, б – energy criterion

ности, тогда как по энергетическому критерию для этой породы характерен динамический и слабо динамический характер разрушения соответственно. Также критерий А.Н. Ставрогина показывает, что андезит в воздушно-сухом состоянии является удароопасным. На этом примере видно, что критерий Кайзера не всегда позволяет однозначно установить, является ли порода удароопасной или нет.

Для оценки удароопасности горных пород месторождения медных руд Жаман-Айбат (Республика Казахстан) проанализированы результаты испытаний порядка 120 образцов.

По критерию Кайзера выявлено, что у 43% исследованных образцов отсутствовал потенциал удароопасности (рис. 8, а). В основном это красные алевролиты и аргиллиты, бурые песчаники. Очень высокий потенциал удароопасности установлен у нескольких образцов медной руды и аргиллита.

По энергетическому критерию преобладающими были

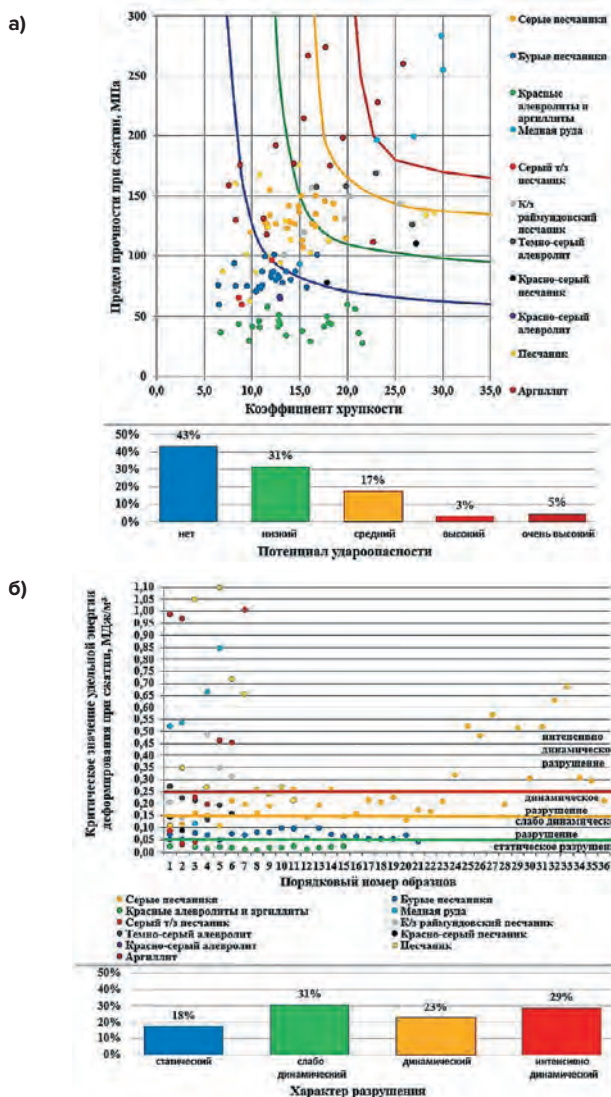


Рис. 8
Оценка удароопасности горных пород месторождения Жаман-Айбат (Республика Казахстан):
а – критерий Кайзера,
б – энергетический критерий

Fig. 8
Assessment of the rockburst hazard at the Zhaman-Aibat deposit (Republic of Kazakhstan):
а – Kaiser criterion,
б – energy criterion

слабо динамический и интенсивно динамический характер разрушения (рис. 8, б). При этом интенсивное разрушение выявлено для образцов серого песчаника, медной руды и аргиллита. Статическое разрушение преимущественно характерно для красных алевролитов и аргиллитов.

Оценку удароопасности пород месторождения Жаман-Айбат по критерию Горного института КНЦ РАН также не удалось выполнить из-за отсутствия необходимых данных.

Критерий А.Н. Ставрогина был применен только для образцов серого песчаника. В результате определено, что эта порода является удароопасной (см. табл. 1).

Список литературы

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. *Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах*. М.: Недра; 1985. 271 с.
2. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Федотова Ю.В., Шоков А.Н. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2019;(6):41–50. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50>
3. Tarasov B.G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. In: M. Van Sint Jan, Y. Potvin (eds). *Deep Mining 2010: Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics*. Perth, pp. 119–134. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/1074_08

В итоге для пород месторождения Жаман-Айбат установлено, что у большей части из них отсутствует потенциал удароопасности либо он низкий. Высокий потенциал удароопасности характерен для медной руды, разрушение которой по энергетическому критерию происходит в интенсивно динамической форме. Удароопасным по критерию А.Н. Ставрогина является серый песчаник, для которого также выявлен низкий потенциал удароопасности по критерию Кайзера и интенсивно динамическое разрушение по энергетическому критерию (см. табл. 1).

Выводы

Таким образом, по результатам выполненных исследований выявлено, что наиболее простым в исполнении является критерий П.К. Кайзера, однако он не во всех случаях позволяет однозначно установить, является ли порода удароопасной или нет.

Более сложным в экспериментальном плане является энергетический критерий, поскольку в этом случае требуется определение деформационных характеристик пород. Этот критерий проработан для месторождений Кольского региона, но для его применения на других месторождениях требуется корректировка (изменение нижней границы статическое/слабо динамическое разрушение).

Выявлено, что даже при низком потенциале удароопасности (критерий П.К. Кайзера) и слабо динамическом характере разрушения (энергетический критерий) породы являются удароопасными по критерию А.Н. Ставрогина.

Установлено, что результаты оценки удароопасности пород по критерию А.Н. Ставрогина и критерию, предложенному Горным институтом КНЦ РАН, совпадают во всех случаях, где их применяли совместно. Но для увеличения степени достоверности получаемых результатов следует выполнить больше определений удароопасности пород по критерию Горного института.

На основании проведенного исследования в качестве универсального подхода для оценки удароопасности горных пород различных месторождений полезных ископаемых можно предложить комплексирование нескольких критериев. Для простой и наглядной оценки удароопасности в первую очередь следует использовать критерий Кайзера или энергетический критерий в зависимости от имеющихся данных. Затем завершить полученных результатов выполнять по критерию Горного института КНЦ РАН. Также следует качественно регистрировать характер разрушения образцов при одноосном сжатии (динамический с разлетом осколков и взрывоподобным звуком или же статический), что позволит увеличить степень достоверности получаемых выводов при оценке удароопасности пород. Если же есть возможность использовать критерий А.Н. Ставрогина, то полученные результаты по другим критериям следует дополнительно заверять по нему.



4. Singh S.P. Burst energy release index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1988;21(2):149–155. <https://doi.org/10.1007/BF01043119>
5. Kidybiski A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*. 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)
6. 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;8(2):204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.002>
7. Cai M., Kaiser P.K. *Rockburst Support: Reference Book*. Sudbury: Laurentian University; 2018. Vol. 1. 284 p.
8. Castro J., Cicero S., Sagasetta C. A criterion for brittle failure of rocks using the theory of critical distances. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(1):63–77. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0728-8>
9. Li N., Zou Y., Zhang S., Ma X., Zhu X., Li S., Cao T. Rock brittleness evaluation based on energy dissipation under triaxial compression. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019;183:106349. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106349>
10. Kivi I.R., Ameri M., Molladavoodi H. Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;167:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.061>
11. 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: Издательство Кольского научного центра; 2021. 20 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.454.9>
12. Кузнецов Н.Н. *Исследование энергоёмкости разрушения скальных горных пород с целью оценки их удароопасности (на примере месторождений Кольского региона): автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Екатеринбург; 2021. 25 с.
13. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование. *Горный журнал*. 2020;(2):35–44. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.02.04>

References

1. Stavrogin A.N., Protosenya A.G. *Rock strength and stability of mining workings at great depths*, Moscow: Nedra; 1985. 271 p. (In Russ.)
2. Kozurev A.A., Kuznetsov N.N., Fedotova Yu.V., Shokov A.N. The determination of rockburst hazard degree of hard rocks by the test results under uniaxial compression. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2019;(6):41–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50>
3. Tarasov B.G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. In: M. Van Sint Jan, Y. Potvin (eds). *Deep Mining 2010: Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics*. Perth, pp. 119–134. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/1074_08
4. Singh S.P. Burst energy release index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1988;21(2):149–155. <https://doi.org/10.1007/BF01043119>
5. Kidybiski A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*. 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)
6. 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;8(2):204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.002>
7. Cai M., Kaiser P.K. *Rockburst Support: Reference Book*. Sudbury: Laurentian University; 2018. Vol. 1. 284 p.
8. Castro J., Cicero S., Sagasetta C. A criterion for brittle failure of rocks using the theory of critical distances. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(1):63–77. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0728-8>
9. Li N., Zou Y., Zhang S., Ma X., Zhu X., Li S., Cao T. Rock brittleness evaluation based on energy dissipation under triaxial compression. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019;183:106349. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106349>
10. Kivi I.R., Ameri M., Molladavoodi H. Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;167:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.061>
11. Kuznecov N.N., Kozurev A.A., Kasparyan 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>
12. Kuznecov N.N. Study of energy intensity of hard rocks' fracture to assess its rockburst hazard (using the example of deposits in the Kola region): *Abstract of Ph.D. thesis*. Ekaterinburg; 2021. 25 p. (In Russ.)
13. Biryuchev I.V., Makarov A.B., Usov A.A. Geomechanical model of underground mine. Part II. Application. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(2):35–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.02.04>

Информация об авторах

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, руководитель отдела геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

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; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru

Макаров Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, главный консультант по геомеханике, SRK Consulting (Russia) Ltd Филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания), г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.12.2022

Поступила после рецензирования: 23.01.2023

Принята к публикации: 27.01.2023

Information about the authors

Anatoly A. Kozurev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Geomechanics, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

Nikolai N. Kuznecov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru

Aleksandr B. Makarov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior Geomechanics Consultant, SRK Consulting (Russia) Ltd (UK), Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 22.12.2022

Revised: 23.01.2023

Accepted: 27.01.2023