

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38

Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений**Ловчиков А. В.**

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

Аннотация: В горнотехнической литературе до сих пор превалирует представление о том, что горные удары в рудниках и шахтах вызываются гравитационными силами веса массива покрывающих пород, выдвинутое в прошлом веке С.Г. Авершиным и И.М. Петуховым. На этом представлении основываются правила безопасного ведения горных работ на удароопасных месторождениях, в том числе современные инструктивные документы Ростехнадзора. Многочисленные исследования свойств поведения массива горных пород как геологической среды, явлений, вызывающих горные удары в подземных выработках, механизмов проявления горных и горно-тектонических ударов изменяют многие представления. Они оказались в настоящее время настоятельно необходимыми для объяснения причин особо мощных геодинамических явлений в рудниках – горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений – явлений, которые в прошлом веке практически не наблюдались. Сильные геодинамические события в рудниках (горно-тектонические удары, техногенные землетрясения), сопоставимые по энергетическому уровню с землетрясениями, в очередной раз показали аналогию этих явлений с естественными землетрясениями, исследованиями которых занимается сейсмология. М.А. Садовским с соавторами был установлен закон самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях. На основании этого закона соотношения, установленные для очагов землетрясений, оказалось возможным применять для динамических проявлений горного давления в рудниках. В настоящей работе развиваются дальнейшие детали этой аналогии. В ней показано, каким размерам структурной неоднородности массива соответствуют те или иные формы динамических проявлений горного давления. На основании закона самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях показано, что энергетические характеристики проявлений горного давления в рудниках подчиняются закономерностям, установленным в сейсмологии.

Ключевые слова: горно-тектонический удар, массив, структурные неоднородности, классификация, сейсмический момент, модуль сдвига.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-00563а.

Для цитирования: Ловчиков А. В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):30-38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.

A New Concept of the Mechanism of Rock-Tectonic Bursts and Other Dynamic Phenomena in Conditions of Ore Deposits**A. V. Lovchikov**

Mining Institute, Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: In mining technical literature, the prevailing idea is still that rockbursts in open pits and underground mines are caused by gravitational forces produced by the overburden rock mass, put forward in the 20th century by S.G. Avershin and I.M. Petukhov. This concept is the basis for the rules of safe mining at rockburst-hazardous deposits, including modern guidance documents of Rostekhnadzor. Numerous studies of the behavior of a rock mass as a geological medium, the phenomena causing rockbursts in underground workings, the mechanisms of manifestation of rockbursts and rock-tectonic bursts change many ideas. They have now become urgently needed to explain the causes of particularly powerful geodynamic phenomena in mines – rock-tectonic bursts, technogenic earthquakes – phenomena that were practically not observed in the 20th century. Intense geodynamic events in mines (rock-tectonic bursts, technogenic earthquakes), comparable in energy level to natural earthquakes, have once again shown their analogy with natural earthquakes to be studied by seismology. M.A. Sadovsky et al. established the law of self-similarity of seismic process at different scale levels. Based on this law, the relationships



established for seismic focuses proved to be applicable to dynamic manifestations of rock pressure at mines. In this paper, further details of this analogy are developed. It shows which forms of dynamic manifestations of rock pressure correspond to which sizes of structural heterogeneity of rock mass. Based on the law of self-similarity of seismic processes at different scale levels, we showed that the energy characteristics of the rock pressure manifestations at mines obey the laws established in seismology.

Keywords: rock-tectonic burst, rock mass, structural heterogeneities, classification, seismic moment, shear modulus.

Acknowledgments: the study has been performed with support of the Russian Foundation for Basic Research, project №18-05-00563a.

For citation: Lovchikov A. V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):30-38. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.

Введение

Горно-тектонический удар – это мгновенное разрушение массива большой мощности по тектоническому нарушению или по вновь образовавшейся под влиянием горных работ трещине, вызывающее разрушение целиков и выработок, как правило, на больших площадях. Новая концепция заключается в том, что мгновенное разрушение пород при ударе происходит из-за концентрации вокруг горных выработок гравитационно-тектонических напряжений, существующих в земной коре, вследствие современных горообразовательных процессов. Под влиянием масштабных горных работ структурно-блоковая среда горных массивов из-за концентрации гравитационно-тектонических напряжений резко переходит в новое положение геодинамического равновесия в форме горных, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений.

Теория вопроса

В основе концепции лежит различие в условиях естественного напряженного состояния массивов рудных и нерудных (осадочного происхождения) месторождений полезных ископаемых. В массивах рудных месторождений магматического или метаморфического происхождения имеет место гравитационно-тектоническое напряженное состояние пород, при котором вследствие современных горообразовательных процессов, происходящих в земной коре, преобладающими по величине

являются горизонтальные напряжения, а вертикальные гравитационные напряжения, обусловленные силами веса толщ покрывающих пород, имеют второстепенное значение. В массивах месторождений осадочного происхождения (угольных, солевых) в силу относительно слабых деформационно-прочностных свойств пород и длительных реологических процессов имеет место гравитационное напряженное состояние пород, в котором определяющее значение имеет вертикальная гравитационная составляющая напряжений, обусловленная силами веса толщи налегающих пород.

Между тем в современной российской горно-технической литературе закрепилось и господствует представление о том, что горные и горно-тектонические удары в рудниках вызываются гравитационными силами веса толщ покрывающих пород над подземными горными выработками. Теоретическое обоснование этих представлений приведено в работах С. Г. Авершина [1], И.М. Петухова с соавторами [2, 3] и др. Положения о гравитационной природе сил, вызывающих горные удары в рудниках, заложены в современных инструктивных документах Ростехнадзора [4], лимитирующих правила ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях. В инструкции [4] нет даже упоминания о тектонических напряжениях, существующих в массивах. Вследствие этого некоторые положения инструкции [4] являются ошибочными и недопустимыми.

Другой основой концепции является представление о горных массивах как геологической среде иерархически-блочного строения, основы которого заложены академиком М. А. Садовским. В соответствии с этими представлениями горные массивы представляют собой иерархию геолого-структурных блоков, как бы вложенных друг в друга и разделенных междублоковыми промежутками – разрывными нарушениями и трещинами различного структурного уровня. Существует множество классификаций структурной нарушенности горных массивов, но, по нашему мнению, наиболее удачной для скальных массивов является классификация структурных нарушений массивов, принятая для оснований гидротехнических сооружений [5]. Указанная классификация наиболее правомерна для массивов рудных месторождений по крайней мере по двум причинам:

а) основания гидротехнических сооружений по масштабам протяженности в горизонтальной и вертикальной плоскостях (сотни метров, первые километры) сходны с размерами шахтных полей рудников, которые имеют аналогичные размеры и, следовательно, схожи по размерам с пересекаемыми структурными неоднородностями (трещинами, тектоническими нарушениями, разломами);

б) классификация разработана для массивов скальных, т. е. весьма прочных, пород магматического или метаморфического происхождения.

Поскольку разрывным структурам различного масштаба должны соответствовать блоковые структуры соответствующего масштаба, нами предложена следующая классификация блоковых структур для шахтных полей рудников, основанная на приведенной выше классификации структурных нарушений в гидротехническом строительстве (табл. 1) [6].

Динамические проявления горного давления в горных выработках (горные, горно-тектонические удары и другие проявления) можно рассматривать как ответную реакцию геологической среды на техногенное вмешательство. Эта реакция зависит от многих факторов, и прежде всего от масштабов техногенного воздействия, структурно-блоковой неоднородности массивов, свойств пород, естественного напряженного состояния массивов и других факторов. Зависимость форм проявлений горного давления от размеров горных выработок при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массивов приведена на рис. 1.

Таблица 1

Классификация блоковых структур, образуемых разрывными нарушениями

Classification of block structures formed by faults

Наименование блоковой структуры	Ранг (порядок) нарушений, ограничивающих блок, и блоковых структур	Протяженность нарушений, ограничивающих блок	Средний поперечный размер блока
Тектонический блок	I	Сотни и тысячи километров	500 – 1000 км
Региональный геолого-структурный блок	II	Десятки и сотни километров	50 – 100 км
	III	Единицы и первые десятки километров	5 – 10 км
Локальный геолого-структурный блок	IV	Сотни и первые тысячи метров	500 – 1000 м
	V	> 10 м	50 – 100 м
Трещинно-блоковая от-дельность	VI	1 – 10 м	5 м
	VII – VIII	< 1 м	< 1 м

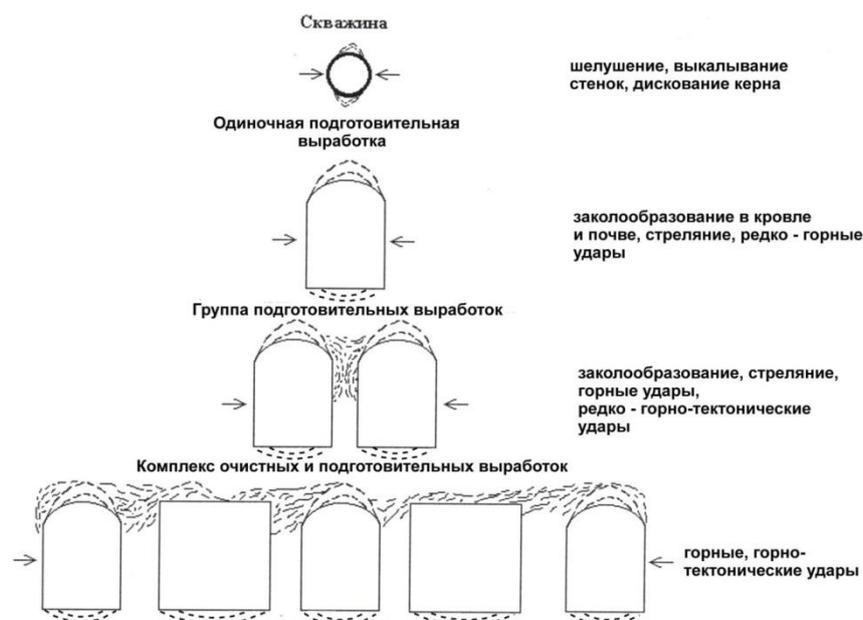


Рис. 1. Схема развития форм динамических проявлений горного давления с ростом масштабов горных работ при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массивов

Fig. 1. Model of development of rock pressure dynamic manifestation forms with increasing scale of mining operations in conditions of gravitational-tectonic stress state of rock masses

Таблица 2

Формы экстремальных динамических проявлений горного давления, соответствующие масштабам активизированных горными работами геологических структур

Forms of extreme dynamic manifestations of rock pressure corresponding to the scale of geological structures activated by mining

Ранг (порядок) геологической структуры	Масштаб горных работ (выработка), активизирующих структуру	Характерный размер выработок, м	Форма динамических проявлений горного давления
VII – VIII	Шпур, скважина	$10^0 – 10^1$	Шелушение, выкалывание стенок, дискование керна
VI	Одиночная выработка, двоянная выработка	$10^2 – 10^3$	Стреляние, заколообразование, горный удар
V – IV	Комплексы подготовительных и очистных выработок	$10^4 – 10^6$	Горный, горно-тектонический удар, техногенное землетрясение

Классификация (см. табл. 1) позволяет ориентироваться в принадлежности по масштабу (рангу, порядку) структурно-блоковой неоднородности горных массивов в соответствии с размерами блоков и ограничивающих их тектонических нарушений. В соответствии с классификацией (см. табл. 1) можно ориентировочно оценивать ранг геологических структур, активизированных горными работами соответствующего размера, вызывающих те или иные формы динамических проявлений горного давления (табл. 2).

Таким образом, предложенная классификация структурно-блоковой неоднородно-

сти массивов позволяет проводить ранжирование блоков наиболее распространенных размеров для рудников. Она помогает практически реализовать концепцию М.А. Садовского о модели иерархически-блочной геологической среды применительно к проблемам эксплуатации рудников.

Анализ материалов. Развитие теории

Любые динамические проявления горного давления – это подвижки геологической среды в новое положение геодинамического равновесия под влиянием горных выработок и существующих в этой среде напряжений. Величина подвижки зависит от размеров горных

выработок в массиве, напряженного состояния пород, размеров геолого-структурной (блоковой) неоднородности массивов и других факторов. В прошлом, XX веке, обращали мало внимания на аналогию горных ударов и сейсмических явлений в земной коре, поскольку горные удары в рудниках и шахтах России имели относительно невысокий энергетический уровень [7]. И только в конце прошлого века – начале нынешнего столетия, когда в рудниках России, ЮАР, Польши и других стран стали проявляться сильные горно-тектонические удары с выделенной сейсмической энергией порядка $E = 10^{10}$ Дж, аналогия этих явлений с землетрясениями была установлена [8, 9, 10].

Для характеристики энергии землетрясений в сейсмологии и шахтной сейсмичности используется понятие сейсмического момента в очаге [9]:

$$M_0 = GS\delta, \quad (1)$$

где M_0 – сейсмический момент, Н·м; G – модуль сдвига пород массива, МПа; S – площадь разрыва, м²; δ – величина подвижки в очаге, м.

При описании горных ударов в рудниках с относительно невысоким энергетическим уровнем событий такие параметры событий, как площадь разрыва S и величина подвижки δ , ранее не определялись. И только когда энергия горно-тектонических ударов в рудниках приблизилась к энергии естественных землетрясений, эти параметры по аналогии с землетрясениями стали измеряться. В табл. 3 приведены указанные параметры для некоторых сильнейших горно-тектонических ударов в рудниках России [11]. На рис. 2 приведены геометрические схемы механизма этих ударов.

Других примеров в отечественной горно-технической литературе не найдено, поскольку при обследовании последствий событий в рудниках эти параметры не измерялись.

Учитывая закон самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях, установленный М.А. Садовским с соавторами [12], динамические проявления горного давления в рудниках можно рассматривать как сейсмические события в массиве пород. Экстраполируя данные табл. 3, можно охарактеризовать эти события следующими параметрами (табл. 4).

Приведенные в табл. 4 данные получены на основе закона самоподобия сейсмических процессов на различных масштабных уровнях. В частности, известно [13], что при больших землетрясениях с магнитудой 7 – 8 протяженность разрывов достигает десятков – сотен километров, а смещения по разрывам исчисляются метрами. Поэтому параметры динамических проявлений горного давления в выработках рудников, энергетический уровень которых на несколько порядков меньше, чем у крупных землетрясений, выглядят вполне правдоподобно.

Зная характеристики очага динамических явлений в рудниках (см. табл. 4), можно по формуле (1) оценить энергетические характеристики этих явлений. Модуль сдвига пород G в горно-технических характеристиках обычно не измеряется. Поэтому определим его величину из известного установленного в геофизике [14] соотношения:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости пород, МПа; ν – коэффициент Пуассона для пород.

Таблица 3

Параметры некоторых сильнейших горно-тектонических ударов (ГТУ) в рудниках

Parameters of some of the most severe rock-tectonic bursts (RTB) in mines

Рудник, месторождение	Дата ГТУ	Параметры события		Очаговые параметры	
		Магнитуда, M_L	Энергетический класс, k	Площадь подвижки, S , м ²	Величина подвижки, см
Кировский (Хибинское апатитовое)	16.04.1989	4,3	10,5	220 000	2 – 9
«Умбозеро» (Ловозерское редкометальное)	17.08.1999	5,0	11,8	~500 м × 500 м = = 250 000	16

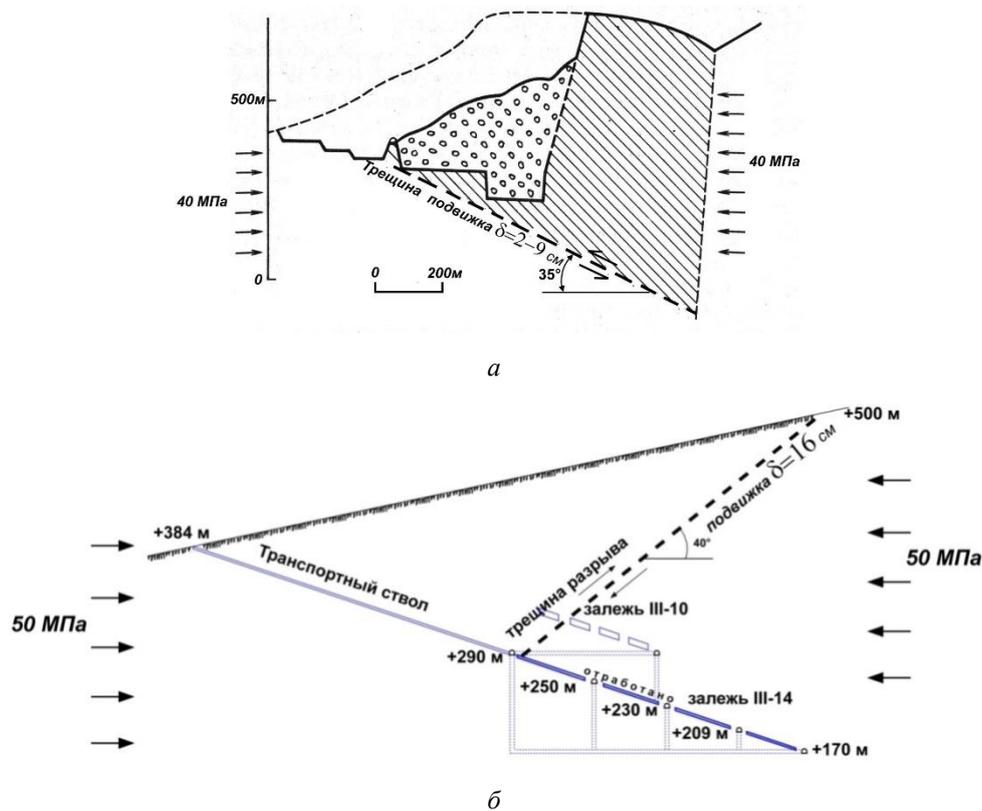


Рис. 2. Схемы механизма горно-тектонических ударов на Кировском руднике (а) и руднике «Умбозеро» (б)

Fig. 2. Schemes of the mechanism of rock-tectonic bursts at the Kirov mine (a) and the Umbozero mine (b)

Таблица 4

Параметры динамических проявлений горного давления в рудниках

Parameters of dynamic manifestations of rock pressure at mines

Вид проявления	Энергетические параметры		Очаговые параметры	
	Энергия, Дж	Энергетический класс, k	Характерная величина площади подвижки, m^2	Ориентировочная величина подвижки, см
Горно-тектонический удар, техногенное землетрясение	$10^9 - 10^{12}$	9 – 12	100 000	10
Горный удар, стрельяние пород	$10^5 - 10^8$	5 – 8	100	1.0
Разрушение стенок скважин	$10^0 - 10^1$	1 – 2	0,1	0,1

Таблица 5

Оценка величины сейсмического момента в очаге динамических проявлений горного давления

Estimation of the magnitude of seismic moment in the focus of rock pressure dynamic manifestations

Форма динамических явлений	Площадь разрыва, m^2	Величина подвижки, м	Модуль сдвига пород, t/m^2	Сейсмический момент, т·м
Горно-тектонический удар	100 000	0,1	2 400 000	$2,4 \cdot 10^9$
Горный удар, стрельяние	100	0,01	2 400 000	$2,4 \cdot 10^6$
Разрушение стенок скважин, дискование керна	0,1	0,001	2 400 000	$2,4 \cdot 10^2$

Подсчитаем, в частности, модуль сдвига для пород Ловозерского редкометалльного месторождения (породы – нефелиновые сиениты: луавриты, уртиты, фойяиты): $E = 6 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,25$. Модуль сдвига, вычисленный по формуле (1), составит

$$G = \frac{60\,000\text{ МПа}}{2,5} = \frac{6\,000\,000\text{ т/м}^2}{2,5} = 2,4 \cdot 10^6\text{ т/м}^2.$$

Теперь, когда определены все параметры, входящие в формулу (1), по величине сейсмического момента в очаге можно оценить энергию динамических проявлений горного давления в горных выработках. Результаты таких оценок приведены в табл. 5.

В табл. 5 расчеты сделаны при модуле сдвига пород $G = 2,4 \cdot 10^6\text{ т/м}^2$, значение которого характерно для скальных пород, в частности для пород Ловозерского месторождения. Полученные величины сейсмического момента для различных форм динамических проявлений горного давления соответствуют фактически наблюдаемым в рудниках, в частности энергетическим характеристикам горных и горно-тектонических ударов [7] и оценкам этих явлений другими авторами [15, 16].

Приведенные данные позволяют подтвердить закон самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях, установленный М.А. Садовским с соавторами. Динамические проявления горного давления в рудниках (горные и горно-тектонические

удары, стрельяние пород и др.) представляют собой форму самоорганизации геологической среды под влиянием горных работ. Приведенные данные позволяют подтвердить тот факт, что форма и энергия динамических явлений в рудниках зависят от многих факторов, прежде всего от масштабов техногенного воздействия на массивы, их напряженного состояния, структурно-блокового строения, свойств пород и др.

Заключение

1. Приведена рациональная классификация структурно-блоковой неоднородности скальных массивов, наиболее приемлемая для условий рудников, основанная на классификации разрывных структур в скальных массивах, принятых в гидротехническом строительстве.

2. Показана зависимость форм проявлений горного давления в горных выработках от размеров техногенного вмешательства в горный массив и размера (порядка) структурной неоднородности массива, активизированной горными работами.

3. На основе закона самоподобия сейсмического процесса в массивах на различных масштабных уровнях выполнена оценка энергетических параметров различных проявлений горного давления. В результате оценки показано, что полученные энергетические показатели проявлений горного давления соответствуют фактическим данным о горных ударах в рудниках.

Библиографический список

1. Авершин С. Г. *Горные удары*. М.: Углетехиздат; 1995. 235 с.
2. *Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках*. Под ред. И. М. Петухова, А. М. Ильина, К. Н. Трубецкого. М.: Изд-во АГН; 1997. 376 с.
3. Петухов И. М., Линьков А.М. *Механизм горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 280 с.
4. *Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам»* (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 576 от 2 декабря 2013 г.).
5. СНиП 11.02.02-85. *Основания гидротехнических сооружений*. М.; 1986. 38 с.
6. Ловчиков А. В. Рациональная классификация структурно-блоковой неоднородности массивов для рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1999;(6):226–230.
7. *Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях Североуральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Кукисвумчоррское (ПО «Апатит»), Качканарское и др.* Л.: ВНИМИ; 1989. 182 с.

8. Ловчиков А. В. Параметры очагов сильнейших горно-тектонических ударов на рудниках России. *Горный журнал*. 2000;(2):9-11.
9. Gibovicz S. J. *Keynote lecture: The mechanism of Seismic events induced by mining. A review. Rockburst and seismicity in mines*. Rotterdam: Balkema; 1990. P. 3-27.
10. Ebrahim-Trollope, R. Gutenberg–Richter relationship and mine-induced seismicity as observed at the African Rainbow Minerals mines—Klerksdorp. *Proc. Fifth Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines*. Van Aswegen, G., Durrheim, R. J., Ortlepp W. D. (eds.). The South African Institute of Mining and Metallurgy, Symposium Series S27; 2001. P. 501–508.
11. Ловчиков А. *Сильнейшие землетрясения и горно-тектонические удары в рудниках России*. Саарбрюкен: Palmarium Academic Publishing; 2016. 141 с.
12. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс*. М.: Наука; 1987. 100 с.
13. Гир Дж., Шах Х. *Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться*. М.: Мир; 1988. 220 с.
14. *Горная энциклопедия*. Т 5. М.: Советская энциклопедия; 1991. С. 263.
15. Смирнов В. А., Иванов-Ростовцев А. Т., Колотило Л. Г. *Междублоковая саморегуляция в иерархии структур*. Доклады РАН. 1992;323(4):664-666.
16. Johnston J. C. Rockburst from a global perspective. *Garlands Beiträge zur Geophysik*. 1989;98(6):474–490.

References

1. Avershin S.G. *Rock burst*. Moscow: Ugletekhizdat Publ.; 1995. 235 p. (In Russ.).
2. Petukhov I. M., Ilyin A. M., Trubetskoy K. N. (eds.) *Forecast and prevention of rock-bursts in mines*. Moscow: AGN Publishing House; 1997. 376 p. (In Russ.).
3. Petukhov I.M., Linkov A.M. *Rock burst and outburst mechanisms*. Moscow: Nedra Publ.; 1983. 280 p. (In Russ.).
4. *Federal standards and rules in the field of industrial safety “Regulations for the safe conduct of mining operations at deposits prone (and dangerous) to rockbursts”* (approved by Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision No. 576 of December 2, 2013). (In Russ.).
5. SNiP 11.02.02-85. *Foundation soils of hydraulic structures*. Moscow; 1986. 38 p. (In Russ.).
6. Lovchikov A. V. Rational classification of structural block heterogeneity of rock masses for mines. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 1999;(6):226–230. (In Russ.).
7. *Catalog of rockbursts at ore and nonmetallic deposits Severouralskoye, Tashtagolskoye, Oktyabrskoye (Norilsk), Kukisvumchorrskoye (PO Apatit), Kachkanarskoye and others*. Leningrad: VNIMI Publ.; 1989. 182 p. (In Russ.).
8. Lovchikov A. V. Parameters of focal points of the most severe rockbursts at Russian mines. *Mining Journal*. 2000;(2):9-11. (In Russ.).
9. Gibovicz S. J. *Keynote lecture: The mechanism of Seismic events induced by mining. A review. Rockburst and seismicity in mines*. Rotterdam: Balkema; 1990. P. 3-27.
10. Ebrahim-Trollope, R. Gutenberg–Richter relationship and mine-induced seismicity as observed at the African Rainbow Minerals mines—Klerksdorp. *Proc. Fifth Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines*. Van Aswegen, G., Durrheim, R. J., Ortlepp W. D. (eds.). The South African Institute of Mining and Metallurgy, Symposium Series S27; 2001. P. 501–508.
11. Lovchikov A. V. *The strongest earthquakes and rock-tectonic bursts in Russ. mines*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing; 2016. 141 p.
12. Sadovsky M. A., Bolkhovitinov L. G., Pisarenko V. F. *Deformation of geophysical environment and seismic process*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 100 p. (In Russ.).
13. Gere J., Shah H. *Unsteady terra firma. What is an earthquake and how to prepare for it*. Moscow: Mir Publ.; 1988. 220 p. (In Russ.).
14. *Mining Encyclopedia*. Vol. 5. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1991. p. 263.

15. Smirnov V. A., Ivanov-Rostovtsev A. T., Kolotilo L. G. Inter-block self-regulation in the hierarchy of structures. Proceedings of Russian Academy of Sciences. 1992;323(4):664-666. (In Russ.).
16. Johnston J. C. Rockburst from a global perspective. *Garlands Beiträge zur Geophysik*. 1989;98(6):474-490.