



Геомеханическое обоснование ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях

А.А. Козырев✉

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

✉a.kozyrev@ksc.ru

Резюме: Обоснована актуальность исследований техногенной сейсмичности при ведении крупномасштабных горных работ на удароопасных рудных месторождениях. Сформулированы условия реализации природных и техногенных землетрясений, различные механизмы сильных сейсмических событий. Показано, что весьма важным представляется выявление напряженного состояния нетронутого массива горных пород, возможных деформаций и дополнительных напряжений вследствие крупномасштабной выемки горной массы, условий высвобождения накопленной энергии за счет влияния взрывных работ при проходке выработки и отбойке руды. Рассмотрены критерии различных форм разрушения горных пород при реализации сильных сейсмических событий.

Для оценки геомеханической ситуации в районе ведения горных работ и управления геодинамическими рисками предложена методика диагностики критических состояний участков геологической среды, позволяющая на основе анализа горно-геологических данных инструментальных измерений в массиве и моделирования методом конечных элементов дать прогнозную оценку изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород и выбрать технические решения по обеспечению безопасности горных работ.

Сформулированы принципы безопасного ведения горных работ на удароопасных месторождениях, обоснованы подходы к выбору системы разработки рудных месторождений и порядку развития очистных работ на горизонте.

Ключевые слова: месторождения, удароопасные месторождения, напряжения, техногенная сейсмичность, механизм разрушений, безопасность

Для цитирования: Козырев А.А. Геомеханическое обоснование ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях. *Горная промышленность*. 2023;(S1):04–13. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>

Geomechanical justification for carrying out mining operations in rockburst hazardous ore deposits

A.A. Kozyrev✉

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

✉a.kozyrev@ksc.ru

Abstract: The article justifies the topicality of studying man-induced seismicity during large-scale mining operations in rockburst hazardous ore deposits. Occurrence conditions have been formulated for natural and man-caused earthquakes as well as various mechanisms of strong seismic events. It is shown, that revealing the stressed state of the intact rock mass, possible deformations and additional stresses due to large-scale rock mass excavation as well as the conditions for the accumulated energy to release due to the impact of blasting activities during roadheading and ore breaking are considered to be very important. Criteria are considered for various forms of rock failure during strong seismic events.

A methodology to identify critical states of the geological environment is proposed to assess the geomechanical situation in the mining area and to manage the geodynamic risks. This methodology allows to give a forecast assessment of changes in the stress-and-strain state of the rock mass based on analyzing mining and geological data of instrumental measurements and finite element modelling as well as to select technical solutions to ensure the safety of mining operations.

Principles of safe mining operations at rockburst hazardous deposits are formulated, approaches to the choice of the mining system for the ore deposits and to the order of stoping operations at the mine level are justified.

Keywords: mineral deposits, rockburst hazardous deposits, stresses, man-induced seismicity, fracture mechanism, safety

For citation: Kozyrev A.A. Geomechanical justification for carrying out mining operations in rockburst hazardous ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):04–13. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>



Введение

С углублением горных работ до отметки 1000 м и более, расширением масштабов горных работ всё острее становится проблема динамических проявлений горного давления в форме горных и горно-тектонических ударов, техногенных землетрясений. Наиболее сильные динамические проявления в форме техногенных землетрясений с магнитудой $M > 4.0$ в отечественной практике отмечены при отработке апатитовых месторождений Хибин (1989 г.), с магнитудой $M > 5.1$ на редкометалльном руднике «Умбозеро» Ловозерского месторождения (1999 г.) [1; 2], с магнитудой $M-4.1$ на Втором руднике Соликамского рудоуправления ОАО «Сильвинит» (1995 г.) [3], с магнитудой $M-4.3$ на Южноуральском бокситовом руднике шахта «Кургазакская» (1990 г.) [4], с магнитудой $M \sim 3,6$ на Таштагольском железорудном месторождении (1999 г.) [5], с магнитудой $M > 5.3-6.1$ на Бачатском угольном разрезе в Кемеровской области (2013 г.) [6] (табл. 1).

Однако самые сильные разрушительные техногенные землетрясения отмечены в ЮАР при разработке золоторудных месторождений Витватерсранда с магнитудой $M > 5.6$ в горнодобывающих районах Клерксдорпа, Карлтонвилля, Велкома (табл. 2) [8].

Такие события обычно происходят на площади с линейным размером от сотен метров до нескольких километров. Формально соотношение между размером области подготовки землетрясения и величиной упругой энергии E при реализации выражается следующими зависимостями [9; 10]:

$$\lg R = C \cdot \lg E + d; \quad (1)$$

$$\lg R = 0,244 \cdot \lg E - 2,266,$$

где C и d – коэффициенты, зависящие от конкретных условий реализации события; R – размер области землетрясения, км; E – энергия, Дж.

Таблица 1
Наиболее сильные сейсмические события на отечественных рудниках

Рудник (месторождение)	Дата события	Параметры события	
		Энергетический класс, $k = \lg E$	Магнитуда, M_L
Северо-Уральский бокситовый р-к, ш.15-15бис	05.10.1984	8.6	3.2
Кировский р-к (Хибинское апатитовое)	16.04.1989	10,5	4,3
Южно-Уральский бокситовый р-к, ш. «Кургазакская»	28.05.1990	10.5*	4.3
Южно-Уральский бокситовый р-к, р-к «Блиново-Каменский»	29.07.1994	10.1*	4.1
СКРУ-2, Верхнекамское месторождение калийных солей	05.01.1995	10.1*	4.1
Р-к «Умбозеро» (Ловозерское редкометалльное)	17.08.1999	11.8	5.1
Таштагольский р-к (Таштагольское железорудное)	24.10.1999	9.4	3.6
Р-к «Карнасурт» (Ловозерское редкометалльное)	17.12.2002	9.2	3.6
Северо-Уральский бокситовый р-к, ш.14-14бис	25.03.2004	8.6*	3.2
Р-к «Умбозеро» (Ловозерское редкометалльное)	04.10.2004	9.8*	3.9
Северо-Уральский бокситовый р-к	Апрель 2007	10.0	4.0
Северо-Уральский бокситовый р-к, ш.14-14бис	13.02.2010	9.1	3.5 (4.2)
Кировский р-к (Хибинское апатитовое)	21.10.2010	9.7	3.4
Бачатский угольный разрез, Кузбасс	09.02.2012		4.3
	Март 2013		4.0
	18.06.2013		5.8-6.1
Расвумчоррский рудник (Хибинское апатитовое)	09.01.2018	8.9	3.3

* С использованием данных А.В. Ловчикова [7].

Table 1
The strongest seismic events at Russian ore mines

Таблица 2
Крупные сейсмические события в районах золотодобычи ЮАР с 01.01.1991 по 31.12.2005 г.

	Восточный Рэнд	Дальний Западный Рэнд	Клерксдорп	Свободный штат
Количество событий $4 \leq M_L < 5$	2	27	68	16
Количество событий $M_L \geq 5$	0	0	2	2
Магнитуда крупнейшего события	4.1	4.7	5.3	5,1
Магнитуда второго по величине события	4,0	4,6	5,0	5,1

Источник: Совет по геонаукам, 2006 г.

Table 2
Major seismic events in South African gold mining areas from 01.01.1991 till 31.12.2005



Соотношение между магнитудой и энергией землетрясения выражается известной формулой Гутенберга-Рихтера [11]

$$\lg R = 1,5M_s + 4,8, \quad (2)$$

где M_s – величина магнитуды, определяемая по поверхностным волнам; E – сейсмическая энергия землетрясения.

Исходя из расчетов по формуле (2) и произошедших сильных событий с магнитудой от 4.0 до 6.0, можно оценить энергию этих событий, или их энергетический класс, от 10 до 14. Такие события в сейсмологии оцениваются уже как средние и весьма опасные по проявлениям разрушения как на поверхности, так и в подземных условиях.

В Российской Федерации свыше 45 месторождений, а также объектов строительства подземных сооружений отнесены к склонным и опасным по горным ударам¹, причем критическая глубина по условиям удароопасности колеблется от 150 до 800–1000 м в зависимости от горно-геологических и геомеханических условий их отработки. На рис. 1 представлена гистограмма горных ударов, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на апатитовых рудниках Хибинского массива. Из приведенных данных видно, что в последние 5–7 лет число сильных сейсмических событий остается примерно одинаковым и существенно ниже, чем в 1980–1993 гг. Это связано с уменьшением объемов добычи руды в 1,5–2 раза в эти сложные годы.

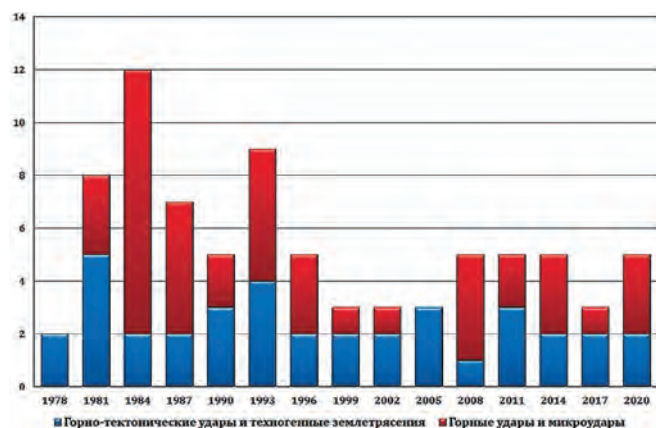


Рис. 1
Распределение по годам горных ударов, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на апатитовых рудниках

Fig. 1
Distribution of rockbursts, tectonic shocks and man-induced earthquakes in the apatite mines by year

Практически на всех указанных месторождениях действует в массиве гравитационно-тектоническое поле напряжений с превышением горизонтальными напряжениями в 2–10 раз вертикальных.

Именно горизонтальные тектонические напряжения, превышающие вертикальные, обуславливают проявление динамических разрушений пород в массиве на различных глубинах от поверхности, в том числе на глубинах 100–150 м. Тектонические напряжения, как установлено экспериментальными исследованиями во многих районах мира [1; 2], характерны практически для всех регионов, где имеют место горообразовательные процессы или другие проявления новейшей тектонической активности.

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам». Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. М.: 2014. №4(73). С. 29–64.

Условия проявлений природных и техногенных землетрясений при ведении горных работ

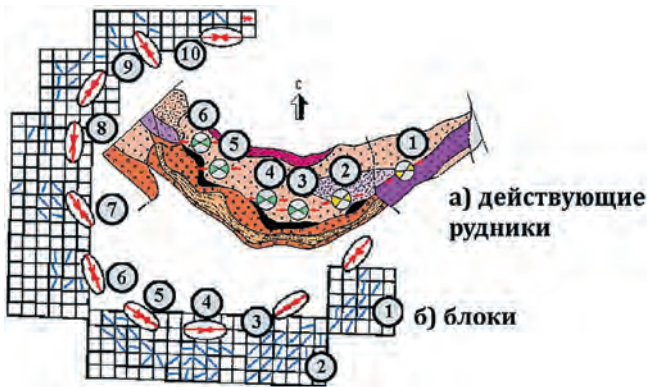
Для формирования крупнейших сейсмических событий, в том числе техногенных землетрясений при ведении горных работ, необходимо сочетание ряда условий: прежде всего высокий уровень горизонтальных тектонических напряжений в массиве пород, определяемый соответствующей тектонофизической обстановкой (т.е. наличие зон с большими градиентами скоростей новейших тектонических движений); наличие соответствующих хрупких высокопрочных пород с тектоническими неоднородностями в пределах зоны разработки; благоприятные геоморфологические условия (гористый рельеф); наличие крупномасштабной разработки (площадь выемки, глубина разработки, объем извлекаемой и перемещаемой горной массы); взрывное воздействие при проходке выработок и отбойке руды, сезонные водопритоки в горные выработки и т.д.

Проявление новейших движений ведет к перераспределению напряжений в земной коре, что сказывается на поведении отдельных блоков, выражающемся в медленном (крип) или скачкообразном движении (толчки) по разломам. Инженерная деятельность человека может рассматриваться как дополнительное кратковременное внешнее воздействие на сложную цепь природных взаимосвязанных процессов, выступающего в роли триггера ранее накопленной упругой энергии, определяющей напряженность массива горных пород. Принципиальная схема подготовки и реализации сильных сейсмических событий в массиве при естественном развитии процессов в массиве и под влиянием техногенных воздействий горных работ рассмотрена нами ранее [2]. Как следует из приведенных данных, при естественном развитии процесса в течение длительного времени выделяются три следующие стадии подготовки разрыва:

1. накопление тектонических напряжений при медленно развивающейся деформации, при этом выделяются небольшие порции энергии в виде слабых толчков или землетрясений (сейсмический фон);
2. нарастание напряжений и активизация деформаций, сопровождающаяся проявлением форшоков и укрупнением разрывов, эта стадия завершается образованием крупного разрыва, вызывающего главный толчок землетрясений;
3. последующее перераспределение напряжений, разрастание разрыва, проявление афтершоков.

Под влиянием же ведения горных работ напряжения концентрируются в окрестности очистного пространства и достигают предельных значений значительно раньше и чаще реализуются в виде более слабых толчков. При действии же мощных взрывных воздействий поля напряжений складываются, и реализация разрушений наступает еще раньше. Поэтому для прогноза таких опасных явлений, как горно-тектонические удары и техногенные землетрясения, весьма важным представляется выявление напряженного состояния нетронутого массива (рис. 2, 3), возможных деформаций и дополнительных напряжений вследствие крупномасштабной выемки горных масс, условий высвобождения накопленной энергии (рис. 4, 5).

Модель формирования избыточных горизонтальных напряжений на территории Фенноскандии за счет регионального сжатия со стороны Срединно-Атлантического хребта представлена на рис. 3 [12].



1–6 – действующие рудники;
7–10 – выделенные блоки в
Хибинском массиве и
направление максимального
сжатия в них;

1–6 – active mines; 7–10 –
selected blocks in the Khibiny
rock mass and the direction of
maximum compressive force in
these blocks;

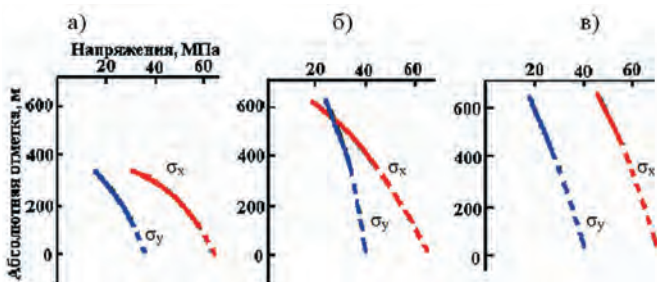


Рис. 2
Прогноз направления
и величины тектонических
напряжений на
отрабатываемых
и перспективных к отработке
месторождениях Хибинского
массива: σ_x , σ_y – измеренные
напряжения;
 σ_x – горизонтальные
напряжения;
 σ_y – вертикальные напряжения;
а – Кировский рудник
(Кукисвумчоррское крыло);
б – Кировский рудник
(Юкспорское крыло);
в – Расвумчоррский рудник

Fig. 2
Forecast of the direction
and magnitude of tectonic
stresses at the currently mined
and prospective deposits in
the Khibiny rock mass
 σ_x , σ_y – measured stresses,
 σ_x – horizontal,
 σ_y – vertical
а) – Kirov mine (Kukisvumchorr
wing);
б) – Kirov mine (Yukspor wing);
в) – Rasvumchorr mine

При ведении горных работ и формировании очистного пространства исходные напряжения в массиве перераспределяются и достигают предельных величин. На рис. 4 показаны техногенные поля напряжений при обычной отбойке руды и формировании разгрузочной зоны висячем боку залежи.

На рис. 4, б можно видеть, что большая часть массива разгружается при сбойке двух сближенных очистных пространств за счет образования разгрузочной зоны. Однако другая часть пригружается в висячем боку, где горные работы по отбойке руды уже не ведутся.

Поскольку массив горных пород представляет сложную иерархично-блочную среду, то его разрушение реализуется, как правило, по наиболее слабым связям, т.е. тектоническим нарушениям между блоками. Крупное событие типа техногенного землетрясения реализуется в результате совместного разрушения сразу многих предельно напряженных неоднородностей в массиве. Вероятность

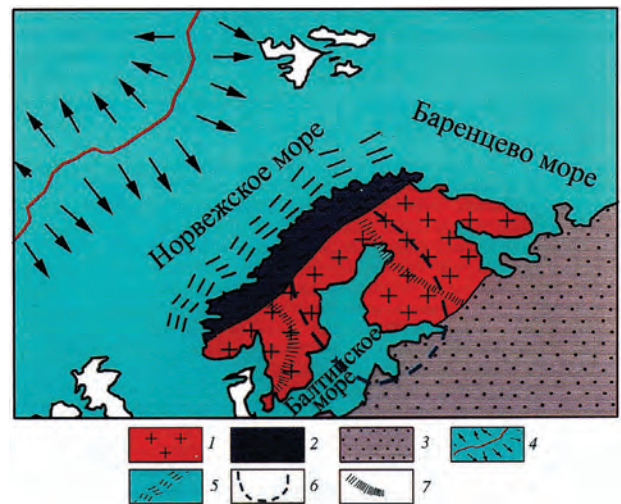


Рис. 3
Модель формирования
избыточных горизонтальных
напряжений на территории
Фенноскандии за счет
регионального сжатия со
стороны Срединно-
Атлантического хребта
(Юдахин, 2002): 1 – Фенно-
Скандинавский щит;
2 – каледониды; 3 – осадочные
породы платформы;
4 – зона спрединга; 5 – зона
ступенчатых сбросов;
6 – астеносферное тело в
нижней части коры – верхах
мантии; 7 – граница между
геологическими провинциями

Fig. 3
A model of excessive
horizontal stresses formation
in Fennoscandia due to the
regional compression from the
Mid-Atlantic Ridge (Yudakhin,
2002): 1 – the Fennoscandian
Shield;
2 – caledonides;
3 – sedimentary rocks of the
platform;
4 – the crust
spreading zone;
5 – the step fault zone;
6 – the asthenospheric body in
the lower crust and the upper
mantle; 7 – the boundary
between the geological
provinces

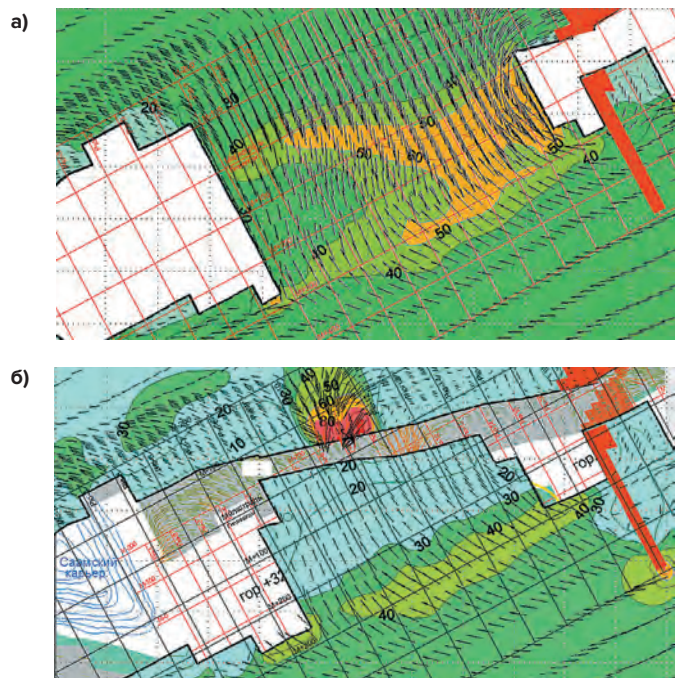


Рис. 4
Состояние горизонта:
а – до образования
разгрузочной зоны по
висячему боку залежи
в векторах (σ_{max}); б – после
образования разгрузочной
зоны по висячему боку залежи
в векторах (σ_{max})

Fig. 4
Condition of the mine level: а)
before formation of an
unloading zone in the
hanging wall of the deposit in
vectors (σ_{max}); б) upon
formation of an unloading
zone along the hanging wall of
the deposit in vector (σ_{max})

этого события естественно тем меньше, чем больше объем очага (формируемой отдельности разрушения). Согласно данным работы [13] естественная сейсмичность массива, распределение частоты землетрясений от энергии (или же от размеров очага) определяются только скоростью деформаций пород в представительном для рассматриваемого землетрясения объеме массива.

Механизмы и критерии различных форм разрушения при реализации сильных сейсмических событий

В зоне воздействия горных работ, где извлекаются и перемещаются значительные объемы горной массы и формируются значительные по площади выработанные пространства, во-первых, увеличивается скорость деформирования пород по сравнению с естественной (иногда на порядок и более), во-вторых, накладываются мощные динамические воздействия от массовых взрывов. Все это приводит к процессам формирования очага (времени созревания очага); преждевременному инициированию серии более слабых толчков, за счет срыва по контактам блоков при наличии в массиве свободного пространства; вспарывания барьера между сближенными трещинами и разломами, между ними и очистным пространством или между двумя сближенными очистными пространствами (рис. 5, 6). Кроме того, при применении систем разработки с обрушением крупные сейсмические события могут происходить при формировании трещин отрыва в породах всякого бока (рис. 7).

В отдельный тип можно выделить сильные сейсмические события, связанные с каскадным разрушением целиков на большой площади в подработанной толще (коллапс пород в системе кровля-целик-подошва), а также динамическое разрушение собственно блоковой структуры массива при превышении действующими напряжениями прочности пород в условиях объемного напряженного состояния.

Сейсмические события типа сдвига пород по трещинам, разломам могут произойти при выполнении следующего условия:

$$\tau_o \geq \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (3)$$

где τ_o – касательные напряжения в массиве; σ_n – нормальные напряжения по плоскости ослабления; C – сцепление по плоскости ослабления.

Участки в массиве пород с максимальным уровнем касательных напряжений являются потенциально опасными по реализации сейсмического события такого типа.

Сейсмические события за счет вспарывания барьера между сближенными трещинами (разломами) могут реализоваться в поле действия в массиве сжимающих напряжений при выполнении следующего условия:

$$\sigma_{\partial p}^{mp} > \sigma_p^n, \quad (4)$$

где $\sigma_{\partial p}^{mp}$ – растягивающие напряжения в конце трещины в направлении, перпендикулярном оси трещины; σ_p^n – прочность породы на растяжение.

После прорастания во взаимном направлении трещин

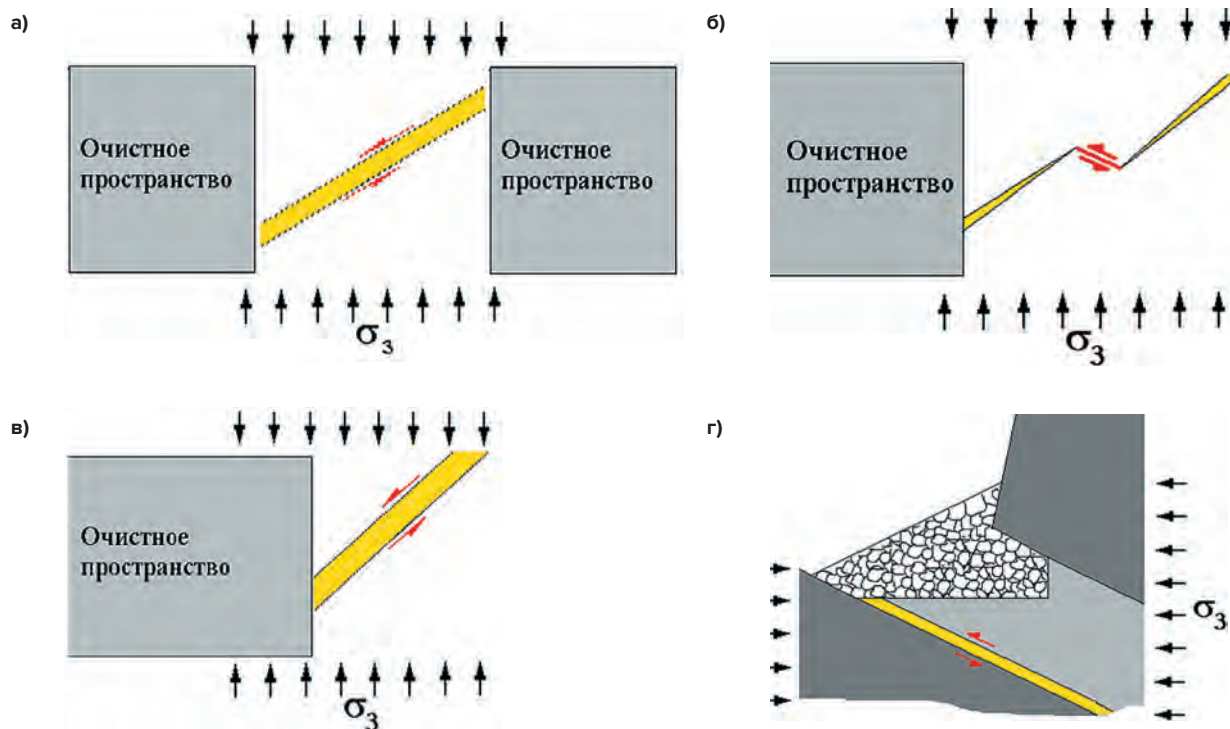


Рис. 5
Некоторые схемы реализации горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений при ведении горных работ:
а – при отработке месторождений встречными фронтами на сближенных рудниках; б – при выходе активного разлома в очистное пространство; в – при разрушении барьерной зоны между двумя разломами в геомеханическом пространстве рудника; г – при выходе тектонического нарушения на дневную поверхность при действии максимальных горизонтальных напряжений σ_3

Fig. 5
Some schematic representations of the tectonic shocks and man-induced earthquake occurrence during mining operations:
а – when the adjacent deposits are mined using the opposite faces; б – when an active fault enters the stope zone; в – when the barrier zone is broken between two faults in the geomechanical environment of the mine; г – when a tectonic fault reaches the day surface under maximum horizontal stresses σ_3

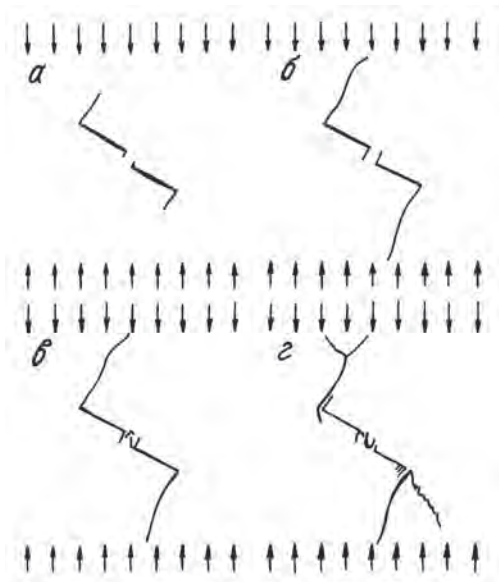


Рис. 6
Этапы разрушения барьерной зоны при ориентации разрывов относительно действующей нагрузки $\alpha = 60^\circ$:
а, б – этапы развития трещин, в – образование трещины в центре барьерной зоны, г – окончательное разрушение модели

Fig. 6
Stages of the barrier zone failure with the fracture orientation $\alpha = 60^\circ$ with respect to the effective load:
а, б – stages of crack formation in the centre of the barrier zone, в – crack formation in the centre of the barrier zone, г – final failure of the model

растяжения на определенную глубину может в дальнейшем реализовываться сдвиг пород в барьерной зоне.

Реализация сейсмического события за счет формирования трещины отрыва в подработанной толще пород висячего бока может произойти при выполнении следующего условия:

$$\sigma_p^d \geq \sigma_p^M; \quad (5)$$

$$\varepsilon_p^d \geq \varepsilon_p^M, \quad (6)$$

где σ_p^d ; ε_p^d – действующие растягивающие напряжения или деформации; σ_p^M ; ε_p^M – прочность на растяжение или предельная деформация растяжения подработанных пород в массиве.

Формирование этой трещины может происходить стадийно от поверхности вниз и снизу вверх, пока не сформируется магистральный разрыв, и лишь после этого может реализоваться самообрушение пород висячего бока (рис. 7).

Каскадное разрушение целиков в форме горных ударов и явление коллапса при подработке массива возможно при выполнении двух необходимых условий [14]:

– нагрузка P_0 на целики превышает максимальную (предельную), которую может выдержать целик P_M :

$$P_0 / P_M \geq 1; \quad (7)$$

– скорость возрастания напряжений в них превышает максимальную скорость релаксации напряжений, т.е.

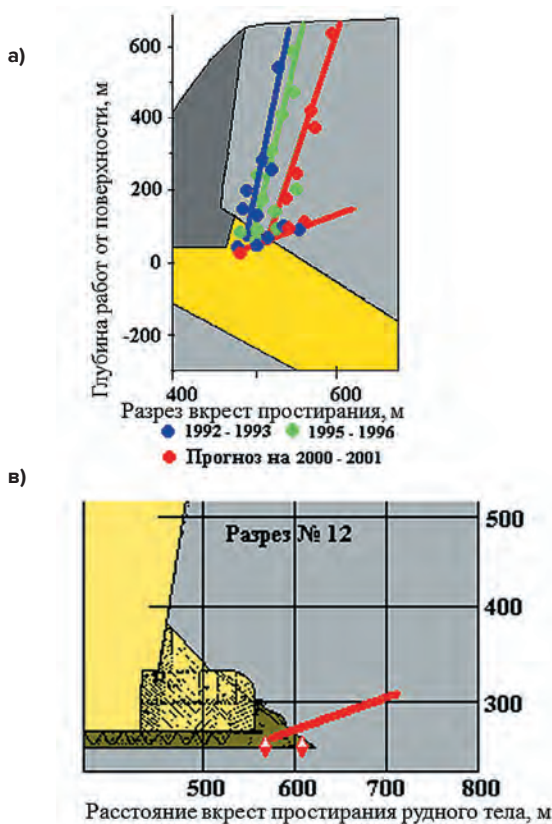


Рис. 7
Механизмы очагов сейсмических событий при формировании трещин отрыва в консоли висячего бока:
а – проявление сейсмичности в консоли пород висячего бока; б – формирование трещины отрыва в подработанной консоли пород висячего бока; в – формирование трещины сдвига в зоне высоких напряжений сжатия; г – сформированная трещина отрыва в плане при подработке пород висячего бока

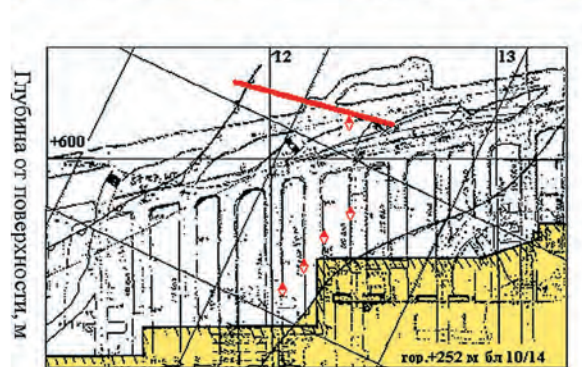


Fig. 7
Mechanisms of seismic hot spots during the cleavage crack formation in the hanging wall:
а) manifestation of seismicity in the hanging wall;
б) formation of a cleavage crack in the undermined hanging wall;
в) formation of a shear crack in the high-stress compression zone;
г) the formed cleavage crack in plan view during undermining of the hanging wall



приток энергии к целикам из внешней среды превышает затраты на их разрушение.

Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то горный удар или техногенное землетрясение этого типа не реализуется. Выполнение второго условия в сложной системе «вмещающие породы – полезное ископаемое» возможно при «мягком» режиме нагружения, т.е. когда жесткость нагружающей системы σ_c меньше жесткости нагружаемой конструкции σ_n , т.е.

$$\sigma_c \leq \sigma_n. \quad (8)$$

Время формирования магистральной трещины в самом структурном блоке согласно кинетической теории прочности можно определить по следующей формуле [15]:

$$t = A \cdot e^{\frac{u - \gamma\sigma}{RT^0}}, \quad (9)$$

где u – энергия активации; R – постоянная Больцмана; T^0 – температура; A и γ – параметры материала; σ – приложенное напряжение.

Таким образом, формирование катастрофической ситуации в массиве горных пород обусловлено энергетическим взаимодействием всех элементов ПТС, поэтому основным управляющим параметром эволюции ПТС можно считать энергию системы.

Как уже отмечалось выше, основной спецификой тектонически напряженных массивов является наличие динамических проявлений горного давления на сравнительно малых глубинах – 150–300 м от дневной поверхности. При этом степень удароопасности отдельных участков месторождения может быть различной и определяется уровнем действующих напряжений, а также показателями упругих и прочностных свойств пород в массиве. Поскольку для скальных массивов блочного строения характерно крайне неравномерное распределение напряжений, связанное с различием свойств пород, наличием трещин, разломных зон, всевозможных складок, включением даек, зон пережимов или расширения, на определенных участках создаются предпосылки для реализации динамических проявлений горного давления. Особенно опасными такие участки становятся при пересечении их выработками и при приближении границ очистного пространства. В этом случае на повышенные естественные напряжения накладывается дополнительная их концентрация, что в значительной мере повышает опасность динамических проявлений горного давления. Особенно неблагоприятные условия создаются при образовании в этой зоне системы выработок с целиками между ними (рис. 8).

В зависимости от конфигурации очистного пространства, глубины его расположения, соотношения горизонтальной и вертикальной нагрузки зона повышенной концентрации напряжений может быть различной. При этом на формирование этой зоны и соответственно зоны опорного давления значительное влияние оказывает величина пролета зависающих пород. В том случае, если величины напряжений в зонах опорного давления превышают критические значения, а скорость релаксации напряжений ниже скорости возрастания опорных нагрузок, разрушение реализуется в динамической форме. Особенно опасные динамические явления в форме собственно горных ударов имеют место в зоне влияния очистных работ, что обусловлено размерами перенапряженной площади.

При приближении горных работ к активным разломам, а также при отработке месторождений встречными



Рис. 8
Изменение сечений выработок в результате динамических проявлений горного давления

Fig. 8
Changes in the mine cross-sections as the result of dynamic manifestations of rock pressure



Рис. 9
Техногенное землетрясение 1989 г. на Кировском руднике АО «Апатит»

Fig. 9
The 1989 man-induced earthquake at the Kirov mine of Apatit JSC

фронтами на уменьшающийся целик могут происходить горно-тектонические удары за счет активизации разломов и подвижек по ним в перенапряженной зоне (рис. 9).

Управление горным давлением при разработке удароопасных месторождений

Стратегия управления горным давлением при разработке удароопасных месторождений сводится к устранению или минимизации концентрации напряжений в районе



ведения горных работ, либо к снижению способности приконтурного массива к накоплению больших запасов потенциальной энергии упругого деформирования [2; 14; 16]. Снижение концентрации напряжений может быть достигнуто: опережающей обработкой соседних защитных пластов, залежей, слоев (надработка), опережающей выемкой вертикальных или наклонных защитных зон по контакту всяческого бока с целью отрезки обрабатываемого основного участка от высоких горизонтальных напряжений; ведением очистных работ без целиков с ориентацией фронта добычных работ в соответствии с имеющимися в массиве природными ослаблениями; уменьшением зависаний подработанных толщ; исключением встречных и догоняющих фронтов очистных работ; исключением работ на уменьшающийся целик при их неизбежности; сокращением шага выработок впереди фронта очистных работ; преимущественным расположением их в разгруженной зоне, либо под обрушением, в складчатом массиве; расположением основных капитальных и камерных выработок по направлению действия максимальных горизонтальных напряжений; выбором рациональной формы поперечного сечения выработок; определением оптимального расстояния между сближенными выработками и т.д.

Снижение способности приконтурного массива пород к накоплению упругой энергии достигается применением камуфлетно-сотрясательного взрывания, мощных виброисточников, рыхлением камуфлетными взрывами, нагнетанием воды в скважины под различным давлением, созданием специальных щелей с помощью щелереза или бурением строчки параллельных сближенных скважин, воздействием на массив поверхностно-активными веществами, изменяющими прочностные и упругие свойства пород.

Поскольку все перечисленные мероприятия связаны, как правило, с дополнительными затратами, для определения целесообразности и объемов их использования необходимо постоянно осуществлять региональный прогноз удароопасности, а на отдельных участках выполнять локальные определения категории удароопасности. Это позволит не только обеспечить безопасность горных работ, но и оптимизировать их технико-экономические показатели.

Для создания ударобезопасной технологии необходимо в первую очередь составить верное представление о природе происходящих динамических явлений. Если основной их причиной на сравнительно малых и средних глубинах являются тектонические напряжения, то в первую очередь надо защищаться от них разгрузочной вертикальной или наклонной щелью, либо зоной, опускаемой ниже уровня защищаемой выработки, либо комплекса выработок, как это имеет место в днище блоков при системе этажного принудительного обрушения. При преобладающем влиянии вертикальной компоненты напряженного состояния и возрастании ее до опасных предельных значений необходимо защищать конструктивные элементы системы с помощью надработки вышележащей залежи или пласта. При пологом и наклонном падении пласта или залежи следует проводить опере-

жающую обработку по контакту всяческого бока с последующей выемкой основных запасов. Однако необходимо иметь в виду, что участки под щелью или защитной зоной, а также на фронтах этих защитных зон будут удароопасны, и здесь потребуются специальные профилактические локальные мероприятия.

В случае недостаточной эффективности региональных мер по разгрузке массива либо технической невозможности их применения используются другие из вышеперечисленных локальных мероприятий отдельно либо в комбинации друг с другом.

Для оценки геомеханической ситуации в районе ведения горных работ и управления геодинамическими рисками используется разработанная нами методика диагностики критических состояний участков геологической среды, позволяющая на основе анализа горно-геологической информации, инструментальных измерений в массиве и моделирования методом конечных элементов дать прогнозную оценку изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород и выбрать технические решения по обеспечению безопасности горных работ (рис. 10) [17].

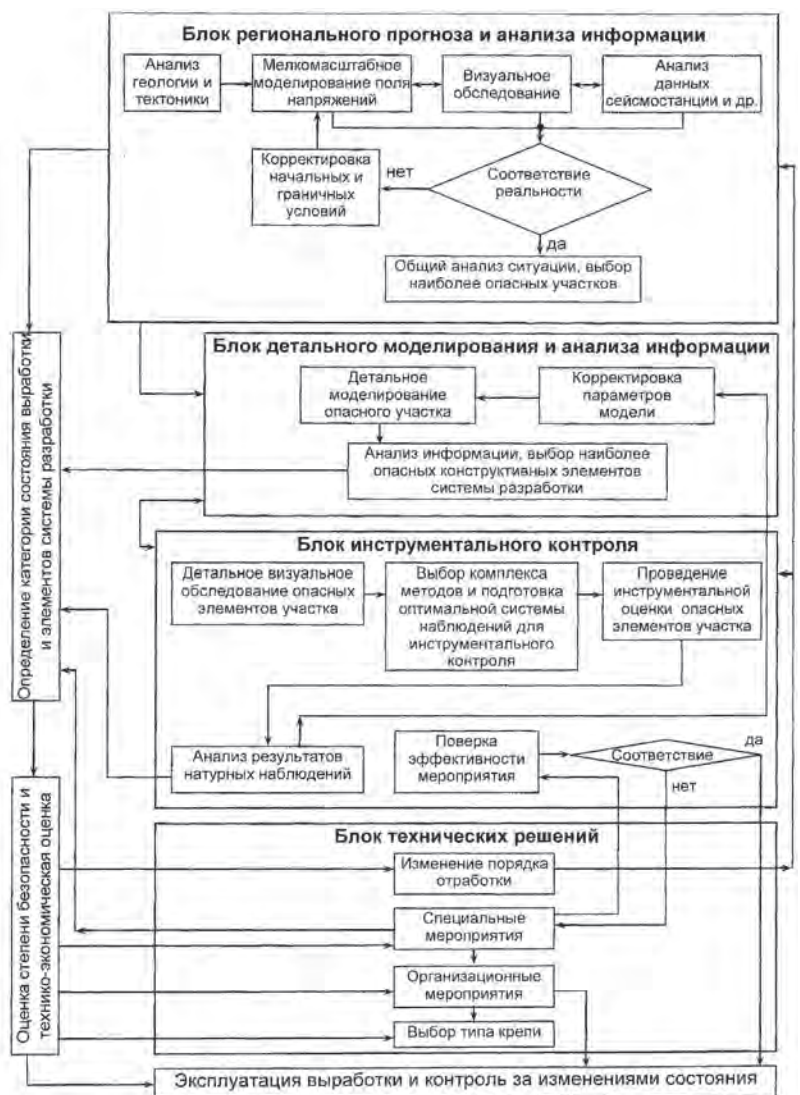


Рис. 10
Блок-схема методики
управления геодинамическими
рисками

Fig. 10
Block diagram of methodology
to manage geodynamic risks



При этом важная роль отводится данным численно-моделирования с использованием метода конечных элементов. Достоинством численного моделирования является возможность перспективного прогноза удароопасности, а также сравнения вариантов и выбора рационального порядка ведения работ на стадии долгосрочного и перспективного планирования. Методика включает в себя два информационных блока регионального прогноза и детального моделирования и анализа информации, блок инструментального контроля по выявлению в первых двух блоках опасного участка и блок технических решений по снижению геодинамического риска.

Задачей первых трех блоков является получение и анализ информации, которая используется для определения категории состояния выработки или элементов системы разработки, а также принятия последующих технических решений.

На основе анализа горно-геологической и геомеханической информации разработаны численные модели для расчета напряженно-деформированного состояния массива, содержащего очистные пространства рудников. Все расчеты выполняются методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса SigmaGT, разработанного в Горном институте КНЦ РАН. Созданный программный комплекс, обеспечивающий последовательные экспертные оценки состояния массива на разных масштабных уровнях, позволяет не только осуществлять региональный прогноз зон повышенных концентраций напряжений на уровне рудника или шахтного поля, но и с необходимой степенью обоснованности разрабатывать и принимать технические решения, обеспечивающие снижение вероятности возникновения динамических форм горного давления.

Заключение

На основе вышеизложенных принципов безопасного ведения горных работ в высоконапряженных массивах обоснованы подходы к выбору системы разработки мощных месторождений и порядку развития очистных работ на горизонте, которые включают в себя:

1. снижение уровня действующих напряжений в отрабатываемом массиве путем опережающего создания разгрузочной зоны со стороны действия максимальных напряжений (для условий Кировского рудника АО «Апатит» – со стороны висячего бока рудного тела);
2. выполнение горноподготовительных работ вне высоконапряженных участков за счет опережения их проходки на величину распространения зон концентраций, вызываемых очистными работами с последующим предварительным бурением строчки скважин для разгрузки приконтурного массива до подхода границ очистного пространства;
3. повышение интенсивности отработки запасов горизонта и сокращение времени эксплуатации транспортных выработок;
4. крепление выработок различными видами штанговой или комбинированной крепи (податливость, работа на растяжение при динамических нагрузках и т.д.);
5. повышение качества, оперативности и полноты информации по геомеханической обстановке путем концентрации технических средств контроля и мероприятий по защите горных выработок от динамических проявлений горного давления в ограниченной, наиболее опасной зоне шахтного поля, примыкающей к висячему боку рудного тела;
6. снижение в несколько раз уровня действующих напряжений позволяет отрезанную от висячего бока часть массива привести в неудароопасное состояние.

Список литературы

1. Курленя М.В. (ред.) *Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах*: в 2-х ч. Апатиты: КНЦ РАН; 1996.
2. Мельников Н.Н. (ред.) *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты: КНЦ РАН; 2002. 325 с.
3. Маловичко А.А., Блинова Т.С., Лебедев А.Ю., Некрасова Л.В. Соликамское землетрясение 5 января 1995 г. В кн.: Трубецкой К.Н., Красноштейн А.Е. (ред.) *Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градо-промышленных агломераций: материалы междунар. симпозиума: SRM-95, 15–21 сент. 1995 г.* Екатеринбург: УрО РАН; 1997. С. 307–315.
4. Ломакин В.С., Халевин Н.И. Горно-тектонические удары в реальной сейсмичности Урала. В кн.: *Геодинамическая безопасность при освоении недр и земной поверхности*. Апатиты: КНЦ РАН; 2002. С. 79–89.
5. Еременко А.А., Машуков В.А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(1):70–76.
6. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с ML=6.1, I0=7 (Кузбасс). *Российский сейсмологический журнал*. 2020;2(1):48–61. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>
7. Ловчиков А.В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(4):68–73. Режим доступа: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/55b/55baacda2945328feca44c80f79102f3.pdf>
8. Van Aswegen G. Seismic Sources and Rock Burst Damage in South Africa and Chile. In: Vallejós J.A. (ed.) *Proceedings 9th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSiM9, November 15–17, 2017, Santiago, Chile*, pp. 72–86.
9. Резниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. В кн.: Резниченко Ю.В. (ред.) *Исследования по физике землетрясений*. М.: Наука; 1976. С. 9–27.
10. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука; 1993. 313 с.
11. Gutenberg B., Richter C.F. Magnitude and energy of earthquakes. *Annals of Geophysics*. 1956;9(1):1–15. <https://doi.org/10.4401/ag-5590>



12. Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И. *Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы*. Екатеринбург: УрО РАН; 2003. 299 с.
13. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. *Основы геомеханики*. М.: Недра; 1986. 301 с.
14. Влох Н.П., Сашурин А.Д. *Управление горным давлением на железных рудниках*. М.: Недра; 1974. 184 с.
15. Журков С.Н. Основы кинетической теории разрушения и ее прогнозирования. *Прогноз землетрясений*. 1984;5:30–44.
16. Петухов И.М., Егоров П.В., Винокур Б.Ш. *Предотвращение горных ударов на рудниках*. М.: Недра; 1984. 230 с.
17. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И. Э. Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений. *Записки Горного института*. 2012;198:16–23. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5908?setLocale=ru_RU

References

1. Kurlenya M.V. (ed.) *Rock pressure control in tectonically stressed rock masses*. Apatity: Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 1996. Part 1, 2. (In Russ.)
2. Melnikov N.N. (ed.) *Seismic activity during mining works*. Apatity: Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 2002. 325 p. (In Russ.)
3. Malovichko A.A., Blinova T.S., Lebedev A.Yu., Nekrasova L.V. The Solikamsk earthquake of January 5, 1995. In: Trubetskoy K.N., Krasnoshtein A.E. (eds) *Safety issues in mining of mineral deposits in urban agglomeration areas: Proceedings of the SRM-95 International Symposium, September 15–21, 1995*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 1997, pp. 307–315. (In Russ.)
4. Lomakin V.S., Khalevin N.I. Rock and tectonic bumps in the real seismicity of the Urals. In: *Geodynamic safety in mining and land surface development*. Apatity: Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 2002, pp. 79–89. (In Russ.)
5. Eremenko A.A., Mashukov I.V., Eremenko V.A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in Gornaya Shoria. *Journal of Mining Science*. 2017;53(1):65–70. <https://doi.org/10.1134/S1062739117011859>
6. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V. Bachatskiy induced earthquake on June 18, 2013, ML=6.1, I0=7 (Kuzbass). *Russian Journal of Seismology*. 2020;2(1):48–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>
7. Lovchikov A.V. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. *Journal of Mining Science*. 2013;49(4):572–575. <https://doi.org/10.1134/S1062739149040072>
8. Van Aswegen G. Seismic Sources and Rock Burst Damage in South Africa and Chile. In: Vallejos J.A. (ed.) *Proceedings 9th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSiM9, November 15–17, 2017, Santiago, Chile*, pp. 72–86.
9. Reznichenko Yu.V. Hot spot dimensions of a crustal earthquake and the seismic moment. In: Reznichenko Yu.V. (ed.) *Research on earthquake physics*. Moscow: Nauka; 1976, pp. 9–27. (In Russ.)
10. Sobolev G.A. *Basics of earthquake prediction*. Moscow: Nauka; 1993. 313 p. (In Russ.)
11. Gutenberg B., Richter C.F. Magnitude and energy of earthquakes. *Annals of Geophysics*. 1956;9(1):1–15. <https://doi.org/10.4401/ag-5590>
12. Yudakhin F.N., Shchukin Yu.K., Makarov V.I. *The deep structure and modern geodynamic processes in lithosphere of the East-European platform*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2003. 299 p. (In Russ.)
13. Rodionov V.N., Sizov I.A., Tsvetkov V.M. *Basics of geomechanics*. Moscow: Nauka; 1986. 301 p. (In Russ.)
14. Vlokh N.P., Sashurin A.D. *Rock pressure management in ore mines*. Moscow: Nedra; 1974. 184 p. (In Russ.)
15. Zhurkov S.N. Basics of kinetic theory of rupture and its prediction. *Prognoz zemletryaseni*. 1984;5:30–44. (In Russ.)
16. Petukhov I.M., Egorov P.V., Vinokur B.Sh. *Prevention of rock bumps in mines*. Moscow: Nedra; 1984. 230 p. (In Russ.)
17. Kozыrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E. Experience in expert systems application for estimation of stress- strain state of rock mass for selection of safe methods of ore deposits mining. *Journal of Mining Institute*. 2012;198:16–23. (In Russ.) Available at: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5908?setLocale=en_US

Информация об авторе

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.kozyrev@ksc.ru

Information about the author

Anatoly A. Kozыrev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of Rock Mechanics Department, Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kozyrev@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.02.2023
Поступила после рецензирования: 02.03.2023
Принята к публикации: 04.03.2023

Article info

Received: 19.02.2023
Revised: 02.03.2023
Accepted: 04.03.2023