

М.В. Рыльникова, В.А. Еременко, Е.Н. Есина

СПОСОБ РАЗГРУЗКИ УДРООПАСНЫХ И СТРУКТУРНО НАРУШЕННЫХ УЧАСТКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

На основе многолетнего опыта применения при подземной разработке вертикальных концентрированных зарядов и наблюдений методами регионального и локального контроля за напряженным и деформированным состоянием массива горных пород обоснован новый способ разгрузки удароопасных и структурно нарушенных участков месторождений, который является основой для перспективного развития электровоспроизводящих геотехнологий при подземной разработке месторождений на больших глубинах.

Ключевые слова: способ, вертикальный концентрированный заряд, взрыв, разгрузка, рекуперация энергии, деформация, скорость колебаний.

Введение

Подземные горные работы, которые проводятся на месторождениях с целью добычи твердых полезных ископаемых, нарушают сплошность массива горных пород [1, 2]. Перераспределяется природное поле напряжений, формируются зоны концентрации и разгрузки сил в конструктивных элементах горнотехнических систем и вблизи контура горных выработок по всему периметру обнажений [3–5]. На значительных расстояниях от выработок и очистного пространства наблюдаются смещения, из-за неравномерности которых происходит деформирование массива и изменение его напряженного состояния. Наблюдаются статические проявления горного давления, которые происходят в течение длительного времени (рис. 1, а). Технологические и массовые взрывы инициируют выделение сейсмической энергии в горном массиве и провоци-

руют динамические проявления горного давления, которые происходят мгновенно с выделением огромной энергии (рис. 1, б).

Горные предприятия потребляют до 10% всей производимой в горнодобывающих странах электроэнергии. Снижение энергетических затрат на производство основных и вспомогательных технологических процессов, а также применение способов рекуперации энергии являются перспективным направлением ресурсосбережения и повышения эффективности функционирования горнотехнических систем. В процессе

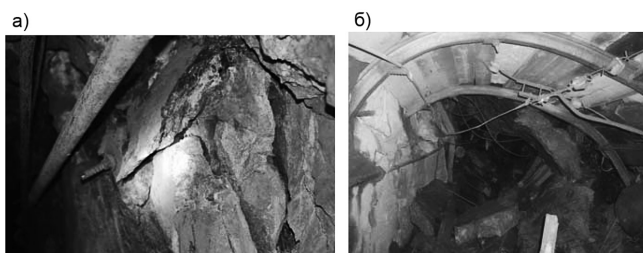


Рис. 1. Статические проявления горного давления в рудном штреке Холбинского рудника (гор. +1490 м) и последствия горного удара на Таштагольском руднике (орт 12, гор. -350 м)

* Работа выполнена в рамках государственного контракта Российского научного фонда – грант № 14-17-00255.

подземной разработки месторождений полезных ископаемых, управляя энергией массива горных пород, появляется возможность использования энергии горного давления в качестве собственного дополнительного источника механической и электрической энергии [6–8]. Проведение исследований в данной области имеет свои особенности. Например, контролировать и оперативно управлять процессами деформирования массива в ходе подземной разработки месторождений на больших глубинах весьма сложно и ответственно. Учитывая регистрируемую величину горного давления на глубине 1000 м до 100 МПа и более, устройства для преобразования энергии должны обладать повышенной несущей способностью и высокой прочностью.

После вскрытия горными выработками рудного участка на месторождении, массив в большей степени обладающий потенциальной энергией начинает активизироваться с выделением значительных объемов кинетической энергии. Массив смещается, деформируется, разрушается, проявляется техногенная трещиноватость.

Наибольшее влияние оказывают взрывные работы, а также накопление на рудниках технологических подземных пустот.

Влияние взрывов на выделяемую сейсмическую энергию динамических явлений

Выделение сейсмической энергии взрыва и суммарной сейсмической энергии динамических явлений, произошедших после взрыва, вызвано реакцией массива горных пород на взрыв и зависит от геологических, геомеханических особенностей и структуры рассматриваемого участка месторождения (рис. 2). Также в течение длительного времени регистрируются случаи разрушения массива горных пород в виде статических проявлений горного давления.

Следует отметить, что полная удельная работа инициируемого заряда ВВ примерно на три порядка выше, чем сейсмическая энергия самого взрыва. В качестве примера в таблице приведены параметры массового взрыва, проведенного на участке Восточный Таштагольского месторождения.

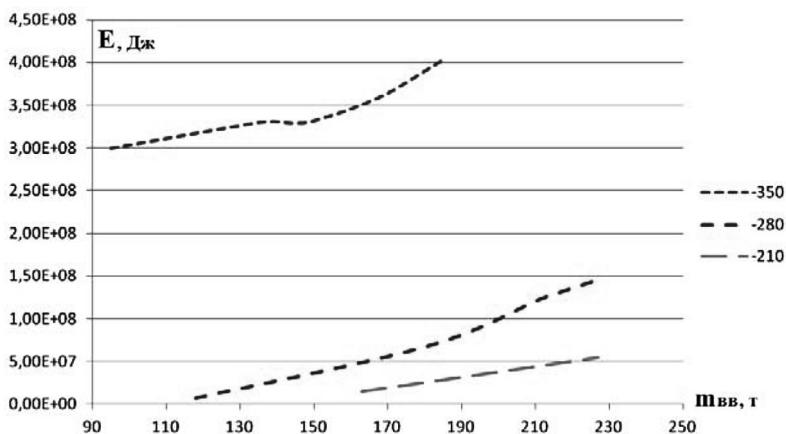


Рис. 2. Реакция массива на взрыв (E) – сумма выделяемой суммарной сейсмической энергии динамических явлений (E_d) и сейсмической энергии взрыва (E_v) на глубине 890 м (гор. -350 м), 820 м (гор. -280 м) и 750 м (гор. -210 м) участка Восточный Таштагольского месторождения, $m_{ВВ}$ – масса ВВ

Параметры массового взрыва, проведенного на участке Восточный Таштагольского месторождения

Дата	Блок, этаж (глубина), м	Масса заряда ВВ, т	Сейсмическая энергия взрыва (E_v), Дж	Суммарная сейсмическая энергия динамических явлений (E_d), Дж	Полная удельная работа заряда ВВ (аммонит № 6ЖВ) (A), Дж
25.03.2012	Бл. 20–21, -350÷ -280 м (890 м)	184,50	$2,91 \cdot 10^8$	$5,84 \cdot 10^5$	$6,57 \cdot 10^{11}$

Проблема уменьшения сейсмического воздействия массовых и технологических взрывов на рудниках, склонных и опасных по горным ударам, применяющих системы разработки с этажным и подэтажным обрушением руды и вмещающих пород, в настоящее время является весьма актуальной. С учетом практического опыта освоения удароопасных месторождений разработку рудных тел на глубоких горизонтах предпочтительно осуществлять системами разработки с подэтажным обрушением, что позволяет уменьшить взрывное воздействие на массив горных пород при снижении массы заряда ВВ. При этом отклик массива напрямую зависит от массы инициируемого заряда ВВ.

При проведении экспериментальных исследований наблюдалась определенная тенденция при взрывании блоков на равной глубине при сопоставимой массе заряда ВВ: если фактически регистрируемая сейсмическая энергия взрыва превышала значение среднестатистической, то суммарная сейсмическая энергия динамических явлений была меньше среднестатистической, и, наоборот, если сейсмическая энергия взрыва регистрировалась меньше среднестатистической, то суммарная сейсмическая энергия динамических явлений превышала среднестатистическую. Таким образом, массив или максимально разгружался во время взрыва, или разгружался в течение недели после его проведения. Затем, в течение определенного времени напряжения

в массиве вновь возрастали. Если своевременно не производился очередной взрыв, то в дальнейшем во время, до и после проведения взрыва росла вероятность возникновения динамических проявлений горного давления, в т. ч. с высоким энергетическим классом – удары горно-тектонического типа, горные удары и микроудары.

При разгрузке массива во время взрыва за счет его сейсмической энергии и в течение недели после взрыва в результате накопления суммарной сейсмической энергии динамических явлений возникают динамические проявления горного давления, которые приводят к негативным последствиям – внезапным выбросам руды (породы) в подземные выработки, нарушению технологических процессов, деформациям машин, механизмов, оборудования и разрушению крепи. Поэтому своевременное проведение технологического взрыва на удароопасном участке до накопления им максимальной упругой энергии является инструментом, позволяющим минимизировать негативные проявления горного давления с обеспечением качественного дробления отбиваемой руды и сохранить устойчивость и несущую способность элементов подземных горных конструкций как во время взрыва, так после него [9].

Наблюдения за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при разработке месторождений методами регионального и локального контроля позволяют определять рекомендуемые периоды вре-

мени проведения взрывов [10]. Если на удароопасном участке в определенный период не планируется проведение технологического взрыва, необходим специальный взрыв для разгрузки массива. Существует несколько взрывных способов, позволяющих разгрузить напряженные подземные локальные участки массива. Например, камуфлетное взрывание.

Способ разгрузки удароопасных и структурно нарушенных участков

С учетом опыта проведения подземных взрывов разработан способ [11], позволяющий разгружать массивы горных пород на больших площадях. Для этого применяется направленное взрывание вертикального

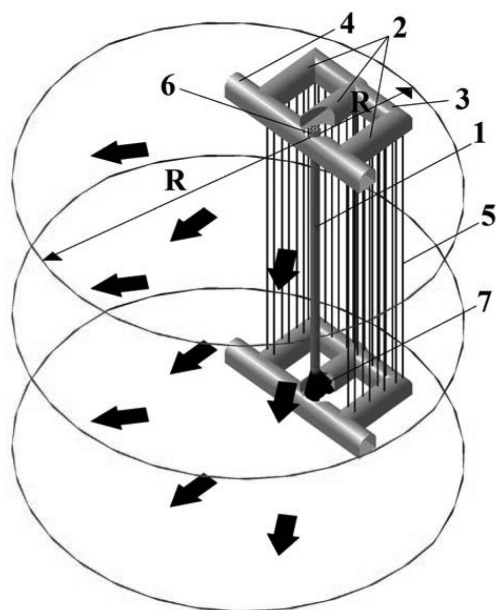


Рис. 3. Способ направленного взрывания ВКЗ: 1 – вертикальный концентрированный заряд; 2 – сбойки; 3 – выработка для создания демпферного слоя (отрезной щели); 4 – подходная выработка; 5 – вертикальные скважины для создания демпферного слоя (отрезной щели); 6 – целик горного массива в потолочине ВКЗ; 7 – забойка; R – радиус воздействия

концентрированного заряда (ВКЗ), размещенного в восстающей выработке, пройденной, например, с помощью секционного взрывания (рис. 3). Заряды ВКЗ неоднократно опробованы при массовом обрушении блоков на рудниках Горной Шории и Хакасии [12]. Для направленного взрывания необходимо оконтурить заряд ВКЗ с трех сторон компенсационным пространством или демпферным слоем разрушенных пород, формируемых путем взрывания зарядов ВВ, расположенных в пробуренных вертикальных скважинах диаметром от 100 до 300 мм. Это необходимо для уменьшения негативного воздействия взрыва на прилегающий массив. Затем производят инициирование заряда ВКЗ.

Объем ВКЗ определяется по формуле:

$$V_{ВКЗ} = \pi \cdot \left(\frac{d_{ВКЗ}}{2}\right)^2 \cdot \Sigma H_{ВКЗ}, \text{ м}^3 \quad (1)$$

где $d_{ВКЗ}$ – диаметр ВКЗ (восстающей выработки), м; $\Sigma H_{ВКЗ}$ – суммарная длина ВКЗ, м.

Масса заряда ВКЗ находится из выражения:

$$Q_{ВКЗ} = \rho \cdot V_{ВКЗ}, \text{ кг} \quad (2)$$

где ρ – плотность заряжения ВВ, кг/м³.

Объем массива горных пород, разрушаемого взрыванием ВКЗ, рассчитывается:

$$V = q_0 \cdot Q_{ВКЗ} \cdot K_n, \text{ м}^3 \quad (3)$$

где q_0 – удельный расход ВВ, кг/м³; K_n – поправочный коэффициент.

Параметры ВКЗ необходимо корректировать с учетом результатов, полученных по данным наблюдений при проведении экспериментальных взрывов, так как каждое месторождение имеет уникальные геологические, геомеханические и геотехнологические условия освоения. В ходе наб-

людений необходимо варьировать диаметром ВКЗ, а также изменять материалы, размеры и объемы инертных промежутков. С учетом опыта ведения взрывных работ с применением скважинных и пучковых зарядов, а также скважинных зарядов увеличенного диаметра и ВКЗ в различных условиях следует также регулировать объемы разрушаемого массива за счет снижения или увеличения удельного расхода ВВ (q_0). При этом необходимо следить за тем, чтобы разрушаемый массив не переходил границу демпферного слоя и сохранялись подходящие выработки для дальнейшего использования.

Для повышения уровня безопасности горных работ при экспериментальном определении в конкретных условиях месторождения силы воздействия взрыва заряда ВКЗ в заданных направлениях рекомендуется использовать современную систему сейсмологического мониторинга с установкой подземных сейсмопавильонов, оснащенных трехкомпонентными сейсмоприемниками [13]. Регистрация параметров сейсмических событий позволяет верифицировать и, при необходимости, уточнить представления о свойствах и состоянии массива горных пород. Совместная оценка как силовых, так и деформационных характеристик очагов событий – сейсмической энергии и сейсмического момента дает возможность интерпретировать сейсмические данные в геомеханические характеристики горного массива. Например, участки массива, где лоцируются события с повышенной сейсмической энергией по отношению к величине сейсмического момента характеризуются высокой механической прочностью пород и/или высоким уровнем напряжений. Характеристики очагов сейсмических событий (тензоров сейсмического момента) содержат сведения об ос-

лабленных поверхностях (разрывных нарушениях, системах трещин и о направлении действующих напряжений). Это дает возможность корректировать параметры выбранных геомеханических моделей месторождений или его отдельных участков – уточнять направления главных напряжений в природном поле, критерии разрушения массива и др. Также появляется возможность проводить ретроспективный анализ формируемой геомеханической ситуации. Сейсмические характеристики необходимы при анализе причин горных ударов. Так, местоположение очага сейсмического события, ассоциируемого с горным ударом, и геометрические характеристики его проявления (например, ориентировка нодальных плоскостей) позволяют сделать заключение о роли геологических структур в районе очага. Очагом сейсмического события может выступать и непосредственно горный удар. Для исследования такой возможности целесообразно выполнить геомеханическое моделирование вероятных сценариев развития динамических явлений (например, динамическое разрушения целика или его основания) и по результатам моделирования теоретически оценить механизмы геомеханических процессов. Сопоставление результатов теоретических расчетов с механизмами, восстановленными по 3 сейсмическим записям, дает возможность определить наиболее вероятный сценарий развития очагового процесса.

За счет рассредоточения при формировании ВКЗ в восстающей выработке заряда ВВ и инертных промежутков, представленных, например, опилками, возможно при взрыве осуществлять управляемое направленное секционное воздействие на массив горных пород по высоте восстающей выработки (20–70 м) (рис. 4) и формировать зоны концентрации

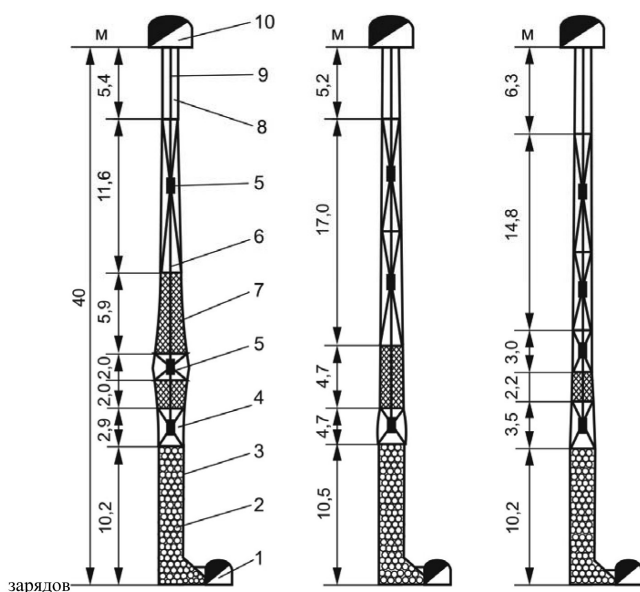


Рис. 4. Конструкции ВКЗ в блоках Абаканского рудника: 1 – сбойка нижнего горизонта; 2 – восстающая выработка; 3 – забойка; 4 – заряд ВВ; 5 – патрон-боевик; 6 – детонирующий шнур; 7 – инертный промежуток; 8 – целик горного массива; 9 – скважины заряжания и коммутации; 10 – сбойка верхнего горизонта

и разгрузки напряжений в заданных местах, где должны располагаться устройства для съема и преобразования сейсмической и динамической энергии разрушения горного массива в иной вид механической или электрической энергии. Таким образом, сейсмическая или динамическая энергия механического разрушения горного массива, выделяемая в ходе техногенного преобразования недр, может быть преобразована в электрическую энергию, направляемую в рудничную сеть и используемую для реализации геотехнологических процессов.

Важно отметить, что деформации горных пород за пределами упругости наблюдаются при относительных величинах, превышающих $0,0002 \div 0,0003$ [14]. Поэтому из условий упругого поведения горных пород, относительная деформация $\epsilon_0 = 0,0002 \div 0,0003$ должна приниматься в качестве до-

пустимой, гарантирующей устойчивость охраняемых горных конструкций при многократном производстве подземных взрывов вертикальных концентрированных зарядов. В соответствие с классификацией защитных подземных сооружений с учетом срока их эксплуатации, допустимые значения упругих деформаций не должны превышать для сооружений: стволы, камеры дробления, околоствольные двory (срок эксплуатации 10–15 лет) – 0,0001; квершлагы, целики (5–10 лет) – 0,0002; камеры, штреки (1–5 лет) – 0,0003; очистные блоки (1 год) – 0,0005. Допустимые скорости колебаний для подземных сооружений, например, в монолитных породах с отдельными

трещинами и пустотами рекомендуется принимать: для сооружений I класса охраны – 12,2 см/с; для сооружений IV класса – 60,0 см/с.

Расчетные параметры скорости колебаний и деформаций массива при проведении экспериментов по направленному взрыванию ВКЗ не должны превышать указанных допустимых значений. При этом при проведении управляемого направленного сотрясательного взрыва ВКЗ массив горных пород разгружается в заданном направлении, создаются условия для съема и преобразования сейсмической и динамической энергии разрушения горного массива в иной вид механической или электрической энергии, используемой на нужды подземного рудника и обеспечиваются безопасные условия эксплуатации подземных горнотехнических конструкций и сооружений.

Выводы

Разработанный способ разгрузки удароопасных и структурно нарушенных участков рекомендуется применять для сейсмозрывного воздействия на зоны концентрации напряжений и развития наибольших деформаций массива – участков для размещения датчиков преобразования энергии горного давления, образуемой в ходе реализации геотехнологических процессов. Также при необходимости можно оказывать влияние на эпицентральную зону землетрясений для инициирования афтершоков [15]. Следует отметить, что взрыв способен как разгрузить массив горных пород с вы-

делением сейсмической энергии при динамических явлениях небольшой мощности, так и спровоцировать горный удар или техногенное землетрясение. Поэтому рекомендуемый способ разгрузки массива путем управляемого направленного сотрясательного взрыва вертикальных концентрированных зарядов создает условия для безопасной подземной отработки месторождений на больших глубинах и обеспечивает возможность съема и преобразования сейсмической и динамической энергии разрушения горного массива в иной вид механической или электрической энергии, используемой на нужды подземного рудника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курлень М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
2. Еременко А.А., Еременко В.А., Гайдин А.П. Совершенствование геотехнологии освоения железорудных удароопасных месторождений в условиях действия природных и техногенных факторов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 312 с.
3. Слесарев В.Д. Механика горных пород и рудничное крепление. – М.: Углетехиздат, 1948. – 304 с.
4. Еременко В.А., Гахова Л.Н., Семенякин Е.Н. Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 80–87.
5. Eremenko V., Eremenko A., Gakhova L., Klishin I. Finding zones of stress concentrations and seismic events in deep ore mining affected by high horizontal stresses. Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining 2012. – Perth 2012. – 28–30 March 2012, Australia. – pp. 443–450.
6. Patent № CN2011245417U 20110224. 02.11.2011. Mine energy regeneration wireless sensor / China university of mining & technology.
7. Patent № GB19870013576 19870610. 03.02.1988. A method and system for the production of electrical energy by means of a pressure medium / Hermann hemscheidt maschinenfabrik GMBH & CO.
8. Серяков В.М., Фрянов В.Н., Павлова Л.Д. и др. Патент № 2377413 РФ. Оpubл. 29.10.2008. Бюл. № 3. Способ получения электрической и других видов энергий при подземной разработке массива полезных ископаемых.
9. Еременко В.А., Семенякин Е.Н. Исследование механизма формирования динамических явлений и зон их концентрации при разработке удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 67–68.
10. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам. ВостНИГРИ, ВНИМИ. – Новокузнецк, 1991. – 90 с.
11. Способ разгрузки удароопасных участков направленным взрывом ВКЗ. Заявка на получение патента на изобретение № 2014122105 от 26.03.2014.
12. Викторов С.Д., Еременко А.А., Закалинский В.М., Машуков И.В. Технология крупномасштабной взрывной отбойки на удароопасных рудных месторождениях Сибири. – Новосибирск: Наука, 2005. – 212 с.
13. Mendecki A.J. Seismic monitoring in mines. – London: Chapman and Hall, 1997. – 262 p.
14. Справочник взрывника / Под ред. Б.Н. Кутузова, В.М. Старобогатова, И.Е. Ерофеева и др. – М.: Недра, 1988. – 511 с.
15. Мухамедиев Ш.А. Предотвращение сильных землетрясений: реальная цель или утопия? // Физика Земли. – 2010. – № 11. – С. 49–60. **ИДAS**

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующая отделом, e-mail: rylnikova@mail.ru,

Еременко Виталий Андреевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: eremenko@ngs.ru,

Есина Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: esina555@list.ru,

ИПКОН РАН.

UDC 622.831; 622.2; 622.235

DESTRESSING OF ROCKBURST-HAZARDOUS AND DAMAGED ZONES

Rylnikova M.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: rylnikova@mail.ru,

Eremenko V.A., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: eremenko@ngs.ru,

Esina E.N., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: esina555@list.ru,

Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences.

Based on the long-term experience gained in application of vertical concentrated explosive charges in underground mining and monitoring of stress-strain state of rocks using the regional and local control means, the authors have developed and described the destressing method for rockburst-hazardous and damaged zones in rock masses.

Key words: method, vertical concentrated charge VCC, blast, recuperation of energy, deformation, vibration velocity.

REFERENCES

1. Kurlenya M.V., Seryakov V.M., Eremenko A.A. *Tekhnogennye geomekhanicheskie polya napryazhenii* (Induced geomechanical stress fields), Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 p.

2. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Gaidin A.P. *Sovershenstvovanie geotekhnologii osvoeniya zhelezorudnykh udaropasnykh mestorozhdenii v usloviyakh deistviya prirodnykh i tekhnogennykh faktorov* (Improvement of rockburst-hazardous iron ore mining technology under natural and induced impact), Novosibirsk, Nauka, 2008, 312 p.

3. Slesarev V.D. *Mekhanika gornykh porod i rudnichnoe kreplenie* (Rock mechanics and mine support), Moscow, Ugletekhizdat, 1948, 304 p.

4. Eremenko V.A., Gakhova L.N., Semenyakin E.N. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 2012, no 2, pp. 80–87.

5. Eremenko V., Eremenko A., Gakhova L., Klislin I. Finding zones of stress concentrations and seismic events in deep ore mining affected by high horizontal stresses. *Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining 2012*. Perth 2012. 28–30 March 2012, Australia. pp. 443–450.

6. Patent CN2011245417U 20110224. 02.11.2011. Mine energy regeneration wireless sensor. China university of mining & technology.

7. Patent GB19870013576 19870610. 03.02.1988. A method and system for the production of electrical energy by means of a pressure medium. Hermann hemscheidt maschinenfabrik GMBH & CO.

8. Seryakov V.M., Fryanov V.N., Pavlova L.D. Patent RU2377413, 29.10.2008.

9. Eremenko V.A., Semenyakin E.N. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2012, no 4, pp. 67–68.

10. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh Gornoi Shorii, sklonnykh k gornym udaram* (Instructions on safe mining of rockburst-hazardous deposits in Gornaya Shoria), VostNI-GRI, VNIMI, Novokuznetsk, 1991, 90 p.

11. *Utility patent application no 2014122105*, 26.03.2014.

12. Viktorov S.D., Eremenko A.A., Zakalinskii V.M., Mashukov I.V. *Tekhnologiya krupnomasshtabnoi vzryvnoi otboiki na udaropasnykh rudnykh mestorozhdeniyakh Sibiri* (Large-scale blasting technology for rockburst-hazardous ore bodies in Siberia), Novosibirsk, Nauka, 2005, 212 p.

13. Mendeki A.J. *Seismic monitoring in mines*. London: Chapman and Hall, 1997. 262 p.

14. *Spravochnik vzryvnika*. Pod red. B.N. Kutuzova, V.M. Starobogatova, I.E. Erofeeva (Blaster's reference guide Kutuzov B.N., Starobogatov V.M., Erofeev I.E. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1988, 511 p.

15. Mukhamediev Sh.A. *Fizika Zemli*. 2010, no 11, pp. 49–60.