УДК 622.831

А.А.КОЗЫРЕВ, *д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, kozar@goi.kolasc.net.ru*
В.И.ПАНИН, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, (81555)79-301*
Ю.В.ФЕДОТОВА, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, (81555)74-523*
Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской обл.

A.A.KOZYREV, *Dr. in eng.sc., deputy director in the field of scientific researches, kozar@goi.kolasc.net.ru*
V.I.PANIN, *PhD in eng. sc., leading research assistant, (81555)79-301*
Yu.V.FEDOTOVA, *PhD in eng. sc., senior research assistant, (81555)74-523*
Mining Institute of the Kola Research Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Интенсивная разработка крупных месторождений в высоконапряженных скальных массивах приводит к резкой активизации техногенных процессов в недрах и на поверхности, что вызывает возрастание сейсмической активности в районе ведения горных работ и опасность возникновения горных ударов и техногенных землетрясений. Поскольку надежный пространственно-временной прогноз динамических явлений в рудниках при современном состоянии методики и техники геомеханического эксперимента является проблематичным, следует оценивать риски от этих явлений, размер которых определяет соответствующие профилактические мероприятия.

Ключевые слова: техногенная сейсмичность, прогноз, оценка рисков

SAFETY PROBLEMS OF MINING OPERATIONS IN HIGH-STRESS HARD ROCK MASSIF

Intensive development of large-scale deposits in high-stressed rock masses results in sharp activation of mining-induced processes in the earth depths and the surface thus initiates increasing of seismic activity in the mining area and hazard of rockbursts and mining-induced earthquakes. As reliable spatial-temporal prediction of dynamic events in the mines is problematic in the current state of methodology and geomechanical experiment technique, therefore, it is required to assess risks of these events which scale determines corresponding preventive measures.

Key words: technogenic seismicity, prediction, risk assessment.

В последние годы наиболее актуальной проблемой в крупных горно-добывающих регионах, а также в районах мощного техногенного воздействия иного рода, например при сооружении уникальных гидротехнических или подземных объектов, становится так называемая наведенная (техногенная) сейсмичность, которая существенно повышает опасность горных работ и приводит к значительным материальным потерям [6, 8-11]. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что горно-тектонические удары проявляются на всех месторождениях, где выявлены аномально высокие естественные напряжения в массиве, вне зависимости от типа тектонической структуры (стабильные щиты, подвижные платформы, мобильные горно-складчатые области). Техногенные же землетрясения проявляются, как правило, на месторождениях, где в отработку вовлечены большие площади, где извлекаются и перемещаются значительные объемы горной массы.

Техногенные землетрясения аналогичны природным, отличаются только режимом выделяющейся сейсмической энергии под влиянием техногенных факторов. Для них характерны большое количество форшоков (или горных ударов) перед главным толчком (собственно техногенным землетрясением), медленное убывание афтершоков, повышенная балльность за счет неглубокого заложения очага землетрясения. Для формирования очага техногенного землетрясения при ведении горных работ необходимо сочетание ряда условий: прежде всего, высокий уровень горизонтальных тектонических напряжений в массиве пород, определяемый соответствующей тектонофизической обстановкой (наличие зон с большими градиентами скоростей новейших тектонических движений); хрупкие высокопрочные руды и вмещающие породы с тектоническими неоднородностями в пределах зоны разработки, благоприятные геоморфологические условия (гористый рельеф); крупномасштабная разработка (площадь выемки, глубина разработки, объем извлекаемой и перемещаемой горной массы); взрывное воздействие при проходке выработок и отбойке руды. 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 может рассматриваться как дополнительное кратковременное внешнее воздействие на сложную цепь природных взаимосвязанных процессов, которые выступают в роли триггера ранее накопленной упругой энергии, обусловленной высокой напряженностью массива горных пород [7].

В зоне воздействия горных работ формируются значительные по площади выработанные пространства. При этом увеличивается скорость деформирования пород по сравнению с естественной (иногда на порядок и более) и накладываются мощные динамические воздействия от массовых взрывов. Все это приводит к нарушению процесса формирования очага (времени созревания очага), преждевременному инициированию серии более слабых толчков за счет срыва по контактам блоков или же взаимодействия сближенных трещин и разломов.

Задачи рационального природопользования являются сегодня актуальными практически для всех стран мира. Особенно обостряется комплекс проблем, заключающийся в нарушении достигнутых природных равновесий под воздействием техногенных факторов, связанных с влиянием жизнедеятельности человека на геологическую среду. Их влияние носит сложный, комплексный характер, охватывая все компоненты природной среды (недра, поверхностные и подземные воды, почву, рельеф, атмосферу и биоту).

Проблема прогноза и предупреждения техногенной сейсмичности при крупномасштабной разработке месторождений полезных ископаемых остается актуальной для многих горно-добывающих районов мира, в том числе и для России. При этом, несмотря на широкие исследования в этой области и достигнутые успехи, особенно в методике и технике регистрации динамических явлений в рудниках, острота этой проблемы не уменьшается. Особенности это касается сложности разработки удароопасных месторождений.

Между тем при решении проблемы прогноза и предупреждения активизации техногенной сейсмичности часто используют модели и методические подходы, применяемые в сейсмологии, поскольку динамические явления в рудниках и техногенные землетрясения имеют единую физическую природу [2]. В то же время в современной сейсмологии четко обозначился кризис, обусловленный невозможностью краткосрочного прогноза землетрясений.

В области прогноза и предупреждения техногенной сейсмичности накоплено достаточно знаний, чтобы провести их некоторую систематизацию для сугубо практических целей. И при этом следует использовать терминологию, адекватную модели процесса и сложившейся ситуации.

Ранее нами была предложена и обоснована модель формирования и реализации динамических явлений в горно-рудной природно-технической системе [2], которая может быть положена в основу стратегии прогноза и предупреждения геодинамических явлений.

Рудник с вмещающим его участком геологической среды образует сложную нели-

нейную открытую природно-техническую систему (ПТС), эволюция которой осуществляется чередованием стадий адаптаций и бифуркаций. На начальном этапе эволюция идет в устойчивом детерминированном режиме. Параметры этого режима обеспечивают адаптацию ПТС к конкретным горно-геологическим условиям и рассчитываются на стадии проектирования по различным алгоритмам на основе соответствующих моделей геологической среды с учетом современного состояния горной технологии и экономики.

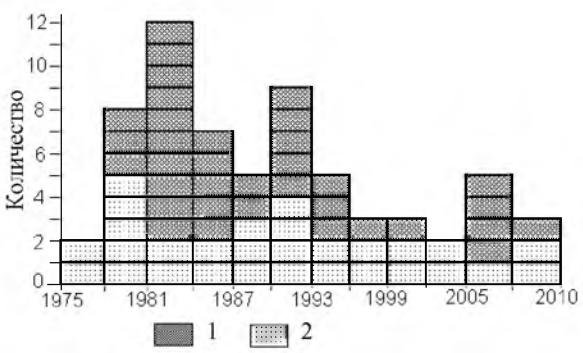
Когда управляющие параметры системы достигают некоторых предельных значений, система переходит в стадию нелинейного развития – стадию неустойчивости, которая завершается бифуркацией, т.е. ветвлением путей эволюции при переходе через некоторое пороговое состояние системы. При этом одна из эволюционных ветвей может реализоваться в виде различного рода катастроф, почему термин «бифуркация» нередко заменяют термином «катастрофа».

Геодинамическая эволюция ПТС «Хибины» за последние 35 лет иллюстрируется данными рисунка, на котором показаны гистограммы микроударов, горных ударов, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений, зарегистрированных на апатитовых рудниках.

Необходимо отметить, что переход системы в фазу нелинейности означает критическое состояние системы, которое в точке бифуркации реализуется через кризис, то есть имеет место нарушение прежнего равновесия и переход системы в новое устойчивое состояние. Таким образом, осуществляется режим самоорганизации геологической среды в ПТС, отражением которого и являются горные удары и техногенные землетрясения.

Данная модель представляется универсальной для всех природных и техноприродных процессов, поэтому она может быть положена в основу стратегии прогноза и профилактики всех природных и техногенных катастроф.

Несмотря на солидный возраст проблемы прогноза и предупреждения техногенной сейсмичности, здесь еще не сформировалась общепризнанная классификация динамических явлений в рудниках, и нередко одинаковые события идентифицируются различными терминами. Наибольшая неопределенность существует между понятиями «горно-тектонический удар» и «техногенное землетрясение». Общепризнанной является единая физическая природа всех динамических явлений в рудниках – от «стреляния» пород на контуре горных выработок до мощных землетрясений, поэтому в большинстве классификаций главным определяющим признаком является энергия динамического события [2], которая определяет риск от этого события.



Техногенная сейсмичность на рудниках ОАО «Апатит»

1 – микроудары и горные удары; 2 – горно-тектонические удары, техногенные землетрясения

По аналогии с основными стадиями возникновения и развития опасных производственных ситуаций [5] в табл.1 приведена классификация динамических явлений на апатитовых рудниках [3], которая может быть полезной для оценки геодинамической обстановки на других удароопасных месторождениях.

На сейсмическую реакцию массива, в пределах которого находится действующий рудник, влияют не только геологическое и тектоническое строение массива, но и технология отработки данного месторождения, количество взрываемой горной массы, количество ВВ, используемого на массовый взрыв, темпы ведения горных работ. Оказывает влияние также и гидрологический режим данного участка.

Как показывает опыт, по причине неоднородности состава и строения горных пород в массиве, неполной геомеханической и гео-

Таблица 1

Классификация геодинамических явлений в рудниках

Наименование геодинамического явления	Этап развития опасной ситуации	Сущность процесса	Уровень геодинамического риска
Шелушение	Угроза	Постепенное разрушение поверхности обнажения породы на отдельные пластинки, из-за отслоения которых места шелушения всегда выглядят «свежими» (не запыленными)	Низкий
Стреляние	«	Отскакивание от поверхности обнажения массива пластин пород различных размеров со звуком, напоминающим выстрел	«
Динамическое заколообразование	«	Образование и отделение заколов вслед за их оборкой в течение длительного времени, сопровождаемое треском и звуками, напоминающими выстрел. Это явление чаще всего происходит по ненарушенному массиву и не связано напрямую с трещиноватостью и слоистостью; образующиеся пластины повторяют по форме контур выработки	«
Микроудар	Инцидент	Мгновенное хрупкое разрушение целика или части массива горных пород с выбросом породы в горные выработки без нарушения технологического процесса. Сопровождается звуком и сотрясением массива с образованием пыли	«
Горный удар	Авария	Внезапное быстропротекающее разрушение предельно напряженной части массива, прилегающего к горной выработке, которое проявляется в виде выброса руды (породы) в подземные выработки с нарушением крепи, смещением машин, механизмов, оборудования и вызывает нарушение технологического процесса. Сопровождается резким звуком, сотрясением массива, образованием пыли и воздушной волной	Средний
Горно-тектонический удар	Катастрофа	Мгновенная подвижка пород по тектоническому нарушению или прорастание крупной трещины в массиве, в том числе с образованием систем оперяющих трещин, сейсмическое воздействие от которых вызывает хрупкое разрушение пород на контуре горных выработок в виде горных ударов, вывалов пород, падения заколов, разрушение целиков и крепи на большой площади или на отдельных удаленных друг от друга участках выработок. Сопровождается сильным сотрясением массива, резким звуком, а иногда образованием пыли и воздушной волны в горных выработках	Высокий
Техногенное землетрясение	«	Мгновенная подвижка пород по тектоническому нарушению или прорастание крупной трещины в массиве геомеханического пространства рудника, в том числе с образованием систем оперяющих трещин. Само явление или его сейсмическое воздействие вызывает хрупкое разрушение пород на контуре горных выработок в виде горных ударов, вывалов пород, падения заколов. Разрушение целиков и крепи, вспучивание почвы на значительных площадях в подземных горных выработках также приводят к повреждениям и разрушениям на земной поверхности. Сопровождается сильным сотрясением массива и поверхности, резким звуком или гулом	«

логической информации, вынужденных (ситуативных) отступлений от проекта горных работ в руднике периодически возникают кризисные ситуации, обусловленные внезапными разрушениями горных выработок, в том числе и в виде динамических явлений в массиве пород. Поскольку все кризисные ситуации развиваются по универсальной модели, то и ликвидацию этих ситуаций следует осуществлять также по типовому алгоритму [4].

В первую очередь осуществляют идентификацию кризисной ситуации (определение

типа разрушения, мощности динамического явления и т.д.) и оценивают риск от этого явления для всего технологического процесса по формуле

$$R = PD,$$

где P – вероятность реализации динамического события или коэффициент геодинамической опасности; D – суммарный ущерб.

Вероятность реализации динамического события оценивают по имеющейся на предприятии соответствующей статистике или по данным геодинамического мониторинга.

Размер риска может варьировать в широких пределах, и уровень его значимости для конкретного предприятия определяется масштабами производства и технико-экономической конъюнктурой. Однако можно сказать определенно, что ценность человеческой жизни имеет не только и не столько денежный эквивалент, поэтому вопросы техники безопасности на любом руднике имеют первостепенное значение.

Если риск оказывается неприемлемым, выявляются причины возникшей ситуации и определяются пути ее ликвидации.

Определенные подходы по оценке рисков имеются в настоящее время в практике работы рудников ОАО «Апатит» при решении проблемы обеспечения устойчивости горных выработок с учетом влияния горно-геологических и геомеханических факторов.

В основу комплексного регионального прогноза критических состояний участков массива пород нами положен принцип выделения пространственно-временны́х областей с повышенной вероятностью ожидания опасных состояний по совокупности однопараметровых критериев. Для анализа выбраны предвестники по нестационарным признакам: изменения фрактального размера пространственного распределения сейсмических событий, концентрационный критерий, изменения угла наклона графика повторяемости, изменения средней длины трещин. По стационарным признакам учитывались границы очистного пространства и тектонические нарушения [1].

Для оценки статистических характеристик предвестниковых параметров по выбранным критериям использовали базы данных автоматизированной системы контроля сейсмичности массива центра геофизического мониторинга ОАО «Апатит». При расчете общей вероятности возникновения кризисной ситуации при одновременном контроле по всем рассмотренным критериям лучший результат выявлен в случае, когда прогноз осуществляется одновременно по комплексу критериев. Увеличение числа используемых критериев позволяет более детально дифференцировать контролируемую область по вероятностям возникновения мощных сейсмических событий.

Анализ результатов мониторинга геодинамического пространства апатитовых рудников показал, что надежный пространственно-временной прогноз отдельных динамических явлений пока является трудноразрешимой задачей, что подтверждается также мировым опытом такого мониторинга. Поэтому при выборе мер по обеспечению устойчивости горных выработок вероятность возникновения отдельного события заменяется коэффициентами опасности или категориями состояний выработок, учитывающими в неявном виде вероятности их разрушения.

Последовательность определения категории состояния выработки на апатитовых рудниках следующая. В соответствии с классификацией руд и пород по прочности и интенсивности трещиноватости [3], определяют категорию устойчивости пород и руд (табл.2). Затем с учетом напряженного состояния массива пород в приконтурной зоне определяют категорию состояния выработки (табл.3).

Таблица 2

Классификация пород и руд апатит-нефелиновых месторождений по устойчивости

Категория	Оценка состояния устойчивости	Категория по прочности	Категория по трещиноватости
1	Устойчивое	I-IV	I-III
2	Среднеустойчивое	I-IV	IV
		V	I-III
3	Слабоустойчивое	V	IV,V
		VI	V

Таблица 3

Классификация категорий состояния горных выработок

Категории состояния выработок	Категория по устойчивости			Формы проявления горного давления
	в устойчивых породах (1к)	в среднеустойчивых породах (2к)	в слабоустойчивых породах (3к)	
А	$\sigma_д \le 0{,}3\sigma_с$	–	–	Выработка сохраняет устойчивость (разрушения и отслоения не наблюдаются)
Б	–	$\sigma_д \le 0{,}3\sigma_с$ в породах IV, V категорий по трещиноватости		Вывалы по трещинам
В	$0{,}3\sigma_с < \sigma_д \le 0{,}5\sigma_с$ в породах I-III категорий по трещиноватости		–	Постепенное хрупкое разрушение пород на контуре в виде шелушения, незначительного динамического заколообразования и плитчатого расслоения пород, отслоения по трещинам
Г	$0{,}5\sigma_с < \sigma_д \le 0{,}7\sigma_с$ в породах I-III категорий трещиноватости		–	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование
Д или «Опасно»	$\sigma_д > 0{,}7\sigma_с$ в породах I-III категорий трещиноватости		–	Стреляние и интенсивное динамическое заколообразование, возможны микроудары и горные удары

Изменение категории состояния выработки от А до Д характеризуется увеличением объемов разрушения и интенсивности их во времени, т.е. фактически категория характеризует повышение вероятности разрушения (категория А соответствует квазинулевой вероятности, категория Д – практически 100-процентной вероятности).

В качестве оценки ожидаемого ущерба от произошедшего разрушения все выработки разделены на три класса по степени важности для нормальной работы рудника:

1) выработки подэтажные, вспомогательные и другие, срок службы которых не превышает одного года;

2) выработки концентрационных горизонтов и горизонтов откатки, используемые более одного года;

3) капитальные и камерные выработки, действующие в течение срока отработки горизонта или всего рудника.

Очевидно, что в зависимости от класса выработок размер ожидаемого ущерба возрастает от класса 1 к классу 3. Действительно, выход из строя выработок класса 1 приводит к остановке или ликвидации последствий в пределах этой выработки или, максимум, отдельного участка рудника. При выходе из строя выработок класса 2 останавливается добычной горизонт в целом. А при выходе из строя капитальной выработки может остановиться весь рудник. Поэтому на апатитовых рудниках для выработок каждого класса установлены необходимые мероприятия и типы крепления в зависимости от их прогнозируемого состояния.

Таким образом, динамические проявления горного давления различной интенсивности являются реальностью при ведении горных работ на удароопасных месторождениях. Оценка рисков от динамических проявлений позволяет более обоснованно подходить к решению задач по их прогнозу и возможной профилактике, поскольку они являются дорогостоящими мероприятиями.

Дальнейшая работа должна быть направлена на выявление закономерностей изменения категорий состояния выработок при дополнительном динамическом воздействии от взрывных работ и сейсмических событий в зависимости от их энергии и расстояния до рассматриваемой выработки.

Исследования проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 09-05-00007.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выделение зон повышенной сейсмоопасности по комплексу прогностических критериев / А.А.Козырев, Ю.В.Федотова и др. // Горный журнал. 2010. № 9. С.44-47.

2. Сейсмичность при горных работах / Под ред. Н.Н.Мельникова; КНЦ РАН. Апатиты, 2002. 325 с.

3. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатитонефелиновые месторождения. Открытое акционерное общество «Апатит») / КНЦ РАН, Апатиты, 2002. 97 с.

4. Управление геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах //

А.А.Козырев, В.И.Панин, В.А.Мальцев, Ю.В.Федотова // Оценка и управление природными рисками, «Риск-2006». М.: Изд-во РУДН, 2006. С.306-308.

5. *Яковлев В.Л.* Развитие методологии формирования информационных потоков в системе управления промышленной безопасностью горнодобывающих предприятий / В.Л.Яковлев, В.Л.Могилат, В.П.Лобко // Горн. информ.-аналит. бюлл. 2006. № 1. С.112-118.

6. *Johnston I.C.* Rockbursts from a global perspective // Gerlands Beitrage zur Geophysik. Band 98. Heft 6. Leipzig. 1989. P.474-490.

7. *Kozyrev A.A.* The geodynamic evolution of the geological medium in the area of large-scale mining. New challenges and visions for mining / A.A.Kozyrev, V.I.Panin, Yu.V.Fedotova // 21-st World Mining Congress. Poland. Krakow – Katowice – Sosnowiec. Vol. Underground Mine Environment. Poland: Agencja Reklamowo-Wydawnicza «Ostoja». 2008. P.79-88.

8. *Knoll P.* The Fluid-induced Tectonic Rock Burst of March 13, 1989 in the «Werra» Rotash Mining District of the GDR (first results) // Gerlands Beitrage zur Geophysik. Leipzig. 1990. 99(6). P.239-245.

9. Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines: Proceedings. 9-11 March, 2005, Australia / Editors Yves Potvin and Martin Hudyma. Australian Centre for Geomechanics. 716 p.

10. *Swanson P.L.* The Magnitude 5.3 Seismic Event and Collapse of the Solvey Trona Mine: Analysis of Pillar / P.L.Swanson, F.M.Boler // Floor Failure Stability. Open File Report 86-95, U.S. Department of the Interior Bureau of Mines. 82 p.

11. *Wong I.G.* Mining-induced earthquakes in the Book Cliffs Eastern Wasatch Plateau, Utah, USA // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1985. N 22. P.263-270.

REFERENCES

1. Extraction of zones with increased seismic hazard via the complex of prognostic criteria / A.A.Kozyrev, Yu.V.Fedotova et all // Gorny zhurnal. Moscow: «Ore and Metals» publishing house. 2010. N 9. P.44-47.

2. Seismicity in mining operations / Editor N.N. Melnikov; KSC RAS. Apatity, 2002. 325 p.

3. Guidelines on safe mining operations on prone-to-rockbursting and rockbursting-hazardous deposits (Khibiny apatit-nepheline deposits. Joint Stock company «Apatit») / KSC RAS. Apatity, 2002. 97 p.

4. *Kozyrev A.A., Panin V.I., Maltsev V.A., Fedotova Yu.V.* Geodynamical risks management in mining operations in high stress rock massif // Natural risks assessment and management, «Risk-2006». Moscow: RUNF. 2006. P.306-308.

5. *Yakovlev V.L., Mogilat V.L., Lobko V.P.* Development of information flow formation methodology within the system of industrial safety management in mining // Mining informational-analytical bulletin. 2006. N 1. P.112-118.

6. *Johnston I.C.* Rockbursts from a global perspective // Gerlands Beitrage zur Geophysik. Band 98. Heft 6. Leipzig. 1989. P.474-490.

7. *Kozyrev A.A., Panin V.I., Fedotova Yu.V.* The geodynamic evolution of the geological medium in the area of large-scale mining. New challenges and visions for mining // 21-st World Mining Congress. Poland – Krakow – Katowice – Sosnowiec. Vol. Underground Mine Environment. Poland: Agencja Reklamowo-Wydawnicza «Ostoja». 2008. P.79-88.

8. *Knoll P.* The Fluid-induced Tectonic Rock Burst of March 13, 1989 in the «Werra» Rotash Mining District of the GDR (first results) // Gerlands Beitrage zur Geophysik. Leipzig. 1990. 99(6). P.239-245.

9. Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines: Proceedings. 9-11 March, 2005, Australia / Editors Yves Potvin and Martin Hudyma. Australian Centre for Geomechanics. 716 p.

10. *Swanson P.L., Boler F.M.* The Magnitude 5.3 Seismic Event and Collapse of the Solvey Trona Mine: Analysis of Pillar/Floor Failure Stability. Open File Report 86-95, U.S. Department of the Interior Bureau of Mines. 82 p.

11. *Wong I.G.* Mining-induced earthquakes in the Book Cliffs Eastern Wasatch Plateau, Utah, USA // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1985. N 22. P.263-270.