

БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ – НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Н.Н. Мельников, А.А. Козырев, С.В. Лукичѳ

Горный институт КИЦ РАН

Аннотация

Современное состояние горнодобывающей отрасли характеризуется тенденцией к быстрому увеличению глубины горных работ, что приводит к увеличению себестоимости добычи полезных ископаемых и отрицательно влияет на безопасность горных работ.

Снизить себестоимость открытых горных работ можно за счет укрупнения бортов карьеров при выполнении ряда условий, невыполнение которых может приводить к серьезным последствиям: гибели людей, поломке техники, остановке или снижении производительности предприятия.

Необходимость учета структурных особенностей массива, его напряженного состояния, влияния сезонных осадков на устойчивость откосов делает задачу расчета оптимальных углов наклона борта карьера и откосов уступов очень непростой. Подобного рода задача была решена применительно к Ковдорскому ГОКу.

Радикальное решение проблемы безопасности – переход на малолюдные, а в перспективе и безлюдные технологии добычи. Такие технологии являются перспективными не только с точки зрения безопасности горняков, но и снижения издержек, связанных с созданием комфортных и безопасных условий труда.

Существует опыт применения полностью автономных погрузочно-доставочных машин (ПДМ) на рудниках компании LKAB (Швеция) и Inca (Канада), а также рудниках EITeniente (Чили) и Jundee (Австралия).

В последние годы активно ведутся работы по автоматизации технологических процессов при ведении открытых горных работ.

Ключевые слова:

горные работы, карьер, подземный рудник, борт карьера, угол откоса, берма, коэффициент вскрыши, напряженно-деформированное состояние, горный удар, техногенное землетрясение, малолюдная технология, дистанционное управление, автономный транспорт.



Современное состояние горнодобывающей отрасли, как в нашей стране, так и за рубежом характеризуется тенденцией к быстрому увеличению глубины горных работ, что увеличивает себестоимость добычи полезных ископаемых и отрицательно влияет на безопасность этих работ. В качестве примера можно привести список наиболее

глубоких карьеров в мире (табл.). Значительно большей глубины достигли подземные горные работы – максимальная глубина южноафриканских рудников по добыче золота достигает 3800 м.

Увеличение глубины ведения горных работ усложняет горно-геологические условия разработки месторождений, выражающихся в следующем:

1) с увеличением глубины, как правило, падает содержание полезных ископаемых в руде и уменьшается мощность рудных тел, что хорошо прослеживается на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях и Ковдорском месторождении бадделеит-apatит-магнетитовых руд, а также большинстве железорудных месторождений;

2) увеличение глубины карьеров приводит к росту коэффициента вскрыши и увеличению расстояния транспортирования горной массы как для открытых, так и подземных горных работ;

3) увеличение глубины карьеров ухудшает их проветривания, а глубины и протяженности подземных горных выработок – к росту затрат на вентиляцию. Следует сказать, что применительно к подземным горным работам вентиляторы – основные потребители электроэнергии. Попытки же искусственного проветривания карьеров показали их бесперспективность;

4) увеличение глубины ведения горных работ приводит к необходимости работы в условиях высокого горного давления, что чревато его проявлениями в форме горных ударов и техногенных землетрясений.

Таблица

Глубокие карьеры

Название	Место-положение	Глубина, м	Размеры, км×км	Добываемое полезное ископаемое
Бингем Каньон (Kennecott Bingham Canyon Mine)	США	1200	4×3.8	Медь, молибден, золото
Чукикамата (Chuquicamata)	Чили	850	4.3×3	Медь, золото, серебро, рений, селен
Палабора (Palabora)	ЮАР	700	1.9×1.7	Медь
Удачный	Россия	640	1.7×1.3	Алмазы
Эскондида (Escondida)	Чили	620	3.8×2.7	Медь, золото, серебро
Мурунтау	Узбекистан	600	3.5×2.5	Золото
Сибайский карьер	Россия	600	2.0×2.0	Медь, цинк, сера
Бату-Худжау (Batu Hijau)	Индонезия	550	2.5×2.2	Золото, медь
Эскондида Нотр (Escondida Notre)	Чили	500	1.6×1.4	Медь, золото, серебро
Ковдорский ГОК	Россия	500	2.3×1.6	Железная руда, апатит, бадделейт

Всё вышесказанное неизбежно увеличивает себестоимость добычи руды, несмотря на использование всё более мощной и производительной техники, что подтверждается данными многолетнего мониторинга экономических показателей деятельности горнодобывающих предприятий Кольского горнопромышленного комплекса (ГПК). На примере нескольких горнодобывающих предприятий ГПК видно, что наибольший рост себестоимости добычи руды наблюдается для открытых горных работ, где основное удорожание идет за счет увеличения объема выемки и транспортирования вскрышных пород.

Снизить коэффициент вскрыши и увеличить экономически допустимую глубину карьера можно за счет увеличения углов наклона его бортов. По нашим оценкам, в зависимости от свойств и состояния массива горных пород (ГП) возможно укрупнение бортов на большинстве действующих карьеров на 5–10°. Но такое достаточно радикальное укрупнение возможно при выполнении следующих условий:

1) детальное изучение геолого-структурного строения месторождения (не только рудных тел, но и вмещающего массива) для получения достоверной информации о прочностных характеристиках массива ГП, наличии и ориентации систем трещин и зон тектонической нарушенности;

2) переход на сдвоенные (как минимум) уступы с близкими к вертикальным углами наклона откосов, что позволяет разместить на борту предохранительные и транспортные бермы необходимой ширины;

3) использование технологии «щадящего» взрывания на конечном контуре карьера, что в минимальной степени нарушает приконтурный массив, сохраняя его несущие свойства;

4) использование в случае необходимости оградительных сеток для предотвращения падения камней в местах работы людей и техники;

5) создание системы мониторинга состояния бортов карьера и приконтурного массива ГП, необходимой для обнаружения зон разрушения массива и выявления опасных деформаций уступов.

Гибель людей, поломка техники, остановка или снижение производительности предприятия – всё это следствие невыполнения этих условий. В качестве такого примера можно привести частичное обрушение борта на карьере «Бингем каньон» (США) в апреле 2013 г., где объем обрушившейся породы составил 165 млн т. Для сравнения: производительность карьера

по горной массе составляла 50 млн т/год. Следует отметить, что система мониторинга состояния бортов, действовавшая на карьере, позволила избежать человеческих жертв и до минимума свести потери техники. Потери устойчивости уступов наблюдались и на карьерах нашего региона, но в значительно меньших масштабах.

Особенность ряда горнодобывающих регионов, куда относятся и месторождения Кольского п-ова, – наличие высоких горизонтальных тектонических напряжений, которые способствуют появлению техногенной сейсмичности уже на малых глубинах (200–300 м) [1]. Это приводит к тому, что динамические проявления горного давления возможны на относительно небольших глубинах и не только на подземных, но и на открытых горных работах. Выполненные в ГоИ КНЦ РАН исследования показали, что горизонтальные напряжения в зависимости от ориентации карьера в их поле могут как повышать, так и снижать риск формирования зон разрушения в прибортовом массиве [2]. Таким образом, необходимость учета структурных особенностей массива, его напряженного состояния, влияние сезонных осадков на устойчивость откосов делает задачу расчета оптимальных углов наклона борта карьера и откосов уступов очень непростой.

Подобного рода задача была решена применительно к Ковдорскому ГОКу. В рамках ее решения совместными усилиями ученых и производственников было сделано следующее:

- силами Геологического института КНЦ РАН, Мурманской геологоразведочной экспедиции и Горного института КНЦ РАН выполнено геолого-структурное картирование месторождения. В результате было выделено 8 секторов в границах карьера, для которых определены предельно допустимые углы наклона борта карьера в верхней (более нарушенной) и нижней (менее нарушенной) зоне;

- разработана конструкция борта карьера со сдвоенными уступами и вертикальными углами наклона их откосов (рис. 1), обеспечивающая формирование борта с заданными углами наклона;



Рис. 1. Реализация конструкции борта со сдвоенными уступами и технологии «щадящего взрывания» на карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа

- разработана технология «щадящего» взрывания, позволившая уменьшить законтурные разрушения до расстояния в 1 м [3];
- создана система мониторинга состояния бортов карьера и приконтурного массива, обеспечивающая контроль наиболее опасного по критерию устойчивости борта карьера. В основу системы мониторинга положена информация, получаемая в результате обработки микросейсмических данных, что определяет не только местоположении зон разрушения, но и размеры единичных трещин, формируемых в массиве;
- силами специалистов ГОКа и специализированных организаций ведутся экспериментальные работы по формированию сеточного ограждения склонных к осыпанию участков уступов.

Учет геомеханического состояния массива – важное условие обеспечения безопасности и стабильности работы подземных рудников. Неучет геомеханических особенностей эксплуатации месторождений может приводить к разрушениям различного масштаба, гибели людей и поломкам техники. В качестве примера можно привести затопление рудника № 1 ОАО «Уралкалий», в результате которого были потеряны не только запасы полезного ископаемого, но и вследствие провалов поверхности над затопленными выработками возникла опасность разрушения зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения.

Примеры локального разрушения выработок в скальных породах, вызванного напряжениями, действующими в массиве, приведены на рис. 2. Опасность такого проявления заключается в отделении от массива ГП кусков значительной массы, достаточной для серьезного травмирования людей и повреждения горной техники.



Рис. 2. Разрушение выработок под действие высоких напряжений в массиве ГП

Еще более опасными являются крупномасштабные проявления горного давления в форме техногенных землетрясений. Таким землетрясением в августе 1999 г. были разрушены подземные горные выработки рудника «Умбозеро» на протяжении 1.5 км (рис. 3), в результате техногенного землетрясения в 1989 г. на Кировском руднике ОАО «Апатит» нарушены подземные коммуникации.

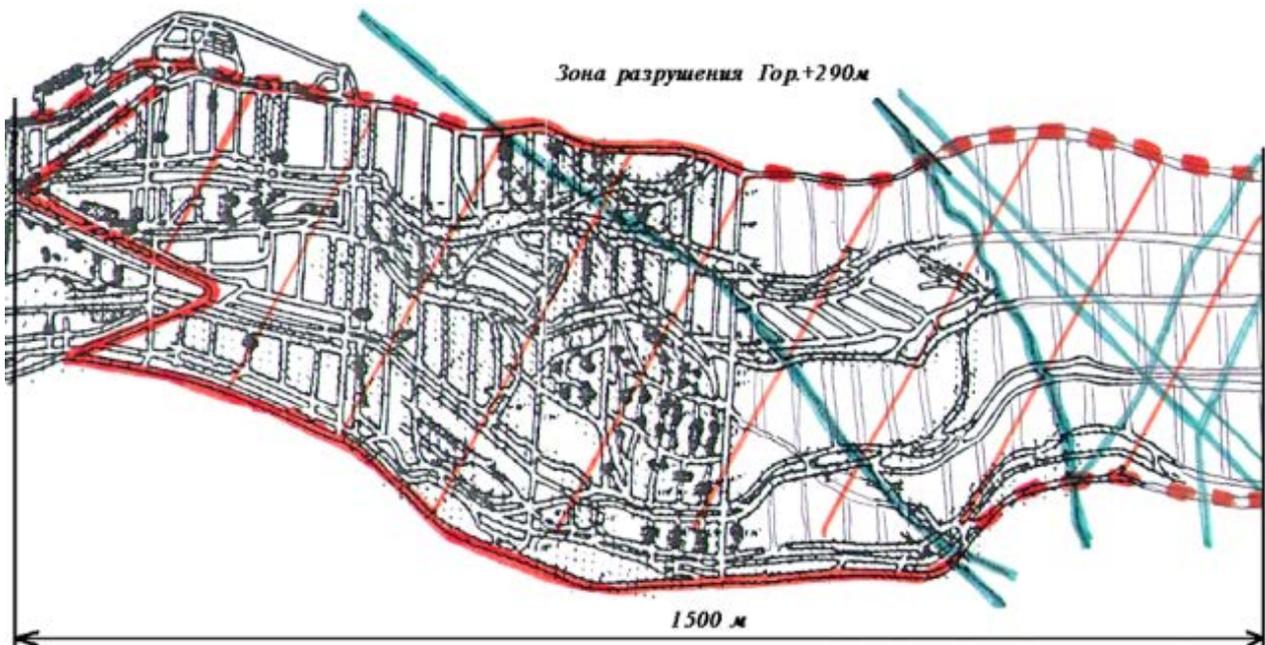


Рис. 3. Разрушение горных выработок рудника «Умбозеро» в результате техногенного землетрясения 17.08.1999 г.

Чтобы избежать потерь, связанных с проявлением горного давления, необходимо уже на стадии проектирования учитывать влияния поля напряжений на конструктивные элементы системы разработки и закладывать в проект соответствующие решения. Но массив ГП – очень неоднородная среда, включающая в себя породы с различными упруго-прочностными характеристиками, тектонические разломы с приуроченными к ним зонами разрушения, системы трещин с отличающимися параметрами. Подземные горные выработки меняют изначально существовавшее поле напряжений, являясь одновременно концентраторами напряжений, что сильно усложняет решение задачи прогноза и обеспечения геомеханической безопасности горных работ. В целом же горные работы выводят массив из состояния равновесия, формируя крайне неоднородное поле напряжений, что и становится основной причиной горных ударов и техногенных землетрясений.

Но горные работы развиваются в пространстве и времени, поэтому необходимо по возможности максимально оперативно учитывать их влияние на изменение геомеханической ситуацию в окружающем массиве. Сделать это возможно, используя средства численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС). Проиллюстрировать это можно на примере работы программного комплекса *Sigma GT*, разработанного в Горном институте и установленного в службах

прогноза и предупреждения горных ударов подземных рудников ОАО «Апатит» [4]. Данные прогнозных расчетов НДС, полученные для моделей месторождения, позволяют в режиме планирования определять зоны концентрации напряжений и выбирать оптимальные по геомеханическим условиям параметры горных работ. На основании данных моделирования можно выбирать как региональные, так и локальные мероприятия по разгрузке участков массива от высоких напряжений, принимать решения о креплении выработок.

Однако в силу неоднородности массива ГП, сложной пространственной конфигурации горных выработок и ограниченных возможностей вычислительной техники невозможно детально, с высокой степенью соответствия природно-техническим условиям смоделировать и спрогнозировать НДС массива и его реакцию на критические значения. Поэтому важная часть мероприятий по обеспечению геомеханической безопасности подземных горных работ – инструментальная оценка состояния массива. И основным методом, позволяющим контролировать микроразрушения массива под действием поля напряжений, является сейсмомониторинг. Исторически на подземных работах он появился раньше, чем на открытых, и на сегодня достаточно широко используется на горнодобывающих предприятиях, отрабатывающих удароопасные месторождения.

Подобная система совместными усилиями Горного института и ОАО «Апатит» была создана для обеспечения геомеханической безопасности при ведении подземных горных работ на Кировском и Расвумчоррском рудниках. Сейсмоприемники – важная часть системы, от количества и местоположения которых зависит точность определения места формирования и энергии сейсмического события. При анализе результатов сейсмомониторинга за длительный период времени выделено три типа зон сейсмической активности (растущая, устойчивая, затухающая), указывающих на высокую или низкую вероятность реализации масштабного разрушения.

Сейсмомониторинг может дать достаточно точный прогноз по месту возможного события, но он не может дать точного прогноза по времени этого события. Для повышения достоверности прогноза по времени необходимо привлечение других методов. В качестве наиболее перспективного можно назвать мониторинг деформаций массива. Подобная система в виде деформационно-наклономерного комплекса развернута на Кировском руднике, и результаты ее работы можно проиллюстрировать рис. 4, из которого видно, что техногенному землетрясению на Кировском руднике в октябре 2010 г. предшествовало резкое увеличение скорости деформаций.

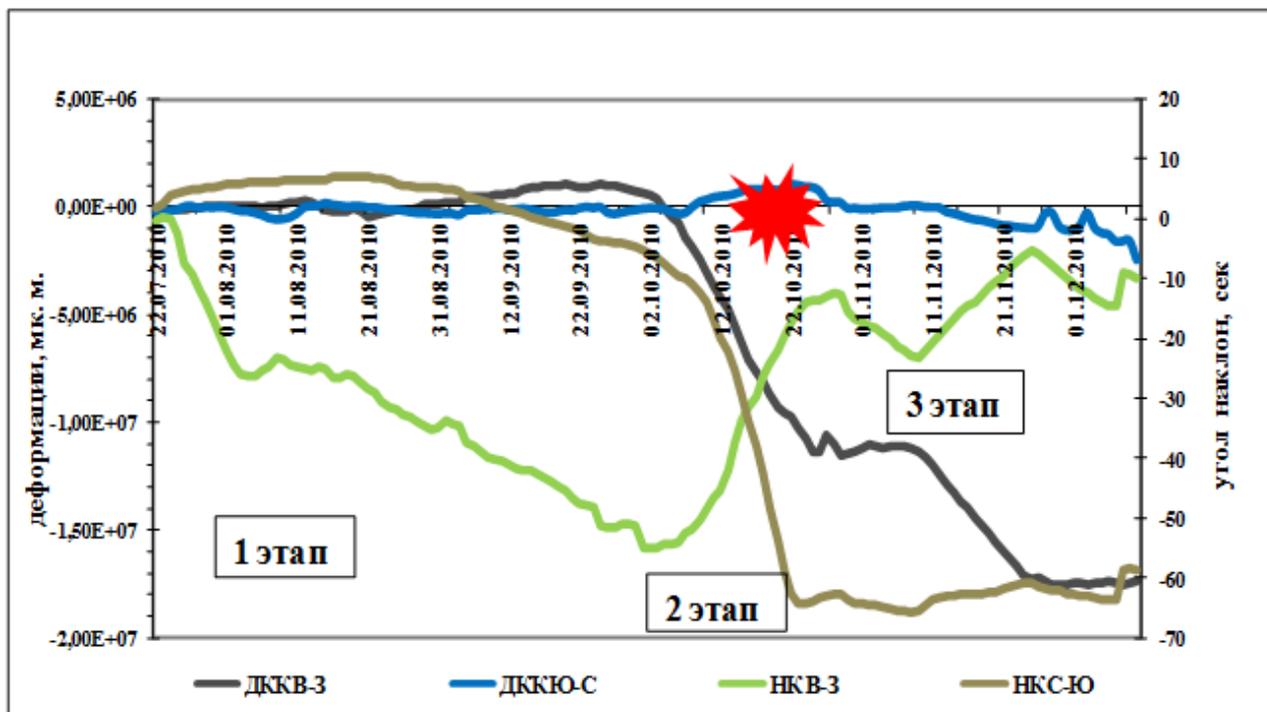


Рис. 4. Данные деформационно-наклономерного комплекса в период подготовки и реализации техногенного землетрясения на Кировском руднике 21.10.2010

Для изучения неоднородностей и напряженного состояния отдельных участков массива в природных условиях могут использоваться методы сейсмической томографии, а также локальные методы контроля (телевизионного, ультразвукового разрушения скважин).

Таким образом, на сегодня существуют достаточно развитые методы выявления зон повышенной опасности, где возможны динамические проявления горного давления. Поэтому усилия исследователей направлены на повышение точности прогноза событий по времени. По мнению многих исследователей, в том числе и Горного института, такой прогноз может быть получен на основе комплексного критерия, учитывающего различные формы проявления НДС массива.

Важная задача в этом плане – визуализация и обработка результатов моделирования НДС и данных различных систем мониторинга с привязкой их к моделям геологической среды и выработок. Такая задача в настоящее время решается для Приаргунского производственного горно-химического объединения силами Горного института и ряда научных организаций страны. В основу компьютерной технологии анализа результатов мониторинга положена программа MINEFRAME, созданная в институте [5]. Планируется, что результаты мониторинга и расчета НДС массива наряду с моделями пройденных и проектных выработок будут являться основой планирования горных работ. Все работы будут выполняться в единой моделирующей среде, обеспечивающей комплексное решение геологических, маркшейдерских и технологических задач.

Несмотря на совершенствование горной технологии и быстрое развитие средств оценки геомеханического состояния массива, остается вероятность неконтролируемого развития катастрофических событий. Радикальное решение проблемы – переход на малолюдные, а в перспективе и безлюдные технологии добычи. Переход к таким технологиям является перспективным не только с точки зрения безопасности горняков, но и снижения издержек, связанных с созданием комфортных и безопасных условий труда.

Существенной проблемой глубоких карьеров является их проветривание, что нередко приводит к простоям погрузочной и транспортной техники. Вывод людей из карьера или снижение до минимума времени их пребывания там позволит избежать этих потерь. Необходимость работы вблизи высоких откосов уступов повышает вероятность падения камней с большой кинетической энергией. Для снижения такой вероятности приходится идти на большие издержки, связанные с увеличением ширины берм или использованием сеточных завес. Вывод горняков из этой зоны исключит возможность их травмирования.

Большой статьей расходов при ведении подземных горных работ становится проветривание, обеспечивающее доставку к рабочим местам свежего воздуха и снижения концентрации вредных веществ. Вывод людей на поверхность и переход на электрические машины существенно сократит эти затраты. Падение крупных кусков ГП из кровли и стенок выработок представляет серьезную угрозу при ведении подземных горных работ. Для снижения вероятности травмирования горняков приходится идти на закрепление опасных по заколообразованию поверхностей. Вывод людей из таких зон серьезно снизит или исключит затраты на крепление выработок.

Исторически первыми за решение проблемы автоматизации технологических процессов взялись подземщики. На первом этапе осуществлялся переход на дистанционное управление, которое позволяло при выполнении всех тех же операций на выносном пульте управления обеспечивать большую безопасность оператора. С развитием вычислительной техники и средств связи появилась возможность большую часть операций выполнять в автоматизированном режиме без участия человека. Если говорить о ПДМ, то, в первую очередь, это такие операции, как движение машины по заданной траектории и разгрузка. Уже это давало возможность одному оператору управлять двумя и тремя машинами, оставив за ним наиболее сложную операцию, связанную с погрузкой. Существует опыт применения полностью автономных ПДМ на рудниках компании LKAB (Швеция) и Inca (Канада), а также рудниках ElTeniente (Чили) и Jundee (Австралия).

Лидеры в производстве таких роботизированных машин компании: SandvikTamrock (Финляндия), AtlasCopco (Швеция), Caterpillar (США), Hitachi (Япония). Некоторые модели буровых станков фирм SandvikTamrock и AtlasCopco обеспечивают дистанционное управление как процессом бурения, так и перемещения установок при нахождении оператора на большом расстоянии (в том числе и на поверхности). Подобная технология работы реализована на рудниках LKABKiruna и Maimberget (Швеция) [6].

Крупнейший в мире проект по автоматизации подземных горных работ реализуется на алмазном руднике Аргайл компании RioTinto в Западной Австралии [7]. В основе автоматизированной системы лежит разработка фирмы Sandvik, позволяющая дистанционно с поверхности управлять 11 электропогрузчиками LH514 и 2 дизельными погрузчиками LH410. Предполагается, что эти нововведения повысят производительность рудника до 9 млн т/год.

В целом же переход на автоматизированное управление горной техникой по оценкам зарубежных специалистов повышает ее производительность в среднем на 20% при некотором снижении эксплуатационных затрат за счет увеличения ходимости шин и ресурса двигателя. Существенный фактор – увеличение времени производительной работы оператора из-за отсутствия необходимости спуска в шахту и подъема на поверхность.

В последние годы активно ведутся работы по автоматизации технологических процессов при ведении открытых горных работ. Наиболее интересными представляются работы, связанные с дистанционным, а затем и автоматизированным управлением карьерными самосвалами [8]. Лидером в этой области является компания Модулар, участвующая в стратегическом проекте, по которому впервые в мире осуществляется развертывание системы безоператорных перевозок. Согласно соглашению между компаниями Komatsu (мировым лидером в области создания роботизированных самосвалов) и RioTinto 150 автономных (работающих без водителей) самосвалов будут введены в эксплуатацию на руднике Yandicoogina в Западной Австралии к концу 2015 г. Рудник получит новый парк автономных самосвалов 930E-B, а также испытательный парк, который будет перебазирован с рудника West Angelas компании RioTinto, где он успешно эксплуатировался с декабря 2008 г. в рамках программы «Рудник будущего» (Mine of the Future™).

В сентябре 2012 года японская компания Hitachi также объявила о планах по разработке к 2017 году системы автономных грузоперевозок полного технологического цикла на основе карьерных самосвалов Hitachi с электроприводом переменного тока.

Еще один ведущий производитель карьерной техники – компания Caterpillar – в настоящее время ведет активные работы по созданию безлюдной системы грузоперевозок с планами запуска первых демонстрационных образцов в 2015 году. Следует сказать, что компания Caterpillar проводит также очень перспективные с точки зрения снижения затрат на топливо работы по переводу дизельных двигателей на природный сжиженный газ, продукты сгорания которого к тому же в меньшей степени, чем дизельного топлива, загрязняют атмосферу.

Компанией «ВИСТ Групп» (Россия) совместно с ОАО «Белорусский автомобильный завод» был разработан и представлен в апреле 2010 года дистанционно-управляемый с рабочего места оператора карьерный самосвал БелАЗ-75137 грузоподъемностью 130 тонн с электроприводом постоянного тока [9]. Рабочее место оператора оснащено такими же органами управления, как в кабине серийного самосвала. На дисплеях отображается дорожная обстановка в реальном времени. Программное обеспечение бортового контроллера и контроллера рабочего места оператора реализует алгоритм дистанционного управления самосвалом путем передачи команд управления по каналу беспроводной связи.

Для повышения безопасности управления предусмотрена система аварийной остановки, которая дистанционно обеспечивает принудительную остановку самосвала при возникновении нештатных ситуаций и автоматическую остановку в движении при пропадании управляющего канала радиосвязи, зависании бортового контроллера и прочих серьезных неисправностях.

Основное отличие роботизированного самосвала БелАЗ-75131 от самосвала с дистанционным управлением – возможность его работы в автономном режиме под управлением бортового компьютера с более совершенной системой видеонаблюдения и предотвращения столкновений. Оператор, находящийся в удаленном рабочем месте, может при необходимости переключаться с автономного режима на ручное управление или программно изменить маршрут движения самосвала.

По словам создателей системы, следующим шагом к автоматизации и повышению производительности горных работ должны стать роботизированные системы управления горнотранспортным комплексом, включающие в себя совместную работу автономной погрузочной техники (экскаваторы, погрузчики), а также другого технологического транспорта и оборудования (бульдозеры, буровые станки и грейдеры). Это в целом отражает мировую тенденцию развития систем автоматизированного управления технологическими процессами, связанными со взрывной подготовкой, погрузкой, доставкой и транспортированием горной массы.

Заключение

Затронутые в статье проблемы и способы их решения не являются чем-то абсолютно новым. Ученые и производственники шли к их решению не один десяток лет. И на сегодня в мире существует научная и техническая база, позволяющая не только оптимизировать параметры горной технологии на основе анализа огромного объема информации о геологии месторождения и геомеханическом состоянии природно-технической системы, но и, переходя на комплексную автоматизацию технологических процессов, одновременно решать две задачи – повышение безопасности и производительности труда горняков. Решение этих задач, в свою очередь, предполагает высокую технологическую культуру, обеспечивающую точное выполнение проектных решений и плановых заданий, а также грамотное использование горной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмичность при горных работах / А.А. Козырев [и др.]. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. 325 с. 2. Исследование напряженно-деформированного состояния массива пород численными методами на основе данных натурных измерений в окрестности крупной карьерной выемки / А.А. Козырев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 11. С. 78–89. 3. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров / В.А. Фокин [и др.]. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2008. 224 с. 4. Козырев А.А., Семенова И.Э., Аветисян И.М., Геомеханическая модель Хибинского массива как основа прогноза напряженно-деформированного состояния при отработке запасов действующих и перспективных апатитовых месторождений. Труды Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», т.1 / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, И.М. Аветисян. Новосибирск, 2011. С. 362–367. 5. Лукичев С.В. Организация работы геолого-маркшейдерской и технологической служб подземного рудника в системе MINEFRAME / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, А.В. Родина // Горный информационно-аналитический бюллетень № 3. Москва, 2010. С. 381–389. 6. Интеллектуализация горных машин – миф или реальность? Режим доступа: http://www.rudana.in.ua/showanalit_12_lang.htm. 7. Истории из деятельности SANDVIKMINING по всему миру. Режим доступа: <http://www.minestories.com/ru>. 8. Решетняк С.П. Перспективные варианты развития технологического оборудования горного производства. Режим доступа: <http://miningworld-russia.primexpo.ru/media/47/presentation/reshetnyak.pdf>. 9. Клебанов Д.А. Принципы построения системы дистанционного и автономного управления карьерным самосвалом / Д.А. Клебанов, И.В. Кузнецов, Н.В. Бигель. Режим доступа: www.vistgroup.ru/pressroom/7/101/.

Сведения об авторах

Мельников Николай Николаевич – академик РАН, директор института;

e-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Козырев Анатолий Александрович – д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе;

e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Лукичев Сергей Вячеславович – д.т.н., зам. директора по научной работе;

e-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru