

УДК 622.012:004.9:519.67

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ — ПЕРВЫЙ ШАГ К СОЗДАНИЮ «УМНОГО» ДОБЫЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА



С. В. ЛУКИЧЕВ,
врио директора, д-р техн. наук,
lu24@goi.kolasc.net.ru



О. В. НАГОВИЦЫН,
зав. лабораторией,
канд. техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия



Е. А. ИЛЬИН,
начальник управления
обеспечения горных работ
ЦНИП ПАО «ППГХО»,
Краснокаменск, Россия



Р. С. РУДИН,
руководитель направления
ИТ-проектов
АО «Атомредметзолото»,
Москва, Россия

Введение

Положительный опыт (к сожалению, на сегодня в основном зарубежный) использования дистанционно управляемых и роботизированных горных машин создает хорошие предпосылки для разработки открытой и подземной горной технологии, основанной на реализации автоматизированных технологических процессов. А с учетом того, что эффективность и безопасность горных работ основывается на информации о пространственном распределении запасов полезного ископаемого (ПИ), геомеханическом состоянии массива горных пород (ГП), геометрии и местоположении выработок, технических характеристиках горных машин и оборудования, цифровые технологии играют системообразующую роль, формируя виртуальную среду функционирования объектов горной технологии [1–4].

Традиционные этапы внедрения цифровых технологий

Все горнодобывающие предприятия, занимающиеся внедрением цифровых технологий, проходят одинаковые этапы работ и сталкиваются с примерно одинаковыми сложностями.

Первый этап. Его можно было бы назвать этапом «несбывшихся надежд». Внедряя цифровые технологии в практику инженерного обеспечения горных работ, руководители предприятий,

Описаны этапы внедрения цифровой технологии инженерного обеспечения горных работ на рудниках ПАО «ППГХО». В рамках этой технологии выполняются работы по формированию геологической модели месторождения, моделированию проходческих, очистных и закладочных работ, а также оценке удароопасности участков месторождения. Развитие цифровой технологии осуществляется в направлении перевода основной деятельности по инженерному обеспечению горных работ на интегрированные в единое информационное пространство программные средства автоматизации.

Ключевые слова: ПАО «ППГХО», рудники, горные работы, инженерное обеспечение, цифровая технология, программные средства, единое информационное пространство.

DOI: 10.17580/gzh.2018.07.17

как правило, рассчитывают на быстрый эффект от перехода на использование компьютерных программ, не учитывая, что это связано с необходимостью пересмотра устоявшейся практики принятия технологических решений и ведения технической документации. В цифровой технологии, в отличие от бумажной (даже с использованием электронных кульманов и таблиц), главным источником информации становится база данных (БД) моделей горно-геологических объектов. Поэтому основной задачей, которую приходится решать на первом этапе, является организация работы по ее формированию. Все это приводит к серьезному увеличению нагрузки на задействованных в этой работе сотрудников, так как БД формируется на основе многолетней информации, а персонал, по сути, параллельно проходит обучение работе с программным обеспечением (ПО), и с него, как правило, не снимается текущая работа. Кроме того, каждое горнодобывающее предприятие имеет свою специфику и собственные сформировавшиеся годами внутренние правила работы. Они зачастую не могут быть полностью реализованы с помощью базового ПО, создаваемого, исходя из усредненного представления о практике решения горно-геологических задач на среднестатистическом горном предприятии. Результатом всего этого является недовольство как сотрудников, так и руководителей, не получивших того, чего они ожидали. Дальнейшие события развиваются обычно по трем сценариям:

- свертывание работ по созданию полноценной цифровой технологии; силами энтузиастов отдельные задачи могут решаться с использованием ПО, но это не дает существенного эффекта;
- закупка нового ПО, которое, в отличие о ранее приобретенного, все же позволит, по мнению принимающих решение, перейти на полноценную цифровую технологию; в этом случае предприятие сталкивается с теми же самыми проблемами: обучение, формирование БД, адаптация ПО к условиям работы предприятия;

- осознание того, что цифровая технология может быть внедрена только в результате целенаправленной работы, которая займет определенное время и потребует дополнительных ресурсов; именно такое, наиболее продуктивное решение приводит к началу второго этапа внедрения.

Второй этап. Его можно было бы назвать этапом «последовательного достижения цели». Важной частью этого этапа является определение последовательности решения задач по созданию цифровой технологии и формированию команды, обеспечивающей их решение. И если для формирования БД моделей объектов горной инфраструктуры, как правило, достаточно базовых инструментов ПО, то для автоматизации решения отдельных задач, учитывающих специфику работы предприятия, требуется определенная адаптация, а иногда и модификация ПО. Это диктует необходимость грамотной постановки задач, проверки их реализации в практической работе, а также интеграции разработанных инструментов в цифровую технологию [5, 6]. По сути, создание цифровой технологии – это совместная работа специалистов предприятия и разработчиков ПО. Бывают исключения, когда базового функционала ПО достаточно для формирования цифровой технологии, но для больших предприятий со сложной технологией ведения горных работ его, как правило, не хватает. Так как любая модификация приводит к нестабильной работе ПО в течение некоторого времени, то определение четкого регламента взаимодействия разработчика ПО и потребителя является необходимым условием устойчивого функционирования цифровой технологии. Для повышения ее эффективности и сокращения сроков создания на предприятии важно иметь команду специалистов, являющихся связующим звеном между разработчиками и работниками, являющимися конечными пользователями ПО. Команда не должна быть большой, но желательно, чтобы в ее состав входили специалисты, знакомые с практикой работы геологов, маркшейдеров и технологов предприятия. В этом случае при взаимодействии с разработчиками ПО команда участвует в постановке задач, проверке созданных инструментов и отработке технологических приемов их использования, а по отношению к конечным пользователям выступает в роли учебного и консультационного центра.

Создание цифровой технологии инженерного обеспечения горных работ

Создание такой технологии в ПАО «ППГХО» во многом соответствовало изложенной выше последовательности. Первые 30 лицензий горно-геологической информационной системы (ГГИС) MINEFRAME (разработчик – Горный институт КНЦ РАН) были приобретены акционерным обществом в 2006 г. Однако из-за слабой на тот момент оснащенности предприятия компьютерной техникой и отсутствия сетевой инфраструктуры существенного эффекта внедрение программного комплекса сразу не дало. Программные средства и инструменты ГГИС использовали на отдельных рабочих местах для решения локальных задач, таких как моделирование горно-геологических условий на отдельных участках месторождения и формирование некоторых видов технологической документации. Основной упор в тот период делали

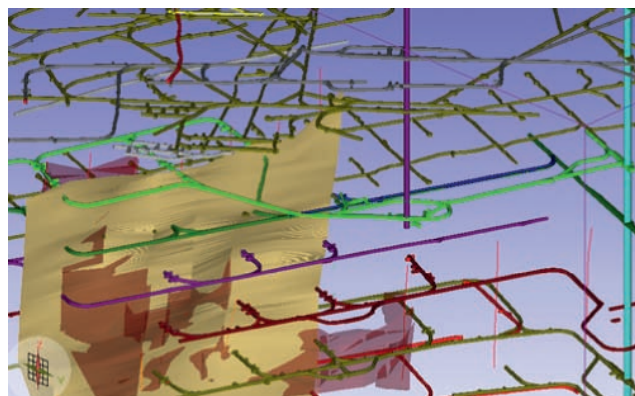


Рис. 1. Модели горно-геологических объектов рудника «Глубокий»

на обучении специалистов работе с инструментами ГГИС в части моделирования горных выработок, рудных тел и тектонических нарушений [7–10], а также приобретение навыков обработки в среде ГГИС результатов маркшейдерских замеров и геолого-геофизического опробования. Путем оцифровки исходной геолого-маркшейдерской информации специалистами рудника «Глубокий» были созданы модели рудных тел и горных выработок семи горизонтов и семи очистных блоков (рис. 1). Выполнение этой работы, кроме всего прочего, позволило уточнить геологическое строение обрабатываемых участков и получить более наглядное представление о геометрии выработанного пространства. Одновременно с этим создавали БД (каталог) маркшейдерских точек. Параллельно с созданием моделей объектов геологической среды и выработанного пространства разработчики ГГИС осуществляли модификацию ПО, в результате которой появились средства визуализации данных мониторинга сейсмических событий (СС). В целом же итоги первых лет работы по созданию цифровой технологии инженерного обеспечения горных работ показали, что более полное использование возможностей ГГИС MINEFRAME позволит снизить потери времени на подготовку и передачу информации между подразделениями путем использования общей БД; повысить надежность принимаемых инженерных решений за счет оперативного доступа к геомеханической и горно-геологической информации; снизить вероятность искажения данных благодаря исключению возможных ошибок при копировании и переносе информации.

Последовательность выполнения работ

В 2009 г. после обсуждения результатов первых лет использования ГГИС MINEFRAME было принято решение о необходимости оснащения рабочих мест специалистов (маркшейдеров, геологов, технологов) современной вычислительной техникой. В это же время были начаты работы по созданию в подразделениях ПАО «ППГХО» локальной компьютерной сети, позволяющей реализовать сетевой режим работы автоматизированных рабочих мест с использованием общей БД. Основная задача при этом состояла в том, чтобы с помощью ГГИС MINEFRAME реализовать

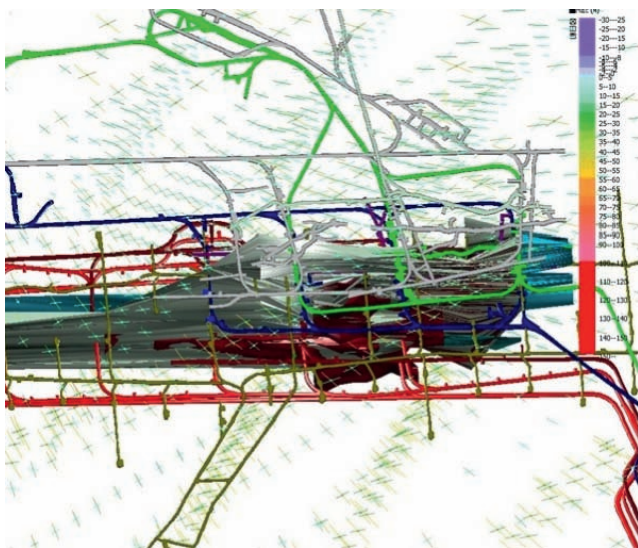


Рис. 2. Векторное представление поля напряжений

режим пополнения и доступа к актуальной БД моделей объектов горной технологии (геологической среды и горных выработок) для решения задач планирования и проектирования горных работ с учетом геомеханического состояния массива ГП.

При разработке месторождений, опасных по горным ударам, к которым отнесены и рудники ПАО «ППГХО» [11, 12], эффективность и безопасность горных работ во многом зависит от своевременного прогноза формирования зон концентрации напряжений, а следовательно, и удароопасности участков массива. Такой прогноз позволяет еще на этапе проектирования оптимизировать конструктивные параметры систем разработки и порядок ведения горных работ, а на этапе планирования – предусмотреть мероприятия, снижающие риск динамического проявления напряженно-деформированного состояния (НДС). Одним из эффективных методов прогноза полей напряжений является численное моделиро-

вание НДС массива ГП, применение которого совместно с инструментальными методами оценки НДС массива позволяет осуществлять геомеханически обоснованный выбор технологических решений. Исходя из этого в 2012 г. были начаты работы по созданию в рамках цифровой технологии инструментов оценки геомеханических условий отработки месторождений Стрельцовского рудного поля. Работа включала в себя создание горно-технологических и геомеханических моделей месторождений [13], а также разработку программных средств визуализации результатов расчета НДС и мониторинга СС.

Цель работы – объединение в рамках ГГИС всей значимой геологической, технологической и геомеханической информации, отражающей условия ведения горных работ. Использование трехмерных цифровых моделей, несущих информацию о пространственно распределенных объектах и событиях, обеспечивает наиболее полное представление о состоянии массива и является основой как для планирования горных работ, так и разработки профилактических мероприятий по предотвращению динамических проявлений горного давления.

В ходе выполнения работ по созданию горно-технологической модели была сформирована БД следующих цифровых моделей:

- геологической среды, включающей рудные тела разрабатываемых месторождений;
- рельефа поверхности с выделением мест ведения открытых горных работ;
- подземных горных выработок и сооружений;
- основных объектов наземной инфраструктуры;
- основных разломных зон.

Цифровые модели геологической среды и выработанного пространства создали основу для формирования геомеханической модели месторождения, которая представляет собой сеточную область, используемую для численного расчета НДС методом конечных элементов в объемной постановке. Для расчета НДС используют программу SIGMA GT и метод последовательных приближений [14, 15], в основе которого

– последовательный переход от мелкомасштабной модели, захватывающей область пространства, в разы превышающую зону ведения горных работ, к крупномасштабной, обеспечивающей необходимую детализацию выработанного пространства.

Для анализа результатов расчета НДС была реализована

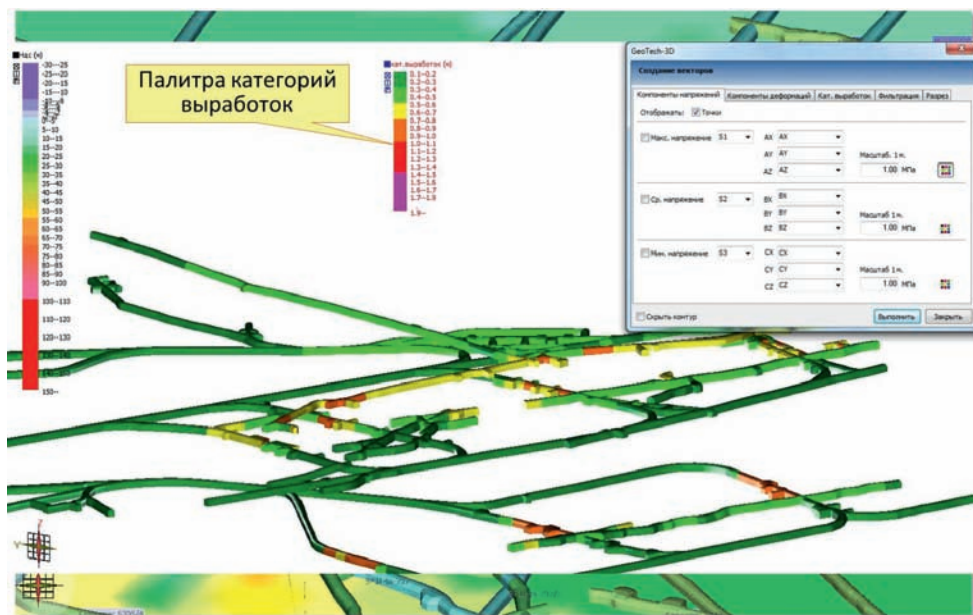


Рис. 3. Отображения категорий опасности горных выработок по горным ударам на основе моделирования НДС массива ГП

возможность их отображения в трехмерном пространстве и на разрезах как в виде векторного поля (рис. 2), так и в виде градиентной заливки по уровню действующих напряжений (деформаций). Для оценки влияния НДС массива на выработки были разработаны программные средства визуализации их состояния по критерию удароопасности в виде цветовой заливки каркаса модели в зависимости от уровня действующих напряжений, физико-механических свойств данного участка массива и ориентации выработки в поле напряжений (рис. 3).

Получили дальнейшее развитие инструменты обработки и визуализации результатов мониторинга СС, позволяющие фильтровать СС по времени и энергии, строить временные ряды и графики повторяемости событий. Была реализована возможность визуализации СС (см. рис. 3) в трехмерном моделируемом пространстве и на плоскостях разрезов различной ориентации. Результатом совместной работы с ИГД ДВО РАН стала возможность представления на плоскостях разрезов полей распределения плотности и энергии СС, что расширило возможности прогноза геомеханического состояния массива.

Наряду с формированием инструментов решения задач геомеханического обеспечения горных работ в этот период были созданы инструменты, автоматизирующие решение таких задач, как «Оперативное опробование», для быстрого интерактивного внесения в БД данных геофизического опробования скважин и подземных горных выработок (рис. 4); «Твердеющая закладка» – для моделирования структуры и параметров закладочного массива, а также подготовки технологической документации (рис. 5); «Маркшейдерский замер» – для моделирования проходки выработок за отчетный период и формирования документации.

Процесс формирования цифровой технологии в подразделениях ПАО «ППГХО» осуществляется силами специально созданного отдела геоинформационных систем и технологий, в котором в настоящее время работают: два ведущих геолога, ведущий маркшейдер, ведущий технолог, инженер по автоматизированным системам управления, ведущий системный программист (по одному), три инженера по ведению геологических БД (по одному на каждом из трех рудников). Задачи отдела – методическое и техническое сопровождение работы пользователей ГГИС; создание трехмерных основ для проектирования и планирования горных работ (используются графические материалы на бумажных носителях, журналы опробования скважин и горных выработок);

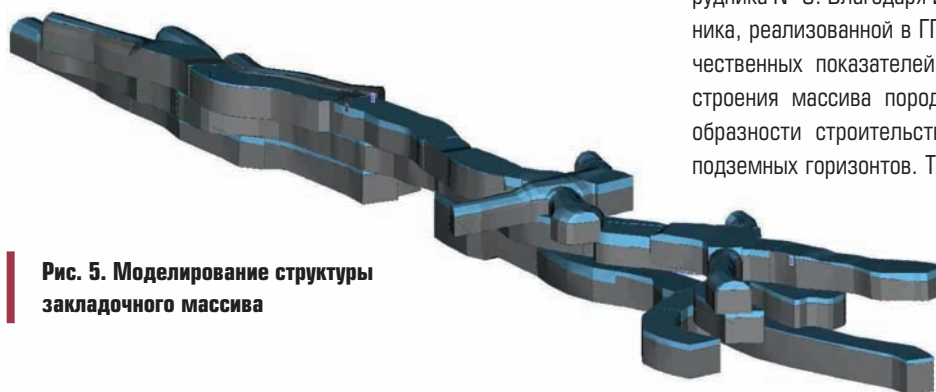


Рис. 5. Моделирование структуры закладочного массива

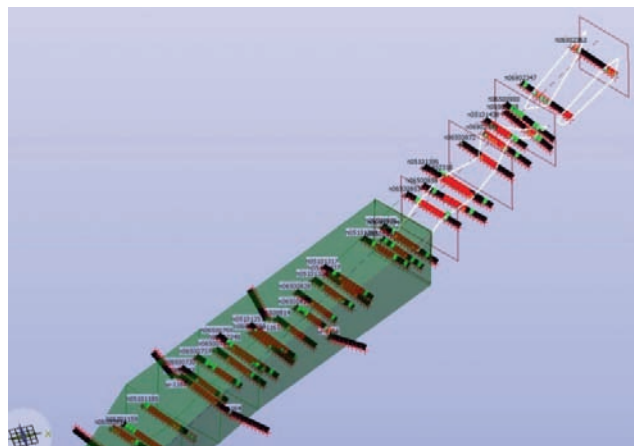


Рис. 4. Узвязанные профили геофизического опробования с использованием моделей горных выработок

формирование геологической БД. Процесс перевода на цифровые технологии предполагает выполнение следующих операций:

- обучение ключевых специалистов (маркшейдеров, геологов, горных инженеров);
- сопровождение БД в части обеспечения ее работоспособности и контроля качества исходной и конечной информации;
- контроль качества выполнения задач по созданию и модификации моделей объектов горной технологии, формирование методик работы с инструментами системы MINEFRAME.

В 2016 г. был проведен анализ результатов внедрения. Он основывался на сравнении производственных показателей до начала работы ГГИС и после ее внедрения. По результатам анализа установлено, что благодаря возможности визуализации объектов горной технологии и применения автоматизированных инженерных расчетов значительно улучшено качество планирования горных работ. Ожидаемые показатели качества извлекаемой руды при соблюдении плановых направлений горных работ совпадают на 95–98 % с полученными по факту отработки. Исключены случаи потерь руды в целиках, так как появилась возможность с любого автоматизированного рабочего места получать информацию о наличии и качестве руды в бортах и кровле горных выработок и, следовательно, своевременно реализовывать технические решения по доработке оставшихся запасов.

Совсем недавно было принято решение о подготовке запасов рудника № 6. Благодаря использованию трехмерной модели рудника, реализованной в ГГИС MINEFRAME, на основе анализа качественных показателей руды и особенностей геологического строения массива пород было принято решение о нецелесообразности строительства одного из запланированных ранее подземных горизонтов. Таким образом, удалось избежать существенных и неоправданных капитальных затрат.

В настоящее время в подразделениях ПАО «ППГХО» на работу с использованием цифровых технологий перешли 75 специали-

стов. Для координации этих работ в рамках горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом» создан центр компетенций по геолого-математическому моделированию разрабатываемых месторождений. Он призван синхронизировать работу по поддержанию в актуальном состоянии БД всех уранодобывающих предприятий (ПАО «ППГХО», АО «Хиагда» и АО «Далур»).

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что на сегодня создана основа цифровой технологии инженерного обеспечения горных работ на рудниках ПАО «ППГХО». В рамках этой технологии выполняют работы по формированию и корректировке геологической модели месторождения, включая модель запасов ПИ в выемочных единицах; на основании данных маркшейдерских замеров моделируют проходку горных выработок; с использованием средств цифрового моделирования проектируют закладочные работы; на основе комплексирования данных расчета НДС и мониторинга СС, а также их визуализации совместно с моделями выработок оценивают удароопасность участков месторождения. В качестве источника информации используют БД коллективного пользования, контролируемый доступ к которым осуществляют с помощью локальной сети предприятия.

Цифровая технология на рудниках ПАО «ППГХО» развивается в направлении перевода всей основной деятельности по инженерному обеспечению горных работ на интегрированные в единое информационное пространство программные средства автоматизации решения геологических, маркшейдерских, технологических и геомеханических задач. При этом наличие моделей объектов горной технологии, представляющих собой в совокупности виртуальный образ горного предприятия, создает условия для перехода от моделирования объектов к моделированию процессов горной технологии, где полученные в результате имитационного моделирования технологические решения могут передаваться в качестве управляющих параметров на оборудование. Одновременно развертывание беспроводной сети, средств позиционирования подвижного оборудования и его дистанционного (а затем роботизированного) управления создает условия для перехода к малолюдной, а следовательно, и более безопасной технологии ведения горных работ с принципиально новыми – «умными» функциями управления.

Библиографический список

См. англ. блок. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 7, pp. 86–90
DOI: 10.17580/gzh.2018.07.17

Digital technologies for sustainable engineering in mining – The first step towards a “smart mine”

Information about authors

S. V. Lukichev¹, Acting Director, Doctor of Engineering Sciences, lu24@goi.kolasc.net.ru
O. V. Nagovitsyn¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences
E. A. Ilin², Head of Mining Support Department of the Central Research Laboratory
R. S. Rudin³, Head of IT-Projects

¹ Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia
² Priargunsky Mining and Chemical Works, Krasnokamensk, Russia
³ “Atomredmetzoloto” JSC, Moscow, Russia

Abstract

Successful experience of use of remote-controlled and robotic mining machines offers pre-requisites for an open pit and underground geotechnology based on automated process flowcharts. In mines of Priargunsky Mining and Chemical Works, within the digital technology of mining engineering, the operations connected with the construction of geological model of deposit, simulation of heading, stoping and backfilling as well as estimation of rockburst hazard are implemented. The digital technology is advanced toward transition of major engineering support of mining to automation software tools integrated in the common information environment.

From the evidence of the analysis carried out in 2016, it was found that visualization of mining technology objects and automation of engineering designs considerably improved quality of mine work planning. Agreement between the anticipated quality of ore extraction, subject to adherence to planned directions of mining advance, and the actual production results makes 95–98%. Ore loss in pillars is eliminated due to the option of getting information on ore reserves and their quality in sidewalls and roof from any automated working place, which enables implementation of technical solutions on extraction of such reserves in due time.

At the present time, 75 specialists of business units within Priargunsky Mining and Chemical Works operate digital technologies. For coordination of such operations, ROSATOM’s Mining Division has established a Center of Competence in Geological-and-Mathematical Modeling of Mineral Deposits. The Center is intended to synchronize and maintain data bases of all uranium mining companies (Priargunsky Mining and Chemical Works, Khiaгда and Dalur).

Keywords: Priargunsky Mining and Chemical Works, underground mines, mining, engineering support, digital technology, software tools, unified information environment.

References

1. Baláž V., Vagaš M., Marcinko P., Putala J. The proposal of structure for workplaces with palletizing

robot. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 7, No. 7. pp. 435–439.

2. Trofimov A. V., Vilchinskaya O. V., Breus K. E., Amosov I. V. Integrated investigation of physical and mechanical properties of rocks using modern methods and means of optimization of mining-and-metallurgical processes. *Tsvetnye metally*. 2014. No. 9. pp. 16–23.
3. Rohrbach E., Liu L., Wang L. Variations in seismic velocity and attenuation associated with seismogenesis: A numerical verification using ambient noise. *Tectonophysics*. 2013. Vol. 584. pp. 54–63.
4. Taranov V. A., Baranov V. F., Aleksandrova T. N. Review of the modeling and computation programs for ore pre-treatment flowcharts. *Obogashchenie Rud*. 2013. No. 5. pp. 3–7.
5. Ringhofer M., Wimmer G., Plaul J. F., Tatschl-Unterberger E., Herzog K. Transition of the steelmaking industry to digital technologies. *Chernye Metally*. 2018. No. 3. pp. 12–17.
6. Reifferscheid M. Ideas, techniques and decisions for application of digital technologies in ferrous metallurgy. *Chernye Metally*. 2018. No. 6. pp. 62–67.
7. Morozov K. V., Prosekin B. A. Creation of geomechanical model of the Antei deposit based on digital technologies. *Gornyi Zhurnal*. 2008. No. 8. pp. 47–49.
8. Rasskazov I. Yu., Tsirel S. V., Rozanov A. O., Tereshkin A. A., Gladyr A. V. Application of acoustic measurement data to characterize initiation and development of disintegration focus in a rock mass. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, No. 2. pp. 224–231.
9. Xiao Y.-X., Feng X.-T., Hudson J. A., Chen B.-R., Feng G.-L. et al. ISRM suggested method for in situ microseismic monitoring of the fracturing process in rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49, Iss. 1. pp. 343–369.
10. Prosekin B. A., Ilin E. A., Toshtobrov V. A. Introduction of computer technologies for the mining operations modeling at Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 8-2. pp. 14–18.
11. Instructions on Safe Operations in Mining of Metalliferous and Nonmetalliferous Deposits and in Underground Construction under Conditions of Rockburst Hazard. RD 06-329-99. Moscow : NTS PB Gosgortekhnadzora Rossii, 2003. Series 06. Regulatory Documents on Safety, Supervision and Permission Activities in Mining Industry. Iss. 1. 88 p.
12. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Petrov V. A., Prosekin B. A. Geomechanics and seismicity of the Antei deposit rock mass. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 48, No. 3. pp. 405–412.
13. Kozlyev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E. Technological and geomechanical modelling for mining safety improvement. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry: Proceedings of the 37th International Symposium APCOM 2015*. Fairbanks, 2015. pp. 411–419.
14. Kozlyev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Experience of application of expert systems in rock mass stress state estimation to select safe mining methods. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012. Vol. 198. pp. 16–23.
15. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E., Belogorodtsev O. V. Mine planning and design in MINEFRAME. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 8. pp. 53–58. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.12