

УДК 539.3:622.83

А.А. Козырев, С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, И.Э. Семенова
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ И ГОРНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Представлена геоинформационная система оценки геомеханических условий отработки удароопасных месторождений. Система базируется на программных средствах моделирования объектов горной технологии, расчета напряженно-деформированного состояния массива. Результаты моделирования комплексуются с данными микросейсмического и деформационного мониторинга техногенно нарушенной геологической среды в едином информационном пространстве. Интеграция технологической и геомеханической информации на базе единой программной платформы обеспечивает адекватную оценку удароопасности участков месторождений на разных стадиях их освоения. Таким образом, достигается обоснованность технологических решений. При этом учитываются ретроспективные, текущие и прогнозные данные о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород. Реализована возможность регионального и локального прогноза формирования зон концентрации напряжений, что обеспечивает увеличение безопасности горных работ. Опытнo-промышленная проверка системы осуществляется на рудниках, разрабатывающих месторождения Стрельцовского рудного поля.

Ключевые слова: геоинформационная система, напряженно-деформированное состояние, геомеханическое моделирование, горнотехнологическое моделирование, удароопасность.

При разработке месторождений, опасных по горным ударам, к которым отнесены и рудники Стрельцовского рудного узла ОАО «ППГХО» [1], эффективность и безопасность ведения горных работ во многом зависит от своевременного регионального прогноза формирования зон концентрации напряжений, а, следовательно, и удароопасности, применительно к конкретным горно-геологическим условиям. Такой прогноз позволяет еще на этапе проектирования оптимизировать конструктивные параметры систем разработки и порядок ведения горных работ. Одним из современных методов прогноза полей напряжений являются численные методы моделирования изменения напряженно-деформированного состо-

яния массива горных пород (ГП), используемые в разрабатываемом программном обеспечении. Применение их совместно с натурными методами прогноза удароопасности позволяет осуществлять геомеханически обоснованный выбор технических решений по отработке полезных ископаемых.

Работы по созданию геодинамического полигона, включающие геолого-структурный анализ и геодинамическое моделирование геологических структур Краснокаменского кластера, показали необходимость разработки горнотехнологической модели Стрельцовского рудного поля. Обусловлено это необходимостью объединения в рамках одной модели всей значимой геологической, геомеханической и горно-технологической ин-

формации, характеризующей условия ведения горных работ на этих месторождениях. Подобный комплексный подход обеспечивает наиболее объективное представление о состоянии массива и является основой для планирования горных работ и разработки профилактических мероприятий.

Задача по созданию горно-технологической модели была поставлена в 2012 г. перед такими научными коллективами как Горный институт Кольского научного центра РАН, Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН, СППГИ. Активное участие в формировании моделей объектов горной технологии приняли работники управления и рудников ОАО «ППГХО». Пилотным объектом для создания горно-технологической модели было выбрано месторождение «Антей».

Горно-технологическая модель представляет собой набор 3-мерных цифровых моделей горно-геологических и горно-технологических объектов, несущих информацию об их геометрии, технологических и физико-механических свойствах, напряженном состоянии массива. Работа с моделями объектов осуществляется средствами геоинформационной системы, реализующей инструменты хранения и обработки пространственно распределенной информации, ее визуализации в удобном для анализа виде.

Геоинформационная система, в свою очередь, имеет функции обмена данными с другими программными продуктами, используемыми для сбора информации о состоянии массива горных пород, горно-геологического моделирования, геомеханического моделирования полей напряжений и анализа всей совокупности моделей.

Основой геоинформационной системы, базирующейся на программном продукте MINEFRAME, стали модели месторождений и горных выработок,

используемые для решения задач геотехнологии и создания всех видов горно-графической документации.

Область моделирования в плане ограничена Стрельцовским рудным полем. В пределах области моделирования располагаются: промышленные сооружения; подземные горные выработки; эксплуатируемые и планируемые к разработке месторождения; элементы схемы разломной тектоники; схемы распространения сейсмодислокаций; схемы распределения сейсмотектонических режимов (стресс-тензоров); объекты трехмерной модели напряженно-деформированного состояния массива ГП, сформированные по комплексу данных о современных напряжениях и сейсмотектонических деформациях поверхности с выделением активных разломов [2, 3].

Основная идея работы заключалась в разработке геомеханической численной модели месторождения «Антей» и инструментов, дающих возможность непосредственно на горном предприятии решать задачу текущего и перспективного прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) в автоматизированном режиме; визуализировать горно-технологическую модель совместно с расчетными данными о поле напряжений и деформаций и данными геомеханического мониторинга; проводить комплексный анализ информации для обоснования геомеханической безопасности планируемых подземных горных работ.

Исходными данными для выполнения работы послужили:

- цифровые модели горных выработок, построенные в системе MINEFRAME;
- электронные копии маркшейдерских планшетов;
- цифровые модели рудных тел;
- нормативные документы Ростехнадзора и стандарты предприятия [1, 4];

- информация о физических свойствах, структурной нарушенности и напряженно-деформированном состоянии массива ГП;

- геологические разрезы и планы горных работ;

- данные об упруго-прочностных характеристиках вмещающего массива и рудных тел;

- данные натуральных измерений напряжений на различной глубине;

- данные натуральных измерений параметров геоакустических и микросейсмических волн в массиве горных пород;

- данные высокоточных измерений деформационных характеристик массива горных пород (ИГД ДВО РАН);

- модели основных разломных зон (ИГЕМ РАН);

- схемы распространения сейсмодислокаций (ИГЕМ РАН);

- схемы распределения сейсмотектонических режимов (ИГЕМ РАН);

- модели напряженно-деформированного состояния массивов пород (ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН, ИЗК СО РАН).

В ходе выполнения работ была создана база данных (БД), содержащая трехмерные цифровые модели объектов горной технологии Стрельцовского рудного поля:

- геологической среды, включающей рудные тела разрабатываемых месторождений;

- топографической поверхности с выделением мест ведения открытых горных работ;

- подземных горных выработок и сооружений;

- основных объектов наземной инфраструктуры;

- основных разломных зон;

- схем распространения сейсмодислокаций;

- схем распределения сейсмотектонических режимов;

- напряженно-деформированного состояния массива ГП.

Укрупненно все задачи проекта были сгруппированы по следующим этапам выполнения работ:

- Анализ и обобщение горно-геологической и геомеханической информации о состоянии массива пород месторождения. Оценка адекватности применения упругой модели для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) для условий месторождения «Антей».

- Разработка мелкомасштабной геомеханической модели месторождения «Антей». Модификация и разработка интерфейса ПО SIGMA GT для функций корректировки геомеханической модели и расчета напряжений и деформаций в окрестности фактических и планируемых горных работ. Анализ результатов многовариантного мелкомасштабного моделирования НДС. Разработка концепции и модуля передачи расчетных данных о поле напряжений и деформаций для отображения в среде MINEFRAME.

- Анализ исходных данных для моделирования горно-технологических объектов. Разработка методики их формирования в структуре проекта MINEFRAME.

- Разработка крупномасштабной геомеханической модели с детализацией сетки конечных элементов для моделирования выемки запасов рудного тела и закладки. Разработка алгоритма автоматического определения начальных условий в узлах новых расчетных областей. Проведение серии расчетов напряженно-деформированного состояния при последовательной отработке запасов месторождения на основе планов горных работ на 2009–2013 гг. Разработка инструкции по использованию программного модуля SIGMA GT. Разработка способов трехмерного представления расчетов НДС массива в среде MINEFRAME.

- Разработка средств импорта моделей геомеханического состояния

среды по данным сейсмоакустического мониторинга ИГД ДВО РАН в модели системы MINEFRAME. Моделирование основных тектонических нарушений, топографической поверхности и объектов инфраструктуры в районе ведения горных работ.

- Разработка информационных моделей и формы представления экспериментальных данных геомеханического мониторинга, отражающих особенности горногеологических условий месторождений ОАО «ППГХО» и учитывающих состав и технические характеристики применяемых измерительных комплексов. Разработка алгоритмов и программного обеспечение для синхронизации данных геомеханического мониторинга с системой MINEFRAME, формирования базы экспериментальных данных, подготовки и загрузки отчетов о сейсмодетонационных наблюдениях в систему MINEFRAME. Разработка и реализация библиотеки обработки и представления данных микросейсмического и геоакустического мониторинга. Разработка инструкций и рекомендаций по использованию программного обеспечения. Разработка рекомендаций по комплексному использованию результатов геомеханического мониторинга при планировании и ведении горных работ.

- Создание методики и программных средств обновления информации горно-технологической модели Стрельцовского рудного поля. Отработка механизма поддержания базы данных в актуальном состоянии за счет процедуры импорта данных о состоянии массива горных пород и границах горных работ. Отработка режима многопользовательского доступа к объектам модели Стрельцовского рудного поля. Проверка работы программных средств в условиях ОАО «ППГХО».

В результате выполнения работ в течение двух с половиной лет были

созданы трехмерные модели горно-геологических и горно-технологических объектов Стрельцовского рудного поля в среде MINEFRAME. На основе геологической и маркшейдерской информации промоделированы основные тектонические нарушения, рельеф поверхности и объекты инфраструктуры в районе ведения горных работ. Численное моделирование НДС проводилось методом конечных элементов в объемной постановке программой Sigma GT с использованием методики последовательных приближений, разработанной в Горном институте КНЦ РАН [5]. На основе геологической и технологической моделей сгенерирована мелкомасштабная геомеханическая конечно-элементная модель месторождения «Антей», учитывающая действие в массиве пород высоких тектонических напряжений. Месторождение сложено в основном породами склонными к упругому деформированию и хрупкому разрушению [6], поэтому качестве модели среды выбрана упругая модель. Возможность такого подхода признана в настоящее время специалистами, как в России, так и за рубежом [8, 9, 10]. Реализован алгоритм автоматического уплотнения сетки и определения начальных условий в узлах вложенных расчетных моделей отдельных удароопасных блоков и технологических узлов. Для созданной геомеханической модели проведены многовариантные расчеты НДС, имитирующие последовательную отработку запасов месторождения. В среде MINEFRAME проведено комплексирование геомеханической информации: данных сейсмического и деформационного мониторинга; расчетного поля напряжений и деформаций. Для этого разработаны средства экспорта/импорта данных и инструменты пространственной визуализации результатов мониторинга. Для импорта данных о напря-

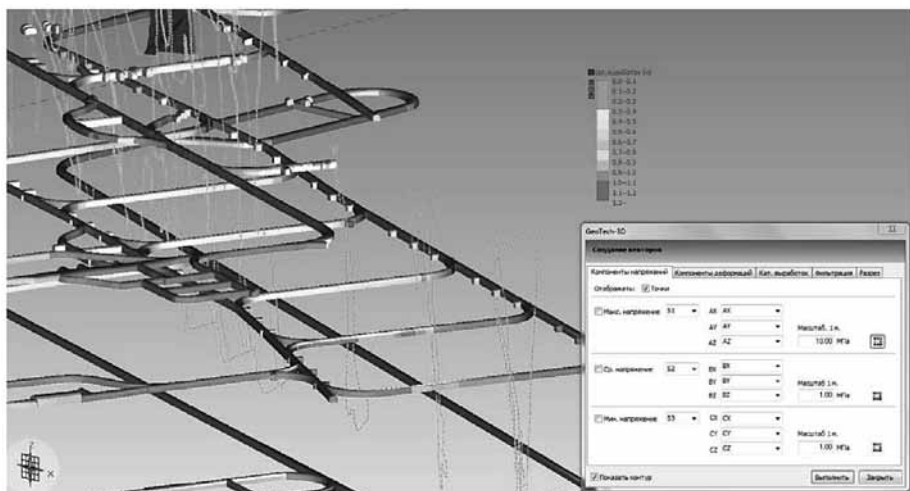


Рис. 1. Раскраска выработок по категориям состояния в зависимости от расчетного поля напряжений

женно-деформированных состояниях модели из программного модуля Sigma GT в систему MINEFRAME используется файл данных специальной структуры, содержащий информацию о каждом элементе модели НДС: индекс точки центра элемента; координаты точки центра; компоненты главных напряжений; компоненты приведенных деформаций; значения углов, образуемых векторами напряжений и деформаций с координатными осями; категории состояния выработок. Реализована возможность отображения данных расчета НДС как в виде векторного поля, так и в виде градиентной заливки по уровню действующих напряжений (деформаций). Кроме того пользователь может вывести данные по состоянию фактических и проектных одиночных выработок в виде цветовой заливки их каркаса на различных участках в зависимости от уровня действующих напряжений, физико-механических свойств данного участка массива и направления выработки (рис. 1).

Крупномасштабная геомеханическая модель месторождения «Антей» вместе с программным обеспечением

для многовариантных расчетов напряженно-деформированного состояния установлена на компьютеры службы прогноза и предупреждения горных ударов (СППГУ). Граничные условия получены путем интерполяции из мелкомасштабной модели. Границы модели удалены от рудной зоны, фактических и планируемых горных работ на расстоянии, при котором перемещения для граничных узлов модели u_x , v_y , и w_z , рассчитанные для нарушенного горными работами массива пород отличаются более чем на 5% от соответствующих перемещений для моделирования выемки и закладки. С учетом данного условия местоположение границ крупномасштабной расчетной области: по простиранию рудной залежи – разрезы 626+50 м и 638+70 м; вкрест простирания – магистральной -220 м и +220 м; дно модели – гор. -300 м. В итоге размеры области моделирования составляют $1220 \times 440 \times 1050 \text{ м}^3$. Сгущение сетки конечных элементов приурочено к зоне ведения горных работ, где размер элемента составляет $5 \times 5 \times 5 \text{ м}^3$. Такие размеры элементов позволяют достаточно подробно промоделировать кон-

фигурацию рудного тела, выработок и закладки. Количество элементов в вертикальном сечении: 5217. Количество горизонтальных сечений – 112, вертикальных по разрезам – 99, вертикальных по магистралям 47, общее число элементов модели – 511 266. Вид сетки конечных элементов в трехмерном отображении приведен на рис. 2.

Граничные условия задавались в виде узловых перемещений, полученных в процессе интерполяции из предыдущего этапа моделирования. В качестве основы был выбран вариант с действием максимальных тектонических сил вкрест простирания рудного тела (рис. 3), показавший наилучшую сходимость расчетного исходного поля напряжений с современными представлениями о НДС массива месторождения «Антей».

Для корректного отображения в разработанной модели рудных тел и закладочного массива в качестве исходной информации использовали горизонтальные и вертикальные разрезы,

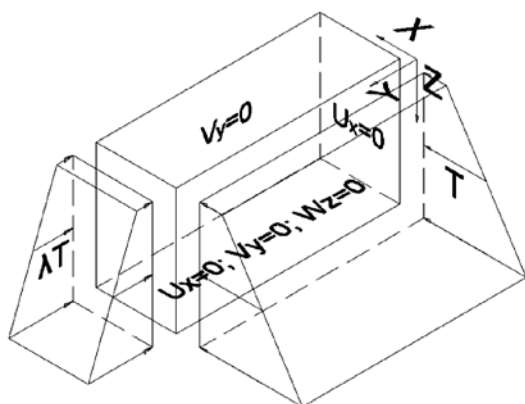


Рис. 3. Вариант нагружения мелкомасштабной модели, взятый в качестве исходного для получения граничных условий модели II этапа

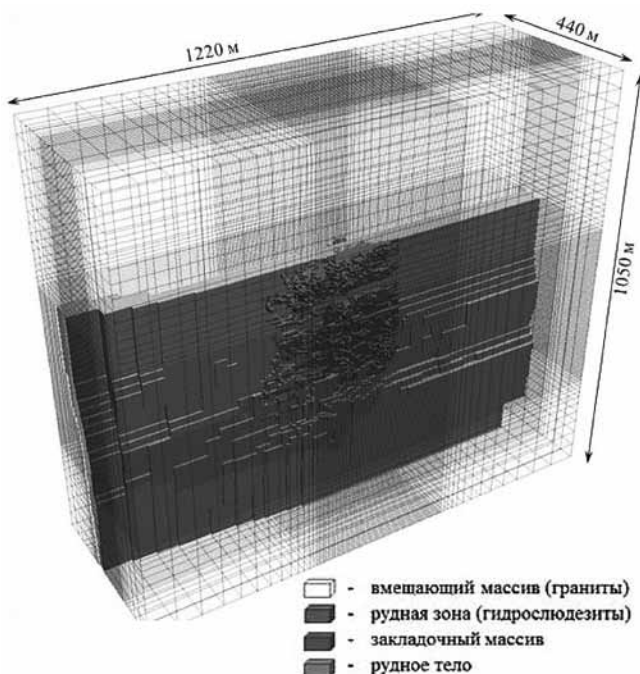
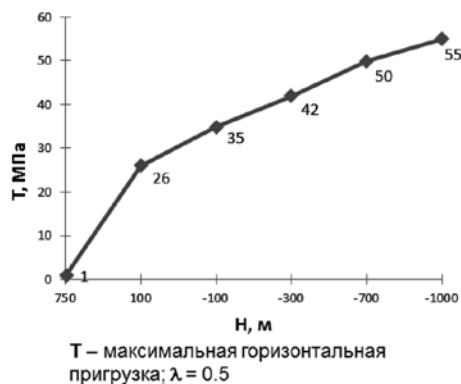


Рис. 2. Сетка конечных элементов крупномасштабной модели месторождения «Антей» в трехмерном отображении

экспортированные из MINEFRAME. Данные разрезы отстраивались практически для каждого слоя модели, то есть с частотой в 5 м для достижения максимального геометрического соответствия фактических и проектных горных работ.



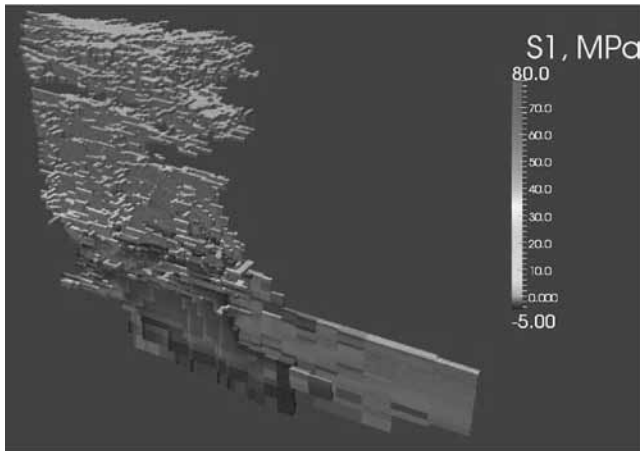


Рис. 4. Трехмерное отображение распределения σ_{\max} в породах рудного тела и закладки

Была проведена серия расчетов напряженно-деформированного состояния при последовательной отработке запасов месторождения. Основой для формирования расчетных вариантов служили планы горных работ на 2009–2013 гг., переданные заказчиком, а также горно-технологическая модель, созданная в среде MINEFRAME.

Приведем результаты распределения максимальной компоненты главных напряжений σ_{\max} для варианта с промоделированными горными работами 2013 г. Отрицательные значения соответствуют напряжениям растяжения, положительные – напряжениям сжатия (рис. 4). В районе закладки на верхних горизонтах, там где мощность рудного тела была более значительной, сформировалась зона разгрузки массива со значениями σ_{\max} 15–20 МПа. Зона концентрации напряжений с абсолютными величинами более 40 МПа, распложена в основном ниже отметки +50 м, по площади эта зона больше в северной части месторождения, где расположены основные запасы урановых руд на нижних горизонтах. По результатам расчетов, участками повышенной удароопасности являются целики в руд-

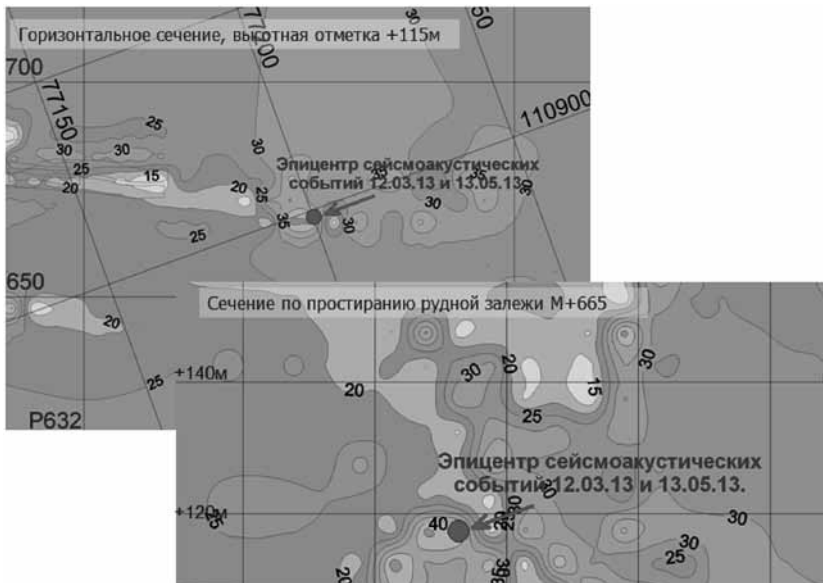


Рис. 5. Карты распределения σ_{\max} в окрестности эпицентра сейсмоакустических событий 12.03.2013 и 13.05.2013

ной зоне на горизонте 0 м, расположенные в пределах разрезов 631 – 631+40 м и 633 – 633+50 м, а также значительные по площади участки нижних горизонтов: на гор. -60 м – от разреза 630+75 до разреза 632+75; на гор. -120 м – от разреза 629+50 до разреза 632+50.

Была проанализирована информация о зонах проявления горного давления, зафиксированных в 2013 г. Проведено сопоставление данных моделирования с данными о местоположении зон повышенной сейсмоопасности. Один из таких участков массива (блок 4а-619 на слое 14) расположен за пределами зоны сгущения элементов. Поэтому сравнительный анализ выполнен по эпизодам 12.03.2013 (событие с геодезическими координатами $X = 77\ 200$, $Y = 110\ 903$, $Z = 115$) и 13.05.2013 (событие с геодезическими координатами $X = 77\ 202,07$, $Y = 110\ 903,95$, $Z = 116,32$). Как видно, координаты этих событий практически совпадают. Были построены карты изолиний максимальной компоненты сжимающих напряжений для участка массива в горизонтальном сечении (отм. +115 м) и вертикальном сечении по простиранию рудной залежи, проходящих через место проявлений горного давления (рис. 5). Как видно, эпицентр сейсмоакустических событий приурочен к зоне концентрации напряжений, что является подтвержде-

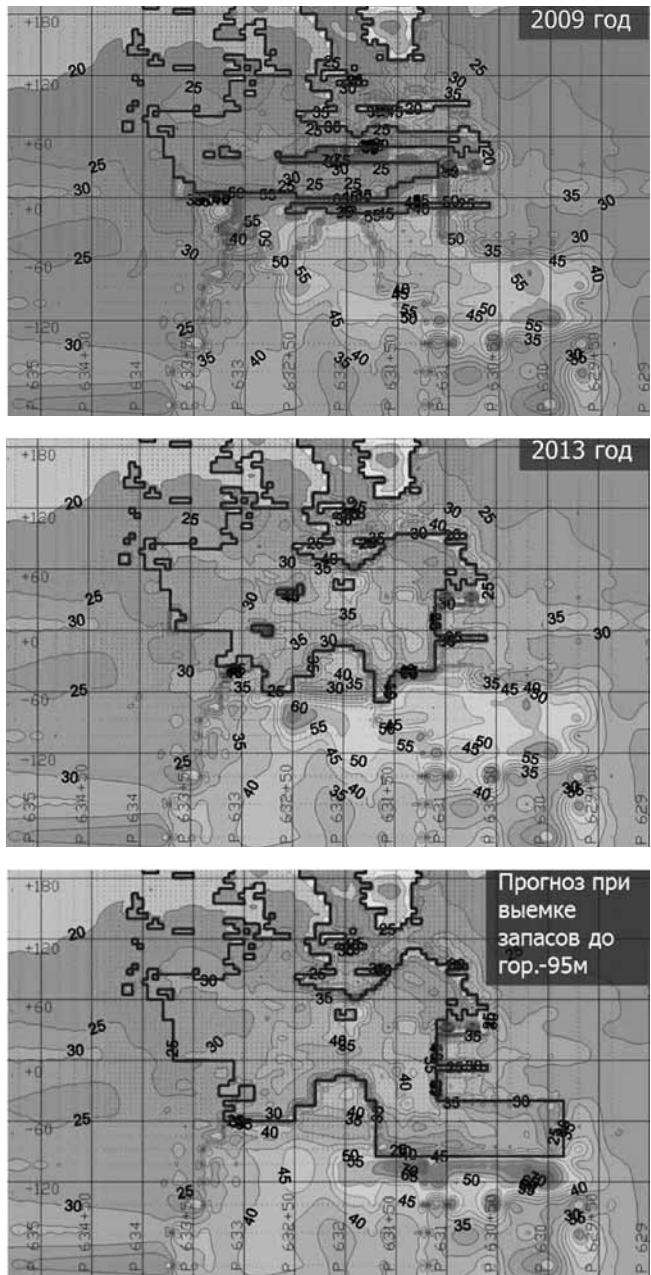


Рис. 6. Ретроспективное и прогнозное изменение σ_{\max} по мере выемки запасов и закладки массива. Бордовыми линиями показаны границы закладочного массива

нием адекватности модели реальным геомеханическим условиям месторождения «Антей».

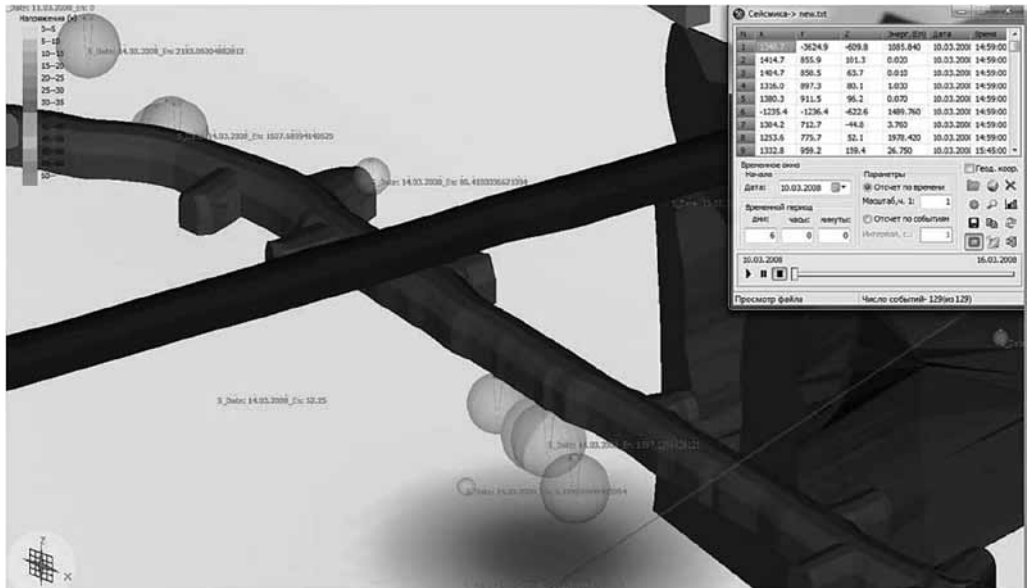


Рис. 7. Отображение сейсмических событий в среде MINEFRAME

Кроме расчетов НДС по планам горных работ 2009–2013 гг. была промоделирована ситуация при выемке запасов урановой руды и закладке массива до отметки -95 м. На рис. 6 приведено распределение σ_{\max} в разрезе по простиранию рудной залежи для трех вариантов: на 2009 г., на 2013 г. и при выемке запасов до гор. -95 м. Наибольшая концентрация напряжений приурочена к целикам (особенно в 2009 г.) и границам закладочного массива, в наибольшей мере к его нижней границе. Наблюдается постепенный рост напряжений на глубоких горизонтах по мере приближения к ним горных работ. Так на горизонте -120 м при выемке запасов до отметки -95 м прогнозируется увеличение сжимающих напряжений с 50–55 МПа до 70 МПа, то есть почти на 50%.

На примере данных сейсмоакустического мониторинга ИГД ДВО РАН разработаны средства импорта моделей геомеханического состояния среды в модели системы MINEFRAME.

Разработаны средства трехмерного представления собственно зарегистрированных сейсмических событий и результатов их интерпретации в виде плоскостей, имеющих градиентную заливку цветом, установленным по диапазону характеристик: энергия, плотность или коэффициент удароопасности (рис. 7).

Был проведен анализ состава моделируемых объектов горной технологии, которые включают в себя: различные типы пород (вмещающие породы, рудные тела, породы рудовмещающей зоны), разломы, подготовительные и очистные выработки, элементы закладки, топоповерхность. Предложена методика формирования трехмерных моделей, обеспечивающих пространственное представление всего комплекса природных и техногенных объектов района. Созданы структуры хранения данных, обеспечивающие удобный и быстрый доступ к моделям объектов и их группам.

Предполагается использование трехмерной геомеханической конечно-

элементной модели с учетом основных геологических и горнотехнических факторов для выполнения текущих и перспективных прогнозов распределения напряжений в окрестности горных работ, расчета категорий состояния выработок, выявления зон повышенной удароопасности при планировании подземных горных работ.

Программное обеспечение с разработанными моделями установлено на

компьютеры заказчика. В результате пользователь имеет возможность комплексной оценки геомеханического состояния массива пород месторождения «Антей» на основе натуральных и численных методов, текущего и перспективного прогноза местоположения и параметров зон повышенной удароопасности, а также выбора оптимальных параметров системы разработки при планировании горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по безопасному ведению горных пород на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06–329-99). – М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 66 с.

2. Петров В.А. Разработка трехмерной геологоструктурной модели месторождения Антей как основы геомеханической модели для прогноза проявления горных ударов. Отчет о НИР (окончательный по 2 этапу) по договору № 10–05/10270 от 17.02.2009 г. между ИГЕМ РАН и ОАО «ППГХО». – М., 2009.

3. Лаверов Н.П., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Хаммер Й., Бурмистров А.А., Щукин С.И. Урановое месторождение Антей – природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 387–413.

4. Шабаров А.Н., Филинков А.А., Рассказов И.Ю. и др. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождении Антей, опасном по горным ударам. – СПб.: Изд. СПбГИ, 2008.

5. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э. Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений / Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 16–23.

6. Рассказов И.Ю., Потапчук Г.М., Мирошников В.И., Рассказова М.И. Оценка напряженно-деформированного состояния элементов системы разработки с закладкой с нисходящей выемкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 11. – С. 116–124.

7. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Просекин Б.А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // ФТПРПИ, 2012, № 3, pp. 3–13.

8. Бенявски З. Управление горным давлением: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 254 с.

9. Бульчев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1982. – 270 с.

10. Виттке В. Механика скальных пород: пер. с нем. – М.: Недра, 1990. – 439 с. **ИЛАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,

Лукичев Сергей Вячеславович – доктор технических наук, заместитель директора, e-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru,

Наговицын Олег Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru,

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,

Горный институт Кольского научного центра РАН.

GEOMECHANICAL AND TECHNOLOGICAL MODELING AS A MEANS FOR IMPROVING SAFETY OF HARD MINERAL DEPOSITS DEVELOPMENT

Kozyrev A.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Deputy Director, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,
Lukichev S.V.¹, Doctor of Technical Sciences,
Deputy Director, e-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru,
Nagovitsyn O.V.¹, Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher, e-mail: nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru,
Semenova I.E.¹, Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,
¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

The article presents the geo-information evaluation system for the geomechanical field mining conditions. This system is based on the software modeling of mining technology objects and strain-stress state analysis. Model results complex with seismoacoustic and deformations monitoring data on technologically disturbed environment in the common informational space. Technical and geomechanical data are integrated in the framework of the single software platform, thus providing adequate rockburst hazard estimation of the deposit blocks on the various stages of development. Thereby valid technological decisions can be taken. The validation is presupposed by current, retrospective and prognostic data on the rock mass strain-stress state. Regional and local prediction of formation of areas with stress concentration is implemented, thus, providing for increase of mining safety. Experimental-industrial test of the system is performed on the base of the mines developing Strel'tsovskoe ore body deposit.

Key words: geo-information system, strain-stress state, geomechanical modeling, technological modeling, rockburst hazard.

REFERENCES

1. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh porod na rudnikakh i nerudnykh mestorozhdeniyakh, ob"ektakh stroitel'stva podzemnykh sooruzhenii, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (RD 06-329-99)* (Guidelines on safe underground metal and nonmetal mining and construction under rockburst hazard conditions (RD 06-329-99)), Moscow, GP NTTs po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii, 2000, 66 p.
2. Petrov V.A. *Razrabotka trekhmernoi geologostrukturnoi modeli mestorozhdeniya Antei kak osnovy geomekhanicheskoi modeli dlya prognoza proyavleniya gornykh udarov. Otchet o NIR (3D geological structure model of Antei deposit as the basis of geomechanical model for rockburst forecasting. Research and development report)*, Moscow, 2009.
3. Laverov N.P., Petrov V.A., Poluektov V.V., Nasimov R.M., Khammer I., Burmistrov A.A., Shchukin S.I. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2008, vol. 50, no 5, pp. 387-413.
4. Shabarov A.N., Filinkov A.A., Rasskazov I.Yu. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdenii Antei, opasnom po gornym udaram* (Instructions on safe mining at rockburst-hazardous Antei deposit), Saint-Petersburg, Izd. SPbGGI, 2008.
5. Kozyrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E. *Zapiski Gornogo instituta* (Mining Institute Proceedings), 2012, vol. 198, pp. 16-23.
6. Rasskazov I.Yu., Potapchuk G.M., Miroshnikov V.I., Rasskazova M.I. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2008, no 11, pp. 116-124.
7. Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Petrov V.A., Prosekin B.A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 2012, no 3, pp. 3-13.
8. Benyavski Z. *Upravlenie gornym davleniem*: per. s angl. (Ground control, English-Russian translation), Moscow, Mir, 1990, 254 p.
9. Bulychev N.S. *Mekhanika podzemnykh sooruzhenii* (Mechanics of underground structures), Moscow, Nedra, 1982, 270 p.
10. Vittke V. *Mekhanika skal'nykh porod*: per. s nem. (Hard rock mechanics, German-Russian translation), Moscow, Nedra, 1990, 439 p.

