УДК 622.831

А.А.КОЗЫРЕВ, *д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, kozar@goi.kolasc.net.ru*
В.И.ПАНИН, *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, trout@goi.kolasc.net.ru*
И.Э.СЕМЕНОВА, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, innas@goi.kolasc.net.ru*
Горный институт Кольского научного центра РАН, г.Апатиты Мурманской обл.

A.A.KOZYREV, *Dr.in eng. sc., deputy director in the field of scienrtific researches, kozar@goi.kolasc.net.ru*
V.I.PANIN, *Dr.in eng. sc., leading research assistant, trout@goi.kolasc.net.ru*
I.E.SEMENOVA, *PhD in eng. sc., senior research assistant, innas@goi.kolasc.net.ru*
Mining Institute of the Kola Research Center RAS, Apatity, Murmansk region

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ СПОСОБОВ ОТРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Разработана методика последовательной геомеханической оценки состояния массива месторождения на разных масштабных уровнях, позволяющая осуществлять региональный и локальный прогноз формирования зон концентрации напряжений, а также разрабатывать и принимать технические решения, обеспечивающие снижение вероятности возникновения динамических форм проявления горного давления непосредственно на горном предприятии в службах прогноза и предупреждения горных ударов.

***Ключевые слова*:** напряженно-деформированное состояние, численные методы, прогноз удароопасности, безопасность горных работ

EXPERIENCE IN EXPERT SYSTEMS APPLICATION FOR ESTIMATION OF STRESS- STRAIN STATE OF ROCK MASS FOR SELECTION OF SAFE METHODS OF ORE DEPOSITS MINING

The method of successive geomechanical estimation of stress-strain state of rock mass at different scale levels was developed. This method allows to carry out the regional and local prediction of formation of stress concentrated zones, and also to develop and adopt technology, which provides the decrease of dynamic rock pressure manifestations and rock burst prevention at mineral deposits.

***Key words*:** stress-strain state, numerical methods, prediction of rockburst-hazard, safe mining operations.

На современном этапе развития горного производства трудно переоценить важность решения проблем, связанных с обеспечением безопасности отработки недр. Добыча полезных ископаемых на многих месторождениях происходит в условиях высокой удароопасности массива горных пород. В связи с этим прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород и удароопасности конструктивных элементов систем разработки является, безусловно, актуальной задачей, успешное решение которой снижает геодинамический риск и позволяет выработать оптимальные технологические решения.

На подземных рудниках ОАО «Апатит» удароопасность обусловлена высокими показателями прочности пород и руд, а также действием в Хибинском массиве высоких тектонических напряжений в сочетании с большой глубиной горных работ. До недавнего времени на подземных рудниках ОАО «Апатит» прогноз удароопасности выполнялся в основном с помощью следующих методов:

- визуальное обследование горных выработок,
- локальные методы оценки удароопасности по результатам непрерывного контроля сейсмичности.

Прогнозирование на основе этих методов связано с применением экстраполяции или аналогового анализа (анализ текущей ситуации и поиск сходных по технологическим и геомеханическим условиям ситуаций в предыдущей практике отработки месторождения). Существенным недостатком этих методов является неоднозначность оперативного прогноза удароопасности и невозможность проведения оперативного сравнения вариантов для выбора оптимального порядка ведения работ на стадии текущего и перспективного планирования.

В значительной мере устранить подобные ограничения позволяет применение численных методов моделирования геомеханической ситуации в районе ведения горных работ. На апатитовых рудниках в течение последних семи лет успешно используется разработанная в Горном институте КНЦ РАН экспертная система диагностики критических состояний участков геологической среды, основанная на анализе горно-геологической информации, инструментальных измерениях и моделировании напряженно-деформированного состояния массива пород методом конечных элементов.

Создан аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий последовательные экспертные оценки состояния массива на разных масштабных уровнях и позволяющий осуществлять не только региональный прогноз формирования зон концентрации напряжений в пределах шахтного поля, отдельных блоков, но и обоснованно разрабатывать технические решения, обеспечивающие снижение вероятности возникновения динамических форм проявления горного давления (рис.1).

Экспертная система включает два информационных блока регионального прогноза и детального моделирования и анализа информации, блок инструментального контроля опасного участка, выявленного в двух первых блоках, и блок технических решений по снижению геодинамического риска на этом участке.

Задачей первых трех блоков является получение и анализ информации, которая используется для определения категории состояния выработки или элементов системы разработки, а также для обоснования последующих технических решений. Одновременно с последовательным вариантом прохождения информации через первые три блока предусматривается возможность выполнять подобные определения на выходе каждого блока, однако уровень достоверности оценок и надежности принимаемых решений в этом случае, естественно, ниже. Содержание и функционирование каждого блока было проанализировано в работе 2005 г.* В этой статье мы более подробно рассмотрим вопросы, связанные с численным моделированием НДС и прогнозной оценкой удароопасности конструктивных элементов системы разработки.

В соответствии с задачами блока *регионального прогноза и анализа информации* экспертной системы в первую очередь разработано несколько объемных мелкомасштабных численных моделей для расчета напряженно-деформированного состояния массива, содержащего очистные пространства всех рудников ОАО «Апатит». Эти модели отражают основные горно-геологические и горно-технологические особенности моделируемого пространства.

Последовательность операций на этапе мелкомасштабного моделирования следующая:

- определение параметров мелкомасштабной расчетной области, соответствующих литологическому блоку;
- разработка инженерно-геологической и численной моделей;
- обоснование граничных условий и последовательности решения ряда трехмерных геомеханических задач для определения основных геологических (рельеф дневной поверхности, основные тектонические структуры, контакты рудных тел) и горно-технических (границы текущих и проектируемых очистных пространств и других элементов горной технологии) факторов, влияющих на формирование исходного поля напряжений в массиве горных пород, вмещающем месторождение полезного ископаемого;

---

* Прогноз и профилактика техногенной сейсмичности на Хибинских апатитовых рудниках / А.А.Козырев, В.И.Панин, В.А.Мальцев, В.С.Свинин, В.Ю.Запорожец, Д.А.Павлов.// Горное дело в Арктике. СПб, 2005. С.15-25.

Kozyrev A.A., Panin V.I., Maltsev V.A., Svinin V.S., Zaporozhets V.Yu., Pavlov D.A. Prediction and prevention of mining-induced seismicity at Khibiny apatite mines // Mining in the Arcitc. Saint Petersburg, 2005. P.15-25.

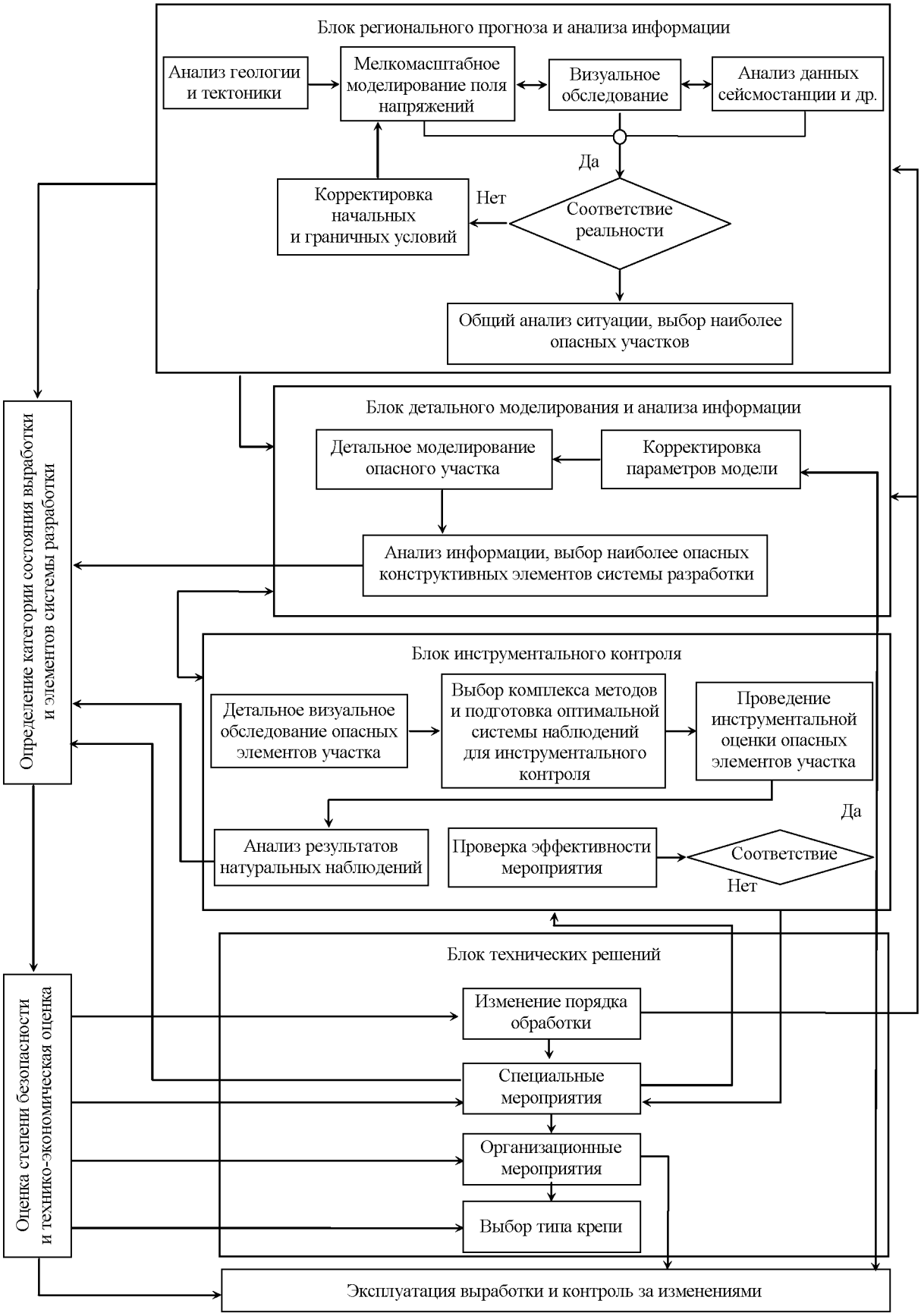


Рис.1. Блок-схема экспертной системы прогнозной оценки изменения напряженного состояния массива пород для обоснования технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ

• сопоставление результатов расчетов с данными других (прямых или косвенных) методов оценки исходного напряженного состояния массива;

• изучение закономерностей формирования вторичного поля напряжений в окрестности ранее отработанных и проектируемых к отработке очистных пространств рудников, входящих в область моделирования;

• проведение по мере необходимости корректировки модели и повторных расчетов;

• локализация удароопасных участков месторождения для более детального моделирования.

Таким образом, определяются параметры поля напряжений участка Хибинского массива, включающего как подземные очистные пространства, так и карьерные выемки, и выделяются зоны повышенной динамической опасности.

Второй этап (*детальное или крупномасштабное моделирование опасного участка*) включает в себя:

• определение области влияния максимальных размеров открытых и подземных очистных пространств по данным мелкомасштабного моделирования;

• определение размеров следующей расчетной области;

• задание на ее границах узловых перемещений, полученных на предыдущем этапе;

• проведение расчетов для моделирования последовательной выемки запасов, анализ их результатов и определение безопасных параметров систем разработки, применяемых или планируемых к применению на месторождении.

При необходимости более детальных расчетов возможно сгущение сетки конечных элементов путем вставки дополнительных сечений в любой из трех плоскостей или формирование новой области моделирования с заданием граничных перемещений из модели второго этапа.

На *третьем этапе* проводят *уточненный расчет НДС в окрестности одиночной выработки*, сопряжения или системы выработок с учетом поля напряжений, сформировавшегося при определенной геометрии очистных пространств путем задания граничных перемещений из соответствующего варианта и моделирования проходки выработки.

Программный комплекс вместе с моделями удароопасных участков, созданными на основании регламентов на отработку соответствующих блоков, и рассчитанным исходным полем напряжений при текущей конфигурации очистных пространств устанавливается на компьютеры службы прогноза и предупреждения горных ударов (СППГУ) рудников. Инженеры службы могут самостоятельно редактировать геометрию очистных пространств, учитывать изменения упругих и прочностных характеристик пород в конечно-элементной модели, в результате чего получать перераспределение напряжений и деформаций как в целом по блоку, так и в окрестности отдельных выработок.

Для контроля и выявления наиболее опасных элементов горной технологии и участков выработок, а также обоснования рекомендаций по их поддерживанию необходимо:

1) регулярное (ежемесячное) прогнозное обновление геометрии очистной выемки в соответствии с планом работ на ближайший месяц, расчет поля напряжений для данного варианта, а также уточненный расчет категорий удароопасности для планируемых к проходке выработок;

2) обязательный прогноз удароопасности в случае вынужденных ситуативных отклонений от плана горных работ и изменения порядка отработки запасов; при прогнозировании повышенной удароопасности – рассмотрение других вариантов порядка ведения горных работ и (или) мероприятий по снижению удароопасности и выход на комиссию по горным ударам рудника с соответствующими предложениями;

3) раз в полгода – проведение сопоставительного анализа расчетных категорий удароопасности выработок с данными визуального обследования; в случае несовпадения – корректировка модели блока (изменение граничных условий, уточнение контактов рудного тела, моделирование неоднородностей);

4) по мере необходимости (не реже одного раза в два года) – проведение измерений напряжений натурными методами и учет результатов измерений при задании граничных условий.

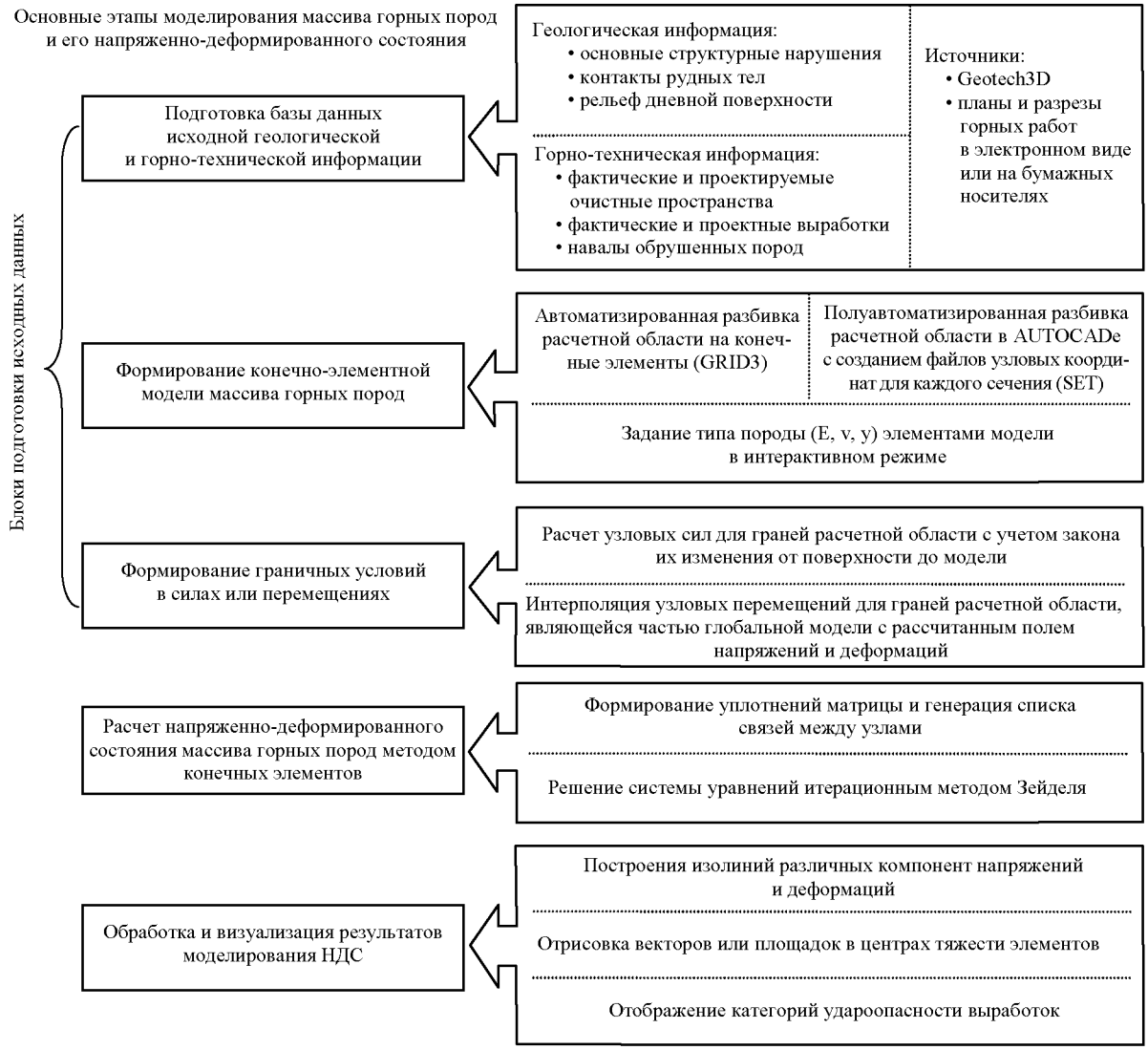


Рис.2. Блок-схема программного комплекса Sigma3D

Все работы по моделированию и анализу НДС проводятся в среде компьютерного приложения Sigma3D, включающего в себя три крупных блока: блок подготовки исходных данных, блок решения задачи МКЭ, блок дополнительной обработки и визуализации результатов расчета (рис.2).

Приложение Sigma3D позволяет:

• создавать новые расчетные варианты – *редактировать* геометрию отбитых пространств, уточнять положение контактов рудных тел, вводить элементы для моделирования неоднородностей второго и третьего порядков, нарушенных зон; эти процедуры можно выполнить путем задания любому элементу в зависимости от типа породы определенного модуля упругости, коэффициента Пуассона и объемного веса; изменения местоположения отдельных узлов расчетной схемы;

• производить *перерасчет* напряженно-деформированного состояния;

• выполнять *анализ результатов* – в качестве выходной информации могут быть использованы главные компоненты напряжений и деформаций в виде карт изолиний или их векторного распределения, а также категории выработок (ортов и штреков) в буквенном отображении или как карты изолиний.

Основные категории состояния выработок на апатитовых рудниках Хибин обозна-

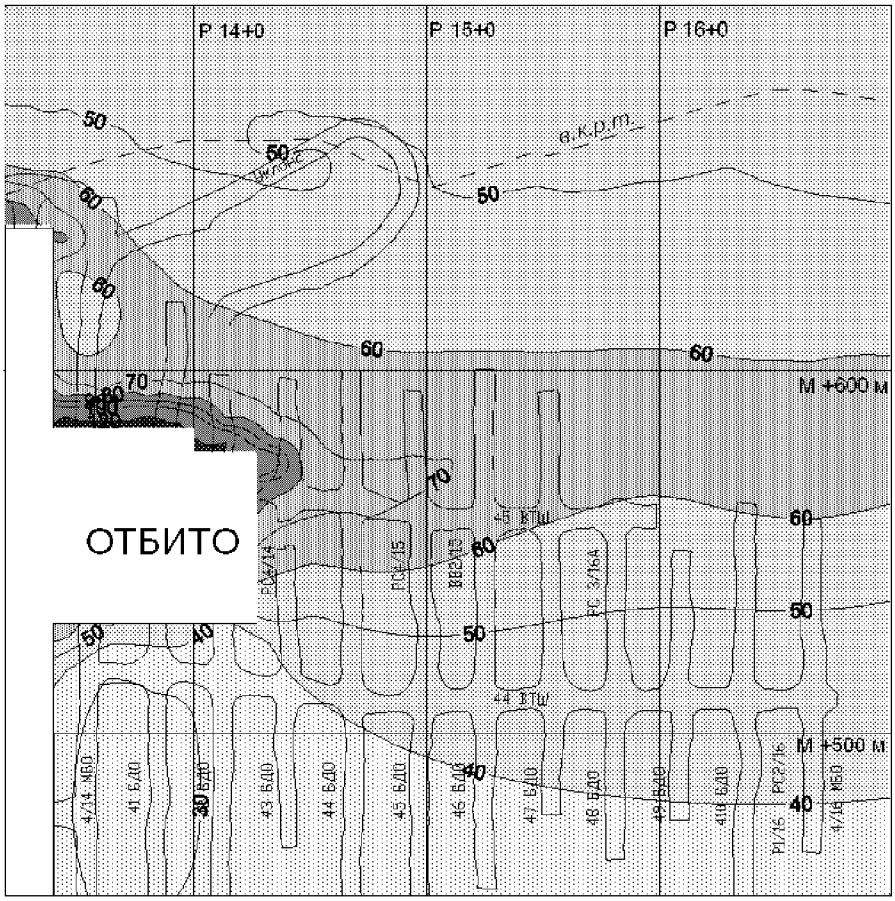


Рис.3. Распределение расчетных значений максимальной компоненты напряжений по блоку 14-16 горизонта +235 м Объединенного Кировского рудника ОАО «Апатит»

чены от А до Д в зависимости от форм проявления горного давления в них и определяют тип поддержания выработок. Для каждой категории состояния выработок в приложении Sigma3D автоматически определяются необходимые типы крепей и специальные мероприятия в соответствии с инструктивными документами*.

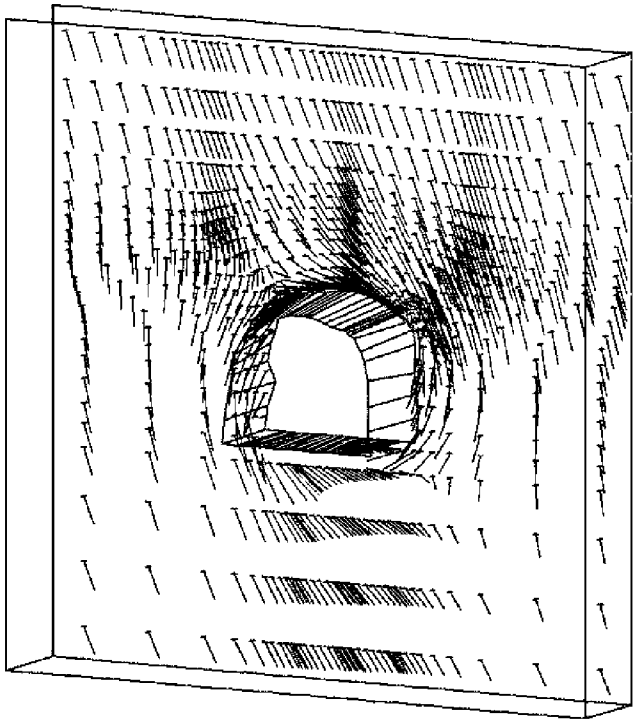
Одним из существенных преимуществ программного продукта является привязка расчетной модели к рудничным координатам как на этапе редактирования, так и на этапе анализа результатов. Сечения модели дополняются привычными для горного инженера разрезами (вкрест и по простиранию рудной залежи), а также планами основных рабочих горизонтов, содержащими всю необходимую геологическую и горно-техническую информацию. Такие подложки могут корректироваться по мере необходимости. В конечном итоге пользователь получает картину распределения напряжений на определенной высотной отметке или по выбранному разрезу с нанесенными на нее фактически пройденными и проектными выработками, сеткой разрезов и магистралей, контактами рудных тел (рис.3).

На следующем масштабном уровне имеется возможность создания геомеханической модели одиночной выработки или системы выработок в расчетном поле напряжений для любого участка исходной модели и получение подробной картины распределения каждой из перечисленных выше компонент напряжений на контуре выработок, сечение которых также можно корректировать. Для реализации этой функции разработано

* Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Апатиты, 2002. 97 с.

Directions on safe mining in rockburst-prone deposits. Apatity, 2002. 97 p.

а



б

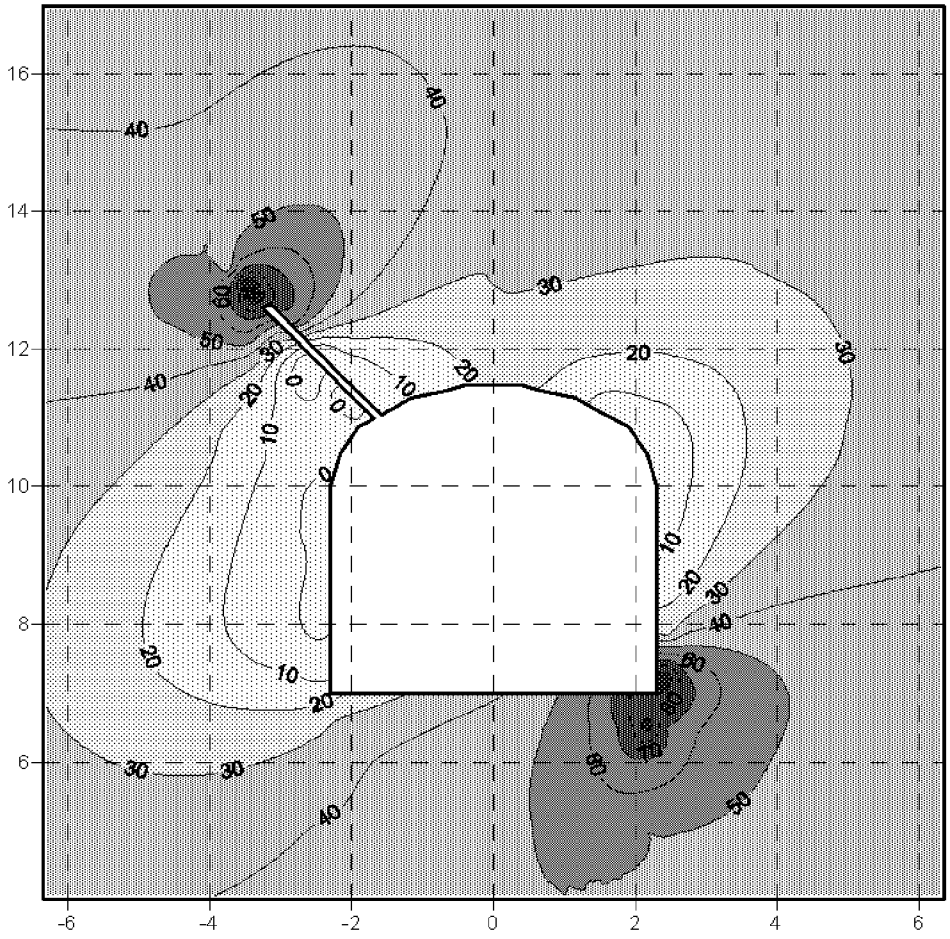


Рис.4. Распределение максимальной компоненты напряжений в окрестности одиночной выработки: *а* – в виде векторов (без проведения разгрузочных мероприятий); *б* – в виде изолиний (при моделировании разгрузочной скважины в зоне концентрации напряжений)

соответствующее программное обеспечение, позволяющее в интерактивном режиме выбирать местоположение и параметры новой расчетной области, производить ее привязку, формировать файлы, описывающие новую локальную конечно-элементную модель и используемые в дальнейшем для расчета напряженно-деформированного состояния пород.

Начальные условия задаются в виде узловых перемещений, рассчитанных путем интерполяции значений, полученных для модели блока при заданной конфигурации очистных пространств. Все эти процедуры проходят автоматически без участия пользователя. По завершению работы соответствующих программ формируется отдельное приложение со всеми необходимыми файлами. В итоге горный инженер имеет данные о напряженно-деформированном состоянии пород в окрестности выработки, системы выработок или их сопряжения. Анализ полученных результатов позволяет определить вероятные параметры нарушенных зон на контуре выработки и дать рекомендации по обеспечению ее устойчивости (рис.4).

В настоящее время программное обеспечение установлено в службах ППГУ рудников ОАО «Апатит» и используется как один из официально утвержденных методов регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород, а также для выбора технических решений по обеспечению безопасности горных работ.

Важно отметить, что предлагаемая методология проведения прогнозных расчетов НДС и его изменения по мере выемки запасов полезного ископаемого может быть применено как для подземной, так и для открытой разработки недр, а также при комбинированном способе. Причем разработанная система применима не только на стадии активного освоения запасов, как это происходит на рудниках ОАО «Апатит». Оптимальным является сопровождение горных работ от проектирования горного предприятия до его закрытия или консервации. В идеале первый этап моделирования с разработкой одной или нескольких мелкомасштабных расчетных схем должен проводиться еще на стадии проектирования горных работ.

Таким образом, экспертные системы оценки НДС массива горных пород обеспечивают управление геодинамическими рисками, представляющее собой комплекс научно-технических и производственно-организационных мероприятий, успешная реализация которых возможна при активном взаимодействии научных работников и практических инженеров. При этом следует отметить значительную роль методов численного моделирования и прогнозирования напряженно-деформированного состояния, использование которых, наряду с экспериментальными определениями параметров исходного поля напряжений, существенно повышает безопасность и технико-экономическую эффективность горных работ.