

dr Д.В. СИДОРОВ  
Sankt-Petersburski Państwowy Instytut Górniczy  
(Uniwersytet Techniczny)  
Санкт-Петербургский государственный горный институт  
(технический университет)

## **Komputerowa ocena zagrożenia tąpniętami złóż rudnych o złożonej budowie geologicznej**

## **Компьютерная оценка удароопасности рудных залежей сложного геологического строения**

*Rozpatrzono procesy komputerowego modelowania stanu naprężeń z uwzględnieniem wpływu naruszeń tektonicznych. Przytoczono wyniki oceny liczbowej wpływu naruszeń na zagrożenie tąpniętami rudnych elementów nośnych.*

*Рассмотрены процессы компьютерного моделирования напряженного состояния рудной залежи с учетом влияния тектонических нарушений. Приведены результаты численной оценки степени влияния нарушений на удароопасность несущих рудных элементов.*

W Rosji w zagrożonych tąpniętami złożach roboty górnicze prowadzi się zwykle w trudnych lub bardzo trudnych warunkach geologiczno-górniczych, do których zalicza się: zróżnicowane naturalne pole naprężeń i nierówność jego składowych; wysoki poziom „naprężeń szczątkowych” w górotworze, zwykle odnoszących się do stref zaburzeń tektonicznych, często kilkakrotnie przewyższający wielkości naprężeń geostatycznych; wzrastająca wraz z głębokością liczba zaburzeń tektonicznych, których parametry zmieniają się w szerokim zakresie na niewielkich obszarach; nierównomierna miąższość kopaliny użytecznej, zarówno po upadzie, jak i po rozciągłości; obecność litologicznych różnic kopaliny użytecznej z różnymi wartościami własności fizyczno-mechanicznych; istnienie stref ze zróżnicowanymi własnościami oraz miąższością niepozwalającą na przemysłową eksploatację; pogorszenie wraz z głębokością składu skał stropu bezpośredniego.

Badanie przyczyn dynamicznych przejawów ciśnienia górotworu, z destrukcją konstrukcyjnych ele-

W Rosjii górne roboty na udaroопасных месторождениях ведутся как правило в сложных и особо сложных горно-геологических условиях, к которым относятся: невыдержанное природное поле напряжений и его неравнокомпонентность; высокий уровень «остаточных напряжений» в горном массиве, как правило приуроченных к зонам тектонических нарушений, зачастую в несколько раз превышающий значения геостатических напряжений; увеличение с глубиной количества тектонических нарушений, параметры которых изменяются в широком диапазоне на небольших базах; невыдержанная мощность полезного ископаемого как по падению, так и по простиранию; присутствие литологических разностей полезного ископаемого с различными показателями физико-механических свойств; наличие некондиционных участков и участков непромышленной мощности; ухудшение состава пород непосредственной кровли с глубиной.

Изучение причин динамических проявлений горного давления с разрушением конструктивных

ментów nośnych, wskazuje, że przy całej różnorodności przyczyn geologicznych, technologicznych i organizacyjnych, w większości przypadków ma miejsce taka przyczyna, jak stopień geologicznego zaburzenia górotworu, uwarunkowany przede wszystkim szerokim rozprzestrzenianiem się zaburzeń tektonicznych, a wraz z nimi stref tektonicznie naprężonych.

Tak więc, na podstawie analizy praktycznych doświadczeń prowadzenia robót górniczych i wyników badań naukowych, przeprowadzonych w wielu przedsiębiorstwach wydobywczych Rosji, można wnioskować o konieczności bardziej głębokiego zbadania wpływu stopnia zaburzenia tektonicznego górotworu na jego zagrożenie tąpnięciami oraz o potrzebie opracowania metodyki i oprogramowania, co pozwoli korygować systemy eksploatacji w zależności od charakteru i parametrów zaburzeń tektonicznych. Przy tym prawidłowość geomechanicznego uzasadnienia bezpiecznych parametrów konstruktywnych elementów obudów górniczych określana jest adekwatnością modelu matematycznego do rzeczywistych geologiczno-górniczych, geodynamicznych i górniczo-technicznych warunków prowadzenia robót górniczych.

Intensywny rozwój techniki obliczeniowej uwarunkował szerokie zastosowanie w wielu praktycznych zadaniach geomechaniki górniczej takich podstawowych metod, jak metoda elementów skończonych (MES) i metoda brzegowych równań całkowitych (MBRC) do obliczania parametrów stanu naprężenia i odkształcenia (SNO) górotworu, a także modelowania zagadnień dynamicznych. Dotyczy to zarówno stanu płaskiego, jak również, w ostatnich latach, zagadnień przestrzennych – obliczania naprężeń i odkształceń wokół wyrobisk, drażonych w górotworze. Przy tym najbardziej efektywne stało się zastosowanie metod liczbowych do rozwiązywania równań różniczkowych. Jednakże zastosowanie liczbowej metody elementów skończonych w zadaniach trójosiowych jest nadzwyczaj pracochłonne, szczególnie w aspekcie rozbicia przestrzeni na elementy skończone, ich kojarzenia, przygotowania informacji wyjściowych oraz analizy uzyskanych informacji.

Duże znaczenie ma zastosowanie MBRC dla oceny zagrożenia tąpnięciami w części krawędziowej złoża rudy i w filarach, bowiem ma to ścisły związek z oceną stateczności elementów konstruktywnych (podparcia) systemu wybierania. Dla oceny stateczności elementów obudowy szeroko wykorzystuje się metodę mechaniki kruchego odkształcenia.

элементов показывает, что при всем многообразии геологических, технологических и организационных причин в большинстве случаев имеет место такая причина, как геологическая нарушенность массива, прежде всего определяемая широким распространением тектонических нарушений, а вместе с ними тектонически-напряженных зон.

Таким образом, на основании анализа практического опыта ведения горных работ и результатов научных исследований выполненных на многих горнодобывающих предприятий России можно заключить о необходимости более глубокого изучения роли тектонической нарушенности на удароопасность массива горных пород и разработки методического и программного обеспечения, позволяющих корректировать параметры систем разработок в зависимости от характера и параметров тектонических нарушений. При этом корректность геомеханического обоснования безопасных параметров конструктивных элементов горных конструкций определяется адекватностью математической модели реальным горно-геологическим, геодинамическим и горнотехническим условиям ведения горных работ.

Интенсивное развитие вычислительной техники обусловило широкое использование во многих прикладных задачах горной геомеханики таких основных методов, как метод конечных элементов (МКЭ) и граничных интегральных уравнений (ГИУ) для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород (МГП), а также моделирования динамических задач. Это касается как плоских задач, так и, в последние годы, пространственных задач о расчете напряжений и деформаций вокруг выработок, пройденных в массиве горных пород. При этом наиболее эффективным стало применение численных методов для решения дифференциальных уравнений. Однако применение численного метода конечных элементов в трехмерных задачах является весьма трудоемким, особенно с точки зрения разбивки пространства на конечные элементы, их сопряжения, подготовки исходной и анализ полученной информации.

Большое значение применение МГИУ имеет для оценки удароопасности в краевой части рудной залежи и целиках, поскольку это тесно связано с оценкой потери устойчивости конструктивных элементов системы разработки. Для оценки устойчивости рудных элементов широко используется метод механики хрупкого разрушения.

Istnieje kilka sposobów metodycznego podejścia w ocenie zagrożenia tąpniętami złóż rudnych. Praktyczne znaczenie mają następujące metody oceny zagrożenia tąpniętami: geofizyczne, na podstawie podzielności rdzenia wiertniczego, na podstawie wielkości wgłębienia punktaka wciskanego w ściankę odwiertu, na podstawie dopuszczalnej wielkości naprężeń, na podstawie dopuszczalnej wielkości przyrostu energii sprężystej. Do obliczeń związanych z określaniem stref potencjalnie niebezpiecznych najbardziej przydatne jest kryterium dopuszczalnych naprężeń. Proces komputerowej technologii modelowania można umownie podzielić na trzy podstawowe części: preprocesową (organizowanie informacji wyjściowych), obliczeniową (MBRC, ocena zagrożenia tąpniętami) i postprocesową (prezentacja wyników obliczeń) [1].

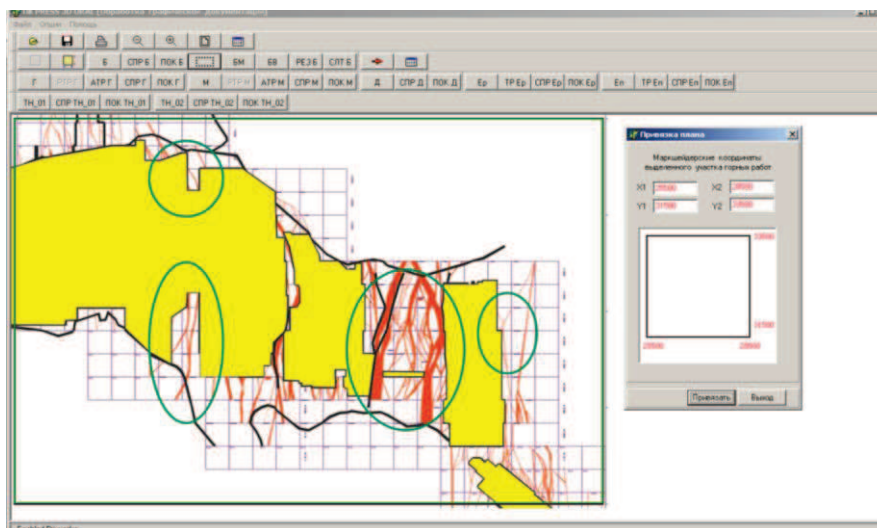
Poniżej, na przykładzie eksploatacji norylskiego złoża rud miedziowo-niklowych, został opisany proces i wyniki komputerowego modelowania stanu naprężeń masywu skalnego z uwzględnieniem wpływu zaburzeń tektonicznych. Podstawowe etapy modelowania przedstawiono na rysunkach 1- 3.

Dowiązanie współrzędnych do planu robót górniczych pokazano na rysunku 1.

Существует несколько методических подходов в оценке удароопасности рудных залежей. Практическое значение имеют следующие методы оценки удароопасности: геофизические, по дискванию керна, по величине вдавливания пуансона в стенки скважин, по допустимой величине напряжений, по допустимой величине притока упругой энергии. Для расчета потенциально опасных зон наиболее применимым является критерий по допустимым напряжениям. Процесс компьютерной технологии моделирования условно можно разделить на три основные части: препроцессорную (организация исходной информации), расчетную (МГИУ, оценка удароопасности) и постпроцессорную (представление результатов расчетов) [1].

Ниже, на примере разработки Норильского медно-никелевого месторождения рассматриваются процесс и результаты компьютерного моделирования напряженного состояния рудного массива с учетом влияния тектонических нарушений. Основные этапы моделирования приведены на рис. 1- 3.

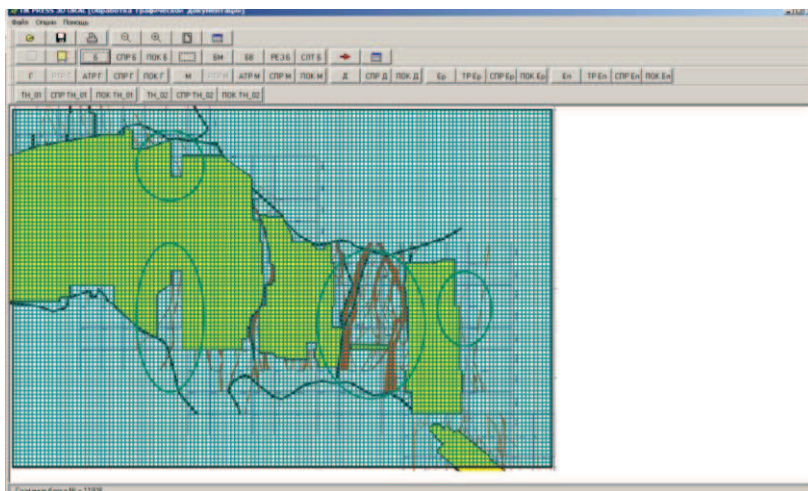
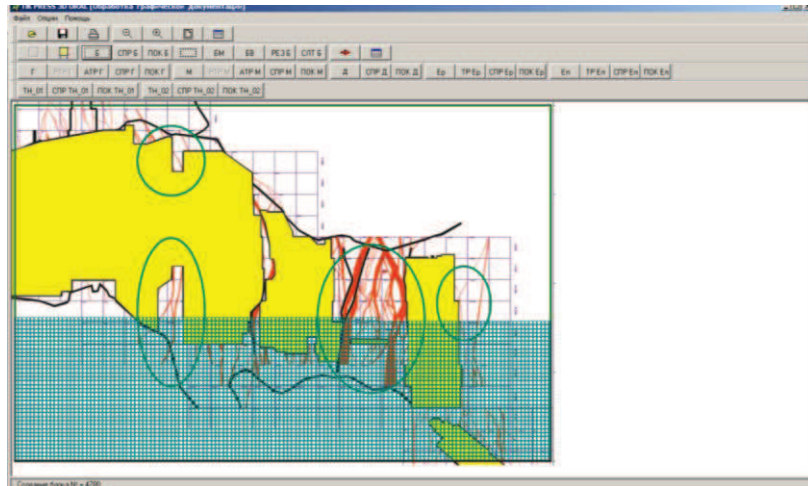
Осуществление координатной привязки плана горных работ приведено на рис. 1



Rys. 1. Dowiązanie współrzędnych do planu robót górniczych  
 Рис. 1. Координатная привязка плана горных работ

Proces budowania siatki obliczeniowej pokazano na rysunku 2.

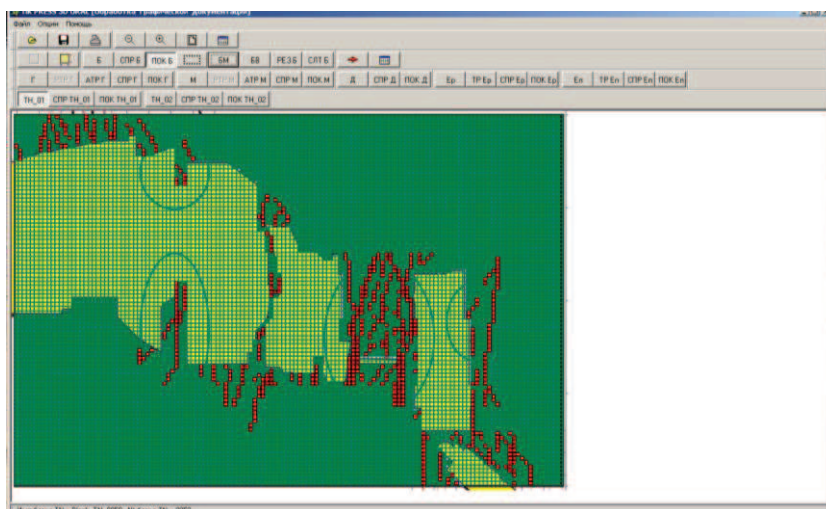
Процесс построения расчетной сетки показан на рис. 2.



Rys. 2. Budowanie siatki obliczeniowej  
 Рис. 2. Построение расчетной сетки

Etap kształtowania elementów zaburzeń tektonicznych przedstawiono na rysunku 3.

Этап формирования элементов тектонических нарушений приведен на рис. 3.



Rys. 3. Kształtowanie elementów naruszeń tektonicznych  
 Рис. 3. Формирование элементов тектонических нарушений

Wyniki modelowania komputerowego przedstawiono na rysunkach 4-6.

Na rysunku 4 pokazano regionalny rozkład naprężeń ściskających w masywie złoża rudy. Wartości naprężeń podano w MPa.

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 4-6.

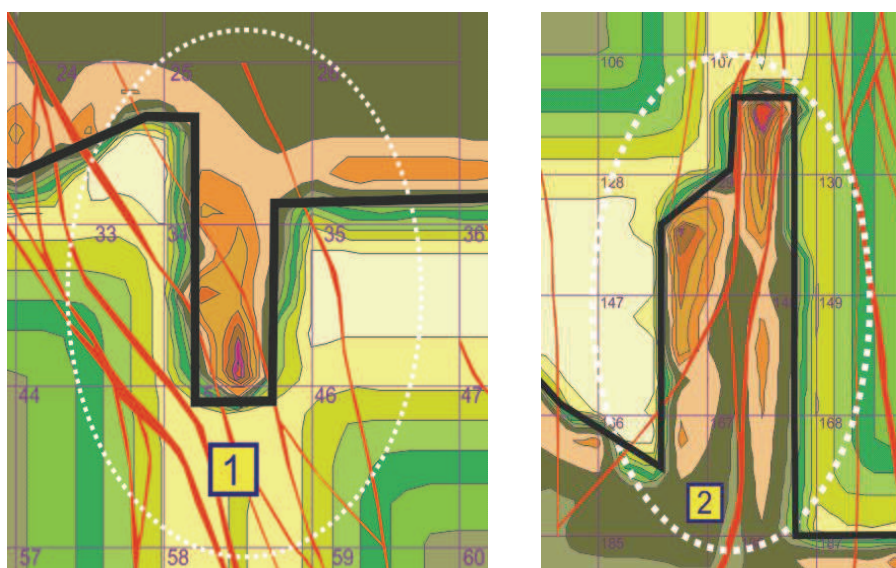
На рис. 4 приведено региональное распределение сжимающих напряжений в рудном массиве. Значения напряжений приведены в МПа.



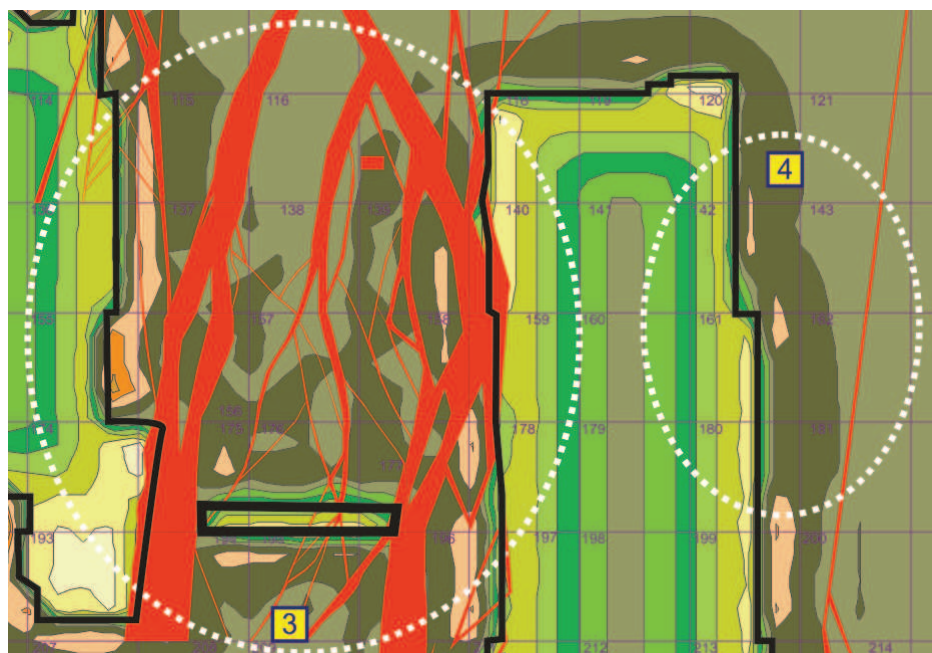
Rys. 4. Regionalny rozkład naprężeń ściskających w masywie złoża rudy  
 Рис. 4. Региональное распределение сжимающих напряжений в рудном массиве

Lokalny rozkład naprężeń ściskających w masywie złoża rudy w rejonach nr 1, 2 pokazano na rysunku 5, a w rejonach nr 3, 4 – na rysunku 6.

Локальное распределение сжимающих напряжений в рудном массиве на участках №№ 1, 2 приведено на рис. 5, а на участках №№ 3, 4 приведено на рис. 6.



Rys. 5. Rozkład naprężeń ściskających w masywie złoża rudy w rejonach nr 1, 2  
 Рис. 5. Распределение сжимающих напряжений в рудном массиве на участках №№ 1, 2



Rys. 6. Rozkład naprężeń ściskających w masywie złoża rudy w rejonach nr 3, 4  
 Рис. 6. Распределение сжимающих напряжений в рудном массиве на участках №№ 3, 4

Obecność w granicach badanych rejonów masywu złoża rudy zaburzeń tektonicznych 2. typu (charakteryzujących się otwartymi lub wypełnionymi szczelinami) prowadzi do nierównomiernej, mającej charakter falisty, zmiany rozkładu naprężeń z utworzeniem stref z podwyższonym spiętrzeniem naprężeń między szczelinami zaburzeń tektonicznych, a także między szczelinami zaburzeń tektonicznych i wyrobiskami. Najbardziej wyraźnie ta prawidłowość jest widoczna w filarze dzielącym RM-1 w rejonach 1 i 2 (rys. 5), gdzie poziom naprężeń zmienia się od 40 do 80 MPa, osiągając w wystających elementach wartości krytyczne pod względem zagrożenia łąpaniami, przekraczające 0,7 granicy wytrzymałości rudy na ściskanie jednoosiowe [2]. Pogorszenie sytuacji geomechanicznej będzie następowało w przypadku obniżenia podporności filara dzielącego RM-1 wskutek zmniejszenia się jego współczynnika kształtu.

W rejonie 3 (rys. 6), pomimo obecności masywnych struktur tektonicznych, poziom naprężeń nie przekracza wartości krytycznych, co tłumaczy znaczną szerokość pasa masywu rudnego między wyrobiskami. Równocześnie należy jednak kontrolować stan naprężeń w rudnym masywie przy rozszerzeniu wybierania i rozkonserwowaniu szczelin zaburzeń tektonicznych.

W rejonie 4 (rys. 6), pomimo niewysokiego poziomu naprężeń, należy oczekiwać stopniowego pogorszenia sytuacji geomechanicznej w miarę zmniejszania się filara między frontem wybierania i poprzedzającym zaburzeniem tektonicznym.

Наличие в пределах исследуемых участков рудного массива тектонических нарушений 2 типа (с открытыми швами или швами с заполнителями) приводит к неравномерному волнообразному перераспределению напряжений с формированием зон с повышенными концентрациями напряжений между швами тектонических нарушений, а также швами нарушений и выработанными пространствами. Наиболее четко эта закономерность прослеживается в РМ-1 на участках 1 и 2 (рис. 5), где уровень напряжений варьирует от 40 до 80 МПа, достигая на выступающих частях критических по удароопасности значений, превышающих 0,7 от предела прочности руды на одноосное сжатие [2]. Ухудшение геomechanической обстановки будет происходить в случае снижения несущей способности разделительного массива РМ-1 путем уменьшения его коэффициента формы.

На участке 3 (рис. 6) несмотря на наличие мощных тектонических структур уровень напряжений не превышает критических значений, что объясняется значительной шириной рудного массива между выработанными пространствами. В месте с тем необходимо осуществлять контроль за напряженным состоянием рудного массива при увеличении отработки и расконсервации швов тектонических нарушений.

На участке 4 (рис. 6) несмотря на невысокий уровень напряжений следует ожидать постепенного ухудшения геomechanической обстановки по мере сокращения целика между очистными работами и передовым тектоническим нарушением.

Tak więc, w chwili obecnej wydaje się, że ma przyszłość zastosowanie współczesnych technologii komputerowych, pozwalających wykorzystać modelowanie matematyczne do opisanego procesów, zachodzących podczas eksploatacji złóż, w zakresie oceny stanu naprężeń i odkształceń oraz stopnia zagrożenia tąpnięciami eksploatowanych rejonów pól górniczych w strefach wpływu zaburzeń tektonicznych, ukierunkowane na uwzględnienie szerokiego zakresu geologiczno-górnictwa i górniczo-technicznych warunków prowadzenia robót górniczych i oparte na przestrzennym modelowaniu matematycznym procesów geomechanicznych.

Niniejsze badania wykonano na podstawie grantu nr A/10/74888, udzielonego przez Niemiecką Służbę Wymian Akademickich (DAAD) i Ministerstwo Szkolnictwa i Nauki Federacji Rosyjskiej.

#### Literatura

1. Pietuchow I.M., Lińkow A.M., Sidorow W.S.: Metody obliczeniowe w mechanice tąpnięć i wyrzutów. Poradnik informacyjny. Moskwa. Nedra. 1992. 256 str.
2. Instrukcja bezpiecznego prowadzenia robót górniczych w złożach rudnych i nierudnych, obiektach budowy budowli podziemnych, skłonnych i zagrożonych tąpnięciami (RD 06-329-99). Moskwa. Państwowe Przedsiębiorstwo Unitarne „Naukowo-Techniczne Centrum Bezpieczeństwa Przemysłu Państwowego Urzędu Dozoru Technicznego i Górniczego Gosgortekhnadzor Rosji”, 2003.

*Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów*

Таким образом, на сегодняшний день перспективным видится применение современных компьютерных технологий, позволяющих использовать математическое моделирование для описания процессов, происходящих при разработке месторождений, в части оценки напряженно-деформированного состояния, и степени удароопасности разрабатываемых участков шахтных полей в зонах влияния тектонических нарушений, направленное на учет широкого диапазона горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ и базирующееся на пространственном математическом моделировании геомеханических процессов.

Настоящие исследования выполнены по гранту № A/10/74888 присужденному Германской службой академических обменов (DAAD) и Министерством образования и науки Российской Федерации.

#### Литература

1. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С.: Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов. Справочное пособие. М.: Недра. 1992. 256 с.
2. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подъемных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). — М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности промышленности Госгортехнадзора России», 2003.

*Статья прорецензирована двумя независимыми рецензентами*

### COMPUTER ESTIMATION OF ROCKBURST-HAZARDOUS OF ORE DEPOSITS DIFFICULT GEOLOGIC STRUCTURE

Processes of computer modelling of a stress of ore deposit taking into account influence of tectonic disturbances are considered. Results of a numerical estimation of degree of influence of failures on a rock-bump hazard of bearing ore elements are resulted.