УДК 622.831.32

**И.Ю.РАССКАЗОВ**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *директор*, *rasskazov@igd.khv.ru*
**Г.А.КУРСАКИН**, *д-р техн. наук*, *гл. науч. сотрудник*
**Б.Г.САКСИН**, *д-р геол.-минерал. наук*, *гл .науч. сотрудник*
*Институт горного дела ДАО РАН*, *adm@igd.khv.ru*
**А.А.ФИЛИНКОВ**, *канд. техн. наук, зав. лабораторией*, *post@spmi.ru*
*Санкт-Петербургский государственный горный институт* (*технический университет*)
**В.С.СВЯТЕЦКИЙ**, *ген. директор*
**Б.А.ПРОСЕКИН**, *гл. маркшейдер*, *prosek@inbox.ru*
*ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» г.Краснокаменск*

**I.Yu.RASSKAZOV,** *Dr. in eng. sc.*, *professor*, *director*, *rasskazov@igd.khv.ru*
**G.A.KURSAKIN**, *Dr. in eng. sc.*, *chief research assistant*
**B.G.SAKSIN**, *Dr.geol. and min.*, *chief research assistant*
*Institute of Mining*, *the Far-East Office of RAS*, *adm@igd.khv.ru*
**A.A.FILINKOV**, *PhD in eng. sc.*, *laboratory head*, *post@spmi.ru*
*Saint Petersburg State Mining Institute* (*Technical University*)
**V.S.SVIATETSKY**, *general director*
**B.A.PROSEKIN**, *chief mine surveyor*, *prosek@inbox.ru*
«*Priargunsk productional mining-chemical union*», *Krasnokamensk*

# КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «АНТЕЙ»

В статье рассмотрены условия и характер динамических проявлений горного давления при отработке месторождения урановых руд «Антей». Приведены данные о горно-геологических, горно-технических и геомеханических условиях отработки месторождения. Дана характеристика методов и средств контроля горного давления и приведены результаты их применения на глубоких горизонтах рудника.

***Ключевые слова:*** месторождение урановых руд, глубина, удароопасность, измерения, математическое моделирование.

# CONTROL OF DYNAMIC ROCK PRESSURE MANIFESTATIONS IN MINING THE «ANTEY» DEPOSIT

The article considers the conditions and pattern of dynamic rock pressure manifestations in mining the «Antey» deposit of uranium ores. Data on geological, technological and geomechanical conditions of the deposit mining are given. The methods and means for rock pressure control are described as well as the results of their application at deep horizons of ore mine are given.

***Key words***: deposit of uranium ores, depth, rockburst hazard, measurements, mathematical modeling.

Месторождение урановых руд «Антей», эксплуатацию которого осуществляет ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ОАО ППГХО), расположено в юго-восточном Забайкалье и входит в состав Стрельцовского рудного узла. Район месторождения находится в пределах Центрально-Азиатского орогенного пояса, «зажатого» между Сино-Корейским и Северо-Азиатским кратонами в северо-западной части Амурской плиты, и характеризующегося высокой геодинамиче-

ской активностью [3]. Этот участок земной коры имеет ярко выраженную блоковую структуру, в которой особое место занимает Тулукуевская кальдера, представляющая собой одну из форм осадочно-вулканических депрессий. В ее верхнем структурном этаже залегает толща сложнодислоцированных пород чехла, в нижнем – граниты фундамента, в котором сформировалось оруденение.

Месторождение представлено в виде локализованных в зонах разломов крутопадающих рудных тел субмеридионального простирания мощностью от нескольких до первых десятков метров и протяженностью по глубине до 1500 м. Вмещающими породами являются мелко- и среднезернистые лейкократовые граниты, а также биотитовые граниты и гранитогнейсы. Форма гранитных тел жильная, реже линзообразная.

Основными структурными элементами месторождения «Антей» являются сближенные в пространстве субпараллельные сложно построенные зоны разломов 160 и 13. Они имеют встречные падения и на глубине 750 м практически сливаются. Зона разлома 160 является основной рудоконтролирующей и рудовмещающей и состоит из серий швов север-северо-восточного простирания (по азимуту 25-30°) и крутого падения. Швы выполнены пакетами глинки трения мощностью до 1 м и сопровождаются зонами повышенной трещиноватости мощностью до первых десятков метров.

Практически все разновидности пород месторождения проявляют склонность к упругому деформированию и хрупкому разрушению в динамической форме. К наиболее удароопасным породам относятся лейкократовые граниты, предел прочности которых на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) в среднем изменяется от 180 до 250 МПа, модуль Юнга ($E$) – от 59,3 до 68,3 ГПа.

По результатам натурных измерений установлено, что в гранитах фундамента действует неравнокомпонентное поле напряжений, в котором преобладают горизонтальные сжимающие напряжения, наибольшие из которых в 1,5-2,5 раза превышают гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород [6], что указывает на определяющее влияние тектонических сил в формировании естественного напряженного состояния.

Разработку месторождения осуществляет рудник «Глубокий». В качестве основной применяется система разработки нисходящими горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. В зависимости от мощности рудного тела слои отрабатываются одной или несколькими заходками непосредственно под искусственной кровлей закладочного массива. Высота этажа между горизонтами 60 м. В соответствии со сложившимся в последние годы на руднике порядком подготовки и отработки запасов рудный массив делится на два полублока, отрабатываемых одновременно по простиранию рудного тела. Постепенно уменьшающийся в процессе добычных работ рудный целик разгружается путем камуфлетного взрывания вертикальных скважинных зарядов.

Очистные работы на месторождении достигли глубины 760 м (на XII горизонте). На нижележащих горизонтах ведутся горно-подготовительные работы.

На месторождении «Антей» первые признаки удароопасности были отмечены еще на стадии строительства при проходке стволов и разведочно-подготовительных выработок [6]. Так, в 1976-1977 гг. динамическое заколообразование и стреляние гранитов неоднократно отмечалось при проведении разведочных выработок на X горизонте при глубине 640 м, а также при проходке ствола 12-В, начиная с глубины 570 м. По мере углубления ствола частота и интенсивность этих явлений закономерно увеличивались. В последующие годы динамические проявления горного давления в форме стреляний и интенсивного заколообразования пород стали происходить при ведении горно-подготовительных и очистных работ на VII горизонте, расположенном на глубине 410 м от дневной поверхности, и нижележащих горизонтах.

С переходом горных работ на более глубокие горизонты и увеличением выработанного пространства (в настоящее время площадь подработки превышает

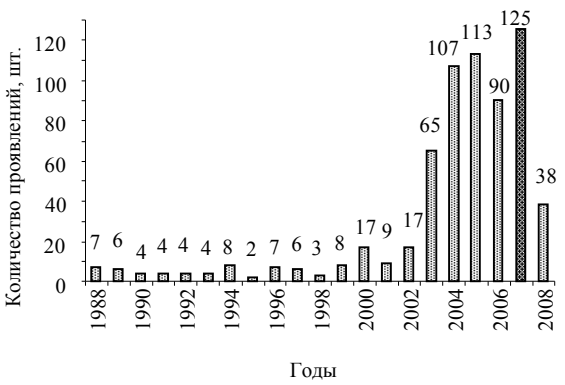



Рис.1. Количество динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» по годам отработки

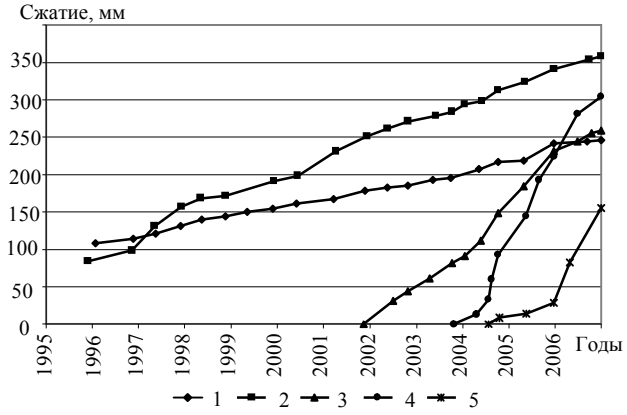



Рис.2. Сжатие закладочного массива по разведочной линии 633 по данным реперных станций в ортах 6а-710(1); 6а-810 (2); 6а -910 (3); 6а-1010(4); 6а-1110(5)

100 тыс.м$^2$) начал происходить рост числа и интенсивности динамических проявлений горного давления (рис.1).

Так, если до 2000 г. на месторождении отмечалось не более восьми случаев динамических проявлений горного давления в год, то в дальнейшем в отдельные годы регистрировалось до 100 и более.

В горных выработках горное давление, в основном, проявляется в форме интенсивного заколообразования в виде разрушения искусственной кровли очистных заходок, щелчков и толчков внутри массива без выброса горной массы. Наибольшее число динамических проявлений в последние годы отмечено в зоне влияния очистных блоков 1010 и 1114.

Одной из основных форм динамического проявления горного давления в последние годы являются толчки в глубине массива (2004 и 2005 гг. соответственно 28 и 39 случаев), которые сопровождаются резким сильным звуком, пылеобразованием и сотрясением массива, и часто приводят к обрушению заколовшихся плит (1-1,5 м$^3$) и образованию новых заколов, а также к разрушению закладки. В отдельных случаях происходит разрушение почвы выработок, иногда с поднятием рельсовых путей. Полученные данные указывают, что определяющее влияние на процесс толчкообразного деформирования массива оказывает геодинамически активный разлом 160, вдоль шва которого формируется зона концентрации высоких тектонических напряжений.

Наиболее интенсивное разрушение закладки происходит в зоне влияния фронта очистных работ на расстоянии до 20 м и приурочено большей частью к сопряжению выработок. На высокий уровень действующих тектонических напряжений, вызывающих разрушение закладочного массива, указывают результаты шахтных наблюдений за деформационными процессами с применением реперных станций, оборудованных на VII-XI горизонтах.

В результате проведенных исследований установлено, что с увеличением глубины отработки возрастает интенсивность сжатия закладочного массива. Анализ экспериментальных данных показывает, что реперы испытывают как вертикальные, так и горизонтальные перемещения. Вертикальные перемещения являются в основном восходящими и характеризуются невысокими (не более 10-15 мм) значениями на концах профильных линий, расположенных на расстоянии 50 м от центра рудного тела, и более высокими значениями (до 97 мм в орте 6а-710) в зоне отрабатываемого рудного тела, приуроченного к тектоническому нарушению 160. При этом наблюдается поднятие западного крыла разлома относительно восточного.

Суммарная величина конвергенции бортов выработанного пространства, которая наблюдается в течение длительного (более 10 лет) времени, по отдельным реперным линиям превысила 300 мм (рис.2).

В последние годы наблюдается изменение интенсивности деформационных процессов: уменьшение почти в 2 раза по сравнению с предыдущим периодом сжимающих деформаций на VII-IX горизонтах и резкое их увеличение на X и XI горизонтах (в орте 6а-1110 горизонтальные перемещения реперов составили за год 127 мм). При пересчете относительных деформаций на ширину закладочного массива наибольшая относительная величина деформаций составила 77 мм/м (орт 6а-1014).

Наиболее мощное динамическое явление, которое было классифицировано как горный удар горно-тектонического типа, было зарегистрировано 14.05.2005 г. Удар в рудном целике блока 6а-1114 на уровне 13-го слоя сопровождался резким звуком, образованием воздушной волны, сейсмическим эффектом (сопоставимым со взрывом 10 т ВВ), ощущавшимся в здании поверхностного комплекса рудника. В результате горного удара были разрушены борта и кровля уклона с 4-го на 5-й слой, сопряжения и искусственная кровля заходок 4-го и 11-го слоев, борта рудоспуска 6а-1114/1, разрушено крепление выработок.

Всего было разрушено более 160 м выработок, объем выброшенной породы превысил 50 м$^2$, объем разрушенной искусственной кровли составил около 200 м$^2$. В орте 6а-1014 в районе тектонического шва 160 произошло поднятие (до 5 см) бетонной дорожки и рельсового пути. После горного удара установлено сближение бортов выработанного пространства по ортам 6а-1014 и 6а-1114 соответственно на 15 и 17 мм.

Причиной мощного динамического проявления горного давления с высокой степенью вероятности явилась высокая концентрация напряжений в недоразгруженном целике верхней части блока 6а-1114, обусловленная его подработкой и влиянием тектонических нарушений 160 и 13, вблизи швов которых отмечены смещения как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Последние свидетельствуют о развитии процесса сдвижения, ограниченного разломами 160 и 13 тектонического блока, вызывающего дополнительную пригрузку разрабатываемого массива горных пород. Об активизации геодинамических процессов на данном участке свидетельствуют участившиеся здесь в последнее время случаи толчков и тресков в глубине массива.

В результате комплексного анализа условий и факторов динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» можно сделать следующие выводы [4]:

- в формировании удароопасных геомеханических ситуаций участвуют как природные, так и техногенные факторы, из которых основными являются влияние тектонических нарушений (особенно рудоконтролирующего разлома 160) и контактов руд и вмещающих пород выработанного пространства, а также наличие различного рода целиков;
- проявления внешних признаков удароопасности (шелушения, интенсивного заколообразования) не носят закономерный характер, а более сильные динамические явления, в основном, происходят через определенное время после взрывных работ и, как правило, приурочены к зонам влияния формирующихся внутриблоковых целиков;
- значительное увеличение объемов выработанных пространств приводит к возникновению качественно новой геомеханической ситуации: на ранних этапах освоения месторождения наибольшее число (более 80 %) динамических проявлений отмечалось в процессе проходки горно-капитальных и подготовительных выработок, а в последние годы они все чаще происходят под влиянием очистных работ;
- с увеличением глубины и масштаба отработки усиливается влияние на удароопасность геодинамически активных разломов и изменяются форма и характер динамических проявлений горного давления: все большее распространение получают толчки в глубине массива, некоторые из которых сопровождаются выделением значительной сейсмической энергии и приводят к разрушением контура выработок и закладочного массива.

Для прогнозирования динамических проявлений горного давления и обоснования эффективных противоударных мероприятий на месторождении «Антей» применяется комплекс численных и инструмен-

тальных методов оценки напряженного состояния и удароопасности разрабатываемого массива горных пород.

Математическое моделирование методами конечных элементов (МКЭ) и граничных интегральных уравнений (МГИУ) применяется для разработки прогнозных карт напряженно-деформированного состояния (НДС) отдельных участков рудничного поля, являющихся основой для перспективного планирования горных работ, а также позволяет установить важные закономерности формирования техногенных полей напряжений, учитывающих особенности геолого-тектонического строения месторождения и параметры применяемых технологических схем.

Выявленные по результатам моделирования высоконапряженные и потенциально удароопасные участки массива контролируются инструментальными методами. Для региональной оценки состояния массива на глубоких горизонтах рудника «Глубокий» с 2006 г. используется разработанная в ИГД ДВО РАН многоканальная цифровая автоматизированная геоакустическая система контроля горного давления «Prognoz-ADS». Система состоит из подземной и поверхностной частей и включает в себя цифровые приемные преобразователи, объединенные в одном блоке ретранслятор, источник питания и синхронизатор, многопортовый расширитель RS-485 и центр управления системой на базе персонального компьютера [1]. В настоящее время на четырех нижних горизонтах месторождения создана разветвленная сеть приемных преобразователей, позволяющая регистрировать даже слабые (с энергией 1 Дж и более) импульсы акустической эмиссии (АЭ), тем самым обеспечивая возможность наблюдений за развитием процесса формирования очагов разрушения непосредственно от начальных стадий их образования, что существенно повышает надежность прогноза. Пример отображения зарегистрированного акустического импульса с энергией 1,73 Дж в окне программного обеспечения системы геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS» приведен на рис.3.

По результатам измерений строятся карты изолиний акустической активности, отражающие процесс перераспределения напряжений в массиве под влиянием горных работ (рис.4). Результаты мониторинга посредством программы MineFrame импортируются в 3D-модель месторождения и могут быть представлены в объемном виде [2].

По данным геоакустического контроля (2006-2008 гг.) установлено, что массив горных пород участка месторождения в пределах зоны контроля испытывает интенсивные деформации, обусловленные техногенным воздействием на него горных работ, которые сопровождаются активным излучением акустических импульсов различного энергетического уровня.

Анализ пространственного распределения и параметров очагов АЭ-событий дал возможность выявить ряд особенностей формирования крупных долгоживущих акустически активных зон, включая их приуроченность преимущественно к контурам очистных выработок (в первую очередь, сформированные целики и выступы фронта очистных работ), к геологическим контактам разнопрочных пород и к активным тектоническим разломам, особенно на участке «пережима» рудоконтролирующего тектонического разлома 160, где ранее неоднократно отмечались динамические проявления горного давления. В пределах контролируемой зоны на уровне XI и XII горизонтов наблюдается процесс миграции акустически активных зон со средней скоростью 30 м в месяц по простиранию и падению породного блока, имеющего форму «клина», границами которого являются тектонические нарушения 13 и 160. Повышенная акустическая активность здесь отмечается после проведения взрывных работ. При этом длительность времени спада акустической активности составляла 1-2 ч, а сам этот процесс, как правило, носил волнообразный характер.

В процессе мониторинга формируется банк данных о параметрах акустической активности разрабатываемого массива месторождения. Содержащаяся в банке данных и постоянно пополняющаяся информация является основой для осуществления текущего и перспективного прогноза удароопасности участков шахтного поля рудника. С накоп-

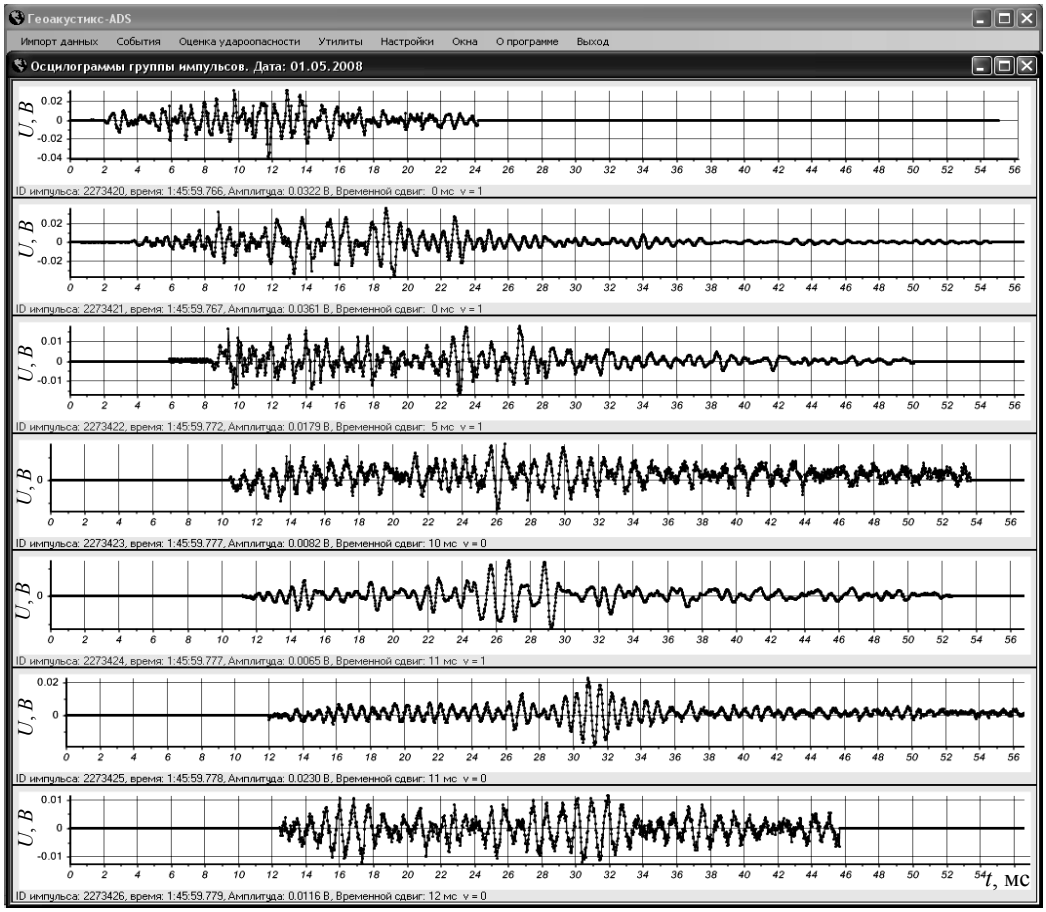



Рис.3. Локационная серия акустического события, зарегистрированного в блоке 6а-1212 рудника «Глубокий» системой геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS»

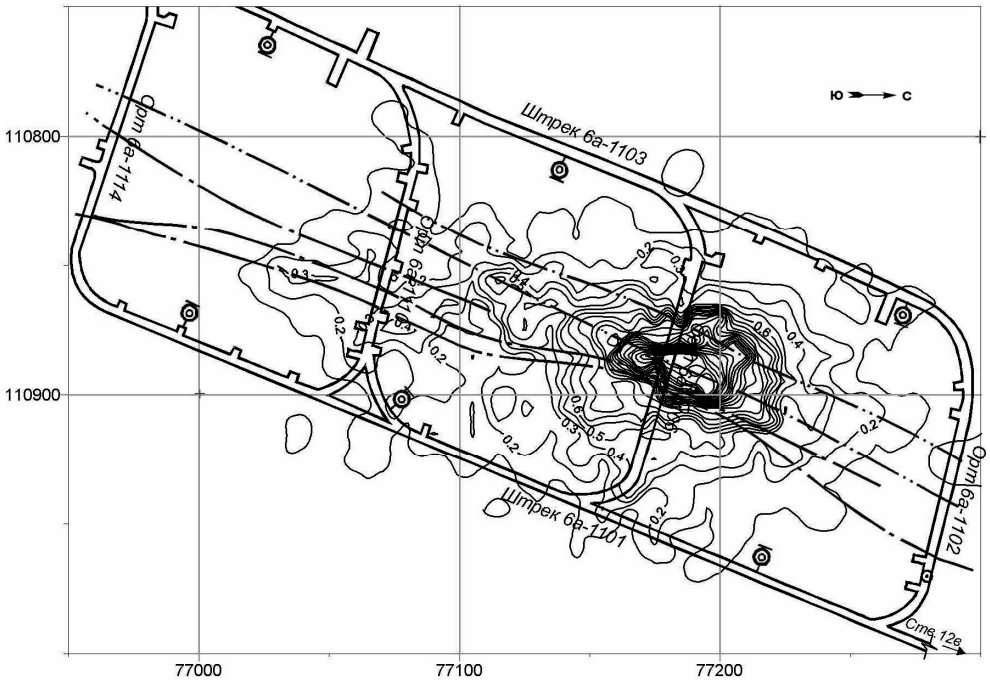



Рис.4. Карта акустической активности участка массива месторождения «Антей», построенная по данным геоакустического мониторинга в 2008 г. (в проекции на XI горизонт)

лением представительного объема экспериментальных данных устанавливаются и уточняются критерии удароопасности массива горных пород.

Состояние массива в пределах акустически активных зон достаточно объективно отражает совокупность таких прогностических признаков, как концентрированность очагов и степень локализации источников АЭ, повторяемость периодов акустической активности и ее незатухающий характер, скорость и направление миграции очагов, близость очаговой зоны к обнажению и др., значения которых экспериментально устанавливаются для условий конкретного месторождения или его части. Дополнительным критерием удароопасности может являться величина удельной энергии $E_V^{АЭ}$, выделившейся в пределах акустически активной зоны, которая может служить критерием для оценки полноты разрушения [7].

Краевые участки горного массива в пределах выявленных по результатам мониторинга потенциально удароопасных зон, характеризующихся повышенной акустической активностью, дополнительно исследуются локальными методами. К числу апробированных и рекомендованных к применению на месторождении «Антей» относятся геомеханический метод и экспресс-метод, основанный на регистрации естественной акустической эмиссии. Последний реализуется с использованием аппаратуры СБ 32М «Сапфир» конструкции ОАО ВНИМИ.

По результатам локальных измерений напряженности горных пород в целиках и других элементах системы разработки и участках массива получены новые данные о параметрах техногенного поля напряжений на глубоких горизонтах месторождения, характеризующегося значительной изменчивостью как по величине, так и по направлению действия главных напряжений. На участках вне зоны опорного давления наибольшие напряжения ориентированы преимущественно по азимуту 220-240°, а в зоне влияния очистных работ их вектор меняет направление действия, отклоняясь на 30° и более от первоначальной ориентировки. Величина наибольших напряжений в зависимости от расположения замерной станции варьируется от 53 до 110 МПа и приближается к пределу прочности горных пород.

Результаты исследований с применением теоретических и экспериментальных методов и технических средств контроля горного давления позволяют эффективно решать задачи оперативного и перспективного планирования горных работ на удароопасных участках, осуществлять необходимую корректировку параметров принятой на месторождении технологии и более обоснованно применять профилактические мероприятия по предотвращению горных ударов. К числу рекомендованных мер по управлению горным давлением на месторождении «Антей» относятся: рациональный порядок отработки очистных блоков, при котором обеспечивается минимальная концентрация напряжений, а также эффективные способы охраны и поддержания горных выработок и разгрузки удароопасных участков массива, включая применение крепей с элементами податливости и метода щелевой разгрузки межполублочных целиков с расположением щели во вмещающем породном массиве под заданным углом к рудному телу [5].

Совместное применение методов контроля горного давления и противоударных мероприятий позволило существенно снизить в 2008 г. число и интенсивность динамических проявлений горного давления и обеспечить более безопасные условия отработки глубоких горизонтов месторождения «Антей».

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Акустический измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ / И.Ю.Рассказов, Г.А.Калинов, А.Ю.Искра и др. // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика: Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2005. С. 351-354.

2. *Морозов К.В.* Создание геомеханической модели месторождения «Антей» на основе цифровых технологий / К.В.Морозов, Б.А.Просекин // Горный журнал. 2008. № 8. С. 47-49.

3. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии / Л.М.Парфенов, Н.А.Берзин, А.И.Ханчук и др // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7-41.

4. Особенности динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» / И.Ю.Рассказов, Б.Г.Саксин, П.А.Аникин и др. // ГИАБ. 2007. № ОВ9. С. 167-177.

5. Оценка напряженно-деформированного состояния элементов системы разработки с закладкой с нисходящей выемкой / И.Ю.Рассказов, Г.М.Потапчук, В.И.Мирошников, М.И.Рассказова // ГИАБ. 2008. № 7. С. 116-124.

6. *Поляков А.Н.* Прогноз удароопасности горно-технических ситуаций на перспективные глубины разработки // Горный журнал. 1993. № 4. С. 51-56.

7. *Рассказов И.Ю.* Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. М.: Горная книга, 2008. 329 с.

**REFERENCES**

1. *Rasskasov I.Yu.*, *Kalinov G.A.*, *Iscra A.Yu.* et al. Acoustic measuring-computing complex for geomechanical monitoring of rook mass during mining operations // Physical acoustics. Propagation and difraction of waves, Geoacoustics. Proc. XVI session of Russian Acoustic Society.V. 1. Moscow: GEOC. 2005. P.351-354.

2. *Morozov K.V.*, *Prosekin B.A.* Creation of geomechanical model of the ANTEY deposit based on digital technologies // Mining Journal. 2008. N. 8. P.47-49.

3. *Parphenov L.M.*, *Berzin N.A*, *Khanchuk A.I.* et al. Model of formation of orogenic belts in Central and North-East Asia // Pacific-Ocean Geology.2003. V. 22. N. 6. P. 7-41.

4. *Rasskasov I.Yu.*, *Saksin B.G.*, *Anikin P.A.* et.al. Peculiarities of dynamic rock pressure manifestations at the ANTEY deposit // GIAB. 2007. N. OB9. P. 167-177.

5. *Rasskazov I.Yu.*, *Polapchuk Y.M.* Assessment of stress-strain state of elements of mining system with packing in descending order. // GIAB. 2009. N. 7. P. 116-124.

6. *Poliakov A.N.* Prediction of rockburst hazard of mining-technical. situations for promisig depths of mining // Mining Journal. 1993. N. 4. P. 51-56.

7. *Rasskazov I.Yu.* Monitoring and rock pressure control at ore mines of Far-East region. Moscow; Publ. // Mining book. 2008. 329 p.