

На правах рукописи



**Аникин Павел Александрович**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДАРООПАСНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ  
ПОРОД ПО ДАННЫМ ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**  
(на примере месторождения урановых руд Антей)

Специальность 25.00.20 – “Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика”

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** доктор технических наук Рассказов Игорь Юрьевич

**Официальные оппоненты:** Вознесенский Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля;

Дягилев Руслан Андреевич, кандидат физико-математических наук, ФГБУН Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией природной и техногенной сейсмичности.

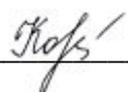
**Ведущая организация:** ФГБУН Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 23 марта 2017 г. в 14-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.101.03 при ФГБУН Институте горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Дзержинского, д. 54, конференц-зал. Тел/факс: 8(4212)32-79-27, E-mail: [adm@igd.khv.ru](mailto:adm@igd.khv.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева д. 51 и на сайте института <http://www.igd.khv.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

  
Корнеева Светлана Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Добыча полезных ископаемых и подземное строительство в массиве горных пород сложной геологической и тектонической структуры и на больших глубинах неизбежно сопровождается повышенным горным давлением, наиболее опасными формами которого являются горные и горно-тектонические удары, нередко приводящие к катастрофическим последствиям. Весьма сложными горно-геомеханическими условиями характеризуется месторождение урановых руд Антей, на котором зарегистрирован обширный спектр динамических проявлений горного давления.

Прогнозирование мощных динамических проявлений горного давления является трудноразрешимой задачей, обусловленной наличием множества действующих факторов, условий и причин возникновения катастрофических явлений, в том числе необходимостью учета широкого ряда параметров, характеризующих состояние и поведение предельно напряженных геосред. Несмотря на имеющиеся достижения в решении проблемы горных ударов и техногенной сейсмичности, вопрос обеспечения безопасности ведения горных работ все еще вызывает значительные трудности вследствие недостаточности существующих методов для своевременного и надежного выявления предвестников удароопасности.

На современном этапе изучения состояния массивов горных пород и решения проблем управления горным давлением широкое применение получили геофизические методы (сейсмические, микросейсмические, геоакустические и др.) как наиболее перспективные и достаточно информативные.

Для обеспечения надежного и достоверного прогноза горных ударов и других опасных геодинамических явлений необходим комплексный учет ряда признаков изменения геомеханического состояния массива горных пород. Поэтому исследования, направленные на углубленное изучение многофакторности условий и причин динамических проявлений горного давления, выявление их предвестников и создание на этой основе эффективной методики оценки геомеханического состояния геосреды, является актуальной научной задачей, позволяющей повысить надежность прогноза опасных геодинамических явлений.

Работа основана на результатах исследований 2004-2016 гг., полученных при непосредственном участии автора в процессе выполнения плановых тем НИР Института горного дела ДВО РАН «Создание теоретических и методических основ прогнозирования геомеханических процессов для предупреждения горных ударов (техногенных катастроф) при подземном освоении месторождений твердых полезных ископаемых» (ГР № 01200953151) и «Разработка теоретических и методических основ и измерительных средств контроля геомеханических процессов при освоении рудных месторождений в геодинамически активных районах» (ГР № 01201253447), гранта РФФИ «Выявление закономерностей и обоснование моделей формирования очагов горных и горно-тектонических ударов в природно-техногенных геодинамических системах» (№ 09-05-

00533); интеграционных проектов "Моделирование и экспериментальные исследования процессов формирования очагов горных и горнотехнических ударов в геодинамически активных массивах горных пород" (№ 08-II-СО-001) и «Комплексные исследования процессов формирования и развития очагов техногенной сейсмичности в горнотехнических системах удароопасных месторождений» (№ 12-II-СУ-08-010); молодежного научного проекта ДВО РАН под руководством автора «Выявление закономерностей формирования очагов разрушения в удароопасном массиве горных пород по данным геоакустического мониторинга (№ 12-III-B-08-024»).

**Цель диссертационной работы** состоит в снижении риска опасных динамических проявлений горного давления на глубоких горизонтах месторождения Антей путем заблаговременной оценки и прогноза геомеханического состояния геосреды по данным геоакустического мониторинга.

**Идея диссертационной работы** заключается в использовании выявленных закономерностей проявления акустической активности в массиве горных пород месторождения Антей для разработки методики прогноза и предотвращения опасных динамических проявлений горного давления.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

– изучить, обобщить и систематизировать материал по горно-геологическим, горнотехническим и геомеханическим условиям разработки, а так же особенностям динамических проявлений горного давления, выявить действующие факторы и причины опасных динамических проявлений на глубоких горизонтах месторождения Антей;

– выполнить комплекс натуральных геомеханических исследований состояния массива горных пород, в том числе с применением автоматизированной системы геоакустического мониторинга;

– выявить особенности проявления акустической активности и закономерности формирования очагов разрушения в массиве горных пород на различных стадиях разработки месторождения;

– обосновать комплексный показатель удароопасности и разработать методику прогноза опасных динамических проявлений по данным геоакустического мониторинга в массиве горных пород месторождения Антей.

**Методы исследований.** В работе применен комплексный метод исследования, включающий: анализ и обобщение данных о горнотехнических, горно-геологических и геомеханических условиях разработки месторождения, в том числе особенностей динамических проявлений горного давления; оценку напряженно-деформированного состояния и механических свойств горных пород инструментальными методами; натурные исследования, экспериментальные и режимные геоакустические наблюдения за состоянием массива горных пород; аналитические методы теории вероятностей и обработку экспериментальных данных методами математической статистики.

## **Основные научные положения, защищаемые автором:**

1. Динамические проявления горного давления на глубоких горизонтах месторождения Антей являются следствием влияния совокупности горнотехнических и горно-геологических факторов, выраженных образованием уменьшающихся межполублочных целиков, содержащих в своей структуре включения высокопрочных и хрупких лейкократовых гранитов, подверженных влиянию неоднородности поля напряжений в участке сближения рудосодержащих тектонических нарушений 13 и 160.

2. Геомеханическое состояние межполублочных целиков на стадии подготовки мощных геодинамических явлений определяется характером изменения ряда выявленных параметров акустически активных зон, образованных локализацией очагов связанных между собой сейсмоакустических событий.

3. Надежный прогноз опасных проявлений горного давления на месторождении Антей эффективно обеспечивается разработанной и апробированной в шахтных условиях методикой, основанной на комплексном учете выявленных признаков удароопасности, отражающих рост числа геоакустических событий в акустически активной зоне более чем в 2-3 раза, сопровождающийся увеличением их суммарной энергии более чем на 80 % и снижением скорости миграции очаговых зон до 8 м/сут.

### **Научная новизна работы:**

– научно обоснованы причины динамических проявлений горного давления в сложноструктурном массиве горных пород месторождения Антей с содержанием включений лейкократовых гранитов в межполублочных целиках с неравномерным полем напряжений;

– получены новые экспериментальные данные о физико-механических свойствах и параметрах напряженного состояния массива горных пород в области влияния горных работ и активных тектонических нарушений месторождения Антей;

– разработана новая методика выделения потенциально удароопасных участков (очаговых зон) в массиве горных пород по данным геоакустического мониторинга, базирующаяся на использовании теории случайных графов и компонент связности;

– выявлены закономерности формирования акустически активных зон в массиве горных пород, отражающие изменение геомеханического состояния удароопасных участков;

– научно обоснован комплексный показатель удароопасности, учитывающий выявленные признаки изменения геоакустического и геомеханического состояния геосреды на различных стадиях подготовки опасных горно-динамических явлений на месторождении Антей с высокой степенью надежности прогноза;

– разработаны рекомендации по повышению безопасности ведения горных работ в условиях месторождения Антей.

**Достоверность и обоснованность** научных положений и выводов обеспечивается многолетними натурными исследованиями геомеханического состояния массива горных пород на месторождении Антей; представительным объемом экспериментальных данных о

напряженном состоянии, физико-механических свойствах, тектонической нарушенности и проявлениях акустической активности массива горных пород; удовлетворительной сходимостью полученных прогнозных оценок с натурными наблюдениями динамических проявлений горного давления, а также положительным итогом внедрения результатов исследований на руднике «ПУР-1» ПАО «ППГХО».

**Практическая ценность работы** заключается: в использовании полученных результатов исследований в процессе геомеханического мониторинга для повышения надёжности прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления, обеспечении безопасной и эффективной отработки удароопасного месторождения Антей; в разработке методического и программного обеспечения для геоакустического контроля потенциально удароопасного массива горных пород.

#### **Реализация результатов работы.**

Полученные научные результаты и разработанные на их основе рекомендации использованы при составлении «Указаний по безопасному ведению горных работ на месторождении Антей, опасном по горным ударам», «Инструкции по сейсмоакустическому контролю массива горных пород на месторождении Антей», а также при разработке и реализации проектов на внедрение автоматизированных систем контроля горного давления «Prognoz-ADS»: на руднике «ПУР-1» ПАО «ППГХО», «Николаевском» руднике «ГМК Дальполиметалл», объединенном «Кировском» руднике АО «Апатит» ФОСАГРО и подземном руднике «Мир» АК «АЛРОСА».

#### **Личный вклад автора:**

– постановка задач, их решение и обобщение полученных результатов по вопросам изучения факторов, условий, причин и механизма проявлений горного давления в массиве горных пород месторождения Антей;

– организация и проведение комплекса натурных исследований удароопасности в шахтных условиях, включая изучение механических свойств горных пород, обоснование эффективного размещения датчиков системы «Prognoz-ADS» на месторождении и режимные геоакустические наблюдения;

– выявление закономерностей формирования акустически активных зон в местах концентрации напряжений, позволяющих характеризовать геомеханическое состояние удароопасных участков в массиве горных пород;

– обоснование и применение комплексного учета ряда признаков удароопасности, характеризующих геомеханическое состояние массива горных пород месторождения Антей, для повышения эффективности геоакустического мониторинга;

– разработка рекомендаций по повышению эффективности геоакустического мониторинга и управления горным давлением на месторождении Антей.

**Апробация работы.** Основное содержание диссертационной работы и отдельные ее положения представлялись в 2005-2016 гг. на научных конференциях: Краевом конкурсе-конференции молодых ученых и аспирантов (г. Хабаровск, 2007, 2008, 2010, 2013, 2016 гг.); II-VI Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения

георесурсов» (г. Хабаровск, 2005, 2007, 2009, 2013, 2016 гг.); VI Молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Хабаровск, 2012); Международном научном симпозиуме "Неделя горняка", (г. Москва, 2012, 2013 гг.); V Международной научной конференции по геомеханике (Varna, Bulgaria, 2012); II Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, 2013); VIII Международном симпозиуме «Снижение опасных геологических проявлений в АТР» (г. Владивосток, 2010); XVII Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2013), IX Международной сейсмологической школе (г. Агверан, Республика Армения, 2014), науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию Горного института Уро РАН и 75-летию чл.-корр. РАН А.Е. Красноштейна, (г. Пермь, 2013), «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» (г. Петропавловск-Камчатский, 2014), X Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» и VI Российско-Китайском научно-техническом форуме «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах» (г. Апатиты, 2016), а также научно-технических совещаниях и Комиссиях по горным ударам ПАО «ППГХО».

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 35 опубликованных работах, в том числе 17 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 свидетельствах на разработанные алгоритмы и программное обеспечение.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 174 наименований, содержит 162 страниц текста, 71 рисунок, 12 таблиц.

Автор считает своим долгом выразить признательность научному руководителю д-ру техн. наук И.Ю. Рассказову, благодарность за помощь при подготовке диссертационной работы д-ру геол.-минер. наук Б.Г. Саксину, д-ру техн. наук Г.А. Курсакину, д.ф.-м.н. Г.Ш. Цициашвили (ИПМ ДВО РАН), коллегам из ИГД ДВО РАН за помощь в экспериментах и ценные советы, а также руководителям и специалистам ПАО «ППГХО» за содействие в организации экспериментальных исследований в шахтных условиях и внедрении научных результатов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** приводится анализ современного состояния проблемы горных ударов на рудниках, а также обзор методов и средств прогноза удароопасности массива горных пород.

Добыча полезных ископаемых и подземное строительство в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах сопровождается повышенным горным давлением, которое проявляется в таких опасных формах как обрушение участков массива,

внезапные выбросы породы, стреляния пород, толчки, горные и горно-тектонические удары, нередко приводящих к катастрофическим последствиям.

К настоящему времени накоплен большой объем результатов теоретических и экспериментальных исследований причин и условий возникновения динамических проявлений горного давления при ведении подземных горных работ, а также в области поиска предвестников прогнозирования сильных и опасных геодинамических явлений. Значительный вклад в изучение этих вопросов внесли С.Г. Авершин, И.М. Петухов, А.А. Козырев, В.С. Куксенко, В.Н. Опарин, А.А. Еременко, А.Н. Шабаров, А.А. Филинков и многие другие. В работах этих авторов установлено, что основными причинами возникновения мощных динамических проявлений в форме горных ударов является высокий уровень напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, их склонность к хрупкому разрушению и способность накапливать упругую энергию деформации.

За последние десятилетия выявлен широкий ряд факторов возникновения динамических проявлений горного давления в горном массиве. К ним относятся сложные горно-геологические и горнотехнические условия отработки месторождений, включая геолого-структурные особенности их строения. Углубленное изучение и комплексный учет этих факторов необходимы для эффективного управления горным давлением.

Интенсивная и крупномасштабная отработка месторождений часто приводит к проявлению техногенной и наведенной сейсмичности, которая является признаком геодинамической активизации при нарушении естественного равновесия геосреды в результате антропогенного воздействия. Изучению этого явления посвящены работы В.В. Адушкина, А.Д. Завьялова, В.В. Кузнецова, А.В. Ловчикова, А.А. Маловичко, М.А. Садовского, С.Д. Виноградова, Г.А. Соболева и других.

Для надежного прогноза и предупреждения опасных геодинамических явлений, включая горные и горно-тектонические удары, в числе прочих необходимо применение инструментальных методов, обеспечивающих оценку и непрерывный контроль геомеханического состояния массива горных пород. В последние годы для геоконтроля все более широкое применение получают геофизические методы, в том числе геоакустический, как наиболее оперативный и достаточно информативный. Геоакустический метод позволяет выявлять источники акустической эмиссии в очагах формирующихся опасных геодинамических событий на самых ранних стадиях их возникновения. Для реализации геоакустического метода разработаны различные технические средства, в том числе многоканальные автоматизированные системы контроля горного давления, позволяющие измерять различные параметры акустических полей.

Использованию и совершенствованию методов и измерительных комплексов сейсмоакустического контроля массива горных пород посвящены работы Ю.И. Болотина, А.С. Вознесенского, В.Н. Захарова, Ю.С. Исаева, И.А. Кривошеева, А.А. Маловичко, А. Мендецки, С.В. Мулева, И.Ю. Рассказова, С.В. Циреля, В.Л. Шкуратника, В.С. Ямщикова и других.

Несмотря на имеющиеся достижения в решении проблемы горных ударов и техногенной сейсмичности, вопрос обеспечения безопасности ведения горных работ все еще вызывает значительные трудности вследствие недостаточности имеющихся методов для своевременного и надежного выявления предвестников удароопасности. Поэтому, совершенствование методики оценки геомеханического состояния геосреды, основанной на комплексном учете ряда признаков удароопасности (в том числе — геоакустических), является актуальной научной задачей.

По результатам анализа состояния проблемы прогноза удароопасности, существующих методов изучения геомеханического состояния геосред и имеющихся в этой области достижений были сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена анализу горно-геологических, горнотехнических и геомеханических условий разработки месторождения Антей, в том числе экспериментальной оценке НДС массива горных пород, выявлению факторов и причин динамических проявлений горного давления.

Геолого-структурные особенности месторождения Антей определяются наличием на его площади сложной системы крутопадающих тектонических разрывов различной ориентировки в сочетании с многочисленными включениями пород и разрывными нарушениями. Основную роль в локализации уранового оруденения играют тектонические нарушения северо-восточного ( $30^\circ$ ) простирания, наиболее развитые в восточной части месторождения и представленные крупными разрывами 13, 160 и 190. Их совокупность наряду с серией более мелких швов, оперений и разрывов образует рудоносную трещинную зону ба.

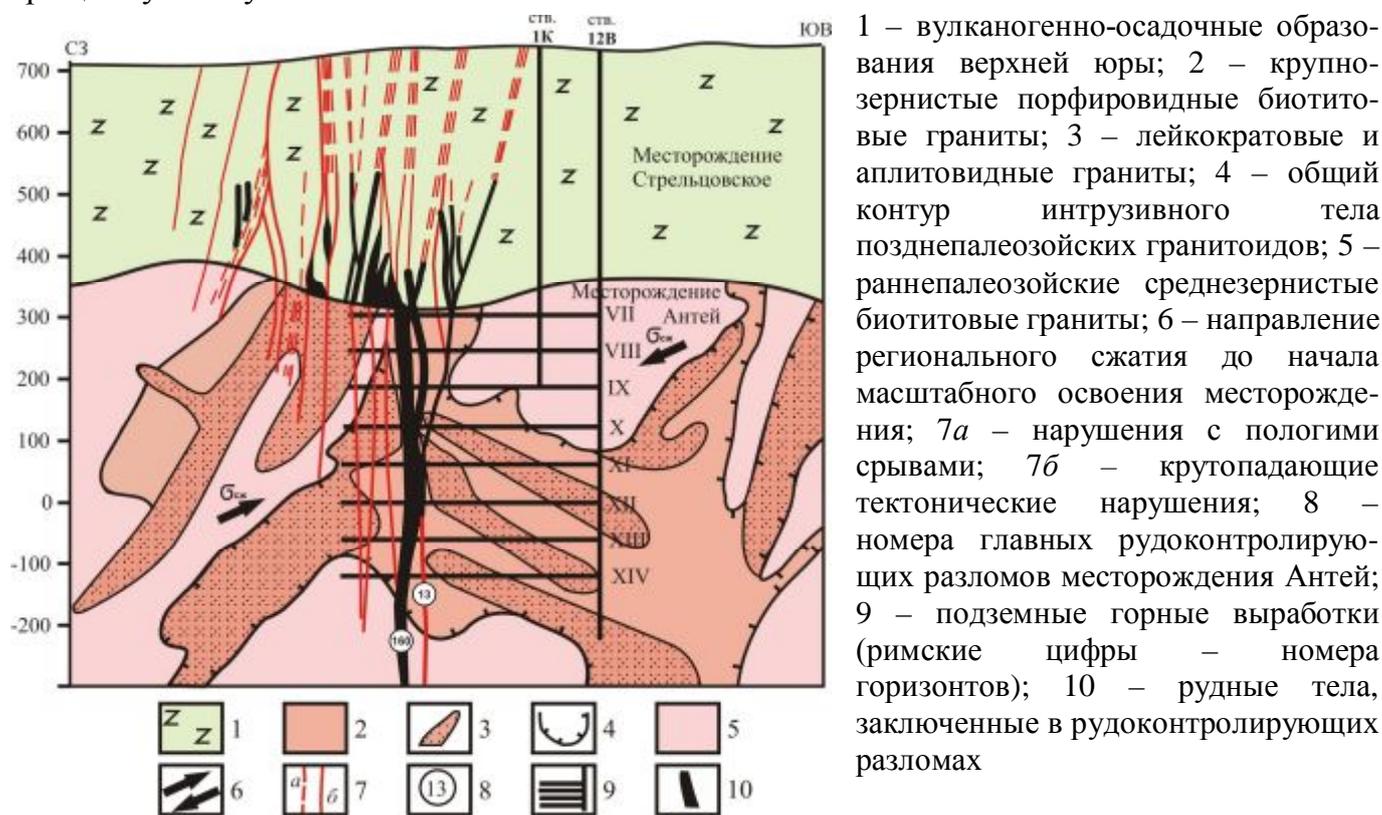


Рисунок 1 – Геолого-тектоническое строение месторождения Антей

Анализ тектонической структуры месторождения Антей показал, что наибольшей сложностью характеризуется участок массива горных пород в этаже 0...180 м, где сливаются оперения разломов 160а, 160б, 160в и 160г в один рудоконтролирующий разлом 160, с которым сближается на расстояние 12 м тектоническое нарушение 13, имеющее встречное падение (рис. 1). Именно здесь еще при проходке геологоразведочных выработок на X горизонте (отм. +114 м) были отмечены проявления горного давления в форме интенсивного заколообразования в местах контактов неравномернозернистых гранитоидов и лейкократовых гранитов.

Включения последних имеют повышенную прочность и склонность к внезапному хрупкому динамическому разрушению. Этот фактор удароопасности наиболее значим для центральной части месторождения Антей, где включения (линзы) лейкократовых гранитов, заключенные между разломами 160 и 13, представляют собой «жесткие мосты».

Отработка месторождения ведется системой разработки горизонтальными слоями с твердеющей закладкой с нисходящей выемкой слоёв под искусственной кровлей. Для проведения добычных работ рудные залежи разделяются на эксплуатационные блоки длиной 50-250 м по простиранию в зависимости от размеров рудных залежей.

Анализ всех зарегистрированных на месторождении Антей динамических проявлений горного давления показал, что с 1979 до 2000 г. интенсивное заколообразование пород, стрельяния из груди забоя, шелушения бортов и кровли выработок происходили исключительно в местах пересечения выработками контактов средне- и мелкозернистых гранитоидов с включениями лейкократовых гранитов.

Изменение порядка отработки рабочих блоков в этаже ниже 240 м, согласно которому блок разделяется по высоте на два полублока, обрабатываемых одновременно по простиранию рудного тела, способствовало резкому увеличению числа опасных проявлений в динамической форме. Причиной этого явилось формирование уменьшающихся межполублочных целиков, сначала в блоках ба-912, ба-906, а позже во всех обрабатываемых блоках. В период с 2000 по 2016 гг. в недоработанных целиках, особенно в блоках ба-1110 и ба-1102, было зарегистрировано 96 % всех толчков, все случаи горных ударов и проявления техногенной сейсмичности, сопровождавшиеся сотрясениями поверхностного комплекса рудника.

В период с 2009 по 2013 г. в недоработанной части верхнего полублока ба-1102 в этаже 90-117 м была зафиксирована большая часть (17 из 23 событий) из всех наиболее мощных динамических проявлений.

Представительный объем экспериментальных данных о свойствах и напряженно-деформированном состоянии массива горных пород месторождения был получен в процессе инструментальных исследований в шахтных условиях (рис. 2).

По результатам исследований механических свойств горных пород с применением прибора БУ-39 установлено, что предел прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  вмещающих пород, представленных разновидностями разномзернистых гранитоидов, изменяется от 100,05 до 148,07 МПа, а модуль упругости  $E$  варьирует в пределах 23-35 ГПа. Предел прочности  $\sigma_{сж}$  образцов руды, отобранных из нарушений 13 и 160 в горной выработке ба-

1006 изменяется от 78,01 до 90,7 МПа. Отдельно исследовались образцы лейкократовых гранитов по выработке ба-1006 на X горизонте (участок блока ба-1102 на отметке 120 м),  $\sigma_{сж}$  которых в участке «сближения» тектонических нарушений 13 и 160 изменялся от 189,67 до 219,83 МПа, а их модуль упругости  $E$  – от 35 до 63 ГПа. Таким образом, прочность и упругость (жесткость) лейкократовых гранитов, особенно локализованных между тектоническими нарушениями 13 и 160, где они выступают в виде «жестких мостов», в 1,5-2 раза превышает  $\sigma_{сж}$  и  $E$  вмещающих гранитоидов и руд, и поэтому они являются концентраторами напряжений и источником повышенной удароопасности при пересечении их горными выработками.

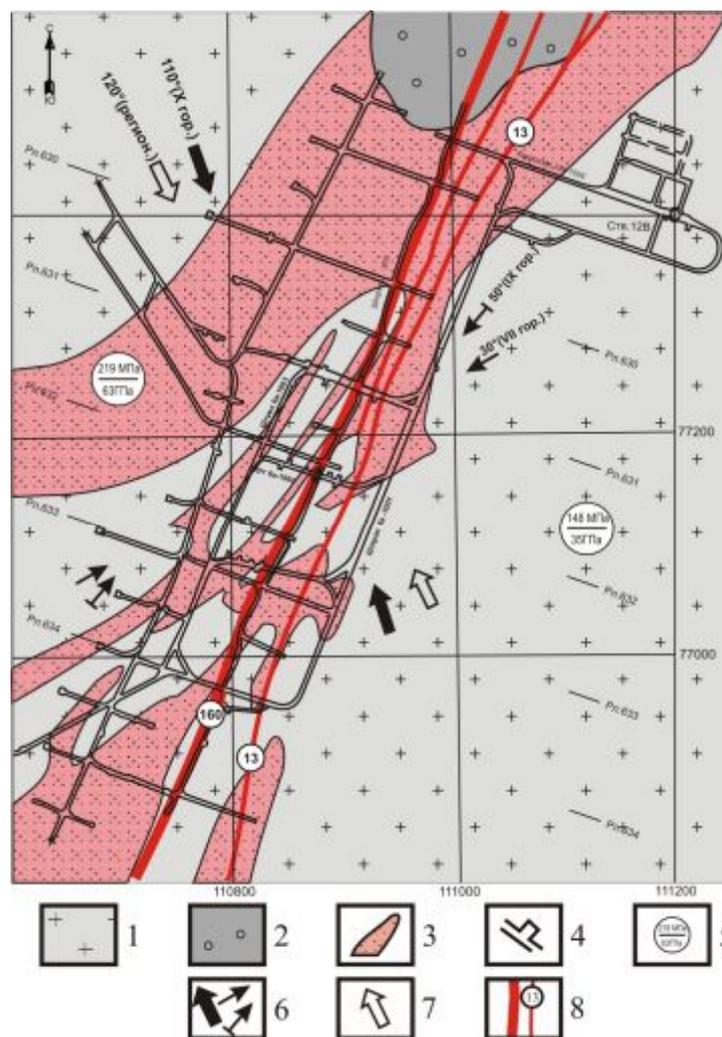


Рисунок 2 – Изменчивость поля напряжений и физических свойств горных пород месторождения Антей

1 – позднепалеозойские граниты и гранитоиды; 2 – раннепалеозойские граниты; 3 – лейкократовые и аплитовидные граниты; 4 – подземные горные выработки X гор.; 5 – механические свойства пород ( $\sigma_{сж}$  и  $E$ ); 6 – направление локального сжатия; 7 – направление регионального сжатия до начала отработки месторождения; 8 – рудоконтролирующие разломы 160 и 13

Геомеханическим методом (основанном на эффекте дискования керна) в уменьшающемся целике блока ба-1006 и верхней части блока ба-1102 (X горизонт) определены величина и направление действия наибольших сжимающих напряжений, которое составило  $110 \pm 10^\circ$ , что существенно отличается от ориентировки  $\sigma_{max}$ , установленной ранее на вышележащих горизонтах: на горизонте VII (гребневая часть вала месторождения Антей) составляет  $30^\circ$ , на горизонте IX (основание вала) —  $50^\circ$ . Тем самым доказано, что с увеличением глубины направление горизонтального сжатия имеет тенденцию приближаться к региональному, которое действует по азимуту  $110-120^\circ$ .

Выявленные особенности современного поля напряжений и уточненные параметры физико-механических свойств пород были использованы для оценки НДС массива горных пород на глубоких горизонтах, результаты которой показали, что значения максимальных напряжений ( $\sigma_1$ ) в участке сближения двух активных тектонических нарушений изменяются в среднем от 31 до 86 МПа. При этом напряжения в пределах включений лейкократовых гранитов в 2,8 раза превышают напряжения в рудном

массиве. Кроме того, выявлено, что целики, особенно уменьшающиеся в процессе очистной выемки, также являются сильно нагруженными и удароопасными.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что центральная часть месторождения Антей, особенно на уровне X горизонта и ниже, характеризуется сложными горно-геологическими и геомеханическими условиями, а геодинамические проявления на глубоких горизонтах месторождения являются следствием совокупного влияния горнотехнических и горно-геологических факторов, включая образующиеся в процессе отработки уменьшающиеся межполублочные рудные целики и высоконапряженные участки с включениями высокопрочных лейкократовых гранитов в зоне влияния активных тектонических нарушений 13 и 160.

**В третьей главе** приведены результаты исследований закономерностей проявления сейсмоакустической активности массива горных пород месторождения Антей.

Для контроля удароопасности на месторождении с 2006 г. используется разработанная в ИГД ДВО РАН многоканальная цифровая автоматизированная система геоакустического мониторинга «Prognoz-ADS», позволяющая регистрировать излучаемые горным массивом в процессе трещинообразования акустические импульсы, или импульсы акустической эмиссии (АЭ), в частотном диапазоне 0,5...12 кГц и определять местоположение, энергию источников упругого излучения, а также измерять ряд дополнительных параметров акустической активности. Главными достоинствами геоакустической системы «Prognoz-ADS», в сравнении с микросейсмическими измерительными комплексами, является более высокая «разрешающая способность» (регистрируются даже слабые акустические события с энергией от 10 Дж) и возможность заблаговременно выявлять в массиве горных пород потенциально удароопасные участки еще на ранней стадии.

По результатам многолетних наблюдений (более 10 лет на рассматриваемом месторождении и более 20 лет на ряде других подземных рудниках дальневосточного региона) получен представительный объем экспериментальных данных о параметрах сейсмоакустических волновых полей, изменения которых отражают процессы деформирования и перераспределения напряжений в массиве под влиянием горных работ. Важной установленной особенностью поведения потенциально удароопасного массива является формирование в нем акустически активных зон, изучение и контроль эволюции которых дает представление о деталях механизма и процесса подготовки сильных горнодинамических событий (рис. 3).

Возникает необходимость разработки методики обработки данных геоакустического контроля в целях формализации процесса обнаружения и выделения потенциально удароопасных зон в массиве, разработки методов и приёмов управления горным давлением при отработке удароопасного месторождения.

Для выделения потенциальных очагов крупных динамических проявлений горного давления предложена методика обработки экспериментальных данных, полученных с применением системы геоакустического контроля «Prognoz-ADS», базирующаяся на методах кластерного анализа и теории случайных графов.

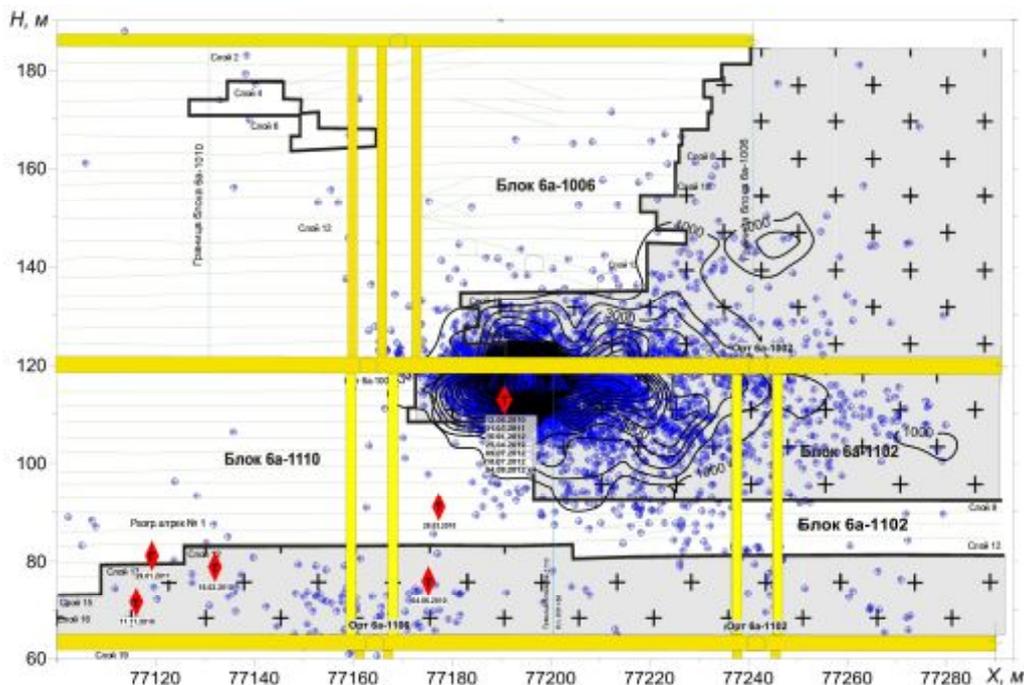
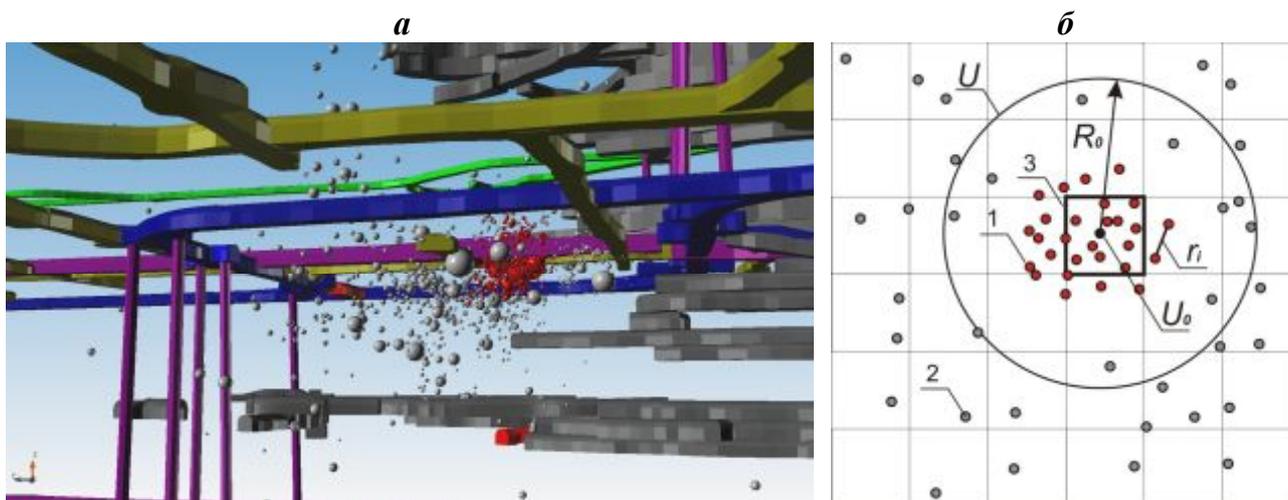


Рисунок 3 – Акустически активные зоны в массиве горных пород месторождения Антей по данным геоакустического контроля в 2012 г. (изолинии отражают распределение энергии АЭ-событий)

В основу методики положено, что вся совокупность регистрируемых в массиве горных пород АЭ-событий представляет собой облако точек, среди которых есть фоновые (случайные) АЭ-события и события, связанные между собой (рис. 4). Концентрация последних в пределах ограниченного участка массива может служить признаком формирования очаговой зоны, которую можно описать шаром  $U$ , радиусом  $R$ , не превышающим 20 м, исходя из экспериментально установленных характеристик потока АЭ-событий. Шар  $U$  ограничивает выборку АЭ-событий для дальнейшего анализа компонент связности.



1 – красным выделены связанные между собой АЭ-события; 2 – серым — фоновые, несвязанные события; 3 – куб с наибольшим количеством очагов АЭ-событий;  $U_0$  – эпицентр АЭ-событий в кубе;  $R_0$  – радиус шара  $U$ ;  $r_i$  – расстояние между очагами АЭ-событий

Рисунок 4 – Выделение потенциально удароопасных участков в массиве горных пород по данным геоакустического мониторинга: а) визуальное отображение акустически активных зон в 3D-модели рудника; б) расчетная схема для выделения очаговых зон

Экспериментально установлено, что расстояние  $r_i$  между всеми точками ( $S_1...S_p$ ) пуассоновского потока интенсивности  $\lambda$  в области шара  $U$  не превышает 10 м, а их большая часть (93 %) распределяется в двух первых интервалах по 2 м. Среднее минимальное расстояние между точками в пуассоновском потоке  $M_r$  определяется из выражения:

$$M_r = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{4\pi\lambda R^3}{3}\right) dR = \frac{4\pi\lambda R^3}{3} = x^3 = \Gamma \frac{4}{3} \cdot dx \left(\frac{4\pi\lambda R^3}{3}\right)^{-1/3}. \quad (1)$$

Сформировав матрицу  $A$  из попарных средних расстояний между отобранными точками, формируется переход от случайного пуассоновского потока точек в сфере  $U$  к случайному графу:

$$\left\| \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \right\|_{i,j=1}^p \quad (2)$$

Решение матрицы  $A_t$  дает возможность выделить максимальную («гигантскую») компоненту связности точек из сферы  $U$ . Выделенные точки из ряда  $S_1...S_l$  по признаку максимальной компоненты образуют собой очаговую зону из АЭ-событий и имеют связность, чем отличаются от других точек в выборке (см. рис. 4).

Апробация методики выделения потенциально удароопасных зон в условиях месторождения Антей показала ее эффективность. Существование выявленных по результатам обработки данных регионального сейсмоакустического контроля высоконапряженных участков горного массива подтверждалось с высокой степенью надежности визуальными наблюдениями и инструментальными измерениями удароопасности локальными методами, в том числе с применением портативного геоакустического прибора «*Prognoz-L*».

На основе анализа и обобщения результатов геоакустического мониторинга на удароопасных и склонных к горным ударам рудных месторождениях Дальнего Востока и Забайкалья, включая месторождение Антей, установлено, что акустическая активность в высоконапряженных участках горного массива характеризуется рядом параметров, по изменению которых можно судить о его геомеханическом состоянии.

По данным сейсмоакустического контроля системой «*Prognoz-ADS*» на глубоких горизонтах рассматриваемого месторождения установлены признаки изменения геомеханического состояния массива горных пород, отражающие процесс подготовки геодинамического явления, к которым относятся: рост числа АЭ-событий в 2 и более раз ( $N_{a3}$ ); уменьшение среднеквадратичного расстояния ( $R_{cpp}$ ) от источника до центра формирующейся очаговой зоны; рост суммарной энергии ( $E_{a3}$ ) более чем на 80 %; сокращение временного интервала между АЭ-событиями ( $t_{cpp}$ ) и снижение скорости миграции ( $v_{a3}$ ) эпицентра очаговой зоны до 8 м/сут (см. рис. 5).

Возникает необходимость в совершенствовании методики оценки геомеханического состояния геосреды, основанной на комплексном учете указанного ряда признаков удароопасности, что позволит предопределять геомеханическое состояние и снизить риск пропуска горнодинамических явлений.

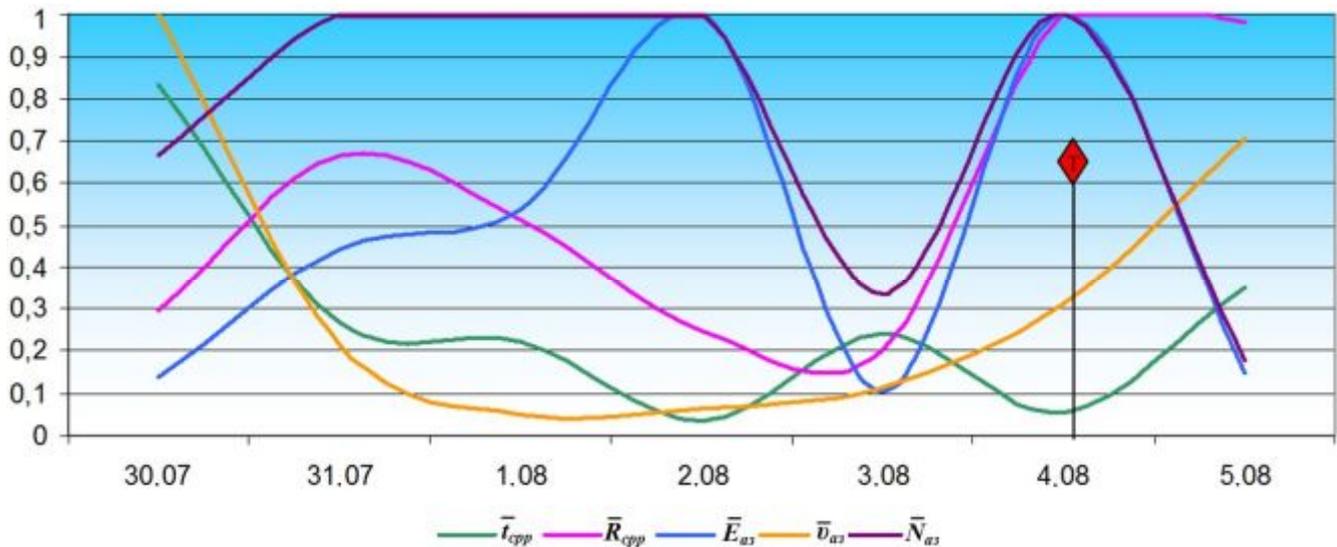


Рисунок 5 – Изменение значений нормированных\* параметров акустической активности, отражающее процесс подготовки крупного динамического проявления горного давления в 2012 г.

**Четвертая глава** посвящена разработке и обоснованию комплексного показателя удароопасности, основанного на выявленных особенностях формирования акустически активных зон (ААЗ), характеризующих геомеханическое состояние массива горных пород.

По результатам анализа и обобщения большого объема экспериментальных данных разработан комплексный показатель удароопасности ( $K_{y\partial}$ ), учитывающий выявленные признаки изменения геомеханического состояния геосреды при подготовке опасных горнодинамических явлений. Показатель  $K_{y\partial}$  определяется как отношение нормированных значений суммарной энергии и числа АЭ-событий в ААЗ к произведению нормированных значений расстояния, времени между последующими событиями и скорости миграции центра зоны акустической активности:

$$K_{y\partial} = \frac{\bar{E}_{az} \cdot \bar{N}_{az}}{\bar{R}_{crp} \cdot \bar{t}_{crp} \cdot \bar{v}_{az}}, \quad (3)$$

где  $E_{az}$  – суммарная энергия АЭ-событий в очаговой зоне (связанных между собой АЭ-событий), Дж;  $N_{az}$  – количество АЭ-событий в очаговой зоне;  $R_{crp}$  – расстояние между последующими АЭ-событиями, м;  $t_{crp}$  – время между последующими АЭ-событиями, с;  $v_{az}$  – скорость миграции центра очаговой зоны, м/сут.

Анализ экспериментальных данных показал, что для повышения надежности прогнозирования динамических проявлений, наряду с применением показателя  $K_{y\partial}$  необходимо также учитывать эффект «затишья», проявляющийся в условиях месторождения Антей за 1-3 суток до наступления мощного горнодинамического явления (рис. 6).

По результатам анализа вариаций отдельных входящих в состав показателя  $K_{y\partial}$  параметров также установлено, что в период подготовки динамического явления особую значимость приобретают флуктуации следующих параметров: суммарная энергия  $E_{az}$ ,

\* Под нормированием понимается сопоставление текущих значений параметров ААЗ с максимальным их значением за 5 предыдущих суток и приведение их к единичному отрезку (рис.5).

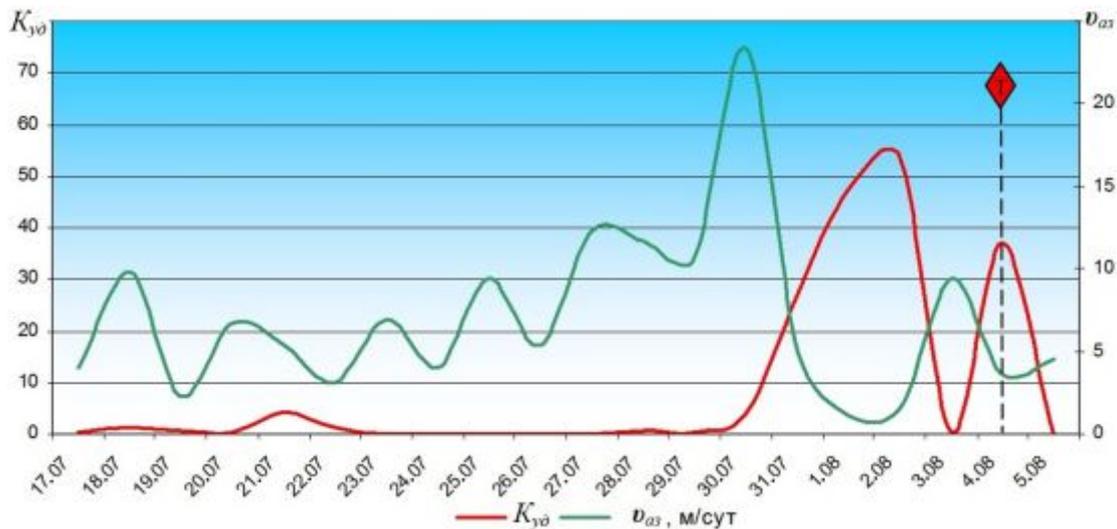


Рисунок 6 – Изменение показателя  $K_{yd}$  и скорости миграции акустически активной зоны перед динамическим проявлением горного давления в 2012 г. на месторождении Антей

количество АЭ-событий в очаговой зоне  $N_{az}$  и скорость миграции центра очаговой зоны  $v_{oz}$ . Так, в период подготовки динамического проявления коэффициент корреляции между  $K_{yd}$  и суммарной энергией ( $E_{oz}$ ) возрастает с 0,0009 до 0,66, также как возрастает теснота связи  $K_{yd}$  с количеством АЭ-событий и скоростью миграции центров ААЗ (на 9 и 14 %) по отношению к неудароопасному режиму (рис. 7).

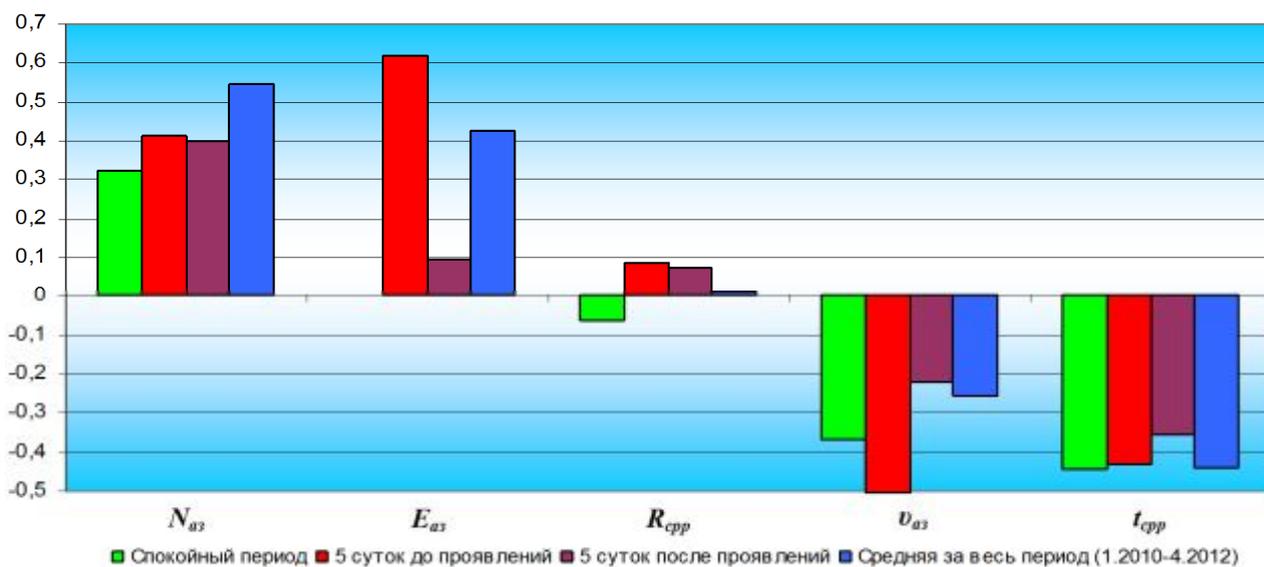


Рисунок 7 – Изменение коэффициентов корреляции  $K_{yd}$  с входящими в него параметрами в различные периоды геомеханического состояния массива

В процессе вариационного анализа экспериментальных данных с использованием правила Стерджесса установлено, что большее число мощных геодинамических проявлений (92 %), в том числе разрушительные горные удары и проявления техногенной сейсмичности, произошли при значениях комплексного показателя удароопасности  $5,116 \leq K_{yd} \leq 5,68$ . В указанном интервале наблюдалось значительное увеличение (более чем в 5 раз) частоты (по Стерджессу) АЭ-событий по сравнению с предыдущими интервалами значений  $K_{yd}$ . В этот период наблюдалось изменение геомеханического состояния массива (усиление напряженного состояния и увеличение роста деформаций массива горных пород), сопровождающееся увеличением числа проявлений, ростом суммарной энергии и

замедлением скорости миграции. Для определения вероятности возникновения опасного динамического проявления горного давления при значении комплексного показателя  $K_{y\partial} \geq 5,116$  использовалась комбинаторная теория вероятности. В итерации для расчета вероятности учитывались значения  $K_{y\partial}$ , проявление эффекта «затишья» до 3 суток и скорость миграции  $v_{03}$ .

По результатам апробации и практического использования предложенной методики прогнозирования удароопасности установлены следующие условия применения комплексного показателя  $K_{y\partial}$ : данные для расчетов должны охватывать не менее 5 суток наблюдений; интенсивность АЭ-событий в очаговой зоне ( $R_0 = 20$  м) составляет не менее 7 событий в сутки; отклонение координат источников АЭ-событий от их эпицентра  $U_0$  не более 20 м ( $R_{CP} \leq R_0$ ), а суммарная энергия АЭ-событий в очаговой зоне должна быть не менее 200 Дж. В условиях месторождения Антей надежность прогнозов динамических проявлений, в которых критерием удароопасности выступал показатель  $K_{y\partial} \geq 5,116$ , за последние 5 лет достаточно высока и составила 84,4 %.

На основе полученных результатов разработаны и предложены рекомендации по повышению надежности прогноза опасных проявлений горного давления, заключающиеся в использовании признаков удароопасности, а также в оценке эффективности мероприятий по разгрузке удароопасного массива горных пород. Разработанная методика прогнозирования удароопасности включена в «Указания по безопасному ведению горных работ на месторождении Антей, опасном по горным ударам» и в «Инструкцию по сейсмоакустическому контролю массива горных пород на месторождении Антей».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления, основанное на разработке методов и средств геоакустического контроля с выделением в массиве горных пород потенциально опасных зон, что имеет существенное научно-практическое значение для обеспечения безопасного и эффективного освоения удароопасного месторождения урановых руд Антей. Основные теоретические положения, научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Получены новые экспериментальные данные о свойствах и напряженном состоянии массива горных пород нижней части месторождения Антей. Установлено, что прочность и упругость (жесткость) лейкократовых гранитов в 1,5-2 раза превышает  $\sigma_{сжм}$  и  $E$  вмещающих гранитоидов и руд, и являются естественными концентраторами напряжений и источником повышенной удароопасности при пересечении их горными выработками. Величина наибольших сжимающих напряжений, ориентированных по азимуту  $110 \pm 10^\circ$  в участке сближения двух активных тектонических нарушений, изменяется от 31 до 86 МПа и в пределах включений лейкократовых гранитов в 2,8 раза превышает напряжения в рудном массиве.

2. Выявлены основные факторы, совокупность которых предопределяет степень удароопасности массива горных пород месторождения Антей: наличие высоконапряженных участков массива горных пород с включениями высокопрочных лейкократовых гранитов, локализованных между тектоническими нарушениями, где они выступают в виде «жестких мостов»; влияние активных разломов 13 и 160 со встречным падением; образующиеся в процессе отработки уменьшающиеся межполушочные рудные целики.

3. По результатам многолетних наблюдений с применением разработанной в ИГД ДВО РАН многоканальной цифровой автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» установлены закономерности изменения сейсмоакустической активности массива горных пород под влиянием горных работ. Важной особенностью поведения потенциально удароопасного массива является формирование в нем акустически активных зон, отражающих процессы деформирования и разрушения горных пород.

4. Разработана методика обработки экспериментальных данных, полученных с применением системы геоакустического контроля «Prognoz-ADS», базирующаяся на использовании теории случайных графов и компонент связности, позволяющая выделять в массиве горных пород акустически активные и потенциально удароопасные зоны.

5. Методами корреляционного анализа определены наиболее значимые параметры акустической активности, отражающие процесс подготовки опасного горнодинамического явления: суммарная энергия  $E_{аз}$ ; количество АЭ-событий в очаговой зоне  $N_{аз}$ ; скорость миграции центра очаговой зоны  $v_{оз}$ .

6. Для оценки удароопасности по данным геоакустического контроля предложен комплексный показатель  $K_{yд}$ , выраженный отношением нормированных значений суммарной энергии и числа АЭ-событий в акустически активных зонах к нормированным значениям расстояния и времени между последующими событиями и скорости миграции центра зоны акустической активности (формула 3).

7. С применением комбинаторной теории вероятности для условий месторождения Антей определены количественные значения комплексного показателя  $K_{yд}$  (категория «Опасно» устанавливается при  $K_{yд} \geq 5,116$ ), что с учетом наблюдаемого эффекта «затишья» позволяет с высокой надежностью (до 84 %) за 1-3 суток прогнозировать разрушительные горные удары и проявления техногенной сейсмичности.

8. Разработаны рекомендации по прогнозу и предотвращению опасных проявлений горного давления на месторождении Антей с применением методов и средств геоакустического контроля, включенные в технологические регламенты и «Указания по безопасному ведению горных работ на месторождении Антей, опасном по горным ударам».

**Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

***В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. Состояние и перспективы решения проблемы горных ударов на рудниках Дальневосточного региона [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. № СВ. Дальний Восток. – С. 433-444.
2. Сейсмоакустический контроль удароопасности на рудниках Дальневосточного региона [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Горный журнал. 2005. – № 12. – С. 139-145.
3. Особенности динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № ОВ9. – С. 167-177.
4. Результаты геоакустического контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 7. – С. 104-111.
5. Результаты геоакустических исследований удароопасности на месторождении «Антей» [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № ОВ4. – С. 41-49.
6. Методы и средства контроля удароопасности при ведении подземных горных работ на рудниках Дальневосточного региона [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Записки Горного института «Современные проблемы геодинамической безопасности при освоении месторождений полезных ископаемых». СПб, 2010. – Т. 188. – С. 18-22.
7. Рассказов, И. Ю. Особенности природно-техногенной геодинамической структуры месторождения Антей и ее влияние на формирование удароопасности [Текст] / Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Аникин П.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. – С. 122-127.
8. Рассказов, И. Ю. Влияние скоростной анизотропии сложно-структурного массива горных пород на точность локации акустической эмиссии [Текст] / В.И. Мирошников, И.Ю. Рассказов, П.А. Аникин // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ «Дальний Восток-1». – 2010. – С. 125-136.
9. Саксин, Б. Г. Моделирование геомеханических процессов при отработке Николаевского месторождения, опасного по горным ударам [Текст] / Б.Г. Саксин, И.Ю. Рассказов, П.А. Аникин. // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ «Дальний Восток-1». – 2010. – С. 136-142.
10. Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО «ППГХО» [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный журнал. – 2013. – № 8-2. – С. 9-14.
11. Особенности регистрации и обработки данных геоакустического контроля массива горных пород на действующем руднике [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 212-218.

12. Результаты геоакустических исследований удароопасности на месторождении «Антей» [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Т. 4. № 12. – С. 219-227.

13. Рассказов, И. Ю. Прогноз динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» по данным геоакустического мониторинга [Текст] / Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Цициашвили Г.Ш. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №10. – С. 162-169.

14. Краснокаменский лазерный деформограф [Текст] / Долгих Г.И. [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 5. – С. 138-139.

15. Алгоритм выделения потенциально удароопасных зон в разрабатываемом массиве горных пород по результатам сейсмоакустического мониторинга [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12, В5: «Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока». – С. 31-39.

16. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 3. – С. 169-179.

17. Оценка геомеханических условий и обоснование мер безопасности при проектировании и ведении подземных горных работ на рудниках Дальнего Востока [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – СВ30 «Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера». – С. 35-46.

***В прочих изданиях:***

18. Перспективные методы и средства сейсмоакустического контроля опасных проявлений горного давления при подземном освоении недр [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Проблемы формирования и освоения минерально-сырьевых ресурсов Дальнего Востока. Хабаровск: ИГД ДВО РАН. – 2004. – С. 185-191.

19. Применение методов и средств геоакустики для геомеханического мониторинга разрабатываемого массива горных пород [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика. Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. – Т. 1. М.: ГЕОС. – 2005. – С. 354-358.

20. Применение систем геомеханического мониторинга для контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Геомеханика в горном деле: Доклады международной конференции 5–8 июля 2005 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, – 2005. – С. 309-318.

21. Геомеханическая оценка технологии отработки крутопадающих рудных тел в удароопасных условиях [Текст] / И.Ю. Рассказов [и др.] // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск 6-10 июля 2009 г., Новосибирск: ИГД СО РАН, – 2010, С. 323-328.

22. Аникин, П. А. Исследование закономерностей формирования полей напряжений в массиве горных пород Николаевского месторождения по данным геоакустического

мониторинга [Текст] / П. А. Аникин // Проблемы недропользования. Материалы 1 научно-практической конференции, 14 февраля 2007, г. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – С.45-53

23. Аникин, П. А. Результаты геоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород месторождения «Антей» [Текст] / П. А. Аникин // Проблемы недропользования: Материалы II всероссийской молодежной научно-практической конференции (12-15 февр. 2008 г.). – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 313-324.

24. Аникин, П. А. Результаты геоакустического мониторинга удароопасности горных пород месторождения «Антей» [Текст] / П. А. Аникин // Наука Хабаровскому краю: материалы X краевого конкурса молодых ученых. –Хабаровск: Изд. ТОГУ. – 2008. – С. 38–47.

25. Рассказов, И. Ю. Результаты геоакустического мониторинга удароопасности на руднике «Глубокий» месторождения «Антей» [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Проблемы освоения георесурсов российского Дальнего Востока и стран АТР: Материалы VI международной научной конференции и VIII международного симпозиума по снижению опасных геологических проявлений в АТР 21-25 сентября 2010. Владивосток: Изд-во ДВТГУ, 2010. – С. 32-39.

26. Особенности формирования очагов разрушения в удароопасном массиве месторождения Антей [Текст] / Рассказов И.Ю. [и др.] // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск 3-6 октября 2011 г., Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2011. Т. 1. С. 425-430.

27. Аникин, П. А. Оценка геомеханического состояния удароопасного массива горных пород по результатам геоакустического мониторинга на месторождении «Антей» [Текст] / П. А. Аникин // Проблемы недропользования: материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 8-10 февраля 2012 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – С. 421-431.

28. Assessment and monitoring of burst-hazart on mines in the Far East (Russia) [Text] / Rasskazov I.Yu. [et al.] // Proceedings of the 11-th International Multidisciplinary Science Geoconference (20-25 June 2011, Bulgaria). Bulgaria, 2011. – Vol. 1. – P. 711-717.

29. Peculiarities of forming of fracture nucleus in burst-hazard massif [Text] / Rasskazov I.Yu. [et al.] // Proceedings of the V-th International Geomechanics Conferece (Varna, Bulgaria, 18-21 June 2012) – Bulgaria, 2012. – P.405-410.

30. Methods and results of burst–hazardous assessment in the underground mines of russian Far East [Text] / I.Yu. Rasskazov [et al.] // Proceedings of the 8-th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (Russia, Saint-Petersburg – Moscow. 1-7 September 2013). – Obninsk-Perm, 2013. – P. 319-322.

31. Аникин, П. А. Комплексный показатель удароопасности по данным геоакустического мониторинга массива горных пород [Текст] / П. А. Аникин, И. Ю. Рассказов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящ. 150-летию со дня рождения акад. В.А. Обручева и 130-летию акад. М.А. Усова, основателей Сибирской

горно-геологической школы. - Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – Т. II. – С. 293-295.

32. Аникин, П. А. Совершенствование методики оценки геомеханического состояния геосреды по данным геоакустического мониторинга [Текст] / П. А. Аникин, И. Ю. Рассказов, Г. Ш. Цициашвили // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Девятой Международной сейсмологической школы (Агверан (Республика Армения), 08-12 сент. 2014 г.). – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 211-212.

33. Исследование формирования очагов разрушения в удароопасных массивах горных пород месторождений востока России [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективности освоения месторождений твердых полезных ископаемых северо-восточных регионов России: труды Второй Всерос. научно-практ. конф., посвященной памяти чл. корр. РАН Новопашина М.Д (Якутск, 17-19 сент. 2013 г.). – Якутск.: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2014. – С. 23-29.

34. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на рудниках ОАО «ППГХО» / И. Ю. Рассказов [и др.] // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф. (Пермь, 05-07 июня 2013 г.). – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2014. – 2014. – С. 326-331.

35. Anikin, P.A. Improvement of technique of assessment of geomechanical condition of geoenvironment according geoacoustic monitoring data [Text] / P. A. Anikin, I. Y. Rasskazov, G. S. Tsitsiashvili // Modern Information Technologies in Earth Sciences: Proceedings of the International Conference, Petropavlovsk on Kamchatka, September 8-13, 2014 – Vladivostok: Dalnauka, 2014. – P. 96-97