ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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"

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

профессор, доктор технических наук,

И. Ю. Рассказов

Хабаровск – 2016

	1
ВВЕЛЕНИЕ	- 4

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ

1.1	Проблема динамических проявлений горного давления при ведении		
	подземных горных работ	10	
1.2	Анализ факторов, влияющих на формирование удароопасности массива		
	горных пород	16	
1.3	Методы оценки геомеханического состояния массива горных пород	18	
1.4	Средства мониторинга геомеханического состояния массива горных пород		
	на удароопасных месторождениях	23	
1.5	Цель и задачи исследований	33	

2. АНАЛИЗ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АНТЕЙ

2.1	Анализ горно-геологических особенностей месторождения	35
2.2	Горнотехнические условия разработки месторождения	44
2.3	Напряженно деформированное состояние и механические свойства массива	
	горных пород месторождения	55
	Выводы к главе 2	74

3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ ЗОН В УДАРООПАСНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

3.1	Сейсмоакустическая многоканальная цифровая система контроля горного			
	давления «Prognoz-ADS» на руднике «ПУР-1»	76		
3.1.1 Размещение элементов АСКГД в удароопасных участках рудничного поля				
3.1.2 Формирование локационных серий из всей совокупности потока данных				
	геоакустического мониторинга	83		
3.2	Методика выделения зон концентрации очагов разрушения в массиве			
	горных пород рудника «ПУР-1» по данным геоакустического мониторинга	87		
3.3	Закономерности изменения значений параметров ААЗ в зависимости от			
	геомеханического состояния массива горных пород	93		
	Выводы к главе 3	113		

4. ПРОГНОЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ АНТЕЙ

4.1	Комплексный показатель удароопасности по данным геоакустического	
	мониторинга массива горных пород месторождения	115
4.2	Закономерности изменения показателя удароопасности $K_{y\partial}$ перед опасным	
	динамическим проявлением горного давления	124
4.3	Расчет порога удароопасности по значениям комплексного показателя $K_{y\partial}$	131
4.4	Корреляционные связи параметров зоны концентрации напряжений и	
	комплексного показателя $K_{y\partial}$	133
4.5	Применение комплексного показателя $K_{y\partial}$ для прогноза опасных проявлений	
	горного давления	137
	Выводы к главе 4	142

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНОКОВ	147

введение

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 горно-динамических 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 (<u>№</u> 09-05-00533); системах» интеграционных проектов "Моделирование И экспериментальные исследования процессов формирования очагов горных И горнотехнических ударов в геодинамически активных массивах горных пород" (№ 08-II-CO-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 натурных 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 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); 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), Х Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» и VI Российско-Китайском научнотехническом 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.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ.

1.1. Проблема динамических проявлений горного давления при ведении подземных горных работ

Добыча полезных ископаемых и подземное строительство в сложных горногеологических 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 горнотектонические удары, нередко приводящие к катастрофическим последствиям.

Динамическое явление в подземных выработках — внезапно возникающее и протекающее с высокой скоростью движение горных пород, газов или жидкостей вблизи выработок, сопровождающееся сильным динамическим эффектом. Динамическое явление — результат проявления горного давления и давления газов и жидкостей, заключённых в породах. К динамическому проявлению относятся внезапные обрушения, выбросы, заколообразования и стреляние горных пород, акустические, микросейсмические И сейсмические явления В горном массиве, горные И горнотектонические удары, представляющие серьезную угрозу жизни горнорабочих. С увеличением глубины ведения горных работ интенсивность и число динамических явлений в массиве горных пород неизбежно возрастают, что требует особого внимания со стороны горнодобывающих предприятий в содействии с курирующими институтами.

Проблема динамических проявлений в мировой горной практике существует уже более 250 лет. К настоящему времени накоплен большой объем результатов теоретических и экспериментальных исследований причин и условий возникновения динамических проявлений в массиве горных пород при ведении крупномасштабных подземных горных работ, а также поиска предвестников И возможности прогнозирования сильных и опасных событий. Особый вклад в изучение этих вопросов внесли С.Г Авершин, В.В. Адушкин, А.Д. Завьялов, А.А. Еременко, А.А. Козырев, А.В. Ловчиков, В.С. Куксенко, В.Н.Опарин, И.М. Петухов, И.Ю. Рассказов, Г.А. Соболев, М.В. Курленя, К.Н. Трубецкой и другие. Большое внимание уделяется техногенной наведенной сейсмичности, как динамическому явлению. Этому проявлению горного

давления посвящены работы С.В. Кузнецова, В.С. Куксенко, А.А. Козырева, А.А. Маловичко, М.А. Садовского, В.Л. Шкуратника, А.А. Филинкова, И.А. Турчанинова, А. Мендецки и других.

Впервые сильные проявления горного давления в мире были зафиксированы на оловянных рудниках Уайтхейвене в 1738 г. (Англия) [19]. Опасные динамические проявления горного давления случались в шахтах и рудниках ЮАР, США, Канады, Индии, Германии, Швеции, Чехии, Китая и других странах мира.

В Индии впервые горный удар был зарегистрирован в 1898 г. на золоторудном руднике Ургаум в Коларском районе на глубине 320 м. В настоящее время рудник Ургаум является одним из самых глубоких рудников в мире. Позже, на руднике Чампион-Риф в 1954 г. произошел сильный горный удар, а в 1962, 1963, 1966 гг. - серия горных ударов, нанесших серьезный экономический ущерб и масштабные разрушения.

Первые горные удары в Канаде были зарегистрированы на рудниках компании Lake Shore в Онтарио в 1932 г. при разработке золоторудного месторождения, а в 1957 г. там же было зафиксировано мощное динамическое проявление в форме горного удара с сейсмической энергией 5×10⁴ МДж [126].

На золотодобывающих предприятиях ЮАР, по мере расширения масштабов добычи полезных ископаемых, количество горных ударов с 1908 по 1918 гг. возросло с 7 до 223, а в 1975 г. на 31 золотодобывающем руднике их было зафиксировано уже более 680. В 80-е годы прошлого столетия на одном из золотодобывающих рудников Буффельсфонтейн (Buffelsfontein, Simmer & Jack Mines, Ltd) происходило в месяц около 25 динамических событий силой 0,5-4,5 бала по шкале Рихтера. В 1975 г. в ЮАР число погибших по причине горных ударов составило 73 чел. или 55 % от общего числа смертельных случаев, а в 1979 г. уже 62 % несчастных случаев со смертельным исходом произошло в результате горных ударов и обрушений [24].

В США динамические проявления регистрируют более 70 лет. В период с 1978 по 1993 гг. зарегистрировано 73 несчастных случая, связанных с горными ударами, в которых погибло 5 шахтеров и еще в 55 случаях люди не пострадали. Проявления горного давления в динамической форме приводят не только к гибели и травматизму людей, но и наносят значительный ущерб горным работам. Сильный горный удар в 1983 г. на одной из угольных шахт запада США разрушил 40 щитовых крепей длинных очистных забоев и почти полностью вывел из строя вспомогательный штрек действующей очистной панели.

Не остаются в стороне от внимания опасные по горным ударам рудники Австралии, Канады, Великобритании, Германии, Франции, Чили, Чехии и Польши, где более 40 лет регистрируется весь спектр динамических проявлений и проводятся мониторинговые наблюдения [144, 160, 167, 168, 170, 171, 172].

В России первые проявления горного давления в форме горного удара зарегистрированы в 1944 году в Кизеловском угольном бассейне, отличающемся высокой прочностью и упругостью углей и вмещающих пород — кварцевых песчаников [17]. В 1960-е годы горные удары начали проявляться при разработке рудных месторождений (Таштагольского, Октябрьского, Североуральского бокситового и др.). В 90-е годы динамические проявления горного давления наблюдались на 43 месторождениях Российской Федерации и еще на 18 рудниках была выявлена склонность горных пород к удароопасности. По состоянию на 01.01.94 г. число всех зарегистрированных горных ударов и микроударов в России, начиная с 1970 г., составляло более 380 случаев и продолжало расти с увеличением глубины ведения горных работ.

Наиболее удароопасные месторождения России, на которых зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления: Североуральское бокситовое месторождение, где горный удар на шахте № 14-14 бис 18 мая 1978 года на глубине 525 м разрушил 450 м горных выработок с объемом выброса более 1000 м³; месторождения Кольского полуострова, где 17 августа 1999 г. на руднике Умбозеро произошел горный удар, вызвавший разрушения на площади 650 м² с перекрытием на 10-90 % сечения выработок, а на поверхности ощущался толчок с энергией 8 баллов [50, 51]; месторождения Талнахского района (ОАО «ГМК «Норильский никель», рудники «Октябрьский» и «Таймырский»), где в 1999 г. было зарегистрировано более 7800 динамических событий с энергией от 10 до 7400 Дж; Таштагольское месторождение, где было зарегистрировано уже более 20 тыс. динамических событий, и самое мощное из них — горный удар, произошедший 25 декабря 1982 г.) [72], рисунок 1.1.1.

Начиная с конца 1970-х годов проблема динамических явлений стала актуальной для целого ряда подземных рудников Дальнего Востока Российской Федерации, где производятся или планируются горные работы в удароопасных условиях. На некоторых из них наблюдается весь спектр динамических форм проявлений горного давления вплоть до сильных, с тяжелыми последствиями горных и горно-тектонических ударов; на других — отмечены отдельные динамические проявления, но с углублением горных работ прогнозируется рост интенсивности и масштабов опасных динамических проявлений [88].



Рисунок 1.1.1 – Месторождения России, склонные и опасные по горным ударам^{*}

1-Абаканское; 2-Антей; 3-Апатитовый цирк; 4-Белогорское; 5-Березовское; 6-Берикульское; 7-Восток-2; 8-Высокогорское; 9-Гайское; 10-Гороблагодатское; 11-Дарасунское; 12-Естюнинское; 13-Забытое; 14-Ирокиндинское; 15-Казское; 16-Коашвинское; 17-Константиновское; 18-Коробковское; 19-Кочкарское; 20-Кукисвумчоррское; 21-Лебяжинское; 22-Ловозерское (участок Карнасурт и участок Умбозеро); 23-Николаевское; 24-Ньоркпахское; 25-Огневско-Бакенное; 26-Октябрьское; 27-Талнахское; 28-Олений ручей; 29-Партомчоррское; 30-Перевальное; 31-Песчанское; 32-Плато Расвумчорр; 33-Расвумчоррское; 34-Садонское; 35-Саткинское; 36-Солнечное; 37-Стрельцовское; 38-Таштагольское; 39-Тырнаузское; 40-Узельгинское; 41-Хинганское; 42-Шерегешское; 43-Южное; 44-Юкспорское; 45-Яковлевское; 46-Белогорский ГОК; 47-Южно-Хинганское.

Первые динамические проявления горного давления на Дальнем Востоке были отмечены при проходке стволов и разведочно-подготовительных выработок Николаевского рудника ПО «Дальполиметалл». На руднике наиболее мощное динамическое явление, которое было классифицировано как горно-тектонический удар, было зарегистрировано 21.01.1989 г. на глубине 700 м с выбросом 25–30 тыс. м³ породы [91]. В том же районе на месторождении Южное мощное проявление в виде горного удара впервые регистрировали в 1987 г. на глубине 170 м. Объем выброшенной горной массы составил 40 м³.

^{*} Месторождения, перечисленные в «Положении по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам»[29, 75]

На месторождении Антей первые проявления горного давления были замечены в 70-х годах на стадии строительства, при проходке стволов, геологоразведочных и подготовительных выработок. По мере углубления горных работ частота и интенсивность этих явлений закономерно увеличивались, а на глубине более 350 м. фиксировали первое динамические явления в виде стреляния породы. Первый горный удар на руднике «ПУР-1» месторождения Антей был зафиксирован в 14.05.2005 г., вследствие которого было разрушено более 160 пм горной выработки [66].

Хинганское оловорудное месторождение разрабатывалось с 1945 г. открытым способом, а с 1964 г. добычу руды вели подземным способом. Начиная с глубины +110 м. на "Хинганском" ГОКе начали регистрировать динамические проявления горного давления, в том числе толчки, микроудары и т.д. Наиболее мощное проявление было зафиксировано в 1989 г. на глубине 570 м с выбросом более 20 м³. В 80-е годы с увеличением глубины горных работ опасные динамические проявления стали регулярными на целом ряде рудников Дальнего Востока, таблица 1.1.1.

В последующие годы к склонным к горным ударам был отнесен целый ряд рудных месторождений «Хрустальненского», «Солнечного» и «Приморского» ГОКов, на которых имели место динамические проявления или отмечались внешние признаки удароопасности [88].

Анализ последствий самых крупных проявлений горного давления, зарегистрированных на ряде удароопасных рудников [27, 50, 51, 72], позволил выделить их общие особенности:

– с глубиной (если не проводятся эффективные мероприятия по предотвращению горных ударов) частота и интенсивность динамических явлений увеличивается. Стреляния и интенсивное заколообразование пород в горных выработках возникают на глубинах, меньших, чем проявляются собственно горные удары. При увеличении глубины и размеров выработанного пространства появляются горные удары горнотектонического типа, разрушающие горные выработки на больших площадях;

 - горные удары происходят на участках шахтных полей в породах, рудах, обладающих высокими упругими свойствами и склонными к хрупкому разрушению при нагрузках, близких к пределу их прочности;

– удароопасность в горных выработках увеличивается в зонах влияния крупных тектонических нарушений, контактов руд и пород с резко отличающимися

прочностными и деформационными свойствами, а также в менее нарушенных участках массива;

Месторождение (рудник)	Глубина горных работ по условию	Степень удароопасности	Характер динамических проявлений	
	удароопасности, м	месторождения		
Николаевское			Стреляние пород, толчки,	
(Николаевский)	700	Опасное	микроудары, горно-	
(11111001002011111)			тектонические удары	
Южное	180	Опасное	Стреляние пород, толчки, горные	
(Южный)	100		удары	
Хинганское	500	Опасиое	Стреляние пород, толчки,	
(Хинганский)	500	Ollachoe	микроудары, горные удары	
Антой			Стреляние пород, толчки,	
$(\Pi V D 1)$	500	Опасное	микроудары, горные удары,	
(1194-1)			горно-тектонические удары	
Восток-2	500	C	Склонное к проявлениям горного	
(Восточный)		Склонное	давления в форме горных ударов	
Солнечное	600 Склонное	нечное	C	Склонное к проявлениям горного
(Солнечный)		Склонное	давления в форме горных ударов	
Перевальное	400	C	Склонное к проявлениям горного	
(Перевальный)	(Перевальный) 400	Склонное	давления в форме горных ударов	
Дарасунское	Иское	400	C	Склонное к проявлениям горного
(Дарасун)	400	Склонное	давления в форме горных ударов	
Южно-Хинганское	200	Currentee	Склонное к проявлениям горного	
(Поперечный)	300	Склонное	давления в форме горных ударов	
Забытое	Забытое 200 (Забытый)	C	Склонное к проявлениям горного	
(Забытый)		Склонное	давления в форме горных ударов	
Ирокиндинское	200	C	Склонное к проявлениям горного	
(Ирокинда)	200	Склонное	давления в форме горных ударов	
· · ·			· · · · · · · · · · · · ·	

Таблица 1.1.1. – Условия и характер динамических проявлений горного давления на действующих рудниках Дальнего Востока и Забайкалья

 возникновению горных ударов способствует большая глубина горных работ, а также горнотехнические условия, способствующие созданию повышенных напряжений в массиве, соизмеримых с прочностью горных пород и руд.

Таким образом, проблема динамических проявлений в шахтах и рудниках известна на протяжении нескольких веков во всем мире и актуальна для ряда рудников нашей страны с 70-х годов прошлого столетия, в том числе для рудников Дальнего Востока России, где проводятся и планируются горные работы на глубоких горизонтах в удароопасных условиях. На большинстве удароопасных месторождений России попрежнему нет однозначного решения проблемы удароопасности. Поэтому более детальное исследование особенностей проявлений горного давления, выявление факторов и их совокупности на удароопасных месторождениях является важной научной задачей для развития методики прогноза удароопасности.

1.2 Анализ факторов, влияющих на формирование удароопасности в массиве горных пород

Динамические проявления горного давления происходят при определенных сочетаниях естественных геологических и горнотехнических условий. Эти сочетания крайне разнообразны и связаны с влиянием факторов, которыми определяется не только само возникновение этих явлений, но также их сила и характер проявления.

К геологическим факторам, обуславливающим возможность динамических проявлений горного давления, относятся: физико-механические свойства пород; возможные породные включения и контакты пород; глубина залегания пород и геодинамика месторождения.

– Выделяют несколько классов физических свойств горных пород: плотностные (удельный и объёмный вес, удельная масса, плотность и пористость), механические (предел прочности при одноосном сжатии и растяжении, сцепление, угол внутреннего трения и другие), горнотехнологические (коэф. крепости, разрыхления и трения), тепловые (теплопроводность, удельная теплоёмкость и другие), электромагнитные, радиационные. Степень удароопасности массива горных пород в большей степени определяют прочностные характеристики пород и возможность их хрупкого, упругого разрушения, [73]. Предел прочности пород на одноосное сжатие является одной из наиболее важных механических характеристик горных пород. Она была принята проф. М.М. Протодьяконовым (1926 г.) за основу разделения горных пород по крепости на классы от 1 до 20 ($\sigma_{cж}$ изменяется от 10 до 200 МПа и более). Этой классификацией и сейчас широко пользуются на практике для сравнительной оценки прочности (устойчивости) подрабатываемых горных пород [22].

– Породные включения, дайки и другие структурные неоднородности горных пород определяют чрезвычайно широкую изменчивость характеристик массива, что вынуждает применять специфические приёмы изучения свойств и закономерностей их изменения в зависимости от рассматриваемых объёмов, режимов воздействий, времени воздействия, естественного или начального напряжённого состояния и т.д.

Особое значение в тектоническом строении и развитии земной коры принадлежит глубинным разломам, представляющим собой первичные элементы её строения. Наиболее крупные и древние разломы проникают в глубину до подошвы земной коры и ниже, в верхнюю мантию, а их сеть образует литосферные плиты. В пределах плит и блоков развиты плавные и пликативные деформации соответствующих порядков — складчатость и волновые изгибы. Таким образом, земная кора имеет блочное строение. Глубинные разломы и разрывы земной коры являются теми естественными швами, по которым на протяжении всей геологической истории Земли непрерывно происходили тектонические движения, а на их границе трения фиксируются землетрясения разных масштабов. Тектонические структуры в земной коре более высоких (третьего и четвертого) порядков, называют региональными разломами, которые формируют блочно-иерархическое строение и постоянные перемещения относительно друг друга. Именно из-за постоянного движения по региональным разломам формируется природное поле напряжений, изменение которого сопровождается опасными проявлениями горного давления на месторождениях полезных ископаемых [22].

Среди техногенных или горнотехнических факторов выделяют: систему разработки; наличие уменьшающихся целиков и их ширина; способ проведения горных выработок и их пространственную ориентацию; величину отставания крепи от забоя; способы крепления кровли и скорость продвижения очистного забоя; размеры выработанного пространства; вид взрывных работ; пространственную конфигурацию горных выработок; зону опорного давления; организацию работ в забоях и др. факторы, создающие условия для возникновения удароопасности. По мнению цитируемых выше ученых, занимающихся проблемой удароопасности, наиболее значимыми факторами, влияющими на изменения геомеханических условий в массиве, являются: система разработки, которая определяется пространственными параметрами геосреды, такими как характер и мощность рудных тел, угол их падения, направление простирания, состояние вмещающих пород и т.п.; ведение горных работ с оставлением целиков породного массива или полезного ископаемого; зоны влияния геологических нарушений; места, где прочные породы граничат с менее прочными; резкое увеличение или уменьшение мощности отрабатываемого рудного тела, если фронт очистных работ имеет уступную форму; наличие в рудом теле кварцевых включений; изрезанность

отрабатываемого участка большим числом подготовительных и разведочных выработок; ведение горных работ под целиками, оставленными на смежных участках (блоках); ведение горных работ догоняющими, сближающимися или встречными забоями; отработка уменьшающихся целиков, находящихся в предельно напряженном состоянии; применение камерно-столбовых систем разработки и другие дополнительные технологические воздействия на участки массива при ведении добычных и взрывных работ.

Недоучет перечисленных факторов может иметь трагические последствия, особенно опасно сочетание нескольких факторов. Поэтому решение проблемы предотвращения горных ударов должно носить системный, непрерывный и комплексный характер. Только в этом случае возможно для каждого месторождения учесть его особенности, разработать безопасные и эффективные рекомендации, в том числе мероприятия по предотвращению горных ударов.

В зоне действия горного предприятия формируется локальное техногенное поле напряжений, которое взаимодействует с первоначальным природным полем напряжения. В результате перераспределения напряжений и их концентрации в отдельных участках массива формируемая природно-горнотехническая система теряет равновесие. Подобные слияния напряжений могут завершиться специфическими формами разрушения в виде горно-динамического проявления горного давления разных масштабных уровней, вплоть до горно-тектонического удара [62, 74, 20, 107].

На каждом, отрабатываемом подземным способом месторождении, обязательным условием формирования удароопасности является наличие обеих перечисленных групп факторов, определенное сочетание которых в любой момент времени может вызвать опасное динамическое проявление горного давления [24, 87].

Таким образом, существует широкий ряд факторов, условий и причин возникновения динамических проявлений горного давления в массиве, углубленное изучение и комплексный учет которых позволит выявить их предвестники и создать на этой основе эффективную методику оценки геомеханического состояния геосреды.

1.3 Методы оценки геомеханического состояния массива горных пород

Изучение полей напряжений в массиве горных пород представляет собой одну из важнейших фундаментальных задач наук о Земле. Учение о естественном или

техногенном напряженном состоянии геологической среды возникло еще в конце XIX века, затем продолжало и продолжает развиваться вплоть до настоящего времени.

Оценка геомеханического состояния массива горных пород сводится к выявлению в горном массиве напряженных участков и оценке их склонности к хрупкому разрушению в динамической форме. В литературе [121, 126, 139] приводится ряд методов определения напряжений в массиве горных пород, которые подразделяются на три различные по физическим и методологическим подходам группы. По результатам анализа существующих и применяемых методов оценки удароопасности необходимо выделить следующие:

– Первая группа методов — основанная на анализе общей геологической обстановки, анализе геологических и геотектонических особенностей массива, а также на визуальном осмотре горных выработок, деформированных под действием горного давления, и оценке удароопасности массива по дискованию керна. Последний принят как базовый метод оценки геомеханического состояния массива горных пород [8, 29]. Как правило, такие методы способны дать качественную оценку действующих напряжений и характеризуются малой трудоемкостью. Применение визуальных методов в качестве основного метода исследования при кажущейся простоте требует большого опыта и, главное, весьма четкого представления о процессах, происходящих на данный момент в массиве горных пород, формах проявления горного давления в подобных горных породах и другие особенности [141, 59]. Для рудных месторождений подход, основанный на изучении геодинамики конкретного месторождения, подчиненной закономерностям развития региональных тектонических структур, имеет особенно большое значение, т.к. более 80% из них, по данным отечественных и зарубежных геологов, блокируются в узлы и протяженные рудные пояса, контролируемые глубинными разломами [91, 138]. В последние годы метод претерпел изменения и стал развиваться с позиции метода геодинамического районирования месторождений (ГРМ). Метод ГРМ объединяет в себе комплекс геоморфологических и тектонических методов для изучения иерархической системы тектонических блоков [9];

– Ко второй группе относятся так называемые <u>геомеханические методы</u>, в большей части основанные на непосредственном измерении деформационных процессов в локальной области массива; такие методы, как правило, обладают относительно высокой точностью определения направлений действия напряжений,

однако являются весьма трудоемкими и зачастую требуют дополнительного лабораторного определения физико-механических свойств горных пород. В основе метода лежит измерение деформаций пород с последующим вычислением действующих напряжений. Наиболее распространенным деформационным способом определения напряжений является метод щелевой разгрузки. Он основан на измерении упругих деформаций восстановления при отделении некоторого элемента от породного массива и разгрузке его от действовавших в нем напряжений [48, 28, 103, 139];

– Третья группа включает <u>геофизические методы</u>, основанные на изучении взаимосвязи природы, структуры, пространственной и временной изменчивости естественных и техногенных геофизических полей в массиве с действующими в нем напряжениями. Геофизические методы, основанные на изучении естественных и техногенных полей напряжений, насчитывают более 100 разновидностей и разделяются на подгруппы.

Среди отечественных ученых, которые заложили основы геофизических методов исследования, следует упомянуть Л. М. Альпина, В. И. Баранова, В. И. Баумана, В. Р. Бурсиана, В. Н. Дахнова, Г. А. Гамбурцева, А. И. Заборовского, А. Н. Краева, П. П. Лазарева, А. А. Логачева, А. А. Михайлова, Л. Я. Нестерова, П. П. Никифорова, А. А. Петровского, М. К. Полшкова, Е. Ф. Саваренского, А. С. Семенова, Л. В. Сорокина, Ю. В. Ризниченко, Л. А. Рябинкина, А. Г. Тархова, В. В. Федынского, О. Ю. Шмидта, Б. М. Яновского.

Геофизические методы позволяют производить контроль как ограниченных, так и сравнительно больших областей массива, сосредоточенных на площади десятков километров. Точность определения абсолютных значений действующих напряжений невысока, в то же время методы информативны, мобильны и весьма производительны при оценке изменчивости состояния геосреды во времени.

Среди геофизических методов контроля состояния породного массива представляют особый интерес акустические, радиоволновые, радио-, электро- и звукометрические [99, 125], а также сейсмо- и пьезоэлектрические методы, основанные на механоэлектрических эффектах горных пород.

Акустические методы исследования массива горных пород, в зависимости от диапазона частот, подразделяют на следующие: сейсмический (до 200 Гц), сейсмоакустический (0,3-2 кГц), акустический (2-20 кГц) и ультразвуковой (свыше 16-

20 кГп). Сейсмический метод позволяет определять интегральные значения акустических показателей горных пород, которые характеризуют свойства массива; его применяют при контроле на базах от 200 м и больше. Использование более высокочастотных методов дает возможность дифференцировать массив ПО акустическим свойствам и выявлять акустически-активные зоны [18].

Акустические методы, использующие волновые поля естественного происхождения, называют пассивными, а возбужденные (искусственно) – активными. Пассивные методы изучения свойств, строения и состояния массива горных пород (геоконтроль) используют в практике горного дела для исследования и контроля процессов разрушения горных пород, зон повышенной концентрации напряжений и очагов динамических проявлений горного давления (горных ударов). Поэтому пассивные акустические методы для оценки состояния массива горных пород еще называют геоакустическими [54]. Активные же акустические методы, основанные на возбуждении и регенерации упругих волн в массиве, используются для анализа и интерпретация волновой картины, в том числе широко применяют в горном деле для исследования строения и свойств массива горных пород. К достоинствам акустической группы методов стоит отнести малые трудозатраты, оперативность, высокую разрешающую способность измерений, возможность регистрации предвестников динамических проявлений И безопасность В случаях удаленного контроля удароопасности.

Ультразвуковые методы позволяют определять физико-механические характеристики пород в массиве: упругие (модули упругости и сдвига, коэффициент Пуассона), неупругие (коэффициенты вязкости, пластичности, внутреннего трения), прочностные, наличие дефектов структуры (каверны, пористость, трещины, раковины) и их изменение во времени и под нагрузкой. Кроме того, с помощью ультразвука можно устанавливать границы зон упругих и неупругих деформаций, оценивать напряженное состояние целиков [17].

При изучении свойств и состояния массива горных пород методом акустического контроля, непосредственно в производственных условиях, необходимо учитывать вопросы методики, включающие выбор аппаратуры, схемы измерений и оптимальных условий контроля, интерпретацию волновых картин по данным измерений, погрешности измерений [97]. Наличие зон тектонических нарушений значительно усложняет оценку

геомеханического состояния из-за совместного влияния выработки и геологического нарушения. Для исследования в этих зонах применяют методы, позволяющие измерять напряжения за зоной опорного давления, например, ультразвуковой или электрометрический.

Среди геофизических методов выделяют методы электромагнитной индукции, [96, 101]. С помощью наведенного электрического поля изучают напряженное состояние в призабойных зонах одиночных и сопряженных выработок, в результате которых определяют зоны повышенных напряжений и получают качественную картину их распределения [49, 119].

Один из современных и перспективных способов контроля состояния массива горных пород базируется на методах ультразвукового сканирования поверхности выработки или лазерного 3D сканирования для контроля разрушения выработок [38].

Большая часть методов оценки геомеханического состояния массива горных пород, применяемых в настоящее время на подземных рудниках, предполагает бурение скважин (каротаж, ультразвуковые, акустические, геомеханические и др. методы), а в некоторых случаях требуется применение комплекса методов [78].

– Четвертая группа методов оценки удароопасности получила распространение с развитием компьютерных технологий — расчетные методы, основанные на аналитических расчетах; позволяют произвести качественную и количественную оценки напряжений в массиве горных пород. Расчетные методы используют для уточнения данных, полученных при натурных измерениях и изучении состояния массива горных пород. К этой методике также относят физическое и математическое моделирования (метод конечных элементов, метод граничных элементов, методы конечных разностей). В качестве исходных данных используют значения и направления напряжений, прочностные и деформационные свойства массива, особенности его геологического и тектонического строения и др. [57, 61, 105, 134].

В последние годы математическое моделирование методами конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ) стали все чаще использовать в комплексе с геофизическими методами для контроля состояния горного массива. Это обусловлено их относительно малой трудоемкостью и универсальностью программного обеспечения.

Вместе с тем, применение МКЭ или МГЭ позволяет оценить влияние тех или иных действующих факторов на удароопасность, в том числе горно-геологических [34,

74], технологических и тем более их комплексное влияние на изменение геомеханического состояния горного массива [16, 79].

Таким образом, приведенное обобщение показывает, что существует широкое многообразие разработанных и используемых в настоящее время методов оценки Обилие геомеханического состояния горного массива. методов обусловлено сложностью задачи оценки удароопасности, в формировании которого участвуют многочисленные И трудноучитываемые природные (горно-геологические, (сложная геометрия геодинамические) И горнотехнические формирующихся выработанных пространств, наличие разнообразных уменьшающихся целиков) факторы. Влияние комплекса факторов на геомеханическое состояние разрабатываемых массивов остается недостаточно изученным и на ряде месторождений Дальнего Востока России.

Для повышения надежности и достоверности оценки удароопасности на месторождениях необходимы комплексные исследования геомеханического состояния горного массива различными методами. 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, оперативные и достаточно информативные на всех этапах изменения геомеханического состояния.

1.4 Средства мониторинга геомеханического состояния массива горных пород на удароопасных месторождениях

Производство горных работ определяет необходимость обеспечения безопасности, своевременного прогноза и предотвращение опасных динамических проявлений горного давления.

На основе выводов, приведенных в п. 1.3, установлена перспективность **геофизического метода** для оценки геомеханического состояния массива и обеспечения безопасности горных работ при подземной разработке месторождений, склонных к опасным динамическим проявлениям горного давления. Для контроля и мониторинга подобных явлений все большее распространение получают методы, базирующиеся на звукометрических методах, в том числе **геоакустических и сейсмоакустических** методах [88].

Геоакустический метод основан на регистрации акустической эмиссии (АЭ) в диапазоне частот 0,2...20 $\kappa \Gamma u$, возникающей в горных породах вследствие концентрации в них механических напряжений, сопровождающейся структурными изменениями материала, а также вследствие появления и роста в нем микротрещин разрушения. Указанный выше частотный диапазон позволяет регистрировать упругие импульсы от возникновения трещин протяженностью от единиц сантиметров до единиц метров. Образующиеся трещины именно этого размера являются ответственными за начало потери устойчивости участков разрабатываемого массива горных пород и горных сооружений: целиков различного назначения, приконтурных зон, повышенных напряжений вблизи горных выработок, элементов крепи [17, 88, 107].

Сейсмоакустические системы контроля горного давления применяют на ряде удароопасных рудников, среди которых Норильские рудники «Октябрьский» и «Таймырский» («Релос», «GITS-S», «ISS»), СУБР («Очаг»), «Николаевский» («Прогноз-5AM», «Гроза-16», «Prognoz-ADS»), «ПУР-1» («Prognoz-ADS»), объединенный «Кировский» рудник» ФОСАГРО АПАТИТ («Prognoz-ADS»), подземный рудник «МИР» («Prognoz-ADS») и др.

Сейсмический метод основан на регистрации волн в диапазоне частот до 300 Гц и затрагивает регистрацию малых возмущений в виде микросейсмики (сейсмоакустики) в диапазоне до 800 Гц. Применение сейсмических методов позволяет изучать состояние и свойства пород в значительных масштабах — соизмеримых с размерами рудников.

Успешное применение систем сейсмического контроля в шахтах и рудниках во многом связано с использованием методик и подходов, разработанных для прогноза землетрясений. С геоакустическими методами они имеют общие закономерности и параметры, но в большинстве случаев методики не применимы для оценки удароопасности системами геоакустического контроля. Далее в работе будет приводиться сравнительный анализ существующих методик, используемых для оценки геомеханического состояния массива горных пород с применением сейсмологического, сейсмического и геоакустического методов.

Сейсмический метод для контроля изменения геомеханического состояния массива горных пород широко применяют, судя по количеству публикаций и сообщений на эту тему, на наиболее удароопасных в нашей стране месторождениях: Северо-Уральском бокситовом, Таштагольском железорудном, Хибинских апатитовых,

Ловозерском редкометалльном. На каждом из них в течение десятилетий осуществляется контроль сейсмического состояния массивов региональными и местными сейсмостанциями, рисунок 1.1.1 [51].

На всех перечисленных месторождениях остро стоит проблема прогноза и предотвращения опасных динамических проявлений в форме горных ударов и сейсмических явлений. Современные требования к обеспечению безопасных условий работы на удароопасных объектах отражены в инструкции по безопасности ведения горных работ [29], которые предусматривают, В том числе, создание многофункциональных и многоуровневых систем контроля горного давления, внезапных выбросов породы и газов. В этой области в ОАО «ВНИМИ» накоплен многолетний опыт применения подобных систем на шахтах и рудниках России.

Так, для обеспечения безопасности ведения горных работ и снижения удароопасности при отработке глубоких горизонтов на ряде рудников, под методическим руководством сотрудников ВНИМИ были внедрены и запущены следующие сейсмостанции. В 1990 на руднике «Норильский никель» под названием «Норильск». Позже, на базе сейсмостанции «Норильск», в 1995 г. на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» были введены в эксплуатацию два аппаратурных комплекса «РЕГИОН» для сейсмического мониторинга. В 1992 г. на угольной шахте «Южная» ОАО «Ростовуголь» установлена первая в России искробезопасная сейсмическая аппаратура АСТШ-1, разработанная «ВНИМИ», таблица 1.4.1.

сейсмичности Для регионального контроля была установлена система сейсмического мониторинга (GITS) на следующих горнодобывающих и опасных по горным ударам объектах: в 2005-2006 г. на шахтах «Комсомольская» и «Северная» ОАО «Воркутауголь» [113]; в 2008 г. была развернута сейсмостанция на руднике «Баренцбург» ФГУП «Арктикуголь»; в 2010 и 2013 году переданы в эксплуатацию на шахте «Полысаевская» ОАО «СУЭК-Кузбасс» и шахте «Алардинская» [50, 88, 109]. На Верхнекамском месторождении калийной соли действует ряд удароопасных рудников (БКПРУ-2, БКПРУ-3, БКПРУ-4, СКРУ-1, СКРУ-2, СКРУ-3 и др.), разработкой которых занимается ОАО «Уралкалий», ОАО «Сильвинит» и др., где с 1998 года установлены системы сейсмического мониторинга на базе сети датчиков российских и зарубежных производителей (ISS, США) [21, 83, 94].

Таблица 1.4.1 – Системы сейсмического мониторинга на удароопасных шахтах и рудниках России

Шахта/Рудник	Предприятие	Название системы	
Deserve CVED	ОАО «Североуральский	«Регион»	
Рудник СубР	бокситовый рудник»	«Очаг»	
Рудники:		АСКСМ на базе «Апатиты» ГС РАН и	
«Кировский»	ООО «Апатит»	«ARRAY» (подстанции «Апатиты» под	
«Расвумчоррский»		управлением «НТЦ Автоматика»);	
Pumuur «VM602epo»	0.00 "Ceppe user"	«Ревда»; «Апатиты» ГС РАН;	
тудник «умоозеро»	ОАО Севредмет	«ARRAY» (подстанции «Апатиты»);	
		«Ловозеро» ГС РАН; «Апатиты» ГС	
Рудник «Карнасурт»	ООО «Ловозерский ГОК	РАН; «ARRAY» (сейсмостанции	
		«Апатиты»);	
Рудник «Таштагол»	ООО «Кузнецкий ГОК»	«Релос»	
Рудники «Октябрьский»	ОАО ГМК«Норильский	«Релос»	
и «Таймырский»	никель»	«Регион»	
Рудник «Ангидрид» и	ОАО ГМК«Норильский		
«Комсомольский»	никель»	«Булкан»	
Шахта «Северная» и «Комсомольская»	ОАО «Воркутауголь»	«GITS»	
Шахта	ФГУП «ГТ	CITS	
№1-5 Баренцбург	"Арктикуголь»	«OIIS»	
Шахта «Полысаевская»	ОАО "СУЭК-Кузбасс"	«GITS»	
Шахта «Южная»	ОАО «Ростовуголь»	ACTIII-1	
Рудник «Хинганский» ООО «Хинганолово»		АСКГД «Прогноз-5АМ»	
Durante al luncor opportunity	ОАО «ГМК	АСКГД «Prognoz-ADS»	
Рудник «николаевскии»	Дальполиметалл»		
	ΟΑΟ «ΓΜΚ	«Гроза-16»	
г удник «Южныи»	Дальполиметалл»		
Рудник «ПУР-1» ПАО «ППГХО»		АСКГД «Prognoz-ADS»	

Первая многоканальная система сейсмологического мониторинга на Западном Урале была развернута на угольных шахтах Кизеловского угольного бассейна в конце 1980-х годов в рамках работ по прогнозированию и предотвращению горных ударов (72). В тоже время в Кемеровской области на Таштагольском руднике использовали микросейсмические станции «Очаг», «Вектор-13», «Горизонт-6» и позже на базе них — станцию «Прогноз-5», которые позволяли определять координаты источников сейсмоакустической эмиссии [10, 31, 60, 72].

В середине 80-х проблема удароопасности стала актуальной для ряда глубоких месторождений Дальнего Востока, рисунок 1.4.1. Поэтому на базе разработанной в НПО «Дальстандарт» системы «Прогноз-5» в ИГД ДВО РАН был реализован модифицированный комплекс «Прогноз-5АМ», который имел возможность сохранять результаты мониторинга в ЭВМ.

Впервые на Дальнем Востоке России режимные сейсмоакустические наблюдения с использованием системы микросейсмического контроля на базе станции «Прогноз-5AM» проводились на Хинганском месторождении, начиная с 1994 г. Автоматизированная система позволяла получать координаты источников АЭ-событий и простейшие параметры их импульсов.



Рисунок 1.4.1 – Удароопасные месторождения Дальнего Востока России Месторождения: Н – Николаевское, Ю – Южное, В – Восток-2, ПР – Перевальное, С – Солнечное, Х – Хинганское, А – Антей, Д – Дарасунское, И – Ирокиндинское, 3 – Забытое.

В 2004 г. станция «Прогноз-5АМ» была апробирована в условиях «Николаевского» месторождения и успешно внедрена для контроля удароопасности на глубоких горизонтах рудника «Николавеский». Для условий «Николаевского» рудника АСКГД «Прогноз-5АМ» была реализована с функцией записи результатов мониторинга в базу данных персонального компьютера. Программный комплекс системы позволял проводить компьютерный анализ результатов мониторинга и выводить в графическом виде на экран отчеты.

В 2005 г. после серии мощных динамических проявлений на урановом месторождении Антей остро встал вопрос мониторинга массива горных пород. На месторождении Антей (рудник «ПУР-1») в 2006 году введена в эксплуатацию цифровая автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS», основанная на базе разветвленной сети пьезоэлектрических акселерометров в паре с интеллектуальными преобразователями на основе современных микропроцессорных

технологий. Измерительно-вычислительный комплекс позволяет регистрировать сейсмоакустические импульсы в диапазоне частот от 0,5 до 12 кГц. Полученные в результате мониторинга данные являются основой для дальнейшего анализа, интерпретации, оценки и прогноза состояния массива горных пород [1, 32, 66]. До недавнего времени на этом разрабатываемом удароопасном месторождении отсутствовала методика комплексной оценки степени удароопасности. Для прогноза удароопасности использовались отдельные прогностические признаки.

Для контроля удароопасности в сложных горнотехнических и геологических условиях на глубоких горизонтах рудника «Николаевский» в 2010 г. была апробирована и успешно внедрена ACKГД «Prognoz-ADS». Автоматизированная система имеет ряд преимуществ по отношению к существующим аналогам (ISS, GITS), в том числе — управление оператором с поверхности программным комплексом «GeoAcoustics-ADS», что позволяет проводить мониторинг в непрерывном круглосуточном режиме. На сегодняшний момент на месторождении проводится накопление представительной базы данных для создания методики комплексной оценки степени удароопасности, а для прогноза удароопасности используются отдельные прогностические признаки.

Такие дальневосточные месторождения как Восток-2, Перевальное, Солнечное, Дарасунское, Ирокиндинское и Забытое, где проводятся и планируются горные работы, являются склонными к проявлениям горных ударов, и пока на них фронты горных работ не достигли удароопасных горизонтов, таблица 1.4.1.

На наиболее удароопасных шахтах и рудниках Кольского полуострова, Уральского и Сибирских Федеральных округов в большей мере развиваются сейсмические станции (сейсмические методы), а методика прогноза динамических проявлений базируется на специфике сейсмического режима. В тоже время на территории Дальнего Востока России применяется сейсмоакустический метод, базирующийся на специфике регистрации геоакустической и сейсмоакустической эмиссии, являющейся предвестниками более крупных горно-динамических проявлений.

Рассмотрим подробнее существующие методики прогноза удароопасности по данным мониторинга. Известно, что эффективность геоконтроля во многом зависит от объективности интерпретации результатов измерений и надежности применяемых критериев состояния массива горных пород [114]. Сложившиеся в настоящее время представления о массиве горных пород, как о литологически и структурно

неоднородной среде, требуют более совершенного инструмента обработки результатов измерения и анализа не только основных параметров регистрируемого сигнала АЭ, но и ряда их вариационных показателей (в частности пространственных, временных, их производных и градиентов, вариаций фазово-частотных спектров, параметров затухания и поглощения сигнала и т.п.) [33, 122, 91].

Особый вклад в развитие методики прогноза динамических явлений внесли И.М. Петухов, Г.А. Соболев, А.А. Козырев, А.В. Ловчиков, А.А. Еременко, В.С. Куксенко, В.Н.Опарин, И.Ю. Рассказов, А.А. Маловичко, Шкуратник, А.А. Филинков, И.А. Турчанинов, А. Мендецки, А.В. Викулин, С.Д. Виноградов, А.В. Пономорев, В.И. Панин и другие.

Действующие системы контроля горного давления в значительной мере помогают в решении вопросов, связанных с техногенной сейсмичностью. Полученные на перечисленном ряде рудников объемы данных мониторинга позволили уже решить ряд вопросов, направленных на прогнозирование сейсмичности. Как правило, для контроля удароопасности в шахтах и рудниках используют регламентированные методики, но для повышения эффективности контроля и надежности прогноза нередко используют дополнительные методы, разработанные специалистами из области сейсмологии.

Одним из наиболее исследованных в отношении удароопасности объектом является Кизеловский угольный бассейн. Здесь были получены наиболее представительные данные по техногенной сейсмичности и выполнены первые исследования по сейсмологическому прогнозу, которые заключаются в следующем. Для всего бассейна установлено существование единого энергетического баланса динамических проявлений горного давления, заключающегося во взаимосвязи количества проявлений в глубине массива и количества горных ударов в динамической форме. Для более сильных проявлений Кизеловского бассейна выявлена ИХ приуроченность к отдельным участкам, либо к контактам блоков осадочного чехла, либо они связаны с деформационными процессами под влиянием горных работ, либо с сочетанием факторов [114]. Отдельно для шахты «Северная» использовали карты событий, пространственного распределения эпицентров которые строились С периодичностью один квартал.

Подобный подход работы с картами использовали на рудниках СУБР, где были начаты детальные исследования удароопасности [33], в результате которых выявлены

«эффект пространственной сепарации» сейсмичности, явление динамического взаимодействия и другие особенности, но, несмотря на это, оценка удароопасности массива горных пород на рудниках СУБРа осуществляется на основе анализа карт активности за трехмесячный период [72, 109].

В работе Томилина Н.Г. представлены результаты прогноза горных ударов на шахтах СУБР. Прогноз проводился с помощью критерия вариации временных интервалов. Прогнозируемое время ожидания сейсмического события составляет от 12 до 26 суток. Фактическая длительность опасности от 1 до 85 суток с вероятностью от 0,42 до 1,0. Эффективность прогноза при минимальной вероятности составляет 1,2, а при максимальной - 3,6 [122].

Первые попытки прийти к прогнозу горных ударов через другие показатели мониторинга выполнены в конце 80-х годов. Используя каталог сейсмических событий, зарегистрированных на руднике, выявлена возможность прогноза горных ударов на основе концентрационного критерия разрушения. Впоследствии была разработана методика прогноза, базирующаяся на использовании комплекса из двух параметров. По параметру концентрации дефектов выделяли область очага готовящегося опасного проявления, после чего по временным вариациям среднего временного интервала и его коэффициента вариации определяли период тревоги. В результате реализованного подхода ретроспективно удалось достигнуть эффективности прогноза 2,6 при вероятности прогноза 72% и доле ложных тревог 28% [43].

Регулярные наблюдения за горными ударами на Хибинских апатитовых рудниках закономерности формирования удароопасности. позволили выявить Так. было установлено, что основным фактором удароопасности является формируемое естественными разломами блочное строение массива, наличие больших объемов выработанных пространств и влияние взрывных работ. Установлены связи между зонами повышенных статических напряжений и параметрами мониторинга. После массовых взрывов в период перераспределения напряжений измеряют коэффициент временных интервалов между последовательными событиями и отношением величины выделенной энергии к фоновым значениям. При фоновом режиме измерения прогностическими признаками являются: плотность пространственного распределения выделяемой сейсмической энергии, максимально ожидаемая энергия события и коэффициент вариации распределения сейсмических событий по энергии [72, 129].

На рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» методика прогноза удароопасности включает в себя обработку данных сейсмостанции «Норильск» о толчках определенной энергии, выделение зон повышенной удароопасности и поведение этих зон во времени [55]. Исходными данными для оценки геомеханического состояния массива горных пород являются карты ежемесячной сейсмической активности по плотности событий и их энергии. В работах С.Н. Мулева описаны результаты исследований по поиску прогностических критериев подготовки сильных динамических явлений на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский». Ими были выявлены качественные и количественные оценки критериев удароопасности по данным среднемесячной активности, наклону графика повторяемости и концентрационному критерию разрушения [56, 62, 4].

За все время контроля удароопасности на Таштагольском железорудном месторождении Горной Шории были опробованы многочисленные методики прогноза удароопасности по данным мониторинга сильных динамических проявлений горного давления, в том числе тесная связь геомеханического состояния массива горных пород рудника с взрывными работами. Так, приведенная энергия взрыва в условиях Таштагольского рудника существенно зависит от геодинамического состояния горного массива. В результате анализа периодов динамического затишья и активизации проявлений в горном массиве было выявлено, что рост приведенной энергии взрыва соответствует высокой напряженности массива и соответствует повышенной вероятности опасного проявления горного давления [23, 49, 113, 132].

Зарубежными учеными в решении проблемы прогноза мощных динамических проявлений также достигнуты определенные успехи, но проблему нельзя считать решенной для многочисленных удароопасных рудников. В целях анализа опыта российских и зарубежных ученых нами проведен обзор мировой литературы, который показал, что в настоящее время на западных и европейских удароопасных месторождениях используют геофизические методы и методики, основанные на сейсмическом или сейсмологическом методах. В решении проблемы за рубежом так же не создано единой и универсальной методики прогноза опасных динамических проявлений горного давления. Больше всего встретилось публикаций Mendecki A. J., Gibson и Lotter по старейшим и глубоким золоторудным месторождениям.

Большинство имеющейся в общем доступе зарубежной литературы [152, 156, 157, 159, 163, 166, 169] с описанием методики прогноза динамических проявлений на

горнодобывающих предприятиях посвящено рудникам ЮАР и Австралии, где в условиях естественной сейсмичности сосредоточено большинство удароопасных и не редко самых глубоких рудников в мире. А. J. Mendecki в своих работах приводит данные, полученные по результатам сейсмического и сейсмологического мониторингов, на основе которых базируются его методики прогноза опасных проявлений в шахтах и рудниках [163; 164, 165].

Таким образом, в итоге анализа современного состояния прогноза удароопасности и использующихся для этого методик стоит отметить широкое применение автоматизированных систем и методов сейсмического мониторинга. Все существующие системы контроля горного давления и сейсмического режима на действующих рудниках России выпускались единичными экземплярами с учетом конкретных горнотехнических и горно-геологических условий месторождений. Так, например, распространенные системы сейсмического мониторинга на Северо-Уральских рудниках или рудниках Горной Шории не найдут применение на некоторых удароопасных месторождениях Дальнего Востока, где не регистрируются или случаются, но достаточно редко, импульсы в диапазоне частот ниже 500 Гц.

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, в отличие от сейсмического, 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.

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.

1.5 Цель и задачи исследования

Анализ российской и мировой литературы показал, что вопросы, касающиеся оценки геомеханического состояния и прогноза удароопасности, остаются актуальными для многих горнодобывающих предприятий мира, где ведутся и планируются горные работы. В зависимости от применяемых методов существует широкий выбор методик оценки геомеханического состояния массива горных пород и прогноза удароопасности, но каждое месторождение полезного ископаемого является уникальной природнотехногенной системой, что предусматривает индивидуальный подход для оценки степени удароопасности.

На руднике «ПУР-1» уранового месторождения Антей ведутся и планируются горные работы в удароопасных условиях и на больших глубинах, где зарегистрирован весь перечень проявлений горного давления, но, 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 разработка и совершенствование методики оценки геомеханического состояния геосреды, основанной на комплексном учете ряда признаков удароопасности, 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.

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 натурных 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.

2. АНАЛИЗ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АНТЕЙ

2.1 Анализ горно-геологических особенностей месторождения

Месторождение урановых руд Антей расположено в юго-восточной части Забайкальского края в 12 км от г. Краснокаменска и входит в состав Стрельцовского рудного поля (СРП), которое находится в пределах Евроазиатской литосферной плиты в центральной части Амурского геоблока и насчитывает 19 уникальных урановых месторождений, 16 из которых признаны промышленными. СРП является тектоническим элементом Центрально-Азиатского орогенного пояса (рисунок 2.1.1), который сформировался в палеозойско-кайнозойское время в пограничной зоне, разделяющей Северо-Азиатский и Сино-Корейский кратоны.

Все крупнейшие месторождения стрельцовской группы сосредоточены в одноименной вулканотектонической кальдере (СВТК) и совмещены в пространстве с Тулукуевской вулканно-тектонической структурой (ТВТС), называемой также Стрельцовской кальдерой, которая сформировалась в процессе позднемезозойской тектономагматической активизации геологических структур региона, рисунок 2.1.2 [14, 36].



 кратоны и их фрагменты;
орогенные пояса различного возраста; 3 – российская часть
Дальнего Востока; 4 – надвиги; 5 – сдвиги; 6 – прочие разломы; 7 – контур Амурского геоблока; 8 – Стрельцовское рудное поле, месторождение Антей.

Рисунок 2.1.1 – Положение Амурского геоблока в структурах Северо-Востока Азии



1 – кутинская свита; 2 – тургинская свита (верхняя толща); 3 – породы субвулканической фации; 4 – тургинская свита (нижняя толща); 5 – приаргунская свита; 6 – граниты варийского интрузивного цикла; 7 – граниты каледонского интрузивного цикла; 8 – мрамор и кристаллические сланцы; 9 – контур Стрельцовской кальдеры; 10 – месторождения (по номерам в кружках): 1 – Широндукуйское; 2 – Стрельцовское; 3 – Антей; 4 – Октябрьское; 5 – Лучистое; 6 – Мартовское; 7 – Мало_Тулукуевское; 8 – Тулукуевское; 9 – Юбилейное; 10 – Весеннее; 11 – Новогоднее; 12 – Пятилетнее; 13 – Красный Камень; 14 – Юго_Западное; 15–Дальнее; 16 – Полевое; 17 – Безречное; 18 – Аргунское; 19 – Жерловое.

Рисунок 2.1.2 – Геологическая карта вулкано-тектонической структуры Стрельцовского рудного поля.

Фундамент и борта кальдеры сложены протерозойскими и палеозойскими метасоматическими и менее палингенно-аналитическими гранитоидами, содержащими ксенолиты раннепротерозойских метаморфических пород, представленных доломитизированными известняками, кристаллическими сланцами, амфиболитами,
кварцитами, высокоглиноземистыми филлитовидными сланцами, метаэффузивами и метагабброидами.

Месторождение Антей приурочено к узлу пересечения «Аргунской» с «Центральной» зоной разломов и разломами широтного простирания, которые контролируют положение «Стрельцовского» месторождения, расположенного над структурой Антей. Стрельцовское месторождение расположено в верхней осадочновулканогенной толще пород и крайне отличается по структурным, морфологическим и литологическим особенностям строения месторождения Антей, рисунок 2.1.3.



1 – вулканогенно-осадочные образо-вания верхней юры; 2 – крупно-зернистые порфировидные биотито-вые граниты; 3 – лейкократовые и аплитовидные граниты; 4 – общий контур интрузивного тела позднепалеозойских гранитоидов; 5 – раннепалеозойские среднезернистые биотитовые граниты; 6 – направление регионального сжатия до начала масштабного освоения месторожде-ния; 7*a* – нарушения с пологими срывами; 7*б* – крутопадающие тектонические нарушения; 8 – номера главных рудоконтролирую-щих разломов месторождения Антей; 9 – подземные горные выработки (римские цифры – номера горизонтов); 10 – рудные тела, заключенные в рудоконтролирующих разломах.

Рисунок 2.1.3 – Неоднородности строения геологической среды в районе месторождения Антей

Жильно-штокверковое месторождение Антей локализовано породах В кристаллического основания кальдеры, представленных гранитоидами варисского Ундинского комплекса, который обнажен на уровне современного эрозионного среза. Район месторождения приурочен к долгоживущему тектоническому узлу, образованному крупными разломными системами северо-восточного, северозападного, субширотного и субмеридионального направлений.

В публикациях геологоразведочной партии "Сосновская экспедиция" под руководством Ищуковой Л.П. приводятся данные разведки в период 1975–1980 гг. месторождения Антей, когда была пройдена сеть разведочных подземных горных выработок на горизонте 114 м [14]. В геологическом строении месторождения Антей принимают участие позднепалеозойские граниты и залегающий на них горизонт базальных конгломератов, которым начинается разрез вышележащих позднемезозойских осадочно-вулканогенных пород, вмещающих расположенное выше Стрельцовское месторождение. Среди гранитоидов выделяются две фациальные разновидности: крупнозернистые порфировидные и равномернозернистые, среднезернистые <u>биотитовые и лейкократовые</u> граниты. Последним разновидностям ниже будет отведено отдельное внимание.

В центральной и восточной частях месторождения развиты, главным образом, равномернозернистые граниты лейкократового облика, реже – крупнозернистые порфиробластовые граниты. В виде полос. контролирующихся крупными тектоническими зонами, проявились равномернозернистые интенсивно микроклинизированные граниты, слагающие удлиненные тела неправильной формы. На юго-западном фланге месторождения широкое распространение получили крупнозернистые порфировидные граниты, а в северо-западной его части среди однородного поля крупнозернистых биотитовых гранитов в поперечнике размером 150х200м. Контакты между указанными разностями гранитов постепенные, диффузионно-метасоматические, иногда резкие. Они пересекают дайкообразные аплитовидные граниты с четкими границами, редко отмечаются дайки диабазов и базальтов. Размеры даек по простиранию не превышают первых десятков метров, а по мощности достигают первых метров.

Геолого-структурные особенности месторождения Антей определяются наличием на его площади сложной системы крутопадающих разрывов различной ориентировки в

сочетании с многочисленными пологими срывами. Основную роль в локализации уранового оруденения играют тектонические нарушения северо-восточного (30°) простирания, наиболее развитые в восточной части месторождения и представленные крупными разрывами 13, 160 и 190. Их совокупность наряду с серией более мелких швов и трещин образует рудоносную трещинную зону ба, рисунок 2.1.4.



Рисунок 2.1.4 – Геологический план рудопроявления и разведочных выработок Х горизонта (*a*), геологический разрез (б) по линии 633+50 месторождения Антей

Основным рудоконтролирующим структурным элементом этой зоны является тектонический шов 13 северо-восточного (25-30°) простирания, имеющий протяженность 2,5 км и прослеживаемый на глубину более 1800 м от дневной поверхности. Разлом является сквозным и в процессе рудообразования служил дренирующим каналом. На поверхности он выражен мощной зоной брекчированных

фельзитов, интенсивно аргилизированных и окварцованных, и вмещает жилу (мощностью до 5 м) серого микрозернистого кварца [36].

Со стороны висячего бока разлома 13 развита серия субпараллельных ему разрывных нарушений 160, 161, 173, 174 и 190, проявленных в гранитах фундамента и являющихся основными рудовмещающими элементами. Брекчии с кварцевым цементом чаще приурочены к участкам изменения направления шва, где обычно увеличивается количество непротяженных оперяющих трещин. С глубиной (ниже отметки 100 м) шов 13 сближается до первых десятков метров с рудосодержащей серией разломов 160 и меняет падение на северо-запад с 70-80° на близвертикальное, образуя клин.

В вышележащей осадочно-вулканогенной толще на продолжении приведенных швов развивается зона сближенных трещин, которые не содержат рудной минерализации. Крутопадающие разрывы, оперяющие шов 13, образуют единую ослабленную зону мощностью 20-60 м. Несмотря на серию оперяющих швов, основным рудовмещающим элементом в этой зоне является шов 160. В базальных конгломератах шов 160 выражен системой затухающих по восстанию трещин, падающих на северозапад под углом 60-70°, и изучен на протяжении 1500 м по простиранию и на 1000-1200 м по падению от кровли фундамента. В верхней части месторождения шов 160 состоит из 3 оперяющих проявлений 160а, 1606, 160в, их высота и протяженность не превышают 150-200 м.

В центральной части месторождения на уровне высотных отметок 120...130 м при сближении шва 13 и серии нарушений 160 сформирована единая зона нарушенных пород. При проходке геологоразведочных выработок на Х горизонте (отм.+120 м) были отмечены проявления горного давления в виде интенсивного заколообразования в местах контактов неравномернозернистых гранитов и гранитов лейкократового облика, рисунок 2.1.5. В центральной части месторождения Антей включения лейкократовых гранитов кристаллизованы крупными фракциями кварцита, по сравнению вмещающими гранитами они имеют больший запас прочности и способны к хрупкому динамическому разрушению, особенно образования между рудосодержащим разломом 160 и активным тектоническим нарушением 13.

При геологическом документировании все разновидности пород выделялись и разделялись на разрезах и погоризонтных планах. В графических документах лейкократовые граниты изображались в виде линзообразных тел, мощность которых

редко достигала 100-150 м, а протяженность 500 м. Затем, при построении объемной геологической модели месторождения Антей в 1979 г., для упрощения объемного восприятия рудных тел и рудоконтролирующих структур сотрудники отдела специальных исследований Заб. НИИ под руководством д.г.-м.н. Вишнякова В.Е. приняли решение не проводить разделение гранитоидов. Последующие исследователи пользовались уже этой схематизированной моделью.



1 – позднепалеозойские граниты и гранитоиды; 2 – раннепалеозойские граниты; 3 – лейкократовые и аплитовидные граниты; 4 – подземные горные выработки X гор.; 5 – рудоконтролирующие разломы 160 и 13

Рисунок 2.1.5 – Особенности строения горных пород месторождения Антей

Более позднее специальное изучение неоднородностей геологической среды шахтного поля месторождения Антей привело сотрудников ИГЕМ РАН к выводу о том, что лейкократовый облик биотитовые граниты приобретают в результате наложения процессов микроклинизации и альбитизации, а также других низкотемпературных преобразований гранитоидов [65].

Информация о лейкократовых гранитах была вовсе исключена авторами особая публикации И подчеркнута роль крутопадающих жилообразных тел калишпатитов мощностью 10-20 м, которые не документировались в процессе разведки месторождения. Сотрудники ИГЕМ приводят, что в пределах контролируемого блока анизотропию упругих свойств в гранитоидах создают два подобных тела, имеющих субширотное простирание и характеризующихся высокими упруго-прочностными свойствами, рисунок 2.1.6. Связанные с элементами прототектоники жилообразные тела палеозойских калишпатитов и альбититов секутся мезозойскими гидрослюдизитами, которые контролируются разломами 13 и 160. Восточнее разлома 13 выявляется дополнительная апофиза гидрослюдизитов.



Рисунок 2.1.6 – Объемная модель массива горных пород месторождения Антей (жилообразные тела палеозойских калишпатитов и альбититов)

В результате, в исследованиях предшественников был утрачен важный факт о проявлениях горного давления на контакте с лейкократовыми гранитами при проходке геологоразведочных выработок на горизонте +114 м. Так же не учтен вывод группы геологов партии №324, полученный на ранних стадиях изучения месторождения, о существенной роли тех мест в массиве горных пород, где были выявлены «жесткие мосты», представленные линзами лейкократовых гранитов, между бортами нарушений 160 и 13, рисунок 2.1.5.

Как видно из рисунка 2.1.5, представленного в отчете геологов ГРП №324, и разреза (рис. 2.1.6), ориентированного вкрест простирания рудовмещающих разломов, все ими перечисленные разности пород в фундаменте прослеживаются, в том числе и в

горных выработках. В районе шахтного поля среди гранитоидов можно обоснованно выделить крутопадающее тело гранитоидов позднего палеозоя, которое имеет древообразную форму. В пределах этого тела локализован основной объем лейкократовых гранитов, а участки, сложенные этими породами, группируются преимущественно в ветвящейся верхней его части, тяготея к эндоконтактовым зонам. Такая позиция не противоречит версии представления работников ИГЕМ РАН о генетической стороне их формирования. В геомеханическом отношении наиболее важным обстоятельством является структура, сформированная композицией тел лейкократовых гранитов, как представляющая угрозу безопасности горных работ.

Как видно на рисунке эта композиция создает сводовую структуру, в наиболее напряженной, шарнирной (замковой) части, в которой заложился рудовмещающий тектонический клин. Вершина замковой зоны располагается между горизонтами 9 – 12, т.е. именно в том интервале, где современные деформационные процессы приводят к сближению бортов рудовмещающих разломов 13 и 160. Связано это с тем, что лейкократовые граниты отличаются от остальных горных пород повышенным содержанием кварца. Поэтому среди других гранитоидов они характеризуются максимальными значениями упруго-прочностных параметров [15, 90].

Анализ геологической структуры месторождения Антей показал, что самым сложным является участок массива горных пород, приуроченный к зоне, где сливаются оперения 160*a*, 160*b*, 160*b* и 160*c* в один рудосодержащий разлом 160, с которым также сближается активное тектоническое нарушение 13. Участок сближения приурочен к массиву горных пород в этаже 0...180 м., и начинает проявлять свое влияние с отметки 300 м на уровне VII горизонта на границе месторождений Стрельцовское и Антей.

Из изложенного выше следует, что горно-геологические условия разработки месторождения Антей имеют ряд особенностей, обусловленных сложным геологоструктурным строением массива горных пород. Большинство разновидностей пород месторождения, а особенно <u>биотитовые и лейкократовые</u> граниты, проявляют склонность к упругому деформированию и хрупкому разрушению в динамической форме, особенно в местах пересечения контактов этих пород горными выработками.

Сближенные в пространстве и сложноструктурированные зоны разломов 160 и 13 имеют встречные падения и на глубине 750 м от поверхности (отм. -120...-60 м) сближаются до первых десятков метров, образуя открытый вверх тектонический клин с

включениями разных по свойствам горных пород. Зона сближения двух разломов в гранитах фундамента в сочетании с наличием между ними включений лейкократовых гранитов является потенциально опасным участком по динамическим проявлениям горного давления. Выявленные геолого-структурные особенности месторождения являются важными факторами, которые необходимо учитывать при планировании, ведении горных работ и оценке геомеханической ситуации на глубоких горизонтах.

2.2 Горнотехнические условия разработки месторождения

При оценке геомеханической ситуации на месторождении Антей также необходимо учитывать влияние техногенного фактора на горно-геологическую систему. В зоне действия горного предприятия формируется локальное техногенное поле напряжений, которое взаимодействует с первоначальным природным полем, и в результате такого влияния формируется новая природно-горнотехническая система. Подобно, как и в природно-техногенной системе, в результате могут формироваться области перераспределения напряжений, при которых повышается риск динамических проявлений горного давления.

Эксплуатацию месторождения Антей осуществляет ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО»). Месторождение вскрыто на всю глубину вертикальными шахтными стволами 5В и 12В. Для улучшения вентиляции подземных горных выработок в дополнение к капитальным и разведочным стволам на Стрельцовском рудном поле было пройдено еще 10 вентиляционных шахт. Капитальные шахтные стволы имеют круглые сечения диаметром 5-8 м и закреплены бетоном. Глубина стволов зависит от условий размещения рудных залежей. Наиболее глубокий ствол — 12В — пройден на месторождении Антей на глубину 974 м от поверхности. Вентиляционные шурфы также имеют круглые сечения диаметром 4 м и закреплены бетоном. При проходке стволов высота этажа была принята равной 60 метрам [102].

Рудные залежи вскрываются квершлагами и полевыми штреками. Из полевых штреков проходят орты, непосредственно вскрывающие оруденение. Как правило, орты проходят по разведочным линиям с расстояниями по горизонтали равными 50-100 метров. Из ортов проходят вертикальные ходовые восстающие и рудоспуски для выдачи руды из слоевых ортов эксплуатационных блоков. Проходка выработок производится

буровзрывным способом, но при проходке вертикальных выработок рудоспусков и восстающих широко применяется буровой способ с использованием станка 2КВ. Количество вертикальных выработок должно обеспечить раздельный выпуск из блока руды и породы, вентиляцию очистного пространства, передвижение людей и подачу материалов.

Сечения основных откаточных выработок следующие: квершлаги — 9,5-11,2 м², штреки — 8,6-10,5 м², орты — 8,6-9 м², восстающие по проходке буровзрывным способом — 9,2 м², рудоспуски — 5-5,5 м². При проходке восстающих и рудоспусков буровым способом установкой 2КВ поперечное сечение этих выработок составляет 1,8-2,5 м.

Для проведения добычных работ рудные залежи разделяют на эксплуатационные блоки. Размеры эксплуатационных блоков по простиранию, в зависимости от размеров рудных залежей, принимаются равными 50-250 м. На месторождении применяется достаточно редкая в горной практике система разработки горизонтальными слоями с твердеющей закладкой — это комплекс подготовительных, нарезных, очистных и закладочных работ, обеспечивающий выемку рудного массива нисходящими слоями под искусственной кровлей, созданной заполнением вышерасположенного слоя твердеющим закладочным материалом. Этой системой разработки добыто более 80% всего объема руды на Стрельцовском рудном поле [11, 112].

Очистные работы включают: мелкошпуровую отбойку рудного массива горизонтальными или слабонаклонными очистными заходками, доставку отбитой рудной массы в рудоспуски, проветривание рабочих мест, крепление очистного пространства, выпуск и погрузку горной массы из рудоспусков, подготовку очистного пространства к закладке и заполнение выработанного пространства твердеющим или сыпучим закладочным материалом.

Суть системы разработки заключается в следующем. Определяют границы блока, и при его размерах по простиранию 50-100 м в середине блока из ортов проходят рудоспуски, вентиляционные и ходовые восстающие, восстающие для подачи материалов. В случае если блок имеет размеры 150-250 м, такие выработки проходятся по двум-трем линиям для того, чтобы длина откатки руды и породы в блоке не превышала 50 м — расстояние наиболее эффективного применения самоходной

погрузочно-доставочной техники. Блок условно делится на 17 слоев высотой 3,5 м, рисунок 2.2.1.

На первом слое из 20 проходится рудоспуск и разрезной орт, соединяющий пройденные рудоспуски и восстающие. Затем из разрезного орта начинается отработка рудных тел. Проходка ортов и отработка рудных тел производится буровзрывным способом с погрузкой и доставкой руды и породы к рудоспускам и породоспускам самоходной погрузочно-доставочной техникой. Отработка рудных тел производится заходками по простиранию до границы блока. Ширина заходок принимается равной 3,5-5 метрам. В случае, если рудное тело имеет мощность более 3,5-5 м, оно отрабатывается двумя-тремя параллельными выработками. После отработки заходка отделяется от остальных выработок перемычкой и заполняется твердеющей закладкой.

Твердеющая закладка приготавливается из песчано-гравийной массы, золы-уноса ТЭЦ, цемента и воды. Твердеющая смесь приготавливается на закладочном комплексе и по трубам подаётся с поверхности в рабочие блоки. Механические свойства закладки соответствуют ТУ, при котором коэффициент прочности на сжатие по М.М. Протодьяконову составляет 9 МПа [77, 136].

Система разработки горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства нашла широкое применение на рудниках «ППГХО». Потери руды и металла при применении этой системы в связи отсутствием оставляемых целиков составляют 3 %. Несмотря на сложность и относительно высокое разубоживание, система разработки горизонтальными слоями в нисходящем порядке с закладкой выработанного пространства в горно-геологических условиях месторождения Антей является экономически наиболее эффективной [102]. Первые признаки удароопасности на месторождении Антей были отмечены на стадии строительства при проходке стволов и разведочно-подготовительных выработок на VII горизонте при пересечении контактов трахидацитов, лейкократовых и среднезернистых гранитов [41, 66, 76, 88]. Так, в 1976-77 гг. динамические заколообразование и стреляние гранитов неоднократно отмечались при проходке ствола 12В, начиная с глубины 570 м, а также при проведении разведочных выработок на X горизонте на глубине 640 м. По мере углубления ствола частота и интенсивность этих явлений закономерно увеличивались.



Рисунок 2.2.1 – Система подготовки блока транспортным уклоном с послойной отработкой разведочных выработок на X горизонте (на глубине 640 м от поверхности)

В 1981 году динамические проявления горного давления в форме стреляний и интенсивного заколообразования пород стали происходить при ведении горноподготовительных и очистных работ на уровне VII горизонта, расположенного на глубине 410 м от дневной поверхности (блоки 6а-712, 6а-714). Для снижения риска проявлений горного давления применялось отстаивание забоя 1-2 смены после взрывных работ, после чего устанавливали арочную крепь в местах контактов гранитов.

В 1988 году с началом отработки блоков ба-810, 812, 814 интенсивность динамических проявлений выросла в 5 раз, и все они были зарегистрированы в местах пересечения лейкократовых гранитов. Всего было за период отработки зафиксировано 983 случая динамических проявлений на месторождении Антей.

Анализ базы данных динамических проявлений горного давления, зарегистрированных на месторождении Антей начиная с 1979 года показал, что до 2000 года все динамические проявления в виде интенсивного заколообразования кровли, стреляния из груди забоя, шелушения бортов и кровли выработки происходили исключительно в местах контактов разных по свойствам горных пород, таких как лейкократовые и средне- мелкозернистые граниты.

В период 1998-99 гг. в систему разработки месторождения были внесены изменения, касающиеся порядка отработки рабочих блоков в этаже ниже 240 м. Так, сначала экспериментально в блоках ба-912, ба-906, а позже в рабочем порядке во всех последующих блоках, применили систему с разделением блока на две части, рисунок 2.2.2. Суть нововведения заключается в следующем: массив блока делится на два полублока, отрабатываемых одновременно по простиранию рудного тела.

Уменьшающийся в процессе добычных работ рудный массив, являющийся временным целиком, разгружают путем камуфлетного взрывания скважиных зарядов, размещаемых в вертикально пробуренных нисходящих скважинах диаметром 105 мм через 2,5 м (сквозных и скважинах не на всю высоту целика). С одной стороны такой подход позволил повысить производительность добычи руды за счет ускорения в 2 раза подготовительные работ, с другой стороны появилась еще одна причина проявлений горного давления, высокая концентрация напряжений в формирующихся межполублочных целиках, находящихся в области влияния тектонических нарушений 13 и 160.



Рисунок 2.2.2 – Система подготовки блока транспортным уклоном с разделением на два подэтажа (полублока).

С переходом горных работ на более глубокие горизонты, а так же началом применения технологии с разделением рабочих блоков на полублоки в 2000 г. начал происходить стремительный рост числа и интенсивности динамических проявлений горного давления в виде интенсивных заколообразований, стреляний, толчков и горных ударов в массиве горных пород месторождения Антей, рисунок 2.2.3. Если с 1985 года число проявлений не изменялось и составляло до 8 в год, то после 2000 года их количество резко возросло и в 2007 году достигло значений 125, а в 2015 более 200.



Рисунок 2.2.3 – Изменение числа динамических проявлений горного давления на месторождении Антей при его отработке.

Одно из первых наиболее мощных динамических проявлений, которое было классифицировано как горнотектонический удар, было зарегистрировано 14.05.2005 г. Удар, произошедший в межполублочном целике блока 6А-1114 на уровне 13 слоя, сопровождался резким звуком, образованием воздушной волны, сейсмическим эффектом (сопоставимым со взрывом 10 тонн ВВ), ощущавшимся в здании поверхностного комплекса рудника. В результате горного удара были разрушены борта и кровля уклона с 4 на 5 слой, сопряжения и искусственная кровля заходок 4 и 11 слоев, борта рудоспуска 6А-1114/1, разрушено крепление выработок, рисунок 2.2.4, 2.2.5.



a)

б)



Рисунок 2.2.4 – Последствия горного удара 14.05.2005 г. на месторождении Антей: *а* – обрушение кровли съезда; *б* – обрушение искусственной кровли слоевого орта.

Всего было разрушено более 160 п.м. выработок, объем выброшенной породы по контакту с лейкократовыми гранитами превысил 50 м³, объем разрушенной искусственной кровли составил около 200 м³. По орту 6А-1014 в районе пересечения с тектоническим швом 160 произошло поднятие (до 15 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.



Рисунок 2.2.5 – Места разрушений горных выработок при горном ударе 14.05.2005 г. на месторождении Антей: а – на плане 5 слоя; б – на плане 11 слоя; в – в проекции на вертикальную плоскость блока 6а-1114

Причиной мощного динамического проявления горного давления, с высокой степенью вероятности, являлось превышение концентраций сжимающих напряжений в образовавшемся целике верхней части блока 6А-1114, обусловленном его подработкой и влиянием тектонических нарушений 160 и 13. Кроме того, по бортам ортов в местах их пересечения отмечены смещения в горизонтальном и вертикальном направлениях.

В недоработанных целиках блоков 6а-1006, 6а-1110 и 6а-1102 (рисунок 2.2.6) в период с 2005 по 2013 гг. было зафиксировано более 670 динамических проявлений горного давления, в том числе 23 мощных проявления в виде горных ударов, толчков и техногенной сейсмичности в виде сотрясений массива. Во всех представленных случаях при описании мест проявлений присутствует характеристика горных пород в виде лейкократовых гранитов в разных сочетаниях с гранитоидами вмещающих пород.

По результатам проведенных в 2005-2008 гг. геомеханических исследований был разработан комплекс мер по предотвращению горных ударов [127], применение которых позволило значительно уменьшить число динамических проявлений горного давления на месторождении Антей, рисунок 2.2.3. В этот же период закончилась отработка блока ба-1110, по итогам которой был недоработан рудный целик с 12 по 17 слой (нижний полублок). Однако, начиная с 2010 г. количество динамических явлений в блоке ба-1110 стало интенсивно увеличиваться, при этом значительно (более чем в 3-4 раза) выросла их энергетика.

Результатом этого явились разрушительные последствия горного удара, сопровождавшиеся мощным сейсмическим эффектом, произошедшим 29 января 2011 г. в целике 12 заходки 11 слоя блока ба-1110. В результате этого события из правого борта и почвы разгрузочного штрека № 1 было выброшено более 15 м³ породы, на протяжении 80 м разрушена крепь с поднятием почвы выработки на 5-15 см. По результатам расследования аварии установлено, что под- и надработка целика блока ба-1110 привели к срыву по контакту с разломами и перемещению в вертикальном направлении руднопородного блока клиновидной формы, ограниченного с двух сторон тектоническими нарушениями 13 и 160, с выделением энергии, выбросом породы и разрушением крепления разгрузочного штрека, рисунок 2.2.6. Триггерным фактором явились взрывные работы в районе блока ба-1110.

После проведения профилактических работ в блоке 6а-1110 активизировались геомеханические процессы в целике верхнего полублока 6а-1102. В период 2010-11 гг. и первом полугодии 2012 года в блоке регистрировали проявления горного давления в форме микроудара, толчков и сотрясений массива. Один из них был зафиксирован 18 июля 2012 г. в виде микроудара, последствия которого ощущались в поверхностном комплексе рудника и в здании управления. Так, из борта разгрузочного штрека №1 на уровне X гор. блока 6а-1006 произошел выброс породы около 4 м³. В течение суток

после проявления фиксировали серию более 80 акустических эффектов, а также ряд мелких проявлений в виде щелчков и обрушений заколов в выработках.



1 – закладочный массив; 2 – рудный массив; 3 – вмещающие породы (граниты); 4 – разломы и их номера;

Рисунок 2.2.6 – Недоработанный целик блока 6а-1110 на месторождении Антей (справа разрез по линии 632+50)

Причиной микроудара явилась высокая концентрация напряжений в приконтурной зоне выработки, преимущественно в почве и борту, обусловленная влиянием тектонического нарушения 13 и включений лейкократовых гранитов в левом борту разгрузочного штрека №1, откуда был зафиксирован вывал горной массы. По результатам расследования было вынесено решение о разгрузке нижней части блока ба-1006 веером скважин.

В недоработанной части полублока 6а-1102 в этаже 90-117 м была зафиксирована большая часть из всех мощных динамических проявлений (15 из 23 событий) на месторождении. Одним из ярких примеров является случай 4.08.2012, когда была зарегистрирована серия из 4-х подряд мощных динамических проявлений в виде толчков в массиве, следовавших один за другим. Первые два из них произошли в 06:44 и 6:47 во время проведения взрывных работ, третий проявился в 7:27 сразу после взрывных работ. После чего в 9:57 было зафиксировано сотрясение массива на месторождении Антей, которое ощущалось в поверхностном комплексе рудника.

Таким образом, горнотехнические условия разработки месторождения Антей имеют ряд особенностей, обусловленных применяемой системой разработки, которая

предусматривает разделение рабочего блока на два полублока. При сближении фронта горных работ двух полублоков или отставании в одном из полублоков возникает уменьшающийся целик, который является концентратором напряжений и источником повышенной удароопасности. Выявленные горнотехнические особенности отработки месторождения являются одной из главных причин большинства зарегистрированных за последние 5 лет на глубоких горизонтах месторождения мощных геодинамических проявлений.

Анализ горно-геологических разработки И горнотехнических условий месторождения показал, что они являются основными причинами опасных геодинамических проявлений В формирующихся межполублочных целиках, содержащих локализации лейкократовых гранитов, находящихся в области влияния рудосодержащих и активных тектонических нарушений 160 и 13.

2.3 Напряженно-деформированное состояние и механические свойства массива горных пород месторождения

При ведении горных работ в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях неотъемлемой частью технологического процесса является оценка напряженного состояния участков массива, результаты которой являются основой в оценке удароопасности горных пород в окрестности отрабатываемых участков. Для оценки необходимо учитывать физико-механические свойства горных пород в местах концентрации напряжений.

Оценка напряженного состояния участков массива подразумевает определение напряжений, направление их действия и физико-механических свойств горных пород для определения пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение (σ_{cx} , σ_{p}).

Предел прочности пород на одноосное сжатие является одной из наиболее важных механических характеристик горных пород. Она была принята проф. М.М. Протодьяконовым в 1926 г. за основу разделения горных пород по крепости на классы от 1 до 20 ($\sigma_{cж}$ изменяется от 10 до 200 МПа). Этой классификацией и сейчас широко пользуются на практике для сравнительной оценки прочности (устойчивости) горных пород.

Обзор работ коллектива авторов из ИГД им. А.А. Скочинского показал, что крепкие кварциты, роговики, джеспилиты, крепкие базальты, диабазы обладают прочностью на одноосное сжатие до 400 ÷ 500 МПа, корундовые породы — до 800 МПа. Международное бюро по механике горных пород при германской академии наук в 1960 г. приняло классификационную шкалу прочности пород при одноосном сжатии в пределах от 3 до 300 МПа.

Пределы прочности пород на одноосное сжатие и растяжение (σ_{cx} , σ_p) являются основными компонентами, определяющими σ_1 – максимальное сжимающие напряжение (МПа), и определяется отношением разрушающего сжимающего (или растягивающего) усилия к площади приложения нагрузки:

$$\sigma_{csc} = P_{csc}/F; \qquad \sigma_p = P_p/F, \quad (M\Pi a)$$
[2.1]

где σ_{c*} и σ_p - соответственно пределы прочности на сжатие и растяжение; P_{c*} , P_p – соответственно сжимающее и растягивающее усилия; F – первоначальная площадь образца. В горных породах напряжения сжатия σ_{c*} преобладают над σ_p в 10 и более раз.

Значения σ_{c*} и σ_p зависят от свойств и строения пород (состава, структуры, трещиноватости, пористости, слоистости и др.), характера приложения усилий (одноосное, двухосное, трехосное направление сил), метода проведения испытаний, размеров и формы образцов. Поэтому для одних и тех же пород свойства могут изменяться в широких пределах [141].

В полевых условиях определить величину σ_{cm} можно прибором БУ-39 конструкции ВНИМИ [30]. Поскольку прибор БУ-39 устанавливает прочность только на растяжение, необходимы поправочные коэффициенты для пересчета к прочности на одноосное сжатие. Метод определения прочностных свойств прибором основан на измерении приложенного к образцу усилия через инденторы, под действием которых в образце (диске) возникают растягивающие напряжения. При испытаниях на прочность количество образцов должно быть не менее шести для образцов правильной формы и не менее десяти для образцов неправильной формы. Предел прочности породы на одноосное растяжение σ_p вычисляется по формуле:

$$\sigma_p = 0,75 \cdot P_p / S_p \cdot K_m \tag{2.2}$$

где S_p – фактическая площадь поверхности сплошного разрыва; P_p – максимальная разрушающая нагрузка; K_m – безразмерный масштабный коэффициент, принимаемый равным 1 при S_p = (15 ± 3) м²·10⁻⁴. Для других значений S_p коэффициент K_m устанавливается по таблице, 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Соотношение площади разрыва S_p и коэффициента K_m

Sp, м ² ·10 ⁻⁴	3	4	58	10	15	20	25	30	35	40	45	50	80	100
Km	0,72	0,76	0,85	0,90	1,00	1,08	1,14	1,19	1,24	1,28	1,32	1,35	1,52	1,60

Так, в полевых условиях на месторождении Антей было выполнено определение величин σ_{cm} прибором БУ-39. Всего было выбрано 8 пунктов для отбора проб на X горизонте в бортах орта ба-1006 на всем его протяжении, включая образцы породы из рудоконтролирующего шва 13, рисунок 2.3.1. Породы в пунктах отбора образцов в большинстве случаев представлены порфировидными гранитами светло-серого, желтоватого, розоватого цвета или зеленоватого оттенка, по структуре мелко и среднезернистыми. Пункты 2, 3 и 4 приурочены к зоне действия тектонического нарушения 13, где пункты 2 и 3 представлены образцами лейкократовых гранитов.

В каждом пункте, согласно методике опробования прибором БУ-39, было отобраны образцы горных пород в форме куба или параллелепипеда толщиной 2-2,5 см. В результате определения физико-механических свойств были выявлены нагрузка, при которой разрушается образец, пределы прочности на растяжение и сжатие, модуль упругости на сжатие (E_{cx}), таблица 2.3.2.

Значения предела прочности пород на одноосное сжатие σ_{cx} , установленные по результатам измерений прибором БУ-39, в среднем составляют 150,3 МПа, а модуль упругости 36,8 ГПа.

В тоже время, в работах Петрова В.А., Саксина Б.Г. и других авторов приводится предел прочности пород на одноосное сжатие (лейкократовых гранитов, гранитоидов), который в среднем изменяется от 121 до 239 МПа, а модуль Юнга – от 59,3 до 68,3 ГПа [15, 36, 89]. По результатам определения свойств пород, выбуриваемого керна скважин из выработок IX...XI гор., ими было установлено, что минимальные значения свойств гранитов характерны для центральных частей разломов, где проявлены интенсивные гидрослюдистые изменения пород, таблица 2.3.3.



Рисунок 2.3.1 – Пункты отбора образцов для определения физико-механических свойств пород месторождения Антей

Таблица 2.3.2 – Результаты определения	физико-механических	свойств	пород на
месторождении Антей			

Номер пункта отбора пробы	$P_{p}, H \cdot 10^{3}$	$\sigma_p, M\Pi a$	σ _{сж} , МПа
1	5,7	5,92	148,07
2	8,8	7,59	189,67
3	7,2	8,79	219,83
4	4,4	3,12	78,01
5	7,4	5,19	129,73
6	6,1	4,83	114,9
7	5,7	4,02	100,05
8	5,2	3,98	99,38
Средние значения	6,31	5,43	150,3

Таблица 2.3.3 – Значения физико-механических свойств горных пород (гранитоидов) на глубоких горизонтах месторождения Антей (по данным ИГЕМ)

Место отбора образцов	Плотность р, кг/м ³	Скорость продольн ых волн Vp, м/с	Скорость поперечн ых волн Vs, м/с	Модуль Юнга Е, ГПа	Объемный модуль сжатия К, ГПа	Модуль сдвига G, ГПа	Коэффи- циент Пуассона µ
IX горизонт	2548	5550	3195	65,2	44,0	26,09	0,25
В зоне разлома (IX горизонт)	2562	5526	3196	65,4	43,5	26,2	0,246
XI горизонт	2574	5502	3197	65,6	43,08	26,3	0,24
В зоне разлома (XI горизонт)	2542	5588	3274	67,26	43,08	27,2	0,238

Максимальны эти параметры у лейкократовых гранитов и окварцованных разностей гранитоидов. Значимые вариации прочностных и упругих параметров горных пород определялись их петрографическим составом, характером и интенсивностью гидротермально-метасоматической проработки твердой матрицы.

Распределение физико-механических свойств во вмещающем массиве горных пород является весьма сложным. Прочностные свойства гранитов на интервале 10 метров одной и той же выработки могут различаться в 2-3 раза [89, 41, 137]

В отчетах геологической партии №324 [35, 36] приводились данные результатов изучения физико-механических свойств вмещающих пород в Стрельцовском рудном поле. Ими были тщательно изучены удельный и объемный вес, полная и эффективная пористость, водопоглощение, прочность при сжатии и скалывании, упругие свойства (коэффициент Пуассона, модуль Юнга и модуль сдвига). Так, было установлено, что на отметке 114 м. Х горизонта месторождения Антей в среднем σ_{cxc} = 142МПа, а модуль Юнга Е = 64 ГПа. Скорость продольной волны в образцах гранитов месторождения Антей составляет 5110 м/с, а поперечной 3075 м/с [65, 102].

Результаты определения σ_p и σ_{cm} прибором БУ-39 подтверждаются результатами предшественников, в которых отмечалась высокая неоднородность σ_{cm} пород на протяжении выработки ба-1006. Месторождение Антей характеризуется исключительно высокой неоднородностью пространственного распределения физических свойств пород, что способствует возникновению отдельных очагов аномально высоких концентраций напряжений.

Для определения максимальных сжимающих напряжений и направления их действия по отношению к горным выработкам использовали метод дискования керна [29]. Метод дискования керна скважин основан на эффекте разделения керна на диски выпукло-вогнутой формы с выпуклостью в направлении массива, наблюдающемся при бурении скважин в высоконапряженных массивах горных пород.

Дискообразование происходит с наибольшей интенсивностью при направлении скважин перпендикулярно действию максимальных напряжений, величину которых можно определить из следующей зависимости:

$$\sigma_{1} = \frac{\sigma_{c \varkappa c} \sqrt{d_{\kappa}/t_{cp}}}{1,32 + 0,1d_{\kappa} + 0,165\sqrt{d_{\kappa}}} , \qquad [2.3]$$

где σ_1 – максимальные сжимающие напряжения, МПа;

 $\sigma_{_{cw}}$ – прочность породы (руды) на одноосное сжатие, МПа;

 d_{κ} – диаметр выбуриваемого керна, *см*;

t_{cp} – средняя толщина дисков керна с единицы длины скважины, *см*.

Для оценки состояния массива горных пород на удароопасных горизонтах месторождения Антей геомеханическим методом применяли гидравлический буровой станок ONRAM 100, обеспечивающий необходимый режим бурения (скорость вращения бурового става 350-450 об/мин, усилие подачи 1 МПа, скорость бурения 1-2 см/мин, количество воды, подаваемое на забой скважины 3-7 л/мин). Применялись коронки диаметром 46 мм. Диаметр выбуриваемого керна 32 мм.

Для определения направления максимального напряжения бурили веер скважин. Скважина, из керна которой вышло максимальное количество дисков на интервале и наименьшей толщины, показывает направление действия максимальных напряжений, перпендикулярное ее оси.

Принятая на начальном этапе исследований методика измерений предусматривала на каждой замерной станции последовательное бурение веера горизонтальных и вертикальных скважин, рисунок 2.3.2. Такая конструкция замерной станции дает возможность более точно определить направление действия и величины наибольших напряжений.



Рисунок 2.3.2 – Конструкция замерной станции для оценки напряженного состояния и удароопасности массива горных пород геомеханическим методом

Всего было намечено 4 места стоянки и пробурено 22 различно ориентированные скважины (в том числе 18 горизонтальных и 4 вертикальных), расположенных на IX и XI горизонтах месторождения, рисунок 2.3.3.

Стоянки № 1 и № 2 расположены на 18 слое блока 6а-912 (горизонт IX), а № 3 и № 4 – на 18 слое блока 6а-1110 (горизонт XI). Скважины бурили на глубину ~5 м, в отдельных случаях на большую глубину.



Рисунок 2.3.3 – Схема расположения стоянок для оценки удароопасности геомеханическим методом (в проекции на план XI горизонта)

Породы, слагающие керн, в большинстве случаев представлены порфировидными гранитами светло-серого, желтоватого, розоватого цвета или зеленоватого оттенка, по структуре мелко и среднезернистыми.

Анализ полученных результатов показал следующее. Дискование керна установлено более чем в 50% скважин, рисунок 2.3.4, что свидетельствует о достаточно высокой напряженности массива горных пород. Наиболее высокий выход дисков (толщиной 0,2...1,2 см) отмечался на расстоянии 0,25...1,5 м от контура выработки, соответствующем величине зоны опорного давления (рисунок 2.3.4 *a*, 2.3.5).

Далее по длине скважин дискование происходило только на отдельных интервалах протяженностью, не превышающей 0,4 м (в среднем 0,2...0,25 м). В вертикальных скважинах дискование практически не наблюдалось за исключением крутонаклонной (под углом 84°) скважины II-В (рисунок 2.3.5 б, 2.3.5 г), пробуренной в целике между 11 и 18 слоями. Наличие по глубине скважины нескольких участков дискования керна, свидетельствует о высоком уровне действующих напряжений, обусловленных их концентрацией в уменьшающемся межполублочном целике и влиянием тектонической структуры массива. Последнее особенно отчетливо

проявляется в участке массива, приуроченного к месту сближения рудоконтролирующих швов 160 и 13, где ранее неоднократно отмечались динамические проявления горного давления.



Рисунок 2.3.4 – Фотографии керна скважин: горизонтальной I–2 (a) и вертикальной II-В (б)

Все проанализированные горизонтальные скважины были сгруппированы по азимуту их направления A_z . Было выделено 5 таких групп, каждая из которых объединяет скважины в тридцатиградусном диапазоне их азимута. Интенсивность дискообразования керна скважин в каждом диапазоне учитывали с помощью отношения числа скважин определенного направления, в которых зарегистрировано дискообразование керна $N_{i, cxe}^{\partial}$ к общему числу скважин этого направления $\sum N_{i, cxe}$:

$$k_i^{\vartheta} = \frac{N_{i,c\kappa\theta}^{\vartheta}}{\sum N_{i,c\kappa\theta}^{\vartheta}} .$$
[2.5]

Полученная методом средних зависимость коэффициента k_i^{δ} от азимута направлений скважин (рисунок 2.3.6) показала наличие экстремума, отвечающего наибольшей интенсивности выхода дисков в горизонтальных скважинах, ориентированных по азимуту 15°.

Выявленная закономерность указывает на преобладание в массиве месторождения сжимающих напряжений, ориентированных субгоризонтально в направлении $105\pm10^{\circ}$. Величина максимальных напряжений σ_l при различной толщине дисков *t* и постоянных d = 3,2 см и $\sigma_{cxc} = 130,6$ МПа изменяется на отдельных участках от 56 до 110 МПа, таблицы 2.3.2.



Рисунок 2.3.5 – Изменение параметров дискования керна по глубине скважин: *а-в* — горизонтальных, *г* — вертикальной



Рисунок 2.3.6 – Зависимость коэффициента относительного числа скважин с дискованием керна (k_i^{δ}) от азимута направлений скважин (Az)

Наблюдения за характером и интенсивностью дискования керна скважин позволяют не только выявить участки концентрации напряжений, но и установить ориентировку осей главных нормальных напряжений в массиве пород за пределами зоны динамического влияния горных выработок. В работах ИГЕМ РАН изложены результаты бурения веера горизонтальных и вертикальных скважин длиной 50 м каждая на восточном фланге (штр. ба-902) IX гор. Для получения более объективной информации по структуре поля напряжений и граничных условий прогнозной геомеханической модели пробурили веер аналогичных скважин на западном фланге (штр. ба-905) месторождения, [65].

Сравнительный анализ полученных данных показал, что наиболее интенсивное дискование керна развито в скв. 902-2, которая была ориентирована ортогонально к направлению действующих в массиве максимальных напряжений сжатия (ось SH). В противоположность этому, в скв. 902-1, ориентированной параллельно оси максимальных напряжений, развита лишь кусковатость, приуроченная к зонам гидрослюдизации пород. Эти наблюдения полностью подтверждают вывод о том, что ось максимальных напряжений сжатия ориентирована в массиве пород в СВ-ЮЗ направлении.

Так, был выполнен анализ данных по дискованию керна в скважинах на XII горизонте, которые были ориентированы вдоль оси действующих в массиве минимальных горизонтальных напряжений сжатия (растяжения). В разрезе массива на вертикальном интервале около 180 м от гор. 9 до гор. 12 ось максимальных горизонтальных сжимающих напряжений переориентируется по часовой стрелке на величину около 30° . Поэтому, если на IX гор разрушаются C3 и ЮВ секторы выработок, то на уровне гор. XII деформации концентрируются в северных и южных секторах и стенках горных выработок, рисунок 2.3.8 [81, 130].

Структурируем полученные данные в единый рисунок, отражающий направление регионального и локального сжатия на месторождении Антей, рисунок 2.3.7. Так, если направление максимального горизонтального сжатия, выявленное на горизонте VII (гребневая часть вала), составляет 30°, то на горизонте IX (основание вала) оно уже составляет 50°, а на горизонте XII – 90-105°. Как считает Саксин Б.Г., с увеличением глубины (и как следствие – выходом фронта горных работ собственно в тело плутона

гранитоидов) локальное направление горизонтального сжатия имеет тенденцию приближаться к региональному [Саксин и др., 2009].



1 – Аргунская зона разломов; 2 – контур гребня вала гранитоидов на VII горизонте; 3 – контур вала гранитоидов на Х горизонте; 4 - ориентировка зон разломов, их номер; 5 – направление максимального горизонтального сжатия, определенное на удалении от очистных выработок на верхних горизонтах (ВНИМИ); 6 – направление максимального горизонтального сжатия на нижних горизонтах (ВНИМИ, ИГД ДВО РАН); 7 – направление локального сжатия, определенное по разрушению выработок и дискованию керна на разных горизонтах (VII – Поляков А.Н., IX и XII – ИГЕМ, XI – ИГД **ДВО РАН)**

Рисунок 2.3.7 – Направление регионального и локального сжатия на месторождении Антей

Указанное явление не редкость в горной практике. Геодинамическая расслоенность разреза гранитоидных массивов является достаточно распространенным явлением даже в тех местах, где в них не локализуются рудные месторождения. Это выражается в смене тектонического режима по вертикали, в связи с чем существенно изменяется величина и ориентировка максимального горизонтального напряжения. Это приводит к формированию участков локального растяжения (декомпрессии) и сжатия (компрессии) в крутопадающих разломах [89].

Перераспределение напряжений приводит к изменению геомеханической обстановки и формированию новых разрывов или активизации старых, что в отдельных случаях сопровождается динамическими проявлениями и разрушением закладки и контура горных выработок. Скорость протекания подобного процесса зависит от конфигурации горных выработок и их ориентировки по отношению к осям действующих напряжений. Как показано в работе [44], изменение геодинамического состояния недр достигает своего аномального (экстремального) проявления в зонах

разломов. При этом уровень аномальных деформаций может быть соизмерим с опасными смещениями при землетрясениях.

Так, после отработки блоков 6а-1110 и 6а-1006 была выполнена оценка удароопасности в целике блока 6а-1006 и верхнем полублоке 6а-1102 в этаже 130-90м, рисунок 2.2.6. На 17 слое (отм. 127 м) было выбрано место стоянки, откуда в почву выработки было пробурено 3 скважины с шагом 45°, рисунок 2.3.8 и 2.3.9.



Рисунок 2.3.8 – Расположение скважин для оценки напряжений в целике между блоками 6а-1006 и 6а-1102 на месторождении Антей

Анализ полученных результатов показал следующее. Дискование керна установлено во всех трех скважинах, что свидетельствует о достаточно высокой напряженности массива горных пород. В скважине №1 интенсивный выход дисков наблюдается в интервалах 10,5...11,5, 13,5...14,5, 22...23 м., что соответствует центральной и нижней части целика (отметка 90...115 м.). Наиболее продолжительный интервал выхода дисков (толщиной 0,5...1,2 см) отмечался на интервале 13...14 м от устья скважины, рисунок 2.3.10.

На этой же стоянке в вертикальной скважине №2 на интервалах 16, 17, 20, 21 и 24 м наблюдается интенсивное дискообразование отрезками по 0,2...0,5 м со средней толщиной диска 1,5 см. По скважине №3 отмечено незначительное дискование отрезками по 0,1...0,4 м на интервалах 12...13 м и 15...16 м.



Рисунок 2.3.10 – Фотографии керна скважины №1 (ст. №1): в интервале 0-14 м (*a*) и интервале 14-26 м (*б*)

Характерно, по всем трем скважинам была отмечена многослойная структура керна слоями толщиной примерно 1 см (без их отделения), а также отрезки разрушенного на мелкие обломки керна отрезками по 0,2...0,3 м, рисунок 2.3.11. Такая структура указывает на гидротермальное и неоднородное по свойствам строение массива — гидрослюдизацию.



Рисунок 2.3.11 – Фотография строения керна в скважине №1 (ст. №1)

Наличие в глубине скважин дискования керна, свидетельствует о высоком уровне действующих напряжений. Дискование сгруппировано в уменьшающемся межполублочном целике на отметках 117...110 м, где ранее неоднократно отмечались динамические проявления горного давления в форме толчков.

Так, в сентябре 2013 года в блоке 6а-1006 выполнялась оценка удароопасности методом дискования керна. Со стоянки, размещенной в орте на 18 слое (координаты устья X = 77227, Y = 110914, Z = 122), было пробурено 6 скважин с шагом 45° в кровлю и почву выработки, рисунок 2.3.12, таблица 2.3.4. Стоянки №1 и №2 размещены по разные стороны от рудоконтролирующего шва №13 на удалении 38,5 м друг от друга, рисунок 2.3.9.

Дискование керна наблюдалось в скважинах №1 и №2 на интервале от 5 до 20 м. Особенно интенсивное дискование с выходом до 64 дисков с погонного метра скважины наблюдалось на интервале 5...7 м. и 12...19 м. в скважине №1, ориентированной вертикально в кровлю выработки. Менее интенсивно проявлялось дискование на двух интервалах 7...10 м. и 16...23 м в скважине №2, ориентированной по азимуту 150° и вертикальным углом 78°.



Рисунок 2.3.12 – Схема расположения места стоянки №2 для оценки напряжений в целике между блоками ба-1006 и ба-1102 на месторождении Антей (проекция на вертикальную плоскость)

		1 .		*		
Скв. №	Азимут	Верт. уг.	Х	Y	Z	L, м

 $\frac{1}{2}$

Таблица 2.3.4 – Координаты устья скважин и их ориентация стоянки №2

								4
F	4	200	-45	77227	110914	119,1	30	
ſ	5	_	-90	77227	110914	119,1	20	
ſ	6	20	-45	77227	110914	119,1	35	
L	Во	стальных че	етырех сква	жинах набл	юдается ре	едкое и сла	або выражен	1HO(

122,1

122.1

122.1

В остальных четырех скважинах наблюдается редкое и слабо выраженное дискование керна, за исключением скважины №3, где на интервале 12...13 м наблюдается выход 15 дисков, и в скважине №6 на интервале 9...10 м выход 12 дисков.

Во всех шести скважинах наблюдаются интервалы с раздробленным керном. Так, разрушение керна было зафиксировано в скважине №1 в интервале 7...12 м и 20...24,5 м, между интервалами, где были зафиксированы интенсивные дискообразования, а в скважине №2 дробление керна отмечено в интервале 10...12 м, рисунок 2.3.13.

В ходе анализа данных по дискованию керна было установлено направление действия максимального сжимающего напряжения, которое ориентировано субгоризонтально в направлении 110±10°, рисунок 2.3.14.



Рисунок 2.3.13 – Фотография дробления керна в скважине №1 (ст. №2)



Рисунок 2.3.14 – Круговая диаграмма распределения скважин с дискованием керна в массиве месторождения "Антей"

Вблизи контактов среднезернистых и более крепких лейкократовых гранитов наблюдается увеличение дискообразования с незначительной протяженностью, не превышающей 0,2–0,25 м. Эти экстремумы представлены, как правило, не более чем 5–10 дисками и не определяют зоны максимума опорного давления.

Учитывая, что ранее в этом целике проводились испытания образцов на физикомеханические свойства, представленные в таблице 2.3.2, рассчитанная величина максимальных напряжений σ_1 по керну на стоянках №1 и №2 при различной толщине дисков *t*, постоянных d = 3,2 см, $\sigma_{cxc} = 150,3$ МПа изменяется на отдельных участках от 30 до 86 МПа, таблица 2.3.5.

Таким образом, в результате оценки удароопасности установлено интенсивное дискование керна в трех скважинах на первой стоянке, ориентированных в почву

выработки (в этаже 90-127 м) и в трех скважинах на второй стоянке, ориентированных в кровлю выработки (в этаже 122-180 м). В то же время, совершенно отсутствует выход керна в трех скважинах, ориентированных в почву на второй стоянке.

Номер пункта отбора пробы	σ сно, МПа	Есно, ГПа	<i>σ</i> 1, <i>М</i> Па	
1	148,07	31,13	58,22	
2	189,67	35,92	74,58	
3	219,83	63,28	86,44	
4	78,01	23,24	30,67	
5	129,73	32,28	51,01	
6	114,9	26,43	45,18	
7	100,05	48,07	39,34	
8	99,38	34,88	39,08	
Средние значения	150,3	36,8	53,06	

Таблица 2.3.5 - Максимальные сжимающие напряжения по скважинам на стоянках №1 и №2

Можно предположить, что стоянки расположены по разные стороны рудоконтролирующего шва №13, где поле напряжений в бортах разлома ориентировано разнонаправлено.

По результатам оценки удароопасности на месторождении установлено, что в нижней части целика блока ба-1102 в интервале отметок 90...117 м сформирована опасная зона концентрации напряжений, где действие максимального сжимающего напряжения $\sigma_{cw} = 219,83$ МПа направлено по азимуту $110\pm10^{\circ}$.

Удароопасность уменьшающихся межполублочных целиков была установлена также по результатам математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород методом конечных элементов (МКЭ) [66].

С помощью математического моделирования МКЭ проводились исследования изменения уровня напряжений в массиве и элементах горных конструкций по мере понижения фронта горных работ и уменьшения величины межполублочного целика в процессе отработки очистного блока, рисунок 2.3.15.

Расчеты напряженно-деформированного состояния участка массива горных пород (целика 6а-1102), расположенного на глубине 580-740 м, проводили при следующих граничных условиях: первые главные напряжения σ_1 действуют в горизонтальной плоскости $\sigma_1 = 50$ МПа, а вторые главные напряжения σ_2 — в вертикальной плоскости;

на глубине 630 м и 690 м от поверхности вторые главные напряжения равны, соответственно, $\sigma_2^{630} = 16,501$ МПа и $\sigma_2^{690} = 18,859$ МПа.



1, 2 – соответственно, закладочный и рудный массив, 3 – межполублочный массив, 4, 5 – тектонические нарушения (римскими цифрами показана очередность отработки горизонтальных слоев; А и Б – характерные точки в массиве)

Рисунок 2.3.15 – Обобщенная расчетная схема для моделирования НДС участка месторождения, отрабатываемого нисходящими слоями с закладкой выработанного пространства

Модули упругости приняты: вмещающих пород $E_n = 70$ ГПа, руды $E_p = 35$ ГПа, закладочного массива $E_3 = 9$ ГПа. Коэффициент Пуассона пород, руд и закладочного массива составлял, соответственно: 0,21, 0,23 и 0,22. Плотность изменялась от 2700 кг/м³ для пород и руд до 2600 кг/м³ для закладочного массива.

Метод моделирования технологии отработки предусматривает, что на I стадии отрабатываются первые слои каждого из полублоков. После чего, на II стадии отрабатываются вторые слои верхнего и нижнего полублоков, а ранее отработанные слои заполняются твердеющей закладкой и так до VI стадии включительно, а затем идет последовательная отработка только нижнего полублока (стадии VII-IX). Предполагалось также, что сформировавшийся межполублочный целик будет разгружаться камуфлетным взрыванием ряда вертикальных скважинных зарядов.

Анализ результатов расчетов, представленных в виде изолиний средних нормальных напряжений $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ и интенсивности касательных напряжений $\tau_{uhr} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$, показал, что до начала отработки блока напряжения сжатия концентрировались преимущественно в его нижней части вдоль границы закладочного и
рудного массивов, при этом значения σ_{cp} не превышали 40 МПа, рисунок 3.2.16. С началом отработки полублоков область повышенных напряжений перемещалась к центру межполублочного целика (точка A), значения σ_{cp} и τ_{uht} которых на VI стадии отработки достигают, соответственно, 68 и 40 МПа, рисунки 2.3.16 и 2.3.17.



Рисунок .2.3.16 – Распределение *σ*_{*cp*} в массиве горных пород на XI стадии отработки очистного блока (высота целика 12 м)



Рисунок 2.3.17 – Изменение среднего давления σ_{cp} и максимальных касательных напряжений τ_{uhm} в центре межполублочного целика (точка А) на различных стадиях отработки очистного блока

Результаты математического моделирования подтверждают наличие напряжений, выявленных экспериментальными шахтными измерениями в блоке 6а-1110 между 11 и 18 слоями и анализом геомеханическим методом по дискованию керна, который свидетельствует о наличии высокого уровня действующих напряжений ($\sigma_{cw} = 219,83$ МПа) в блоке, обусловленных влиянием на массив активных тектонических нарушений 13 и 160.

Выводы к главе 2

1. Результаты геомеханических исследований, включая обобщения данных об условиях И характере возникновения опасных геодинамических явлений на месторождении Антей показывают, что в формировании удароопасных ситуаций участвуют как природные, так и техногенные факторы. К природным факторам, в первую очередь, относятся тектонические нарушения 13 и 160, имеющие встречные падения на уровне Х горизонта и контакты разномодульных горных пород, играющие роль естественных концентраторов высоких напряжений в массиве горных пород. Установлено, что большинство разновидностей пород месторождения, а особенно лейкократовые граниты, проявляют склонность к упругому деформированию и хрупкому разрушению в динамической форме. Так, наиболее удароопасные участки в массиве горных пород приурочены к местам пересечения выработок контактов лейкократовых гранитов с мелко И среднезернистыми гранитоидами. К технологическим факторам отнесены: большой объем выработанных пространств и применение системы разработки горизонтальными слоями с твердеющей закладкой, предусматривающей с 1999 года разделение блоков на 2 полублока с формированием уменьшающихся целиков в области влияния тектонических нарушений 13 и 160. По результатам анализа динамических проявлений, зарегистрированных за весь период отработки месторождения, установлено, что на месторождении Антей большая часть всех зарегистрированных динамических проявлений (94%) была приурочена к уменьшающимся межполублочным целикам, начиная с 2000 года.

2. Получены новые экспериментальные данные и выявлены современные поля локальных напряжений в центральной части месторождения Антей, в том числе в межполублочных целиках на уровне Х горизонта, где напряжения действуют по азимуту 110±10°, в то же время — по азимуту 30° на VII горизонте, 50° на IX горизонте и 90-105° на XII горизонте; эти направления не всегда соответствуют региональному направлению сжатия по азимуту — 110-120°.

3. Определены и уточнены физико-механические свойства разновидностей различной структуры гранитов и гранитоидов на удароопасных участках

месторождения, необходимые для сопоставления их с напряжениями, действующими в массиве горных пород месторождения. Показано, что при значениях максимальных напряжений (σ_1) в участке сближения двух активных тектонических нарушений 13 и 160 на уровне X горизонта, изменяющихся от 31 до 86 МПа, предел прочности σ_{cm} лейкократовых гранитов, особенно локализованных между нарушениями 13 и 160 (где они выступают в виде «жестких мостов»), превышает предел прочности σ_{cm} вмещающих гранитоидов на 59%, а предел прочности σ_{cm} руды — на 64,5%, в связи с чем зоны контактов с лейкократовыми гранитами являются концентраторами напряжений и источниками повышенной удароопасности при пересечении их горными выработками.

месторождения 4. Центральная часть Антей характеризуется сложными геомеханическими условиями, особенностями которых являются значительные вариации физико-механических свойств горных пород в уменьшающихся целиках. По результатам оценки удароопасности установлено, что в верхней части целика блока ба-1102 в интервале отметок 90...117 м сформирована зона концентрации напряжений, направленных по азимуту $110\pm10^{\circ}$. Значения пределов прочности пород на одноосное сжатие варьируют в этом участке от 30 до 86 МПа, что меньше значений главных напряжений в 2-3 раза.

5. В общем виде главными причинами опасных динамических проявлений в формирующихся межполублочных целиках (содержащих включения лейкократовых гранитов, находящихся в области влияния рудосодержащих и активных тектонических нарушений 160 и 13) являются установленные горно-геологические, горнотехнические и геомеханические особенности месторождения. Комплексный учет условий и факторов динамических проявлений горного давления на месторождении дал основания для формулировки первого научного положения:

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.

3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОН В УДАРООПАСНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

3.1 Сейсмоакустическая многоканальная цифровая система контроля горного давления «Prognoz-ADS» на руднике «ПУР-1»

В процессе ведения горных работ в удароопасных условиях неотъемлемой частью технологического процесса является определение удароопасности и контроль состояния участков массива в окрестности отрабатываемых блоков. При этом методы и техника такого мониторинга должны быть достаточно информативными, технологичными и современными, т.е. быть высокопроизводительными, мобильными и легко вписываться в технологию горного производства.

Региональный мониторинг геомеханического состояния массива и прогноз его удароопасности с использованием автоматизированной сейсмоакустической системы контроля горного давления (АСКГД) является одним из наиболее перспективных методов контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока России и рекомендован к применению нормативным документом [29]. Для его осуществления созлана наблюдательная подземная сеть приемных пьезоэлектрических преобразователей (геофонов PeA12), связанных в единую систему, которая позволяет выявлять в пределах рудничного поля удароопасные участки на основе непрерывной активности регистрации параметров сейсмоакустической В элементах горных конструкций.

В участках массива, где происходят процессы накопления напряжений и деформации пород, наблюдается формирование акустически активных зон (AA3), по изменению их параметров можно судить об особенностях геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород. Для контроля удароопасности на месторождении Антей используется многоканальная цифровая автоматизированная система сейсмоакустического мониторинга *«Prognoz-ADS»*.

Рассматриваемая система, разработанная ИГД ДВО РАН (г. Хабаровск) в 2005 г., основана на анализе сигналов акустической эмиссии (АЭ), позволяет регистрировать излучаемые горным массивом при трещинообразовании акустические импульсы в частотном диапазоне 0,5...12 кГц и определять местоположение и ряд важных

параметров источников упругого излучения, передавать их по цифровым каналам связи на компьютер оператора, с которого осуществляется управление всем измерительновычислительным комплексом [1, 32, 88].

Основные технические характеристики цифровой АСКГД «Prognoz-ADS»:

•	Число каналов приема акустических сигналов	не менее 4
•	Чувствительность приемных преобразователей, V/g	не менее 2
•	Мощность потребления цифрового приемника, Вт	не более 2
•	Динамический диапазон по входному напряжению, дБ	100
•	Минимальная скорость обработки акустических событий, имп./с.	5
•	Рабочий диапазон частот, кГц	0,5-12
•	Энергетический диапазон регистрируемых АЭ-источников, Дж.	10-10000
•	Скорость передачи данных, Кбит/с	до 230,4
•	Дистанция передачи данных через модем, м	до 3500
•	Дистанция между смежными датчиками в антенне, м	до 120
•	Точность определения координат источника АЭ сигнала, м	25
•	Период опроса ЦПП, с	10
•	Питание АСКГД от сети переменного тока	220B±10%,50Гш
•	Мощность потребления АСКГД подземной части, кВт,	не более 1
•	Время автономной работы подземной части АСКГД, ч	1012

Система *«Prognoz-ADS»* в различных модификациях используется на месторождении Антей с 2006 г. и на месторождении «Николаевском» — с 2010 г.

Установленный на руднике «ПУР-1» измерительно-вычислительный комплекс состоит из подземной и поверхностной частей и включает в себя разнесенную в пространстве сеть выносных пьезоэлектрических акселерометров *PeA12* (датчиков), подключенных к цифровым приемным преобразователям *RADCi40* (ЦПП), которые подключены к одному коммутационному блоку с источником питания *PSUt4* (синхронизатором), многопортовым расширителем RS-485 и центром управления всей системой (подземным сервером сбора данных) на базе персонального компьютера.

Устанавливаемые скважинах акустические датчики И цифровые В преобразователи соединяются распределительными кабельными линиями с коммутационным узлом в подземной аппаратной. Коммутационный узел — это шкафы, в которых размещаются персональный компьютер (ПК-сервер), SHDSL модем, компактный монитор, источник бесперебойного питания всей системы (8-10 час.), блок питания и синхронизации времени ЦПП, рисунок 3.1.1–3.1.2.



Рисунок 3.1.1 – Основные элементы АСКГД «Prognoz-ADS».

(слева выносной пьезоэлектрический акселерометр *PeA12*, справа цифровой приемный преобразователь *RADCi40*)



Рисунок 3.1.2 – Коммутационный узел подземной аппаратной (слева шкаф автономного электропитания, справа ПК-сервер, блок питания-синхронизации ЦПП, модули сбора и передачи данных)

Центральный сервер АСКГД «Prognoz-ADS» (высокопроизводительный ПК) расположен в поверхностном комплексе рудника и удаленно связан с подземной аппаратной, что позволяет управлять и настраивать конфигурацию системы в реальном времени с автоматической репликацией всех данных геоакустического мониторинга.

По результатам геоакустического контроля формируется база данных (БД) различных параметров сейсмоакустических импульсов и характера активности разрабатываемого массива горных пород. Содержащаяся в базе данных и постоянно

пополняющаяся информация является основой для осуществления текущего и перспективного прогноза удароопасности отдельных участков шахтного поля рудника.

Особенностью геоакустического мониторинга на удароопасном руднике «ПУР» является необходимость осуществлять измерение параметров АЭ в условиях интенсивных технологических помех от бурового оборудования и самоходных погрузочных машин. Для селекции полезных сигналов в потоке АЭ-событий в алгоритме работы ЦПП используется структурно-спектральный анализ сигналограмм и учет пространственной геометрии приемной антенны.

Подземный и центральный сервер, помимо основных программ и приложений, оснащены специальным программным комплексом «Prognoz-ADS», в состав которого входят: программа настройки системы, сбора и регистрации данных — «GeoControl», программа обработки данных и представления результатов мониторинга — «GeoAcoustics-ADS» и другие служебные приложения.

Для работы с данными используется программный комплекс «GeoAcoustics-ADS»*, который позволяет анализировать всю совокупность локационных серий (или их часть) и на основании ряда определенных критериев выделять из нее корректные серии, преобразовывать полезную информацию и записывать ее в постоянно пополняемую БД, а также создавать отчеты о результатах наблюдений, рисунки 3.1.3-3.1.4. Программный комплекс «GeoAcoustics-ADS» позволяет выполнять следующие основные операции: первичную обработку АЭ-событий; расчёт координат источников АЭ; группировку источников АЭ в очаги микроразрушений; расчёт параметров акустически активных зон и критерия их удароопасности; визуализация результатов мониторинга в виде карт, таблиц, графиков; выгрузка результатов мониторинга в объемную модель объекта контроля; получение статистических данных о результатах мониторинга и т.д.

Важной особенностью системы является возможность оперативного наблюдения за процессом мониторинга в реальном времени на экране компьютера, где в трехмерную модель рудника автоматически пополняются результаты в виде сфер (АЭ-событий), выделяются опасные зоны концентраций напряжений и показатели удароопасности.

^{*} Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615167.



Рисунок 3.1.3 – Главное окно программы «GeoAcoustics-ADS»



Рисунок 3.1.4 – Окна программы «GeoAcoustics-ADS» с результатами геоакустического мониторинга

Основой качественного контроля и достоверного прогноза удароопасности является правильный выбор мест размещения основных регистрирующих элементов системы мониторинга (датчиков) в массиве горных пород и четкое руководство методикой обработки полученных данных.

3.1.1 Размещение элементов АСКГД в удароопасных участках рудничного поля

При обосновании схемы размещения элементов АСКГД и организации режимных геоакустических наблюдений в условиях месторождения Антей принимался во внимание комплекс горнотехнических и геомеханических факторов: геологическое строение месторождения; наличие и расположение геодинамически активных разломов; степень удароопасности отдельных участков шахтного поля; существующая горнотехническая ситуация; характеристика планируемых горных работ на ближайшие несколько лет.

Комплексный анализ горно-геологических, горнотехнических и геомеханических условий разработки месторождения показал, что одной из основных причин опасных динамических проявлений является концентрация высокая напряжений В формирующихся межполублочных целиках В области влияния тектонических 160. Натурными исследованиями установлено, что уровень нарушений 13 и напряженного состояния с приближением к зоне разломов заметно повышается и достигает максимума на расстоянии 10-15 м от плоскостей сместителей разрывных нарушений. Это подтверждается анализом локализации очагов стреляний И интенсивного заколообразования пород в выработках ниже VIII горизонта вблизи швов разломов, В которых крупнозернистые биотитовые граниты сочетаются с линзообразными телами лейкократовых гранитов. Последние отличаются повышенным содержанием кварца и отсутствием темноцветных минералов и образуют в массиве своеобразные жесткие мосты, являющиеся естественными концентраторами напряжений.

На основе анализа горно-геологической и горнотехнической ситуации были выявлены потенциально удароопасные участки массива, которые необходимо контролировать. Таким образом, в наблюдательную сеть *«Prognoz-ADS»* вошли 19 датчиков, установленных в скважинах, пробуренных из горных выработок IX, X, XI и XII горизонтов вокруг рабочих блоков рудника «ПУР» в этаже 570-750 м от дневной поверхности, таблица 3.1.1, рисунок 3.1.5.

Разнесенный способ установки акселерометров позволил формировать необходимое число приемных антенн, охватывающих наиболее удароопасные участки

массива в рабочих блоках ба-1006, ба-1106, ба-1110 и ба-1212, где в последнее время зарегистрировано 95% всех динамических проявлений горного давления.

Номер	Номер	Координаты по осям, м		Maama wamawaanii				
скважины	ЦПП	X	Y	Ζ	место установки			
на горизонте IX								
91	2	77176,05	110845,49	185,96	Орт 6а-906			
93	1	77160,11	110921,67	185,68	Орт 6а-906			
на горизонте Х								
1011	3	77221,5	110961,50	119,84	Штр. 6а-1001 (аппаратная)			
102	5	77136,25	110926,99	120,19	Штр. 6а-1001			
1031	6	77166,09	110859,20	119,64	Орт ба-1006			
104	7	77137,02	110809,91	120,89	Штр. 6а-1003			
105	4	77248,04	110865,34	120,42	Орт ба-1002			
на горизонте XI								
1111	8	77183,32	110949,29	63,17	Штр. 6а-1101			
1121	10	77080,82	110905,09	63,73	Орт ба-1110			
113	12	76994,70	110869,76	64,03	Штр. 6а-1101			
1141	9	77222,68	110849,83	63,67	Штр. 6а-1103			
1151	11	77135,45	110812,61	64,04	Орт. 6а-1103			
116	13	77030,11	110764,56	64,80	Штр. 6а-1103			
на горизонте XII								
121	14	77209,95	11955,37	2,58	Штр. 6а-1201			
1221	16	77136,15	11924,53	2,89	Штр. 6а-1201			
123	18	77065,48	11898,17	3,23	Штр. 6а-1201			
124	15	77204,12	11840,55	3,33	Штр. 6а-1203			
125	17	77130,39	11810,01	4,48	Штр. 6а-1203			
1261	19	77029,94	11761,79	3,90	Штр. 6а-1203			

Таблица 3.1.1 – Местоположение приемных преобразователей АСКГД «Prognoz-ADS» на руднике «ПУР»



Рисунок 3.1.5 – Схема расположения акселерометров АСКГД «Prognoz-ADS» на руднике «ПУР» месторождения Антей.

Для мониторинга каждого из указанных блоков предусмотрено минимум 5 приемных антенн, состоящих из 4 акселерометров в каждой из них, находящихся на расстоянии 80-120 м друг от друга. Такой вариант размещения позволяет варьировать комбинацией датчиков в антенне по мере зашумленности участков технологическими помехами. Например, для контроля блока 6а-1110 сформирована антенна из номеров ЦПП — 3-5-6-10-8, 5-6-7-11-9 и их множества вариаций, рисунок 3.1.5. В случае проявления мощного АЭ-события его регистрирует весь набор акселерометров в зоне контроля, а в случае технологических помех в этот момент из набора можно выключить «заглушенные» датчики и добавить из набора смежных, менее подверженных акустическим воздействиям.

Негативное влияние на точность локации источника АЭ оказывает значительная анизотропия контролируемого участка массива горных пород [см. п.2.1]. Сложноструктурное горно-геологическое строение массива, его изрезанность горными выработками и наличие большого числа заполненных закладкой выработанных пространств обуславливают существенные различия в скоростях распространения акустических волн и, как следствие, формирование «некорректных» локационных серий, дающих погрешности при расчете параметров АЭ. Влияние перечисленных факторов удалось снизить путем сгущения акселерометров в наблюдательной сети и использования для локации набора датчиков, расположенных по одну сторону от геологических неоднородностей или тектонических нарушений.

Таким образом, расстояние между смежными датчиками в зоне контроля составляло 80-120 м, а погрешность определения координат источника АЭ-события в условиях технологической зашумленности по результатам тестовых взрывов не превышала в среднем 6,4 м (минимальная погрешность 2,6 м).

3.1.2 Формирование локационных серий из всей совокупности потока данных геоакустического мониторинга

По результатам геоакустического мониторинга формируется база данных (БД) параметров сейсмоакустических импульсов и характера активности разрабатываемого массива горных пород. Содержащаяся в БД и постоянно пополняющаяся информация является основой для осуществления текущего и перспективного прогноза удароопасности отдельных участков шахтного поля рудника.

Формирование АЭ-событий реализуется в программном комплексе «GeoAcoustics ADS» как в автоматическом режиме, так и поддерживается ручным формированием и коррекцией локационных серий. Более точная и корректная локация источников сейсмоакустических событий в условиях технологических помех может быть реализована только в ручном режиме оператором-геофизиком с учетом ряда факторов и условий мониторинга. Остановимся подробнее на ручном формировании АЭ-событий в условиях технологических горно-геологических особенностей месторождения Антей на точность определения координат источника.

Обработку данных геоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях можно разделить на несколько этапов: I — обработка первичных данных и формирование локационных серий; II — обработка и фильтрация локационных серий; III — статистический анализ и выделение очаговых зон.

Этап I. Обработка первичных АЭ-импульсов является наиболее трудоемким этапом и заключается в селекции первичных данных для формирования локационных серий. Перед обработкой данных уточняются условия, при которых проводилось измерение:

– Где проводились буровые работы, и какие станки были в работе. Каждая модель бурового станка имеет свои шумовые характеристики. Например, станок вертикальной проходки восстающих выработок 2КВ излучает широкий спектр частот и блокирует работу ЦПП в радиусе 100 м, далее преобладают низкочастотные шумы;

– Где велись погрузочно-доставочные работы, и какой у них был участок работы.
 Во время погрузочно-разгрузочных работ регистрируется широкий спектр шумов, в том числе отраженных сигналов (эхо) и импульсов разрушения породы в рудоспусках;

 Время, количество взрывчатого вещества (ВВ) и место проведения взрывных работ, в том числе взрывы в рудоспусках и негабаритов, которые могут проводиться как в межсменные перерывы, так и в рабочую смену;

Для построения локационной серии необходимо, просматривая БД, выявить близкие по времени импульсы от четырех и более ЦПП, которые удовлетворяют следующим требованиям:

 Разница по времени между первым и последним в серии АЭ-сигналом не должна превышать значение разницы времени прихода (РВП) между акселерометрами, с которых получены сигналы (~60 мкс);

– Форма сигналов в группе импульсов должна быть подобной. Эта важная информация о процессах деструкции в горном массиве может быть получена в результате спектрального анализа регистрируемых параметров АЭ, возможность которого с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) реализована в приложениях ПК. Форма сигнала АЭ зависит от прочностных характеристик пород и может быть короткой с резким всплеском и затуханием в хрупких и прочных породах, и более пологой, например, при разрушении закладки или более слабых трещиноватых пород;

– Длина сигнала должна соответствовать его частотным характеристикам. Так, чем ниже частота, тем длиннее сигналограмма по времени. Например, длина АЭ-сигнала с частотой ~5 кГц, соответствующего разрушению вмещающих гранитов месторождения на уровне X горизонта, составляет около 20-25 мс, а длина с частотой 1-2 кГц может достигать более 50 мс (с учетом фронта сигнала);

 Во время интенсивных технологических помех (буровые работы) выбирать сигналы с ЦПП следует по значению дисперсии, которое после БПФ составляет 100 ед. для перфоратора ССПБ-1К и ему подобных ручных станков;

 Амплитудные характеристики первых АЭ-сигналов в выбранной группе в большинстве случаев составляет более 1000 квантов;

Каждая локационная серия формируется по следующему принципу. В локационную группу необходимо включать АЭ-импульсы со смежных между собой ЦПП, т.е. если сигнал первым был принят датчиком №1, то следующим должен принять ближний к нему датчик №2, а не №5, который находится на большем удалении от №1.

Так же во время обработки данных мониторинга, при известных местах концентрации напряжений и местоположении долгоживущих ААЗ, в группу импульсов локационной серии необходимо включать только импульсы с ближайших или окружающих эти зоны датчиков, что позволит упростить задачу локации. Например, контролируется целик верхнего полублока 6а-1102 (рисунок 3.1.5), при этом задействуются окружающие его акселерометры (№3, 5, 4, 6 и соседние с IX или XI горизонтов), а остальные не принимаются в локационную серию АЭ. В данном случае, чем больше дистанция в антенне, тем больше вероятность, что на пути распространения сигнала встретятся препятствия в виде тектонических нарушений или выработанных пространств, что повлияет на результат определения координат.

Этап II. В результате формирования локационных серий из АЭ-импульсов получаем таблицу решений координат источников АЭ. Полученные координаты подвергаются этапной селекции по пространственным и энергетическим параметрам АЭ-событий.

На первом этапе фильтруются ошибочные события, которые сформировались из импульсов от двух и более источников. Параметры таких событий внешне ничем не отличаются от натуральных АЭ-событий, но после расчета их координаты выделяются из всего списка значительным удалением от зоны ведения горных работ. Такие случаи возникают по причине ведения одновременных буровых работ в нескольких малоудаленных друг от друга забоях. В большинстве случаев группе таких АЭ-импульсов в таблице первичных данных предшествовали частые повторения по отдельным акселерометрам.

После пространственной селекции из таблицы решений фильтруются АЭ-события с акустической энергией более 50 Дж, которые состоят из высокочастотных сигналов (более 3 кГц). Этот критерий селекции основан на физическом смысле распространения сигнала — высокочастотные сигналы (более 3-5 кГц) не распространяются в массиве на далекие расстояния и затухают в массиве горных пород в приделах 50 м [7, 118].

Наряду с необоснованно высокой энергией удаляются АЭ-события с энергией до 2-3 Дж. Как показала практика геоакустических наблюдений с 2006 года, источниками подобных сигналов становятся технологические помехи бурового оборудования и переотраженные сигналы (эхо по горным выработкам или резонанс). Например, в ходе взрывных работ возникают сейсмические колебания, которые раскачивают троллеи вдоль ЖД путей, растяжки которых передают более высокочастотные колебания в массив горных пород, создавая эффект «россыпи гороха».

Особым образом отличается алгоритм формирования локационных серий после регистрации сильных динамических проявлений или сотрясений массива горных пород. По инструкции безопасного ведения горных работ при возникновении удароопасной ситуации горнорабочие должны покинуть рабочие места на ЭТОМ участке. Следовательно, после сильных динамических проявлений в форме толчка или В указанной зоне отсутствуют технологические сотрясения, помехи, И все зарегистрированные АЭ-события с координатами в указанном участке могут быть приняты как естественные.

В условиях стадии перераспределения напряжений, после проявлений горного давления, в процессе деструкции регистрируются сигналы различной формы и в некоторых случаях вовсе не похожие на обычную форму АЭ-сигнала по ряду параметров, таких как амплитуда, дисперсия, РВП и др. В подобных случаях выбираются импульсы по 4-м ближайшим датчикам к участку проявления горного давления, и из всех образованных групп АЭ-импульсов формируются локационные серии похожих на вид сигнала. В редких случаях, когда мало зарегистрированных данных, допускается исключение из правил по оборванным формам сигналов, т.к. необходимо получить местоположение источника и его время.

Этап III. После проведения всех этапов селекции АЭ-событий необходимо выявить акустически активные зоны (ААЗ) и их параметры. Программный комплекс *«GeoAcoustics ADS»* позволяет выделить ААЗ в массиве горных пород, рассчитать ее параметры и построить отчет, в котором отображаются координаты эпицентра ААЗ, число АЭ-событий в эпицентре (очаговой зоне), суммарная энергия АЭ-событий, среднее время между событиями и т.д.

3.2 Методика выделения зон концентрации очагов разрушения в массиве горных пород рудника «ПУР-1» по данным геоакустического мониторинга

По результатам экспериментальных исследований и натурных наблюдений установлено, что в участках массива, где происходят интенсивные деформационные процессы, происходит формирование акустически активных зон (AA3), которые характеризуются рядом параметров, по изменению которых можно судить об особенностях геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород. Важную роль в прогнозировании динамических проявлений горного давления играет корректное выделение формирующихся в массиве акустически активных зон, под которыми понимается совокупность АЭ-событий, отражающих процесс деформирования определенного участка массива. Ниже приведены основные принципы выделения в массиве акустически активных зон.

Множество очагов АЭ-событий образуют некое пространственное облако из акустических АЭ-событий, в котором присутствуют как области с высокой концентрацией очагов микроразрушений (потенциально удароопасные участки в



массиве), так и области с более редкими очагами, образованными малым количеством АЭ-событий с малой плотностью в объеме зоны, рисунок 3.2.1.

Рисунок 3.2.1 – Пространственное распределение очагов сейсмоакустических событий, зарегистрированных в течение суток на месторождении Антей до и после серии толчков 4 августа 2012 г. (в проекциях на вертикальную плоскость)

Наиболее информативными для исследования процесса формирования очагов разрушения являются участки концентрации (сгущения) источников АЭ-событий, которые необходимо выделить из общего числа (облака точек в пространстве) позиций микроразрушений. Для этого необходимо очаги АЭ-событий разделить на два типа: связанные между собой и несвязанные.

Два и более АЭ-события являются связанными, если они имеют непосредственное отношение друг к другу, отражающие общий деформационный процесс и которые могут объединяться (путем прорастания или кластеризации трещин) в единый разрыв (зону разрушения). Так, серия близкорасположенных АЭ-событий, сгенерированных в процессе деформирования целика или иного участка массива, считаются связанными и будут иметь высокий коэффициент связности, чем отдельные АЭ-события на удалении 20-30 м и более от гипоцентра формирующегося очага разрушения. Связанные очаги

Х. м

АЭ-событий образуют концентрированную очаговую зону, параметры которой являются отражением геомеханических процессов в данном участке массива.

Для выявления в облаке АЭ-событий (облаке точек) очаговой зоны (в пределах которой происходит наибольшая концентрация очагов микроразрушений) вся зона контроля разбивается на равные кубы со стороной 10 м, и вычисляется количество точек, попавших в каждый куб. Куб, в котором насчитывается наибольшее количество точек, принимается за эпицентр ААЗ. Если в нескольких кубах насчитывается равное или близкое по количеству точек, то в таком случае учитывается несколько центров и считается, что ААЗ содержит несколько областей концентрации напряжений. Далее усредняют координаты точек, попавших в выделенный куб, и вокруг полученной средней точки (эпицентра) строят шар U радиусом $R_0 = 20$ м. Таким образом, мы ограничиваем объем выборки данных для расчета, предполагая, что попавшие в шар точки $S_1...S_n$ будут иметь наибольшую связность, чем остальные точки за границей шара. Это предположение основано на натурных наблюдениях за формированием ААЗ в массиве месторождения Антей.

Вычислив минимальные расстояния *r_i* между всеми точками в области шара *U*, строится ряд минимальных значений, рисунок 3.2.2 [25]:

$$r_{i} = \min_{1 \le j \ne i \le n} \rho(S_{i}, S_{j}) = \sqrt{(x_{i} - x_{j})^{2} + (y_{i} - y_{j})^{2} + (z_{i} - z_{j})^{2}}.$$
 (3.1)

Из полученного ряда значений r_i удаляют точки, минимальное расстояние у которых до соседних точек $r_i \leq a = 10$ м. Без ограничения общности, в наборе остаются точки $S_1...S_P$, расстояния от которых до ближайшей точки не превышают 10 м, и они распределяются в большей своей части в интервалах до 6 м, рисунок 3.2.3.

Так, в выборку облака точек за период мониторинга с 01.05 по 01.11.2011 попало 808 АЭ-событий, после построения сферы *U* в выборке осталось 495 (61 %) точек.

Полученные в процессе преобразования точки $S_1...S_P$ являются точками (случайного) пуассоновского потока интенсивности λ в сфере радиусом R_0 . Оценим их среднее минимальное расстояние M_r до остальных точек в потоке величиной \hat{r} :

$$M_{r} = \int_{0}^{\infty} \exp(\frac{-4\pi\lambda R^{3}}{3}) dR = \frac{4\pi\lambda R^{3}}{3} = x^{3} = \Gamma \frac{4}{3} \cdot dx (\frac{4\pi\lambda R^{3}}{3})^{-1/3}.$$
 (3.2)



Рисунок 3.2.2 – Распределение значений *r_i* АЭ-событий всего «облака точек», зарегистрированных в период с 01.01.2010 по 01.03.2013



Рисунок 3.2.3 – Распределение r_i по интервалам в выборке $S_1...S_P$

Если заменить выражение графа Г(4/3) его приближенным значением 0,89298 и λ

— ее оценкой
$$\lambda = \frac{\rho}{\frac{4\pi\lambda R_0^3}{3}}$$
, то выражение M_r примет вид \hat{r} :
 $\hat{r} = \frac{0.89298 \cdot R_0}{p^{1/3}} = \frac{0.89298 \cdot 20}{p^{1/3}}$. (3.3)

Далее формируется матрица *А* по расстояниям между точками или матрица попарных расстояний между отобранными точками, переходя от (случайного) пуассоновского потока точек к случайному графу:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \Big|_{i,j=1}^{\rho} .$$
(3.5)

Для подобных случайных графов известно, что при устремлении числа точек к бесконечности вероятность связности стремится к единице (теорема Эрдеши-Реньи), а это значит, что выделяются компонента связности у большого числа точек и несколько мелких компонент связности [84]. Объединение теоремы Эрдеши-Реньи с результатами по Булевой модели (пуассоновским потоком точек) с позиции математического анализ, впервые применяется в области выделения связности точек в облаке АЭ-событий и является новшеством для сейсмоакустического мониторинга.

Далее для доказательства указанной выше гипотезы о связанности между собой отобранных точек по r_i , обратимся к основам теории связности графов [2, 3, 84, 135], преобразуя полученную матрицу A в 0/1 матрицу $A = \|a_{i,j}\|_{i,j=1}^{\rho}$, где $a_{ij} = 1$, если расстояние между двумя точками меньше $L_i + L_j$, $a_{ij} = 0$, если расстояние между двумя точками меньше $L_i + L_j$, $a_{ij} = 0$, если расстояние между двумя точками меньше $L_i + L_j$.

Рассмотрим матрицу A, как матрицу смежности некоторого неориентированного графа G без петель и кратных ребер (связности) с вершинами 1...*р*. Между вершинами (точками) *i*, *j* существует ребро (связь) тогда и только тогда, когда (*i*, *j*) элемент матрицы смежности A равен 1.

Далее в графе G определяем компоненты связности путем вычисления матрицы связности. Для этого вычисляем $t = [log_2 p] + 1$. После чего определяем матрицу A_t . с помощью рекуррентной процедуры.

$$A_{1} = A \otimes A, A_{2} = A_{1}, \dots, A_{t} = A_{t-1} \otimes A_{t-1}.$$
(3.6)

Таким образом, вычислив матрицу A_t выделим максимальную («гигантскую») компоненту связности, в которую входят точки $S_1...S_l$. Выделенные точки $S_1...S_l$ по этому признаку (гигантской компоненты) образуют собой ОЗ (кластер). Каждая точка из ряда $S_1...S_l$ имеет высокий коэффициент связности, чем отличается от других точек в ряду с минимальными расстояниями.

Рассмотренная выше методика базируется на утверждении о наличии связности между АЭ-событиями, которые формируют ААЗ и которая рассчитывается с применением методов теории графов G, путем преобразования минимальных расстояний между точками в облаке. Выделенные из облака точки образуют очаговую зону, которая образуется крайними точками в пространстве, как многогранное и выпуклое геометрическое тело. Пример выделения очаговых зон по результатам наблюдений в период июля и августа 2012 г., когда была зафиксирована серия толчков в блоке 6а-1102, приведен на рисунке 3.2.4.



Рисунок 3.2.4 – Пространственное распределение сейсмоакустических событий, зарегистрированных в массиве месторождения Антей в июле и августе 2012 г.^{*}

Таким образом, по результатам исследований разработана и программно реализована методика выделения формирующихся В массиве потенциально удароопасных очаговых 30H, базирующаяся на теории случайных графов С использованием установленной компоненты связности [92]. На основе анализа данных геоакустического мониторинга на глубоких горизонтах месторождения Антей установлено, что ААЗ характеризуется рядом параметров, по изменению которых можно судить о геомеханическом состоянии контролируемого массива горных пород.

^{*} Сферы красного цвета образуют очаговую зону из всей совокупности облака АЭ-событий.

3.3 Закономерности изменения значений параметров ААЗ в зависимости от геомеханического состояния массива горных пород

По результатам геоакустического контроля в период с 2006 по 2013 годы был проведен ретроспективный анализ, который показал, что АЭ-события распределяются по контуру выработанного пространства с концентрацией локальных очаговых зон в целиках блоков ба-1006, ба-1102 и ба1110, рисунок 3.3.1. Массив горных пород указанных блоков расположен в рудовмещающем тектоническом клине валообразного фундамента и занимает около половины объема тела лейкократовых гранитов. Породы в указанных блоках отличаются повышенным содержанием кварца и поэтому характеризуются как наиболее удароопасные зоны на месторождении.



Рисунок 3.3.1 – Пространственное распределение очагов АЭ-событий в массиве месторождения Антей за период 2010 г. (проекция на вертикальную плоскость)

Блок 6а-1110 характеризуется более сложной горнотехнической обстановкой, во многом обусловленной приуроченностью к участку «сближения» рудоконтролирующих разломов 13 и 160 [см. п.2.1, п.2.2]. Основным концентратором высоких напряжений в блоке является недоработанный рудный целик (с 11 по 18 слой), где с февраля 2010 г. наблюдалось существенное увеличение уровня акустической активности, а число АЭ-

событий в блоке 6а-1110 в отдельные месяцы превышало 200 ед. В 2010 году количество проявлений горного давления в блоке составило 41% от общего числа зарегистрированных на месторождении проявлений. Важной особенностью является то, что высокая акустическая активность наблюдалась в целике отработанного блока за пределами активного фронта ведения горных работ, так как добычные и проходческие работы в блоке 6а-1110 были остановлены еще в 2009 году.

В блоке 6а-1110 также было зафиксировано 4 из 10 проявлений в форме техногенной сейсмичности, которые сопровождались выделением высокой энергии, сотрясением массива горных пород и в нескольких случаях — сотрясением поверхностного комплекса рудника, таблица 3.3.1. Толчки также сопровождались деформированием закладочного и рудного массива в участке мониторинга, горизонтальные смещения реперов между разломами 13 и 160 составляли десятки миллиметров, рисунок 3.3.2.

Таблица 3.3.1 – Сильные динамические проявления горного давления, на месторождении Антей

Дата	Вид динамического проявления	Акустическая энергия события, Дж	Место проявления
16.02.2010	Толчок	2857	блок 6а-1110, целик
18.02.2010	Толчок	_	6а-1006, целик
28.03.2010	Толчок	1474	6а-906, целик
01.04.2010	Толчок	—	—
14.04.2010	Толчок	430	6а-1212, целик
14.04.2010	Толчок	2750	6а-1212, целик
04.06.2010	Толчок	1100	6а-1110, целик
12.06.2010	Толчок	935	граница 6а-1110/1102
11.11.2010	Толчок	887	6а-1110, целик
25.11.2010	Толчок	—	6а-1212, целик
29.01.2011	Горный удар	2257	6а-1110, целик
07.05.2011	Толчок	—	граница 6а-1110/1102
31.05.2011	Горный удар	5712	граница 6а-1110/1102
16.01.2012	Толчок	2596	граница 6а-1110/1102
25.04.2012	Толчок	4432	граница 6а-1110/1102
09.07.2012	Толчок	1236	граница 6а-1110/1102
18.07.2012	Толчок	874	граница 6а-1110/1102
04.08.2012	4 Толчка	810, 960, 400, 2150	граница 6а-1110/1102
12.03.2013	Толчок	10200	граница ба-1110/1102
14.03.2013	Толчок	1450	граница 6а-1110/1102

Так, 29.01.2011 г. произошел горный удар в блоке 6а-1110. Это сопровождалось сотрясением поверхностного комплекса рудника, разрушением горных выработок в блоке. На протяжении 80 метров в 11 слоевом орте (разгрузочный штр. №1) была вспучена почва, разрушена крепь, с правого борта произошел выброс горной массы в объеме более 10 м³. АСКГД регистрировала резкий всплеск АЭ-событий в период проведения взрывных работ и после него.

Источник динамического проявления горного давления лоцировался в непосредственной близости к месту выброса горной массы. Энергетический показатель АЭ-события составил 1250 Дж, что на порядок выше энергии АЭ от технологического взрыва одного заряда ВВ при проходческих работах в зоне контроля.



Рисунок 3.3.2 – Пространственное распределение очагов динамических явлений в районе блоков 6а-1110, 1102 и 1006

После динамического проявления в 60 метрах от места локации горного удара на границе блока ба-1110 начала интенсивно формироваться акустически активная зона. За сутки после проявления очаговая зона размером 20 х 20 х 20 м насчитывала более 110 АЭ-событий энергией от 10 до 100 Дж.

Анализ причин и факторов динамических проявлений показал, что очаги наиболее крупных из них пространственно приурочены к двум очистным блокам ба-1110 и ба-1102, где сформированные межполублочные целики явились концентраторами высоких напряжений. Особенно это проявлялось на участке сближения тектонических разломов 13 и 160.

Одними из последних случаев сильных динамических проявлений были 4 следующие друг за другом толчка с акустической энергией от 400 до 2150 Дж, зафиксированные 4 августа 2012 года во время подготовительных работ по разгрузке удароопасного массива в блоке 6а-1102. Они сопровождались резким сильным звуком, пылеобразованием и сотрясением массива. В результате этих динамических явлений было полностью разрушено 18 из 40 разгрузочных скважин, пробуренных в целике блока 6а-1102.

Очередное сильное динамическое явление в глубине массива, сопровождающееся сотрясением зданий поверхностного комплекса «ПУР-1», было зафиксировано 12 марта 2013 года в 22 часа 09 минут. В это время рабочие в заходке 4 на слое 17 блока ба-1006 услышали очень громкий звук, ощутили резкий толчок в почве горной выработки, сотрясение массива, после чего по горным выработкам поднялась пыль. Акустическая энергия этого события составила 10200 Дж, что является максимальным значением за все время наблюдений с 2006 г. Визуальный осмотр горных выработок в указанном участке массива не выявил каких-либо разрушений, кроме осыпания бортов и кровли выработок по контактам пород в Разгрузочном штреке блока ба-1006.

Спустя двое суток, 14 марта 2013 г. в 20 часов 46 минут был зафиксирован очередной толчок. Горнорабочие смены, находясь на 17 слое блока ба-1006, услышали громкий щелчок и ощутили толчок в почве горной выработки. По результатам геоакустического мониторинга АСКГД было зафиксировано сейсмическое событие с энергией 1455 Дж.

Обобщением данных сейсмоакустического мониторинга наиболее мощных динамических проявлений, зафиксированных на глубоких горизонтах месторождения Антей, установлено, что к ухудшению геомеханической ситуации на отдельных участках приводят следующие факторы: увеличение числа сейсмоакустических событий и количества упругой энергии, выделяемой в пределах ААЗ; сокращение расстояния и времени между регистрируемыми в этот период времени очагами АЭ-событий; уменьшение скорости миграции ААЗ [2, 5, 6, 92, 146 и др.].

Остановимся подробнее на особенностях формирования акустически активных зон, выявленных по результатам анализа данных геоакустического мониторинга на

месторождении Антей в период с 2006 по 2014 год, в том числе данных по ряду мощных динамических проявлений горного давления в виде сотрясений и горных ударов.

В ходе анализа распределения числа событий во времени отмечено, что общий характер проявлений представляется в волнообразной форме, и за несколько суток до опасных проявлений горного давления наблюдается затухающий характер деструкции массива, что проявляется в форме уменьшения числа событий на графике. Так, за период наблюдений со второй половины 2006 г. по конец 2007 г. в зоне контроля месторождения Антей было зарегистрировано более 1 тыс. акустических событий. На рисунке 3.3.3 показана карта, построенная по результатам геоакустического мониторинга и отражающая процесс перераспределения напряжений в различных участках массива и элементах горных конструкций, находящихся под влиянием ряда горнотехнических факторов.



Рисунок 3.3.3 – Распределение очагов акустических импульсов, зарегистрированных в октябре-ноябре 2006 г. в массиве горных пород месторождения Антей (в проекции на план XI горизонта)

Сложная геомеханическая ситуация складывалась в районе блока ба-1110, приуроченного к участку сближения рудоконтролирующих тектонических швов 13 и 160, где ранее неоднократно отмечались динамические проявления горного давления. Особенно высокая акустическая активность на этом участке наблюдалась после проведения взрывных работ. По данным с акселерометра №15, установленного в борту орта ба-1106 в непосредственной близости от места ведения буровзрывных работ было

выявлено, что длительность времени спада акустической активности после проведения взрывных работ составляла 1-2 часа, а сам этот процесс носил волнообразный характер [67], рисунок 3.3.4.



Рисунок 3.3.4 – Изменение интенсивности АЭ, зарегистрированной 22.02.2007 приемным преобразователем № 15 после взрывных работ на 18 слое блока 6а-1110

Так, в ночную смену 21.11.2006 г. было зарегистрировано повышение акустической активности перед динамическим проявлением, который произошел в 2 часа 25 минут в целике между 6 и 9 слоями блока ба-1110 и сопровождался сотрясением массива и вспучиванием на 0,3 м почвы 6 слоя. На фоне мелких (менее 1 Дж) акустических импульсов за 1,5 часа до динамического проявления оператор фиксировал 2 серии АЭ-событий, следовавших через 10 минут одна от другой, рисунок 3.3.5.

При примерно одинаковом числе импульсов в сериях (21 и 20 импульсов, соответственно) во второй серии наблюдалось значительное, более чем в 3 раза, увеличение энергии, рисунок 3.3.6. Такой характер акустической активности указывает на начало процесса формирования очаговой зоны, в которой происходит слияние мелких дефектов в более крупные разрывы. Критическое накопление разрывных деформаций (трещин) привело через 1,5 часа к разрушению участка массива в виде толчка.



Рисунок 3.3.5 – Изменение акустической активности перед динамическим проявлением 21.11.2006 г. в блоке ба-1110 месторождения Антей



Рисунок 3.3.6 – Характер изменения акустической энергии АЭ импульсов в сериях, зарегистрированных в 1 час 10 минут (*a*) и 1 час 13 минут (*б*) перед толчком 21.11.2006 г.

Полученные результаты измерительно-вычислительного комплекса в условиях данного месторождения свидетельствуют о возможности с его помощью получать информацию 0 геодинамических геомеханических процессах, определять И местоположение И энергетические показатели источников излучения AЭ В разрабатываемом массиве.

Таким образом, были получены новые данные об особенностях формирования очага разрушения в удароопасном массиве, которые характеризуются циклическим ростом акустической энергии в эмиссионных сериях и наличием периода латентного

накопления потенциальной энергии в очаге, что предшествует динамическому проявлению горного давления.

В результате анализа данных геоакустических наблюдений на месторождении Антей была установлена еще одна из особенностей формирования акустически активных зон, которая заключается в пространственном перемещении их центра в зависимости от геомеханического состояния массива.

Так, во второй половине 2006 года в отработку глубоких горизонтов месторождения был введен блок ба-1110, в котором планировалось пройти 20 слоевых ортов по рудному телу с закладкой выработанного пространства твердеющей смесью [11]. Блок ба-1110 характеризуется сложными горнотехническими и горногеологическими условиями, в числе которых — сближение рудоконтролирующих разломов и включения разномодульных пород [15].

В октябре 2006 г очаговую зону фиксировали на участке пересечения разломов 13 и 160 с ортом 6а-1006. Визуально в орте 6а-1110 наблюдали интенсивное заколообразование по кровле геологоразведочного штрека на 20 слое блока, что подтверждалось данными мониторинга АСКГД. Во время отработки блока 6а-1110 происходило перераспределение напряжений, что вызывало интенсивное смещение центра акустически активной зоны. Процессы миграции центров ААЗ в блоке сопровождались проявлениями горного давления, в том числе интенсивными заколообразованиями, щелчками в массиве, разрушениями закладки, а скорость миграции составляла до 22 м/сут.

С ноября 2009 по май 2010 года в блоке 6а-1110 регистрировалось превышение средних значений по количеству и доли АЭ событий, что составило 30% от общего числа зарегистрированных АЭ-событий в пределах всей зоны контроля. Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной удароопасности данного участка массива.

В дальнейшем, по данным 2009 г., наиболее интенсивно процесс формирования ААЗ протекал в районе соседнего блока 6а-1006 в этаже между IX и X горизонтами. Зародившись в районе 6 слоя в лежачем боку рудного тела, по мере отработки блока ба-1006 акустически активная зона в I-III кварталах 2009 г. разнонаправлено перемещалась со средней скоростью 8-12 м/месяц, рисунок 3.3.7. Анализ горнотехнических и горногеологических условий показал, что на характер миграции ААЗ оказывает влияние не только сложная геометрия выработанного пространства и направление фронта очистных работ, но и особенности тектонической структуры массива и неоднородность природнотехногенного поля напряжений.



Рисунок 3.3.7 – Характер и направление миграции акустически активной зоны в массиве месторождения Антей по данным геоакустического мониторинга в I-III кв. 2009 г. (диаметр окружности соответствует суммарной энергии АЭ-событий в ААЗ)

В разные периоды наблюдений, совпадающие с активизацией процесса миграции AA3, в пределах последней насчитывалось от 10 до 20 и более очагов близко расположенных АЭ-событий. Объем очаговой зоны в разные месяцы изменялся от 25 до 101 м³, а удельная энергия — от 1,7 до 26,6 Дж/м³.

Так, было установлено, что при понижении скорости миграции ААЗ происходит увеличение количества излучаемой массивом акустической энергии и рост удельной энергии. Подобную динамику отражает диаграмма параметров активных зон на рисунке 3.3.8. С февраля по июнь наблюдалось снижение уровня суммарной энергии в 10 раз, а скорость перемещения наоборот возросла в 4 раза.

Суммарная энергия очаговой зоны является весьма перспективным параметром AA3 и характеризует собой процесс слияния микротрещин в более крупные с образованием магистральных разрывов, при этом повышается акустическая энергия источника [88]. Повышение уровня суммарной энергии указывает на процесс формирования техногенных полей напряжений опасных по проявлениям горных ударов.



^{■ ∆}S*100, м/сут ■ Е, Дж

Рисунок 3.3.8 – Взаимосвязь скорости миграции и суммарной энергии ААЗ в период I-III квартал 2009 г. по результатам геоакустического мониторинга в блоке ба-1006

Результаты регионального контроля удароопасности достаточно часто находили подтверждение при оценке удароопасности локальными методами, в том числе с использованием аппаратуры СБ32М «Сапфир». Такая корреляция, в частности, отмечалась при измерении естественной акустической активности в районе блока ба-1006 и некоторых других участках ведения горных работ. В октябре 2009 г. в забое на 9 слое блока ба-1006 неоднократно регистрировалось повышение интенсивности АЭ. В отдельные периоды интенсивность АЭ достигала 60 импульсов/мин., что являлось основанием для закрытия отрабатываемого участка.

Важную роль в понимании геомеханических процессов на стадиях подготовки и непосредственно самого горного удара дал анализ распределения очагов разрушения, зарегистрированных 29.01.2011 г., когда в течение суток произошло 340 АЭ-событий, суммарная энергия которых превысила 6800 Дж, рисунок 3.3.9.

По результатам анализа данных мониторинга в период горного удара 29.01.2011 были выявлены предвестники и уточнен механизм динамического явления, связанный с неравномерным перемещением тела тектонического клина в результате подработки его вертикальной опоры — места стыковки разломов № 160 и № 13. После разрушения левой стыковочной части рудного целика на контакте лейкократовых и биотитовых гранитов акустически активная зона переместилась в сторону блока 6а-1102 и частично

— блока 6а-1006, где в течение суток после горного удара происходило интенсивное трещинообразование горных пород.



Рисунок 3.3.9 – Распределение АЭ-событий, зарегистрированных на месторождении Антей до и после горного удара 29.01.2011 г.

В результате анализа особенностей поведения ААЗ в течение суток 29.01.2011 установлено появление серий близкорасположенных, следующих друг за другом, мощных геодинамических событий, среди которых присутствуют сильные с большой энергией сейсмоакустические проявления. Такой характер акустической активности массива свидетельствует переходе ко второй (предразрушающей) 0 стадии формирования очагов разрушений, на которой происходит когерентное накопление повреждений кластеризация Близкорасположенные трещин. макротрещины И объединяются в более крупные разрывы (протяженностью от десятков сантиметров до первых метров), а сам этот процесс сопровождается выделением значительной энергии, рисунок 3.3.10.

Особенность проявления акустической активности на нижних горизонтах месторождения заключается в формировании на отдельных наиболее напряженных

участках массива долгоживущих ААЗ, разнонаправлено перемещающихся со средней скоростью 22 м/месяц, рисунок 3.3.10. Анализ экспериментальных данных показывает, что на характер миграции ААЗ оказывает влияние не только сложная геометрия выработанного пространства и направление фронта очистных работ, но и особенности тектонической структуры массива и неоднородность природно-техногенного поля напряжений.



 места динамических проявлений горного давления; 2 – направление ежемесячной миграции акустически активных зон; 3 – положение центра ААЗ и количество выделившейся в ее пределах энергии (в Дж)

Рисунок 3.3.10 – Положение и направление миграции акустически активных зон в массиве месторождения Антей в 2010-2011 гг.

Весьма представительный материал был получен в результате анализа данных геомеханического мониторинга за период наблюдения май 2011 года, когда было зафиксировано два толчка 7 и 31 мая. Первый зарегистрирован спустя 10 часов после взрывной разгрузки целика в блоке 6а-1006, а второе динамическое проявление стало одним из сильнейших зарегистрированных на месторождении за последние 5 лет. Энергетический показатель АЭ-события составил более 5700 Причиной Дж. динамического проявления горного давления, очаг которого находился в целике на и ба-1110, явилось формирование области высокой границе блоков 6a-1102 концентрации напряжений в центральной части рудного целика блоков 6а-1106 и ба-1102, обусловленное снижением его несущей способности после взрывной разгрузки в

этаже 120...135 м блока ба-1106. Разрушение центральной части целика проявилось в виде мощного сейсмического явления и ощущалось в поверхностном комплексе рудника, рисунок 3.3.2.

Анализ данных, полученных в период мая 2011 года, показал характерные изменения значений скорости миграции AA3 по графику за несколько дней до сильных динамических проявлений. На рисунке 3.3.11 показаны изменения скорости миграции очаговой зоны v_{a3} в блоках ба-1110 и ба-1102 в мае 2011 г.



Рисунок 3.3.11 – Изменение показателей скорости миграции очаговой зоны в блоке 6а-1110 и количества АЭ-событий в ОЗ в мае 2011 г.

По графику видно, что минимальная скорость миграции очаговой зоны имела место непосредственно перед 7, 20, 27 и 31 мая, в то же время значение числа АЭсобытий в очаговой зоне увеличивается. Стоит предположить, что показатель скорости миграции центра очаговой зоны характеризует процесс формирования в участке массива зоны концентрации напряжений. Так, при высокой скорости миграции происходит перераспределение напряжений, а при снижении скорости — концентрация напряжений в участке массива с дальнейшим геодинамическим проявлением.

В то же время, зависимость суммарной энергии от количества АЭ-событий не всегда прослеживается по данным геоакустического контроля в период мая 2011 года, рисунок 3.3.12. Нередки случаи, когда рост количества событий не сопровождается повышением уровня их суммарной акустической энергии. Такие периоды совпадают с процессами релаксации массива, формированием поля напряжений и повышением скорости миграции очаговой зоны.



Подобные явления миграции отмечает в своих работах Опарин В.Н. [4, 62], выделяя наличие связи между отдельными актами сейсмоэмиссии из массива горных пород, и предлагает использовать метод «кажущихся» скоростей. Сущность этого метода заключается в следующем. Весь каталог сейсмособытий представляется в виде последовательности, упорядоченной по времени проявления этих сейсмособытий. В качестве информативных характеристик ниже определяются и используются:

 – «кажущаяся» скорость миграции отдельных сейсмособытий для упорядоченных по времени последовательностей их проявления;

– среднемесячная скорость миграции приведенного центра сейсмоэнерговыделения для контролируемых зон массива.

В расчете этих характеристик заключается метод «кажущихся» скоростей, сущность которого состоит в следующем. Вследствие локального перераспределения напряженного состояния возникают сейсмоэмиссионные проявления, изменение пространственного положения которых показывает направление и скорость волны смещения или деформации. Опарин В.Н. считает, что значительные проявления с высоким энерговыделением активируют более мелкие события. Скорость миграции центра энерговыделения V_E определяется по разнице координат между текущим сейсмособытием и средней координатой всех сейсмособытий, зарегистрированных в участке массива за 30 сут. к времени между ними. Среднемесячную скорость *V_E* миграции центра сейсмособытий вычисляем по формуле:

$$V_E = \sqrt{(x_{i+1} - x_i) + (y_{i+1} - y_i) + (z_{i+1} - z_i)} / (\Delta t_0) , \qquad (3.7)$$

где $i = 1, ..., 11; \Delta t_0$ – время (30 · 24 · 3600), сек, $x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_j, y_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} y_j,$ $z_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} z_j,$

где x_j, y_j, z_j – координаты *i*-го сейсмособытия; N – количество сейсмособытий за месяц.

Для более мелких событий рассчитывается своя «кажущаяся» скорость миграции *i*-го сейсмособытия V_{κ} , использующая дистанцию от эпицентра последнего мощного сейсмособытия до текущего мелкого события, и определяется по формуле:

$$V_{\kappa} = \frac{\sqrt{(x_i - x_0) + (y_i - y_0) + (z - z_0)}}{t_i - t_0},$$
(3.8)

где t_i , x_i , y_i , z_i – время и координаты *i*-го сейсмособытия; t_0 , x_0 , y_0 , z_0 – время и координаты крупного инициирующего сейсмособытия, которое повлекло за собой ряд мелких по энергоемкости сейсмособытий.

Расчет скоростей вызывает определенную сложность, так как автоматизация процесса выделения групп сейсмособытий для вычисления «кажущихся» скоростей затруднена из-за того, что динамический диапазон сейсмособытий по энергии весьма большой, инициирующее сейсмособытие само может быть инициируемым, когда является афтершоком более крупного сейсмособытия; число сейсмособытий достаточно велико (превышает 11000 в год). В настоящее время выделение таких групп производится вручную, а расчет скоростей выполняется в электронной таблице Excel.

Опарин В.Н. считает, что определение и анализ кинематических характеристик сейсмических процессов в массивах горных пород занимают важное место в оценках геомеханической или геодинамической обстановки. Пространственные и временные параметры распределения динамических проявлений, их интегральные характеристики позволяют оценить геомеханическое состояние отдельных участков горного массива.

Данный метод не совсем подходит для регулярных геоакустических наблюдений, по причине регистрации гораздо большего числа проявлений, чем в сейсмике и микросейсмике Норильских рудников. Определить инициирующее АЭ-событие из сотен мелких проявлений на фоне быстропротекающих процессов и в выбранном диапазоне частот не представляется возможным на данном этапе исследований.

Приведенные выше особенности позволяют предположить, что выявленные параметры AA3 в виде скорости миграции, суммарной энергии и количества AЭсобытий в совокупности могут служить прогностическими критериями удароопасности [2, 5, 6, 67, 90, 92].

Так, анализ экспериментальных данных позволил выявить еще ряд важных особенностей формирования геоакустических волновых полей в разрабатываемом горном массиве, а также составить практически значимое представление о его геодинамическом состоянии.

Дальнейшее исследование данных геоакустического мониторинга показало, что усложнение геомеханической ситуации на отдельных участках массива сопровождается увеличением числа АЭ-событий, ростом выделяемой массивом упругой энергии и сгущением координат или сокращением расстояния между регистрируемыми в этот период времени очагами АЭ-событий (концентрацией).

Так, по результатам геоакустических наблюдений в период мая 2011 года было установлено, что незадолго до сильных динамических проявлений происходит концентрация АЭ-событий. Это выражается в сокращении дистанции между регистрируемыми друг за другом АЭ-событиями, рисунок 3.3.13.

Приведенный параметр R_{cp} весьма специфически реагирует на состояние массива горных пород. Так, при наличии единственной области концентрации напряжений в очаговой зоне, значение параметра R_{cp} будет уменьшаться накануне динамического проявления, указывая на концентрацию АЭ-событий в очаговой зоне, как было зафиксировано перед толчком 7 мая 2011 года. Совсем другое поведение значений параметра R_{cp} , если в очаговой зоне возникает несколько близко расположенных зон концентрации (обширной деструкции). В этом случае R_{cp} не объективно отражает концентрацию и требуется интерпретация ситуации по другим параметрам ААЗ.


Рисунок 3.3.13 – Изменение показателей Rcp и числа АЭ-событий в ОЗ зарегистрированных в блоке 6а-1110 месторождения Антей в мае 2011 г.

Кроме пространственных особенностей поведения ААЗ необходимо учитывать и его временные особенности. Одним из показателей, характеризующих геомеханическое состояние массива, является временной интервал между зарегистрированными АЭ-событиями [47, 131]. Уменьшение временного интервала между событиями указывает на интенсивность процесса разрушения и потерю устойчивости массива горных пород. К такому выводу склоняются ученые, занимающиеся проблемами в сейсмологии и техногенной сейсмичности [91, 129, 88, 13, 114, 115].

Детальный анализ данных геоакустического мониторинга по случаю динамических проявлений в форме толчка и горного удара, зарегистрированных в мае 2011 года, показал, что накануне мощных проявлений горного давления фиксируется уменьшение временного интервала между последовательными АЭ-событиями в очаговой зоне, рисунок 3.3.14. Как показал анализ значений временного параметра ААЗ по всем случаям динамических проявлений, зарегистрированных на месторождении Антей в период с 2006 года, в 89% случаев он снижается по сравнению с предыдущим периодом, из них в 53% случаев временной параметр за 1-2 суток до проявления резко повышается. Указанная особенность объясняется появлением эффекта «затишья» накануне проявления [2, 5, 6].



Рисунок 3.3.14 – Изменение показателей временного интервала в десятичных долях и числа АЭ-событий в ААЗ, зарегистрированных блоке ба-1110 месторождения Антей в мае 2011 г.

Анализ графиков по наиболее крупным проявлениям за указанный выше период показал, что в большинстве зарегистрированных АСКГД случаев за 1-2 суток до момента динамического проявления регистрируется эффект «затишья» массива горных пород. В указанный период суток происходит снижение значений показателей N_{o3} и E_{a3} , следовательно изменяются v_{a3} , t_0 и R_{cp} . Подобные явления в массиве горных пород также регистрируют на удароопасных рудниках ОАО «СУБР» и «Апатиты», где особенно интенсивно проявляется техногенная сейсмичность [27]. По данным сотрудников ИВиС ДВО РАН и КФГС РАН эффект «затишья» также фиксируется в сейсмическом режиме Камчатского полуострова и является надежным предвестником землетрясений [12, 58, 115].

Таким образом, экспериментально установлено, что накануне опасных динамических проявлений горного давления наблюдается уменьшение временного интервала между АЭ-событиями (t_{d}). Полученный параметр указывает на ухудшение геомеханического состояния участка массива горных пород.

Для прогнозирования удароопасности с применением предложенных показателей (суммарной энергии в активной зоне (E_{a3}), количества АЭ-событий в активной зоне (N_{a3}), среднего расстояния между последующими АЭ-событиями (R_{cpp}), временного интервала между последующими АЭ-событиями (t_{cpp}) и скорости миграции центра

активной зоны (*v*_{*a*3})) важно определить границы и геометрические параметры (в первую очередь — объем) акустически активных зон.

Объем очаговой зоны, занимаемой связанными и выделенными из общей совокупности АЭ-событиями из ААЗ [п.3,2], можно выразить алгоритмом, который заключается в следующем. Каждая из выделенных точек окружается минимальным прямоугольным параллелепипедом, отделяющим эту точку от точек, попавших в шар, но не попавших в максимальную компоненту связности. В результате все точки, образующие ОЗ, окажутся ограниченными гранями минимальных параллелепипедов.

Так, каждый параллелепипед U_i состоит из точек х,у,z, удовлетворяющих неравенству $\underline{x}_i \le x \le \overline{x}_i, \underline{y}_i \le y \le \overline{y}_i, \underline{z}_i \le z \le \overline{z}_i$, где:

$$\underline{x}_{i} = \min(x_{j} \le x_{i} : x_{k} \notin [x_{j}, x_{i}], \quad 1 \le j \le l < k \le p$$

$$\underline{x}_{i} = \max(x_{j} \ge x_{i} : x_{k} \notin [x_{i}, x_{j}], \quad 1 \le j \le l < k \le p)$$

$$\underline{y}_{i} = \min(y_{j} \le y_{i} : yk \notin [y_{j}, y_{i}], \quad 1 \le j \le l < k \le p)$$

$$\overline{y}_{i} \max(y_{j} \ge y_{i} : yk \notin [y_{i}, y_{j}], \quad 1 \le j \le l < k \le p)$$

$$\underline{z}_{i} = \min(z_{j} \le z_{i} : z_{k} \notin [z_{j}, z_{i}], \quad 1 \le j \le l < k \le p)$$

$$\overline{z}_{i} = \max(z_{j} \ge z_{i} : \chi_{k} \notin [z_{i}, z_{j}], \quad 1 \le j \le l < k \le p)$$

Тогда суммарный объем параллелепипедов V, отделяющий точки $S_1,...,S_l$ от остальных точек AA3 $S_{l+1},...,S_p$, определяется равенством:

$$V = \sum_{i=1}^{s} (\overline{x}_i - \underline{x}_i)(\overline{y}_i - \underline{y}_i)(\overline{z}_i - \underline{z}_i).$$
(3.7)

Чтобы упростить визуализацию совокупности параллелепипедов, их описали каркасом по вершинам крайних углов так, что в результате было получено многогранное выпуклое геометрическое тело, рисунок 3.3.15. Объем очаговой зоны является важным параметром для оценки масштаба ее влияния на горные выработки. Так, используя указанные выше результаты расчетов, был проведен анализ изменения параметров ОЗ в период с 29 июля по 5 августа 2012 г., в пределах которого 04.08.2012 г. была зарегистрирована серия из 4 толчков, рисунок 3.3.16.



Рисунок 3.3.15 – Параметры очаговых зон, выделенных в блоках ба-1006 и ба-1102 месторождения Антей (по данным геоакустического контроля в период с 29 июля по 5 августа 2012 г.)



Рисунок 3.3.16 – Изменение показателей^{*} ААЗ перед серией мощных динамических проявлений 4 августа 2012 г. на месторождении Антей

По основной оси Y отложена суммарная энергия E_{o3} основной очаговой зоны (красная зона, рисунок 3.3.15), а по вспомогательной оси Y — ее нормированные параметры: скорость миграции (v_{o3}), временной интервал в десятичных долях (t_{d}), среднее расстояние от эпицентра (R_{cp}), число АЭ-событий (N_{o3}) и показатель объема (V_{o3}).

^{*} Все показатели нормированы к их средним значениям за 5 предыдущих суток.

Таким образом, установлены особенности изменения параметров AA3 в зависимости от геомеханического состояния массива горных пород, которые заключаются в следующем. Накануне опасного динамического проявления горного давления наблюдается рост числа АЭ-событий (N_{o3}), уменьшение среднеквадратичного расстояния (R_{cpp}) от источника до центра очаговой зоны (в случае одной O3), рост суммарной энергии (E_{a3}), уменьшение временного интервала между АЭ-событиями (t_{d}), значительное снижение скорости миграции (v_{a3}) очаговой зоны и уменьшение геометрического объема (V_{o3}), при условии наличия в AA3 одной очаговой зоны. В случае, когда регистрируется несколько очаговых зон, параметры R_{cp} и V_{o3} изменяются обратно пропорционально. Этот эффект объясняется общирным влиянием горного давления, в том числе — разрушением краевых частей напряженного участка массива. Подобные явления описывается в работах Виноградова С.Д. [13].

По результатам наблюдений за изменением параметров AA3 следует отметить, что приведенные выше параметры AA3 по отдельности не всегда позволяют объективно оценивать геомеханическое состояние контролируемого участка массива, поэтому была поставлена научная задача — разработать комплексный показатель удароопасности, который достаточно полно учитывал бы характер поведения каждого из параметров AA3 в разнообразных и изменяющихся горно-геологических и горнотехнических условиях разрабатываемого месторождения Антей.

Выводы к главе 3

1. Экспериментально установлено, что рациональная схема формирования наблюдательной сети приемных преобразователей для мониторинга удароопасных участков массива горных пород должна включать в себя множество комбинаций акселерометров в антенне, причём, наиболее эффективной и в меньшей степени зависящей от технологических помех в зоне контроля является схема, когда датчики в приемной антенне размещены по одну сторону от рудоконтролирующих тектонических нарушений и заложенных выработанных пространств. Обоснованы условия, при которых достигается максимальная точность локации источников АЭ-событий.

2. Разработанная и апробированная в результате многолетних инструментальных наблюдений в условиях действующего рудника «ПУР-1», основанная на комплексном учете ряда признаков технологических помех и условий геоконтроля методика

выделения АЭ-событий включает в себя ряд составных элементов, основным из которых является разработанный алгоритм выделения акустически активных зон, отражающих геомеханические процессы в разрабатываемом массиве горных пород. Предложенный и научно обоснованный метод обработки данных геоакустического мониторинга, базирующийся на использовании теории случайных графов и компонентах связности, позволяет выделять из общей совокупности АЭ-событий в ААЗ концентрацию связанных между собой АЭ-событий, которые образуют очаговую зону, параметры которой характерно изменяются накануне опасных проявлений горного давления.

3. особенности Выявленные проявления акустической активности И закономерности формирования очагов разрушения в массиве горных пород на различных стадиях подготовки геодинамических явлений, заключаются в характерном изменении параметров AA3, В зависимости ОТ геомеханического состояния контролируемого участка горного массива. Инструментально измерено и установлено, что изменение геомеханического состояния массива горных пород сопровождается ростом числа АЭ-событий, уменьшением среднеквадратичного расстояния от источника до центра активной зоны, ростом суммарного энергетического показателя, уменьшением временного интервала между АЭ-событиями, значительным снижением скорости миграции центра активной зоны и уменьшением ее геометрического объема.

Для 4. обеспечения надежного и достоверного прогноза динамических проявлений горного давления необходим комплексный учет выявленных И рассмотренных признаков изменения геомеханического состояния массива горных пород. Отсюда вытекает актуальная научная задача — разработка и совершенствование методики оценки геомеханического состояния геосреды с использованием комплексного учета ряда выявленных признаков удароопасности.

5. Предоставленные выше результаты изучения закономерностей формирования сейсмоакустической активности массива горных пород по данным геоакустического мониторинга позволили сформулировать второе научное положение:

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.

114

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ АНТЕЙ

4.1 Комплексный показатель удароопасности по данным геоакустического мониторинга массива горных пород месторождения

Поставленными задачами диссертационного исследования была определена необходимость углубленного изучения многофакторности условий и причин динамических проявлений горного давления на месторождении, а также выявления их предвестников и создания на этой основе эффективной методики комплексной оценки геомеханического состояния геосреды, что позволит повысить надежность прогноза опасных геодинамических явлений. Следовательно, для обеспечения надежного и достоверного прогноза динамических проявлений горного давления необходим комплексный учет ряда установленных по данным мониторинга признаков изменения геомеханического состояния массива горных пород.

В ранних работах Г.А. Курсакина и И.Ю. Рассказова, других сотрудников ИГД ДВО РАН, для оценки состояния массива горных пород на основе данных сейсмоакустической системы «Прогноз-5М» на Хинганском месторождении был предложен и использован интегральный показатель удароопасности Π_{yd} , который учитывал ряд признаков склонности массива горных пород к динамическим проявлениям горного давления. Среди признаков были параметры, полученные инструментально по данным «Прогноз-5М», а также признаки, численные значения которых рассчитывались вручную на основе эмпирических наблюдений и оценок горнотехнологической ситуации. Так, общий интегральный показатель удароопасности Π_{yd} [91] формировался совокупностью следующих признаков удароопасности (критериев):

– Близость активной зоны к обнажению — один из наиболее значимых признаков возникновения удароопасной ситуации. Согласно нормативной документации, приближение зоны концентрации к границам выработанного пространства является признаком формирования опасности проявления горного давления. Значение параметра рассчитывалось вручную по планам и разрезам горных выработок;

– Продолжительность спада акустической активности после технологических взрывов. Наблюдения за спадом акустической активности в зоне концентрации

напряжений является важным параметром, но его значение не всегда может быть получено из глубины массива;

 Концентрированность очагов АЭ в акустически активной зоне представляет собой отношение объема очаговой зоны к числу излученных этим участком массива акустических импульсов;

– Изменение соотношения интенсивности и энергии АЭ. Признаком неустойчивого (удароопасного) состояния массива может являться увеличение среднего уровня энергии АЭ-импульсов, характерного ранее для контролируемой активной зоны, а также регистрация импульсов с энергиями на один и более порядков выше средних;

– Скорость и направление миграции очагов АЭ. Данный критерий позволяет оценить динамику и направления развития активных зон. Чем выше скорость миграций очагов в зоне, тем интенсивнее течение геомеханических процессов в ее пределах;

Повторяемость периодов акустической активности и ее незатухающий характер.
 Незатухающий или медленно затухающий в течение более 10 суток характер акустической активности служит признаком удароопасности массива пород.
 (волнообразный характер акустической активности);

– Степень локализации источников АЭ-событий в активной зоне определяется как среднеквадратическое отклонение значений координат очагов акустических импульсов по осям X, Y, Z относительно центра активной зоны (плотность пространственного распределения);

– Суммарная длительность АЭ-активности. Данный критерий базируется на установленной зависимости продолжительности времени релаксации напряжений в горных породах от их свойств и геомеханических условий.

В соответствии с удельным весом каждого из критериев рассчитывалась их балльность и коэффициент, после чего сумма произведений баллов показателей на их коэффициент составляют интегральный показатель удароопасности Π_{yo} .

Количественные и качественные значения перечисленных критериев, являющихся элементами интегрального показателя удароопасности, определялись эмпирически для условий конкретного объекта контроля и уточнялись по мере накопления фактического материала. Все составляющие элементы, в зависимости от их значимости, имеют соответствующий удельный вес, оцениваемый баллами. Выражение для определения значения интегрального показателя удароопасности выглядит следующим образом:

116

$$\Pi_{y\partial} = \sum_{i=1}^{N} (K_i \cdot k_i), \qquad (4.1)$$

где K_i – значение i-го признака удароопасности, *баллы*;

 k_i – удельный вес соответствующего признака ($k_i = 0, 5..., 1, 5$), усл. ед.

Приведенная методика была апробирована на Хинганском руднике. Для условий его нижних горизонтов были установлены следующие значения интегрального показателя. Устойчивому (неопасному) состоянию массива горных пород в пределах активной зоны соответствуют значения показателя $\Pi_{yo} \le 2,5$. Значения $\Pi_{yo} = 2,5...5,4$ характеризуют переходное состояние горного массива, близкое ко II категории удароопасности. В случае, когда величина $\Pi_{yo} > 5,4$, массив считается неустойчивым (удароопасным), а горные работы на этом участке необходимо вести с применением специальных профилактических мероприятий.

Приведенная методика, при её полезности и учете ряда важных признаков, не может применяться для автоматического, программного расчета показателя удароопасности в современных системах без участия опытного исследователя. Учет всех факторов является крайне сложной задачей, требующей формализованного подхода, необходимого для создания автоматизированных систем контроля горного давления.

Используя опыт предшественников, основываясь на новых данных геоакустического мониторинга массива горных пород месторождения Антей, приведенных в разделе 3.3, необходимо решить новую задачу по оценке геомеханического состояния контролируемого участка массива, используя новые выявленные признаки удароопасности массива горных пород.

Так, характерными признаками изменения геомеханического состояния техногенной природной системы месторождения Антей по данным геоакустического мониторинга являются:

а) Рост суммарной энергии АЭ-событий в ААЗ ($\Sigma E \uparrow$), Дж. Повышение уровня энергии указывает на процессы кластеризации мелких трещин в более крупные разрывы, что указывает на процессы изменения состояния геосреды;

б) Увеличение числа АЭ-событий в ААЗ (N_{a_3} \uparrow), шт. Изменение числа АЭсобытий выражает интенсивность деструкции участка массива; в) Уменьшение временного интервала между АЭ-событиями ($t_{cpp} \downarrow$), с. Сокращение времени между проявлениями горного давления указывает на частоту регистрации АЭ-событий в контролируемом горном массиве;

г) Снижение скорости миграции центра AA3 ($v_{a3} \downarrow$), м/сут. Параметр позволяет оценить динамику AA3. Чем выше скорость миграций AA3, тем интенсивнее течение геомеханических процессов, таких как релаксация и распределение напряжений в ее пределах;

д) Уменьшение среднеквадратичного отклонения координаты источника АЭ от центра ААЗ ($R_{cpp} \downarrow$), м. Параметр указывает на плотность пространственного распределения источников АЭ относительно эпицентра ААЗ.

Основываясь на данных особенностях, был предложен и экспериментально проверен пробный показатель акустической активности R_E , представляющий собой посуточное отношение <u>натуральных</u> значений суммарной энергии и среднеквадратичного отклонения координат АЭ-событий от совокупного их эпицентра (R_{cpp}) за определенный интервал времени (сутки):

$$R_E = \frac{E_i}{R_{cpp}}; (4.2)$$

$$R_{cpp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\left(X_{Si} - X_{C}\right)^{2} + \left(Y_{Si} - Y_{C}\right)^{2} + \left(Z_{Si} - Z_{C}\right)^{2}}; \qquad (4.3)$$

$$E_{i} = \sum_{i=1}^{n} E_{Si} ; (4.4)$$

где Хс, Үс, Zс – координаты центра всей совокупности АЭ-событий за сутки;

Xs, Ys, Zs – координаты *i* очага АЭ-события по дате;

N – количество АЭ-событий, которые участвовали в образовании совокупного центра за текущие сутки (шт.);

E_i – суммарная энергия источников АЭ-событий за сутки (Дж);

 E_{Si} – энергия *i* очага АЭ-события по дате (Дж);

График, полученный по значениям показателя R_E , отражает качественноколичественный характер поведения массива. При концентрации АЭ-событий значение показателя начинает увеличиваться, указывая на интенсивную деструкцию массива горных пород, рисунок 4.1.1. Таким образом, при увеличении энергетического показателя АЭ-событий и образовании плотной очаговой зоны, график будет информировать ростом значения показателя. Если увеличится значение суммарной энергии АЭ-события и при этом R_{cp} остается неизменной или стремится к бесконечности, то АЭ-события — разрозненные между собой, и нет концентрации и накопления энергии в участке горного массива.



Рисунок 4.1.1 – Показатель *R_E*, рассчитанный по данным геоакустического мониторинга в период января 2011 г. (горный удар 29.01.2011 г.)

В процессе анализа выявлено, что значение показателя R_E интенсивно реагирует на изменение числа АЭ-событий, концентрацию очагов АЭ и суммарную энергию, но возникает также множество ложных и необоснованных повышений значения R_E . Например, по графику (рисунок 4.1.1) в период 27-29 января видно увеличение (горный удар зарегистрирован 29 числа), остальные случаи повышений 9, 13, 17-20, 22 и 25 не подтверждаются. Несмотря на недостаток, в одном случае график за 2 суток до мощного проявления горного давления имел тенденцию роста — стремление к максимуму, чем косвенно сигнализировал о наступлении стадии удароопасности.

Таким образом, было экспериментально подтверждено, что использовать совокупность отдельных признаков (параметров AA3), в том числе таких взаимосвязанных, как суммарная энергия и концентрация АЭ-событий, в натуральном виде и без преобразований нельзя. Поэтому для расчета комплексного показателя необходимо выявленные в гл. 3 параметры акустически активных зон привести к единому отрезку для математических преобразований, т.е. нормировать. Так, показатель суммарной энергии (E_{a3}) изменяется в диапазоне от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^4$ Дж, значения

временного интервала между событиями — от 2-5 сек. до 10 ч, количество АЭ-событий — от первых единиц до нескольких десятков шт., а скорость миграции — до нескольких десятков метров в сутки. Учитывая числовой порядок их значений, реальны такие ситуации, когда один параметр теряется в периоде значений другого и не дает видимой динамики значений комплексного показателя.

Применим другой подход, базирующийся на сравнении текущего значения параметра AA3 с предыдущими значениями периода мониторинга для оценки изменений параметра и остановимся подробнее на методике расчета параметров, приведению их к единичному отрезку (нормированию).

<u>Количество АЭ-событий в очаговой зоне (N_{03})</u>. В расчет количества событий идут только связанные АЭ-события, попавшие в очаговую зону за период мониторинга 5 предыдущих суток^{*}. После чего из общего набора данных (за период 5 сут. = 432000 с) отбираются АЭ-события за последние сутки (период 24 ч. = 86400 с). Далее их количество нормируется к максимальному значению за 5 суток (за период 432000 с):

$$\overline{N}_{03}^{i} = \frac{N_{i}}{\max N_{i-n}},\tag{4.5}$$

где n – число суток выборки данных, n = 5.

Полученное значение \overline{N}_{03}^{i} показывает, на сколько оно соответствует максимуму числа событий пяти предыдущих суток, и $\overline{N}_{03}^{i} \rightarrow 1$, если текущее значение числа событий увеличивается по сравнению с N_{03} предыдущего периода.

<u>Суммарная энергия АЭ-событий (E_{a_3})</u> Суммарная акустическая энергия источников рассчитывается подобно $\overline{N}_{o_3}^i$ (4.5) путем нормировки по значениям пяти предыдущих суток. Так, в случае, если E_{a_3} будет возрастать или будет зарегистрировано мощное динамическое проявление, то значение $\overline{E}_{o_3}^i \to 1$.

<u>Скорость миграции центра очаговой зоны $A\mathcal{P}(v_{a3})$ </u>. Данный параметр позволяет оценить динамику развития AA3. Чем выше скорость миграций очагов в зоне, тем интенсивнее протекают геомеханические процессы в ее пределах и, соответственно, ниже вероятность концентрации напряжений в контролируемом участке горного массива. Скорость миграции очаговой зоны определяется из выражения:

^{*} Количество суток, выбрано исходя из экспериментально установленных особенностей поведения данного массива горных пород накануне геодинамических проявлений. Период подготовки, «затишья», релаксации массива и проявления горного давления составляет не более 5 суток.

$$\upsilon_{i}^{a_{3}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{3} (x_{ki} - x_{kj})^{2}}}{\Delta T_{i-j}} , \quad M/cym, \quad (4.6)$$

где x_{ki} , x_{kj} – положения центра очаговой зоны текущей (i) и предыдущей (j),

соответственно, в декартовой системе координат (по осям X, Y, Z), м;

 ΔT_{i-i} – интервал времени выборки данных, *сут*.

После расчета скорости миграции ее значение сравнивается (нормируется) с максимальным значением пяти предыдущих суток, подобно \overline{N}_{03}^{i} (4.5).

Опарин В.Н. в своих работах [4, 62] приводит данные по «кажущимся» скоростям миграции сейсмособытий и доказывает состоятельность их комплексного параметра для прогноза динамических проявлений. В качестве комплексного диагностического показателя для оценки удароопасности массива горных пород предлагается использовать отношение скоростных характеристик во времени (см. п. 3.3):

$$\chi(t) = \frac{V_E}{V_{\kappa}}(t).$$

Опарину В.Н. удалось доказать, что отношение скоростей в пределах зон концентрации напряжений для шахтных полей (разделительные массивы, опорные и междукамерные целики) является важным показателем перехода контролируемых участков в удароопасное состояние. Но этот метод не подходит для регулярных геоакустических наблюдений по причине регистрации гораздо большего числа проявлений, чем регистрируется в сейсмических системах и микросейсмике Норильских рудников. Определить инициирующее АЭ-событие из сотен мелких проявлений на фоне быстропротекающих процессов и в выбранном диапазоне частот, не представляется возможным на данном этапе исследований.

<u>Концентрация источников АЭ</u> (R_{cpp}). Средний радиус распределения АЭ-событий от центра очаговой зоны характеризует плотность пространственного распределения источников АЭ в очаговой зоне и определяется как среднесуточное значение всех среднеквадратических отклонений координат очагов АЭ-событий по осям X, Y, Z относительно центра очаговой зоны, по формуле

$$R_{cpp}^{i} = \frac{\left(\sqrt{\sum_{k=1}^{3} (x_{ki} - x_{kj})^{2}}\right)_{1} + \dots + \left(\sqrt{\sum_{k=1}^{3} (x_{ki} - x_{kj})^{2}}\right)_{n}}{N_{O3}}, M$$
(4.7)

где k_i — значение соответствующей декартовой координаты (по осям X, Y, Z) i-го АЭ-события в очаговой зоне, *м*;

*k*_{*i*} — значение соответствующей декартовой координаты центра очаговой зоны.

Например, за сутки очаговую зону сформировало 50 АЭ-событий. От каждого источника АЭ до центра очаговой зоны определяется среднеквадратическое отклонение. Далее вычисляется среднее значение (R_{cpp}) по всем 50 значениям (параметр — среднесуточный «радиус разлета» АЭ-событий в очаговой зоне).

Для приведения значений радиуса разброса АЭ-событий к общему виду параметров ААЗ, значение *R_{cpp}* нормируется к максимальному значению пяти предыдущих суток (4.5).

<u>Временной интервал между АЭ-событиями в очаговой зоне</u> (t_{cpp}). Временной показатель отражает динамику и интенсивность процесса деструкции участка массива (4.8). Экспериментально установлено, что в момент перехода массива в неустойчивое (удароопасное) состояние интенсивность эмиссии достигает критических (максимальных) значений, после чего происходит ее резкий спад при одновременном повышении (на 1-2 порядка) энергии излучаемых акустических импульсов, свидетельствуя тем самым о начале образования в массиве крупных (магистральных) разрывов, [91]. Показатель *t*_{срр} определяется по формуле:

$$t_{cpp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} t_i = \frac{1}{n} (t_1 + \dots + t_n) , \qquad (4.8)$$

где *n* – число временных интервалов в периоде выборки данных.

Значение параметра t_{cpp} переведем в десятичные единицы для математических операций. Например, t_{cpp} составляет 1:30:00 (чч:мм:сс), а в десятичном формате $t_{cpp} = 1,5$. В расчет среднего временного интервала между АЭ-событиями (t_{cpp}) идет время между следующими друг за другом АЭ-событиями в очаговой зоне (связанных событий).

Таким образом, значения всех параметров ААЗ были приведены к единичному виду, что позволяет оценивать их изменение в равной степени. Один из ярких примеров



выявленных закономерностей распределения значений параметров был зафиксирован в период подготовки серии из 4 толчков, зарегистрированных 4.08.2012 г, рисунок 4.1.2.

Рисунок 4.1.2 – Распределение нормированных значений параметров ААЗ накануне мощного динамического проявления горного давления, по данным геоакустического мониторинга месторождения Антей в период 30.07 по 5.08.2012 г.

На основе выявленных закономерностей изменения параметров AA3 и геоакустических волновых полей в высоконапряженных породах месторождения Антей предложен комплексный показатель удароопасности K_{yd} , который представляет собой отношение нормированных^{*} значений суммарной энергии и числа AЭ-событий в AA3 к нормированным значениям расстояния, к времени между последующими друг за другом событиями и к скорости миграции центра AA3

$$K_{y\partial} = \frac{\overline{E}_{as} \cdot \overline{N}_{as}}{\overline{R}_{cpp} \cdot \overline{t}_{cpp} \cdot \overline{v}_{as}}$$
(4.9)

где E_{a3} – суммарная энергия в очаговой зоне, Дж; N_{a3} – количество АЭ-событий в очаговой зоне; R_{cpp} – расстояние между последующими АЭ-событиями, м; t_{cpp} – время между последующими АЭ-событиями, с; v_{a3} – скорость миграции центра очаговой зоны, м/сут.

Важной особенностью предложенного показателя $K_{y\partial}$ является комплексный учет характера изменения каждого из представленных в нем признаков удароопасности. При изменении одного из них значение $K_{y\partial}$ будет изменяться в зависимости от масштаба

^{*} Показатель $K_{y\partial}$ учитывает значения, входящих в него нормированных параметров AA3, за 5 предыдущих суток, а под нормированием понимается сопоставление текущих значений параметров AA3 с максимальным их значением за 5 предыдущих суток и приведение их к единичному отрезку.

динамического проявления в массиве горных пород по сравнению с АЭ-событиями за 5 предыдущих суток и не реагирует на одиночные разрозненные или незначительные всплески акустической активности в зоне контроля системы.

Опробование K_{yd} на базе данных геоакустического мониторинга за период с 2006 по 2016 г. показало перспективность предложенного подхода. Так, при помощи этого показателя можно оценивать условия подготовки динамических проявлений и за 2-3 суток наблюдать предвестники формирования опасного проявления горного давления в пределах зоны контроля АСКГД «*Prognoz-ADS*», при ведении горных работ в удароопасных условиях.

4.2 Закономерности изменения показателя удароопасности *К*_{уд} перед опасным динамическим проявлением горного давления

В ходе анализа результатов геоакустического мониторинга на месторождении Антей, зарегистрированных в период 2011 и 2012 гг., был выявлен ряд особенностей изменения значений комплексного показателя K_{yo} накануне сильных динамических проявлений горного давления.

Так, в ходе мониторинга 29.01.2011 г. был зафиксирован горный удар в блоке ба-1110. Проявление сопровождалось сотрясением поверхностного комплекса рудника и разрушением горных выработок в блоке. АСКГД зарегистрировала резкий всплеск АЭсобытий. Энергетический показатель АЭ-события составил 1250 Дж, а комплексный показатель K_{yd} превысил свое среднемесячное значение в 10 раз 26 января — за двое суток до динамического проявления, рисунок 4.2.1. В этот же период наблюдалось снижение скорости миграции очаговой зоны до значений 1-2 метра.

Не менее представительный материал был получен в результате анализа данных геомеханического мониторинга за период наблюдения май 2011 года, когда было зафиксировано два толчка 7 и 31 мая. По полученным данным проводилась апробация показателя K_{yo} , которая показала значительные превышения значений K_{yo} по графику за несколько дней до мощных динамических проявлений. На рисунке 4.2.2 показаны изменения показателя K_{yo} и скорости миграции очаговой зоны (в натуральных единицах) в блоках 6а-1110 и 6а-1102 в мае 2011 г.



Рисунок 4.2.1 – Изменение показателя K_{yo} и скорости миграции очаговой зоны в блоке 6а-1110 месторождения Антей в январе 2011 г.

На графиках видно, что минимальная скорость миграции очаговой зоны имела место, соответственно, 7, 20, 27 и 30 мая. В эти же периоды времени показатель K_{yd} имел значения более 12, а 31 мая в 45 раз превысил значения K_{yd} за предшествующие 2 суток.



Рисунок 4.2.2 – Изменение показателя *К*_{уд} и скорости миграции очаговой зоны в блоке 6а-1110 месторождения Антей в мае 2011 г.

Во время построения графиков $K_{y\partial}$ была замечена особенность поведения некоторых параметров, составляющих $K_{y\partial}$. Точки графика на интервалах, где наблюдается повышение и понижение значений $K_{y\partial}$, совпадают с точками пересечения графиков скорости (см. рис. 4.2.2), времени и количества АЭ-событий. Сразу после пересечения значение числа АЭ-событий увеличивается, или снижается скорость

миграции очаговой зоны v_{a3} и сокращается среднее время t_{cpp} между АЭ-событиями перед проявлением горного давления, рисунок 4.2.2 и 4.2.3. Численные значения входящих в показатель K_{yo} параметров ААЗ в точках пересечения этих графиков близки к 5 единицам вертикальной оси.



Рисунок 4.2.3 – Изменение параметров ААЗ и *К_{уд}* перед мощным проявлением горного давления на месторождении Антей

В 2012 году было зарегистрировано 8 крупных динамических проявлений, которые сопровождались сильным звуком, сотрясением массива и сейсмическими колебаниями, ощущавшимися не только в подземных горных выработках, но и в поверхностном комплексе рудника. Зарегистрированные АЭ-события отличались высокой энергетикой, более чем на 2 порядка превышающей средний уровень. Не рассматривая все случаи проявлений горного давления, остановимся подробнее на двух из них.

Так, 16.01.2012 в 12:11 на месторождении Антей было зафиксировано сотрясение массива. Визуально, рабочие слышали щелчок и сотрясение почвы. По результатам мониторинга АСКГД «Prognoz-ADS» было зарегистрировано АЭ-событие с энергией 2600 Дж. По данным геоакустического контроля в целике блока 6а-1102 в период 12-15 января фиксировали превышение уровня акустической энергии АЭ-событий. Наряду с мелкими АЭ-событиями до 50 Дж, в период с 12 по 15 января были отмечены проявления, величина акустической энергии которых составила 75, 111, 495 и 517 Дж, соответственно, что указывало на ухудшение геомеханического состояния контролируемого участка массива.

Ретроспективный анализ результатов мониторинга показал, что с 12 января по значениям комплексного показателя $K_{\nu \partial}$ фиксировался рост, отражающий превышение AA3, на среднемесячных значений параметров что указывает усложнение геомеханического состояния. При этом практически все входящие в состав комплексного показателя параметры изменялись. Так, с 13.01 снизилась скорость миграции ААЗ с 25 до 8 м/сут, указывая на локализацию процесса деструкции и концентрацию напряжений на отдельном участке массива. Энергетические показатели источников АЭ увеличились 2,5-3 раза по отношению к показателям текущей недели и в сумме достигали 950 Дж/сут. Показатель концентрации очаговой зоны R_{cp} реагировал на появление второй очаговой зоны в блоке 6а-1102, что привело к росту его значений с 6-9 до 21 м. Количественный параметр АЭ-событий в ААЗ показал превышение своих предыдущих значений в 2 раза и составил 26 событий АЭ, при этом значение временного показателя, отражающего среднее время между событиями в очаговой зоне, снизилось в 2 раза, рисунок 4.2.4.

Значения комплексного показателя $K_{y\partial}$ за несколько дней до толчка составили 2,5-4,2, что в некоторых случаях в 2 и более раз превышает значения $K_{y\partial}$ предыдущих дней января. После обработки данных с использованием программного комплекса «Prognoz-ADS» показатель $K_{y\partial}$ в день толчка показал значение 16,4. В удароопасном участке целика блока 6а-1102 после толчка 16.01.2012 зафиксировано более 260 событий, из них 18 событий с энергией от 50 до 600 Дж, что превысило более чем в 20 раз среднесуточное значение по всей зоне контроля.



Рисунок 4.2.4 – Изменение значений комплексного показателя *К*_{уд} в январе 2012 г. по данным геоакустического мониторинга на месторождении Антей.

В ходе геоакустического мониторинга в период 25 апреля 2012 года в 8:20 в целике блока 6а-1102 было зафиксировано проявление горного давления в форме толчка, который ощущали в поверхностном комплексе рудника «ПУР-1» (ранее «Глубокий»). Энергетический показатель проявления составил 4500 Дж. В указанном блоке акустическая активность начала проявляться с 23 февраля, при этом значение K_{yo} повысилось в 10 раз по сравнению с предыдущим периодом и составило 5,1. В следующие сутки оно повысилось до 18,5, а в сутки проявления составляло 22,3, рисунок 4.2.5.



Рисунок 4.2.5 – Изменение значений комплексного показателя K_{yd} в апреле 2012 г. по данным геоакустического мониторинга на месторождении Антей.

Ценные данные были получены в случае проявления горного давления, зафиксированного 4 августа 2012 г., когда произошла серия толчков в массиве. Так, 4.08.2012 было зафиксировано подряд 4 крупных динамических проявления в виде толчков в массиве. Первые два из них зафиксировали в 6 часов 44 и 47 минут во время проведения взрывных работ, третий — в 7 часов 27 минут, после взрывных работ. Позже, в 9 часов 57 минут, было зарегистрировано сотрясение массива, которое ощущалось и в поверхностном комплексе рудника. По результатам мониторинга АСКГД были зарегистрированы 4 мощных АЭ-события с энергией 810, 960, 400 и 2150 Дж, соответственно. Показатель *Куд* в этот период достигал значений 37 и более. С 31.07.2012 скорость миграции ААЗ снизилась с 21 до 2 м/сутки, рисунок 4.2.6.



Рисунок 4.2.6 – Изменение значений комплексного показателя *К_{уд}* в июле-августе 2012г, по данным геоакустического мониторинга на месторождении Антей.

Сильное динамическое явление в глубине массива, сопровождающееся сотрясением зданий поверхностного комплекса рудника «ПУР-1», было зафиксировано 12 марта 2013 года в 22 часа 09 минут. В это время рабочие в заходке 4 на слое 17 блока 6а-1006 услышали очень громкий звук, ощутили резкий толчок в почве горной выработки, сотрясение массива, после чего по горным выработкам поднялась пыль. Акустическая энергия этого события составила 10200 Дж, что является максимальным значением за все время наблюдений с 2006 г. Визуальный осмотр горных выработок в указанном участке массива не выявил каких-либо разрушений.

Спустя двое суток, 14 марта 2013 г. в 20 часов 46 минут, был зафиксирован очередной толчок. Горнорабочие смены, находясь на слое 17 блока 6а-1006, услышали громкий щелчок и ощутили толчок в почве горной выработки. По результатам геоакустического мониторинга АСКГД было зафиксировано АЭ-событие с энергией 1455 Дж. Анализ данных геоакустического мониторинга показал, что с 9 марта за 3 суток до динамического проявления наблюдался рост значений комплексного показателя $K_{\nu o}$, рисунок 4.2.7.

Анализ экспериментальных данных в случаях зарегистрированных сильных динамических проявлений показал, что повсеместно перед динамическими проявлениями наблюдается увеличение значений комплексного показателя K_{yd} , а сразу после проявления происходит спад показателя до фонового уровня.



Рисунок 4.2.7 – Изменение значений комплексного показателя *К*_{уд} в марте 2013 г., по данным геоакустического мониторинга на месторождении Антей.

В ходе анализа выявлена характерная особенность изменения показаний K_{yo} перед мощными динамическими проявлениями, которая заключается в резком уменьшении K_{yo} и его параметров (E_{a3} и N_{a3}) за несколько суток до момента проявления. Так, в отдельных случаях рост значений K_{yo} сопровождался динамическим проявлением, тогда как в остальных 54 % случаев за 1-4 суток до события (таблица 4.2.1) наблюдался период резкого снижения показателя K_{yo} до минимальных значений — так называемый эффект «затишье», хорошо известный в сейсмике и сейсмологии [12, 13, 45, 58, 115], а затем, — повторный рост значений K_{yo} уже сопровождался динамическим проявлением (рисунок 4.2.4 и 4.2.6).

При проявлении подобного эффекта сейсмоакустической активности происходили наиболее сильные и разрушительные динамические проявления. Подобное поведение горных пород описывают в своих работах Виноградов С.Д. и Пономарев В.С., объясняя различие случаев характера разрушения и проявления акустической эмиссии механическими свойствами горных пород и условиями их нагружения. Так, интенсивный рост деформаций наблюдается в образцах при высокой скорости их нагружения; если же скорость нагружения мала, то возникают эффекты «затишья», которые сменяются лавинообразным процессом деструкции.

Дата	Вид динамического проявления	Акустическая энергия события, Дж	Число суток увеличения $K_{y\partial}$ накануне события, при $K_{y\partial} > 5,116$	Наличие эффекта «затишья» в течение 1-2 суток
16.02.2010	Толчок	2857	4	+
18.02.2010	Толчок	—	2	+
28.03.2010	Толчок	1474	3	+
01.04.2010	Толчок	—	4	+
04.06.2010	Толчок	1100	3	+
12.06.2010	Толчок	935	1	—
11.11.2010	Толчок	887	1	—
29.01.2011	Горный удар	2257	3	+
07.05.2011	Толчок	—	2	—
31.05.2011	Горный удар	5712	5	—
16.01.2012	Толчок	2596	1	—
25.04.2012	Толчок	4432	4	+
09.07.2012	Толчок	1236	3	_
18.07.2012	Толчок	874	2	_
04.08.2012	Толчки 4	2150	4	+
Итого	15		среднее 3	8 (54%)

Таблица 4.2.1 – Особенности сейсмоакустической активности в период подготовки геодинамических событий на месторождении Антей

Таким образом, на основе ретроспективного анализа результатов мониторинга по случаям мощных проявлений горного давления, зарегистрированных на месторождении Антей в период 2010-2012 гг., выявлен ряд особенностей изменения значений комплексного показателя $K_{y\partial}$ накануне проявлений и предварительно, эмпирически по графику значений $K_{y\partial}$ определена граница, соответствующая переходному состоянию контролируемого массива.

Наряду с особенностями изменения K_{yd} анализ показал необходимость учитывать эффект «затишья» и его продолжительность для краткосрочного прогноза опасных динамических проявлений по графику K_{yd} .

4.3 Расчет порога удароопасности по значениям комплексного показателя K_{yd}

Для выявления критических значений комплексного показателя K_{yd} , которые соответствуют переходной стадии геомеханического состояния массива горных пород, выполнен статистический анализ экспериментальных данных с использованием правила Стерджесса, основанного на выделении групп в рядах распределения, подчиненных нормальному закону [25]. Для построения интервально вариационного ряда значений K_{yd} были отобраны данные по ААЗ, только попавшие в границы блоков рудника ба-1110 и ба-1102, где наиболее интенсивно велись горные работы и зарегистрировано 310

(82%) АЭ-событий, что позволило сократить объем расчетов. К тому же, в указанных блоках в период 2010-2012 гг. было зафиксировано 13 крупных динамических проявлений горного давления в виде горных ударов, толчков и техногенной сейсмичности (серия толчков за одни сутки в одном очистном блоке принимается за 1 проявление). Таким образом, в вариационный ряд для анализа попало 310 АЭ-событий. В соответствии с методом Стерджесса весь ряд был разбит на 15 интервалов, и рассчитаны число попавших в интервал АЭ-событий и их частота относительно числа, попавших в вариационный ряд динамических проявлений, таблица 4.3.1.

№ интервала	Интервал значений <i>К_{уд}</i>	Частота АЭ-событий в интервале по правилу Стерджесса
1	<0,002	0,0556
2	0,0020,138	0,0323
3	0,1381,896	0,0067
4	1,8962,642	0,0385
5	2,6425,116	0,0323
6	5,1165,68	0,1667
7	5,686,693	0,125
8	6,6936,875	0,3333
9	6,8758,799	0,0909
10	8,79913,627	0,0909
11	13,62716,625	0,5
12	16,62536,475	0,1
13	36,47545,077	1,0
14	45,07799,836	0,3333
15	>99,836	0

Таблица 4.3.1 – Распределение АЭ-событий по интервалам значений K_{yo} вариационного ряда экспериментальных данных

В процессе вариационного анализа установлено, что 92% мощных динамических проявлений с высокой энергией произошло при значениях показателя $K_{yo} \ge 5,116$, что соответствует 6-му интервалу. На интервале $5,116 \le K_{yo} \ge 5,68$ наблюдалось увеличение частоты АЭ-событий более чем в 5 раз по сравнению с предыдущими интервалами. Величина показателя $K_{yo} \ge 5,116$ после апробации в условиях месторождения Антей принята в качестве порогового значения для геоакустического мониторинга.

Для определения вероятности возникновения мощного динамического проявления горного давления при значении комплексного показателя $K_{yo} \ge 5,116$, использовалась комбинаторная теория вероятности [100]. Данный алгоритм основан на последовательном изменении прогнозирующего правила путем перехода от одной итерации к другой. В первой итерации используются только значения показателя K_{yo} , во

второй итерации используются значение $K_{y\partial}$ и проявление эффекта «затишья» с введением условия, что все работы на опасном участке шахтного поля будут остановлены (нет технологических помех) в течение 3 суток после превышения. В третьей итерации используются указанные выше условия и дополнительно — ранее хорошо себя зарекомендовавший параметр ААЗ — скорость миграции v_{a3} . Известно, что значение v_{a3} незадолго до динамического проявления снижается [67].

По результатам расчетов установлено, что наиболее приемлемой является уточненная третья итерация, при которой вероятность спрогнозировать динамическое проявление с использованием K_{yo} равна 0,844. Вторая итерация, в которой учитывается только эффект «затишье», — вероятность равна 0,791.

Таким образом, путём математической обработки данных, представляющих собой обширную выборку экспериментально-расчётных значений $K_{y\partial}$, применив, в том числе, термины урновой схемы, широко используемой в комбинаторной теории вероятности, получен следующий научно-практический результат по расчёту порога удароопасности: в случае возникновения в процессе мониторинга вполне определённых геомеханических условий (значение комплексного показателя $K_{y\partial} \ge 5,116$, наблюдаемое снижение скорости миграции центра AA3, возникновение эффекта «затишье») вероятность прогноза опасного динамического проявления в течении трех суток составляет 84,4%. В подобных случаях рекомендуется закрыть доступ людей в горные выработки, прилегающие к выделенному участку массива горных пород.

4.4 Корреляционные связи параметров зоны концентрации напряжений и комплексного показателя *К*_{vd}

В результате практического применения комплексного показателя K_{yo} для оценки геомеханического состояния массива горных пород месторождения Антей выявилась необходимость расчета степени значимости входящих в него компонентов, а также установления их взаимосвязи на этапе подготовки к динамическим проявлениям. Математическая обработка наблюдательных и экспериментальных данных, характеризующих параметры АЭ-событий в акустически активных зонах удароопасного массива горных пород месторождения Антей, выполнена с применением статистических методов [25, 100]. Результаты корреляционного анализа влияния компонентов

комплексного показателя $K_{y\partial}$ по данным мониторинга за период с января по май 2012 г. приведены в таблице 4.4.1.

Показатели	<i>N</i> _{оз} , шт.	<i>Е</i> _{оз} , Дж	<i>R_{cpp}</i> , м	<i>v</i> _{аз} , м/сут	t_{cpp} , c
$K_{y\partial}$	0,54444	0,42562	0,01206	-0,256	-0,4384
<i>N</i> ₀₃ , шт.		0,87017	0,09625	0,01597	-0,2675
<i>Е</i> ₀₃ , Дж			0,04828	0,06398	-0,2274
<i>R_{срр}</i> , м				0,1529	-0,0439
<i>v</i> _{аз} , м/сут					0,0697

Таблица 4.4.1 – Эмпирические коэффициенты корреляции параметров AA3 и K_{yd}

Рассмотренный временной отрезок включает в себя спокойные периоды без динамических проявлений, периоды подготовки к динамическим проявлениям и стадии релаксации после проявлений. По усредненным показателям за весь период наиболее выраженная корреляционная связь отмечается между показателями числа АЭ-событий (N_{o3}) и суммарной энергией (E_{o3}) , которая достигает 0,87 (см. табл. 4.4.1). Со значениями комплексного показателя K_{yd} наиболее сильно коррелируют N_{o3} , E_{o3} и t_{cpp} , и слабее выражены связи между остальными показателями.

В процессе анализа, учитывая наличие нескольких стадий подготовки динамического проявления, экспериментальные данные разделили на три группы. Первая группа данных содержала в себе выборку значений $K_{y\partial}$, N_{o3} , E_{o3} , R_{cpp} , v_{a3} и t_{cpp} за 5 суток перед проявлениями (данные в течение суток, в которых были зафиксированы проявления, в выборку не входили). Вторая группа включала в себя выборку значений $K_{y\partial}$, N_{o3} , E_{o3} , R_{cpp} , v_{a3} и t_{cpp} за 5 суток после проявлений. Данные третьей группы (самой объемной) характеризовали относительно спокойный период, без динамических проявлений. Полученные результаты приведены в таблице 4.4.2. В спокойный период проявляется более тесная связь $K_{y\partial}$ с t_{cpp} (0,44), и более слабая — с числом АЭ-событий N_{o3} (0,32) и скоростью миграции центра O3 v_{a3} (0,37). Остальные параметры очень слабо коррелируют с K_{yo} (коэффициент корреляции не превышает 0,1).

В период подготовки к динамическому проявлению показатели коррелируют с $K_{y\partial}$ значительно сильнее. Коэффициент корреляции между $K_{y\partial}$ и суммарной энергией (E_{o3} ,) возрастает от 0,0009 до 0,61. Также возрастает теснота связи $K_{y\partial}$ с количеством АЭсобытий и скоростью миграции центров ААЗ. Влияние остальных показателей изменяется незначительно. Следовательно, в период подготовки динамического проявления возрастает значимость показателей N_{o3} , E_{o3} , и скорости миграции v_{a3} .

Показатели	<i>N</i> ₀₃ , шт.	<i>Е</i> _{оз} , Дж	<i>R_{cpp}</i> , м	<i>v</i> _{<i>a</i>3} , м/сут	t_{cpp}	
Спокойный период						
$K_{y\partial}$	0,323234	0,000999	-0,06422	-0,36543	-0,44234	
<i>N</i> ₀₃ , шт.		0,284949	0,262883	-0,02915	-0,5947	
<i>Е</i> ₀₃ , Дж			0,09172	0,08818	-0,09372	
<i>R_{cpp}</i> , м				0,161965	-0,03256	
<i>v</i> _{аз} , м/сут					0,123767	
В течение 5 суток до проявления						
K _{yð}	0,411773	0,617137	0,088198	-0,50215	-0,43242	
<i>N</i> ₀₃ , шт.		0,294884	0,394213	-0,03577	-0,46493	
<i>Е</i> ₀₃ , Дж			0,202595	-0,35504	-0,13227	
<i>R_{cpp}</i> , м				0,053265	-0,09242	
<i>v</i> _{аз} , м/сут					-0,00993	
В течение 5 суток после проявления						
Kyð	0,400934	0,072458	0,033388	0,22475	0,35582	
<i>N</i> ₀₃ , шт.		-0,19105	0,310607	0,030274	-0,19641	
<i>Е</i> ₀₃ , Дж			0,085459	0,06652	-0,0606	
<i>R_{cpp}</i> , м				0,369777	-0,12369	
<i>v</i> _{<i>а</i>3} , м/сут					0,040673	

Таблица 4.4.2 – Коэффициенты корреляции показателей ААЗ и К_{уд}

В течение 5 суток после динамического проявления горного давления показатели слабо коррелируют с K_{yd} , что свидетельствует о процессе релаксации напряжений в массиве горных пород. За весь период наблюдений наименьшими значениями коэффициента корреляции с K_{yd} характеризуется показатель R_{cpp} . В спокойном периоде его знак меняется на противоположный, рисунок 4.4.1.



Рисунок 4.4.1 – Сводная диаграмма коэффициентов корреляции *К*_{уд} с входящими в него показателями в различные периоды наблюдений на месторождении Антей (массив данных 1 января 2010 — 30 апреля 2012 г.)

Прологарифмируем значения показателей входящих в K_{yd} перед расчетом корреляции, тем самым приведя их к линейной зависимости. В этом случае корреляционные признаки примут более выраженный вид, рисунок 4.4.2.



Рисунок 4.4.2 – Сводная диаграмма коэффициентов корреляции *К_{yd}* с входящими в него показателями после логарифмирования (массив данных 1 января 2010 — 30 апреля 2012 г.)

Таким образом, применение корреляционно анализа позволило определить степень значимости параметров AA3, учитывающихся комплексным показателем K_{yo} на различных этапах подготовки опасных динамических проявлений. Установлено, что на предразрушающей стадии наибольшее влияние имеют: суммарная энергия AЭ-событий в очаговой зоне и скорость миграции центра AA3. Выявленные особенности изменения показателей могут быть использованы в качестве дополнительных признаков удароопасности.

4.5 Применение комплексного показателя $K_{y\partial}$ для прогноза опасных проявлений горного давления.

По результатам геоакустического контроля формируется база данных различных параметров геоакустических импульсов и характера активности контролируемого массива горных пород. Содержащаяся в базе данных и постоянно пополняющаяся информация является основой для осуществления текущего и перспективного прогноза удароопасности участков шахтного поля рудника, а также позволяет исследовать закономерности изменения параметров мониторинга [2, 5, 6, 92].

Для обработки АСКГД полученных данных оператором используется разработанный нами пакет прикладных программ «GeoAcoustics-ADS», который позволяет формировать локационные серии, проводить детальный анализ ИХ параметров, выявлять местоположение очагов динамических проявлений горного давления, выполнять селекцию результатов и готовить параметрическую сводку для прогноза удароопасности контролируемого массива горных пород. По результатам измерений параметров ААЗ строятся карты изолиний акустической активности, отражающие процесс перераспределения напряжений в массиве под влиянием горных работ. Для селекции полезных сигналов в потоке АЭ-событий используется структурноспектральный анализ сигналограмм и учет пространственной геометрии приемной антенны [32].

Зона контроля АСКГД представляет собой окруженный акселерометрами (интеллектуальными датчиками) участок массива горных пород — сложно структурированную природно-техногенную геодинамическую систему, расчлененную крутопадающими и пологими разломами со сбросо-сдвиговой кинематикой. Породы участка характеризуются большими вариациями значений физико-механических свойств, что предопределяет использование разнообразных комбинаций датчиков в антенне.

Методика расчета комплексного показателя K_{yo} допускает использование выборки данных по пространственной зоне различных геометрических размеров, что предусмотрено алгоритмом формирования очаговых зон [см. п.3.2]. Оператор АСКГД может сформировать более локальную зону контроля для исследования акустической активности в элементах системы разработки. Для соблюдения сопоставимости экспериментов и достоверности прогноза динамических проявлений необходимо использовать одни и те же шаблоны зон контроля для мониторинга и сравнения показателей акустической активности в зоне контроля.

В случаях формирования удароопасности по комплексному показателю K_{yo} необходимо провести анализ значений каждого составляющего его параметра (см. п.4.2). Зафиксированы единичные случаи, когда комплексный показатель K_{yo} указывал на сложное геомеханическое состояние контролируемого массива, а в результате детального анализа было установлено негативное влияние технологических помех на формирование локационных серий АЭ-событий. Как показывает практика применения

137

 K_{yd} , подобные случаи отличаются поведением графика комплексного показателя в форме резкого увеличения его значений в 10 и более раз в течение суток, увеличением числа АЭ-событий и незначительным ростом на 2-8% их суммарной энергии, рисунок 4.5.1.



Рисунок 4.5.1 – Техногенные помехи, повлиявшие на расчет комплексного показателя *К*_{v∂} в июле 2012 г.

Известны и другие (противоположные) случаи, когда по результатам мониторинга не были зафиксированы предвестники проявления горного давления. Пример такого проявления был зафиксирован 24 апреля 2010 г. в форме сотрясения массива. В результате ретроспективного анализа результатов мониторинга и проведенного расследования на месте проявления было установлено, что проявление было вызвано мгновенным сдвигом по разломам 13 и 160, рисунок 4.5.2.

Для более детального анализа изменения значений параметров AA3 и комплексного показателя в программном комплексе «*GeoAcoustics-ADS*» реализован их почасовой расчет. Почасовой расчет K_{yd} позволяет зафиксировать предвестники мощных динамических проявлений в случае, если они не регистрировались за 1-2 суток накануне проявлений, а также следить за процессами изменения геомеханического состояния в круглосуточном режиме.

Почасовой расчет геомеханического состояния массива горных пород в рамках службы контроля горного давления позволяет получать краткосрочный прогноз удароопасности. Один из примеров почасового расчета параметров ААЗ и комплексного показателя приведен на рисунке 4.5.3. Так, 25 апреля 2012 г. в блоке 6а-1102 рудника «Глубокий» был зафиксирован случай проявления горного давления в виде сотрясения массива. В ходе осмотра горных выработок был обнаружен выброс из борта выработки

по разгрузочному штреку в объеме 3 м³. Сотрясение массива ощущалось в поверхностном комплексе рудника.



Рисунок 4.5.2 – Изменение значений комплексного показателя K_{vo} в апреле 2010 г.



Рисунке 4.5.3 – Почасовой расчет параметров ААЗ и комплексного показателя Куд

При регистрации превышения по значению $K_{y\partial}$ ($K_{y\partial} \ge 5,116$) необходимо закрыть доступ рабочих в прилегающие к опасному участку массива горные выработки не менее чем на 3 суток. Указанное количество суток выявлено в результате экспериментальных наблюдений за состоянием массива и математически обосновано в ходе расчета с применением комбинаторной теории вероятности.

В период указанных суток могут регистрироваться: возрастание комплексного показателя, изменение направленности графика по значениям параметров AA3, эффект «затишья», а при удачном сложении обстоятельств — понижение графика $K_{y\partial}$ — релаксация массива, без динамического проявления. Подобные случаи релаксации массива горных пород, находящихся под влиянием зон концентрации напряжений, регистрируются в 16% случаев превышения $K_{y\partial}$.

На основе приведенных выше рекомендаций по повышению эффективности геоакустического мониторинга в условиях месторождения Антей сформулированы меры безопасности, которые заключаются в следующем:

 Концентрация напряжений в массиве горных пород определяется в начальной стадии образованием зон акустической активности. Процессы деструкции в массиве горных пород сопровождаются ростом акустической активности;

– Для заблаговременного выявления напряженных участков массива горных пород требуется контроль изменения комплекса параметров акустически активных зон. При условии роста числа АЭ-событий, их суммарной энергии и уменьшения скорости миграции центра активной зоны, временного интервала и квадратичного отклонения источников от центра зоны, возникает угроза опасного проявления горного давления;

– При превышении значения комплексного показателя $K_{yd} \ge 5,116$ необходимо провести анализ значений параметров акустической активности. Наличие признаков удароопасности, выраженных характерным изменением параметров AA3, указывает на необходимость принятия мер обеспечения безопасности в участке массива горных пород;

– В случае, когда применение метода локального контроля в местах регистрации превышения параметров акустической активности ($K_{yo} \ge 5,116$) подтверждает удароопасность участка массива, принимаются меры ограничения доступа людей к опасной зоне не меньше, чем на 3 суток;

– Снижение удароопасности и перераспределение напряжений в конструктивных элементах системы разработки обеспечивается путем бурения разгрузочных скважин перпендикулярно направлению действия максимальных напряжений. Изменение уровня акустической активности, в том числе значений комплексного показателя ($K_{yo} \leq 5,116$), после проведения профилактических мероприятий, свидетельствует об улучшении геомеханической обстановки;

140

Использование рекомендованных решений обеспечивает повышение безопасности горных работ в зоне контроля АСКГД «Prognoz-ADS» в условиях месторождения Антей.

В период с 2011 по 2015 гг. выявленные закономерности изменения параметров комплексного показателя характерно отражали изменения геомеханического состояния контролируемого массива горных пород и в достаточной степени (87% случаев) прогнозировали динамические проявления горного давления за 1-3 суток. Но в период 2014 и 2015 гг. все чаще стали проявляться сбои при расчетах значения K_{yo} , которые часто оказывались либо слишком низкими ($K_{yo} < 1$), либо резко в течение суток превышали пороговое значение ($K_{yo} \leq 5,116$) в сотни раз, достигая значений более 700.

За время работы системы накоплен значительный объем данных о параметрах АЭ-событий и установлены закономерности изменения акустической активности массива горных пород под техногенным и геодинамическим влиянием, анализ которых позволил сделать следующие объяснения и выводы.

В период 2014-2015 гг. отмечается некоторое снижение концентрации АЭсобытий на глубоких горизонтах месторождения Антей. В частности, если ранее в активных акустических зонах (радиусом 10-20 м), локализованных в целиках, регистрировалось 20 и более АЭ-событий в сутки, достигая в некоторые периоды более 110, то в данном периоде их количество не превышает 2-3 за сутки. Проведение мероприятий по приведению целиков в неудароопасное состояние, а также смещение фронта горных работ на более глубокие горизонты (более 200 м) от мест активных геомеханических процессов, привело к сокращению уровня акустической активности и значительному изменению геомеханической обстановки на месторождении. В сложившихся условиях потребовалось уточнение критериев оценки удароопасности.

В связи с вышеизложенным, рекомендовано внести изменения в регламент работы службы ППГУ рудника «ПУР-1» по отнесению участков горного массива к категории «Опасно» с использованием показателя K_{yo} . Анализ результатов сейсмоакустического мониторинга за период с 2010 г. по июнь 2016 г. показал, что показатель K_{yo} корректно оценивает степень удароопасности массива, и с его помощью можно прогнозировать возникновение опасных геодинамических проявлений за 1-3 суток при следующих условиях: в периоде данных о параметрах акустически активных зон для расчета показателя необходимо наличие от 5 и больше суток, а интенсивность АЭ-событий в очаговой зоне (радиусом не более 20 м) составляет не менее 6 АЭсобытий в сутки; отклонение координат источников АЭ от их эпицентра не более 20 м; суммарная энергия указанных АЭ-событий не менее 200 Дж. При меньших значениях указанных параметров производить расчет комплексного показателя K_{yd} не рекомендуется.

В общем же случае применение методики и комплексного показателя $K_{y\partial}$ для прогноза опасных проявлений горного давления является достаточно обоснованным и эффективным, учитывая положительные результаты апробации в условиях удароопасных месторождений Антей и Николаевское.

Проблема прогноза опасных динамических проявлений остаётся далеко не окончательно решённой для удароопасных месторождений в нашей стране и за рубежом, но применение рассмотренных выше геоакустической системы контроля и методики прогноза с использованием комплексного показателя удароопасности K_{yd} может быть рекомендовано для других удароопасных месторождений только после предшествующего глубокого изучения потенциального объекта с последующей адаптацией и уточнением пороговых значений K_{yd} для условий конкретного месторождения.

Выводы к главе 4

1. По результатам геоакустических исследований на месторождении Антей с использованием автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» и на основе теоретических обобщений установлено, что для обеспечения надежного и достоверного прогноза удароопасности необходим комплексный учёт ряда выделенных признаков изменения геомеханического состояния массива горных пород: суммарной энергии очагов АЭ-событий (источников акустической эмиссии), их числа в очаговой зоне, скорости миграции центра акустически активных зон, времени между последовательно происходящими связанными между собой АЭ-событиями и расстояния между этими источниками. Нормированные значения выделенных признаков интегрированы в комплексный показатель удароопасности K_{yd} , адекватно отражающий изменения геомеханического состояния массива на различных стадиях подготовки опасных геодинамических проявлений. 2. Интервально-вариационным анализом экспериментальных данных с применением комбинаторной теории вероятности установлено, что использование комплексного показателя удароопасности $K_{y\partial}$, с учетом эффекта «затишья», обеспечивает высокую достоверность прогноза опасных геодинамических проявлений в условиях глубоких горизонтов месторождения Антей. При условии $K_{y\partial} \ge 5,116$ устанавливается категория «опасно» с вероятностью прогноза геодинамического проявления 84,4 %, а при условии $K_{y\partial} \le 5,116$ — категория «не опасно» с вероятностью 87,5 %.

3. Корреляционным анализом значений пространственно-временных прогностических признаков, вошедших в расчет K_{yd} , выявлена степень их значимости и доля в формировании комплексного показателя K_{yd} на разных стадиях подготовки динамического проявления; более значимое влияние на результат расчета K_{yd} в период подготовки проявления (5 суток до события) оказывают показатели: суммарная энергия (коэффициент корреляции 0,66), число очагов (0,41) и скорость миграции центра акустически активной зоны (0,50).

4. Разработанные практические рекомендации по повышению эффективности прогноза опасных динамических проявлений горного давления являются составным элементом методики геоакустического мониторинга с применением экспериментальной автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» и включены в Указания по безопасному ведению горных работ на месторождении Антей (2008 г.) и в Инструкцию по сейсмоакустическому контролю массива горных пород на месторождении Антей.

5. Вышеприведённые позиции позволили сформулировать третье научное положение:

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.

6. Дальнейшее совершенствование методики оценки удароопасности, основанной на геоакустическом контроле изменения геомеханического состояния геосреды, может

143

заключаться в расширении ряда предвестников геодинамических проявлений и техногенной сейсмичности, основанных на параметрах сейсмоакустических волновых полей, характеризующих переходные состояния массива горных пород в удароопасное состояние. Исследования, направленные на выявление закономерностей изменения параметров сейсмоакустических сигналов в массиве горных пород в переходных геомеханических состояниях, является также актуальной научной задачей, которая позволит повысить надежность прогноза опасных геодинамических явлений.
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 σ_{cxc} 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 $110\pm10^{\circ}$ 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 межполублочные 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.

145

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 геодинамического явления: суммарная энергия E_{a3} ; количество АЭ-событий в очаговой зоне N_{a3} ; скорость миграции центра очаговой зоны v_{a3} .

6. Для оценки удароопасности по данным геоакустического контроля предложен комплексный показатель K_{yd} , 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 ЛЛЯ условий месторождения Антей определены количественные значения комплексного показателя K_{vo} (категория «Опасно» устанавливается при $K_{vo} \ge 5,116$), что с учетом наблюдаемого эффекта «затишья» позволяет с высокой надежностью (до 84 %) за 1-3 суток прогнозировать разрушительные горные проявления техногенной удары И 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».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акустический измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика : сб. тр. XVI сессии Российского акустического общества. – М. : ГЕОС, 2005. – Т. 1. – С. 351-354.

2. 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, вып. 5 : Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. – С. 31-39.

3. Амбарцумян, Р. В. Введение в стохастическую геометрию [Текст] / Р. В. Амбарцумян, Й. Мекке, Д. Штойян. – М. : Наука, 1989. – 399 с.

4. Анализ сейсмоактивности породного массива рудников норильского месторождения в период 1994–2005 гг. [Текст] / В. Н. Опарин [и др.] // Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли : труды конференции, г. Новосибирск, 10–13 окт. 2005 г. – Новосибирск, 2005. – С. 7-15.

5. Аникин, П. А. Комплексный показатель удароопасности по данным геоакустического мониторинга массива горных пород [Текст] / П. А. Аникин // Проблемы геологии и освоения недр : труды XVII Междунар. симпозиума им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – Т 2. – С. 293-295.

6. 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.

7. Анциферов, М.С. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений [Текст] / М. С. Анциферов, Н. Г. Анциферова, Я. Я. Каган. – М. : Наука, 1971. – 136 с.

8. Барышников, В. Д. К вопросу оценки состояния пород по дискованию керна [Текст] / В. Д. Барышников, К. В. Пирля, М. М. Мышакин. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 98-103.

9. Батугина, И. М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников [Текст] / И. М. Батугина, И. М. Петухов. – М. : Недра, 1988. – 166 с.

10. Болотин, Ю. И. Системы локации источников акустической эмиссии в массиве горных пород на рудниках Таштагольского и Талнахского месторождений [Текст] / Ю. И. Болотин, А. Ю. Искра, В. В. Нечаев // III Всесоюзная научно-практическая конференция по акустической эмиссии : доклады. – Обнинск, 1992. – Ч. І. – С. 157-159.

11. Ведение очистных работ в условиях подземных рудников : технологический регламент ТР 07621060-09-2012 [Текст]. – Краснокаменск : ОАО «ППГХО», 2012. – 57 с.

12. Викулин, А. В. Физика волнового сейсмического процесса [Текст] / А. В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский : КГПУ, 2003. – С. 150.

13. Виноградов, С. Д. Экспериментальное изучение сейсмического режима [Текст] /
С. Д. Виноградов, В. С. Пономарев // Природа. – 1999. – № 3. – С. 77-89.

14. Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля [Текст] / Л. П. Ищукова [и др.]. – М. : Геоинформмарк, 1998. – 524 с.

15. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 3. – С. 3-14.

16. Геомеханическое обоснование отставания очистных работ при одновременной отработке смежных панелей [Текст] / А. А. Барях [и др.] // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 25-28.

17. Геофизические исследования горных ударов [Текст] / И. М. Петухов [и др.]. – М. : Недра, 1975. – 136 с.

18. Глушко, В. Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях [Текст] / В. Т. Глушко, В. С. Ямщиков, А. А. Яланский. – М. : Недра, 1987. – 278 с.

19. Горные удары [Текст] / С. Г. Авершин. – М. : Углетехиздат, 1955. – 210 с.

20. Дорошенко, В. И. К проблеме горных ударов на Южном месторождении [Текст] / В. И. Дорошенко, А. В. Антипов, Ю. Ю. Пиленков // Горный журнал. – 1994. – № 3. – С. 56-61.

21. Дягелев, Р. А. Сейсмологический прогноз на рудниках и шахтах Западного Урала [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Р. А. Дягелев. – М., 2002. – 181 с.

22. Емельянов, Б. И. Геомеханика [Текст] : учеб. пособие / Б. И. Емельянов, В. Н. Макишин. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2008. – 339 с.

23. Еременко, А. А. Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности [Текст] / А. А. Еременко, М. В. Курленя // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 3-11.

24. Еременко, В. А. Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений [Текст] / В. А. Еременко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 50-59.

25. Ефимова, М. Р. Общая теория статистики [Текст] / М. Р. Ефимова, Е. В. Петрова, В. Н. Румянцев. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 416 с.

26. Журков, С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел [Текст] / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46-52.

27. Закономерности проявлений техногенной сейсмичности в иерархично-блочных массивах горных пород [Текст] / А. А. Козырев [и др.] // Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений : сб. науч. тр. науч.-практ. конф. – Норильск : ГМК «Норильский никель», 2012. – С. 45-51.

28. Зубков, А. В. Геомеханика и геотехнология [Текст] / А. В. Зубков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – 335 с.

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

30. Инструкция по эксплуатации пробника БУ-39 [Текст]. – Л.: ВНИМИ, 1978. – 24 с.

31. Искра, А. Ю. Микросейсмическая аппаратура для регистрации и локации АЭисточников в массивах горных пород [Текст] / А. Ю. Искра // Системы контроля горного давления. – М. : ИПКОН АН СССР, 1989. – С. 54-66.

32. Искра, А. Ю. Развитие средств акустического контроля опасных проявлений горного давления [Текст] / А. Ю. Искра, И. Ю. Рассказов // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 85-88.

33. Исследование режима возбужденной сейсмичности на шахтах СУБРа [Текст] / В.
С. Пономарев [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1993. – № 3. – С. 15-23.

34. Исследование устойчивости контуров подготовительных выработок в зависимости от горно-геологических факторов методом конечных элементов [Текст] / Портнов В.С. [и др.] // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные

технологии освоения недр : VII междунар. конф. (г. Москва-Ереван, 15-19 сентября 2008 г.). – М. : Изд-во РУДН, 2008. – С. 80-82.

35. Ищукова, Л. П. Геологическое строение Южного Приаргунья в Восточном Забайкалье [Текст] / Л. П. Ищукова // Известия АН СССР. Сер. Геология. – 1989. – № 8. – С. 102-108.

36. Ищукова, Л. П. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье [Текст] / Л. П. Ищукова, И. С. Модников, И. В. Сычев. – Иркутск : Геологоразведка, 2007. – 260 с.

37. Козырев, А. А. Комплексный прогноз изменений сейсмического режима на Хибинских апатитовых рудниках [Текст] / А. А. Козырев, Ю. В. Федотова, О. Г. Журавлева // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : матер. VI Междунар. сейсмологической школы, Апатиты, 15-19 авг. 2011 г. – Обнинск : ГС РАН, 2011. – С. 170-174.

38. Козырев, А. А. Мониторинг состояния подземных горных выработок по данным лазерного сканирования [Текст] / А. А. Козырев, В. В. Тимофеев, К. Н. Константинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 2. – С. 134-140.

39. Козырев, А. А. Техногенная сейсмичность как отражение самоорганизации геологической среды в природно-технических системах [Текст] / А. А. Козырев, В. И. Панин, Ю. В. Федотова // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли : сб. науч. тр. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2011. – Т. 1. – С. 227-231.

40. Козырев, А. А. Техногенная сейсмичность при ведении горных работ на рудниках Кольского полуострова [Текст] / А. А. Козырев, В. И. Панин, Ю. В. Федотова // Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений : сб. науч. тр. науч.-практ. конф. – Норильск : ГМК «Норильский никель», 2012. – С. 64-69.

41. Колмаков, В. Д. Геомеханическое обоснование технологии разработки крутопадающих удароопасных месторождений гидротермального генезиса (на примере месторождения "A") [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Д. Колмаков. – Новосибирск, 1983.

42. Колмаков, В. Д. К вопросу прогноза удароопасности массива горных пород [Текст] / В. Д. Колмаков, Р. А. Ахметгареев // Технический прогресс в атомной промышленности. Серия ГМП. – 1983. – № 4. – С. 26-30.

43. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов [Текст] / А. Ю. Гор [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1989. – № 3. – С. 54-60.

44. Корчагин, Ф. Г. Геодинамика Амурского геоблока [Текст] / Ф. Г. Корчагин // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений : 1 Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26-29 сент. 2000 г. – Хабаровск : ИТиГ ДВО РАН, 2001. – С. 18-39.

45. Кузнецов, В. В. Физика землетрясения и сопутствующих ему явлений в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере [Текст] / В. В. Кузнецов. – Новосибирск : ИГиГ СО РАН, 2008. 453 с.

46. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород [Текст] / Ю. О. Кузьмин, В. С. Журов. – М. : Изд-во МГГУ, 2004. – 262 с.

47. Куксенко, В. С. Возможности акустической эмиссии в прогнозировании разрушения горных пород [Текст] / В. С. Куксенко // Системы контроля горного давления. – М. : ИПКОН, 1989. – С. 5-22.

48. Курленя, М. В. Предельные размеры породного керна с центральной скважиной [Текст] / М. В. Курленя, А. В. Леонтьев // Измерение напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск, 1970. – С. 42-46.

49. Курленя, М. В. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород [Текст] / М. В. Курленя, В. Н. Опарин. – Новосибирск : Наука, 1999.

50. Ловчиков, А. В. Современное состояние проблемы регистрации, прогноза и предупреждения горно-тектонических ударов в рудниках [Текст] / А. В. Ловчиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 1. – С. 173-183.

51. Ловчиков, А. В. Техногенное сейсмическое событие как критерий геодинамической опасности месторождения [Текст] / А. В. Ловчиков // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли : тр. Всерос. конф. с участием иностранных ученых. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2010. – С. 410-414.

52. Мендецки А. Ж. Мониторинг сейсмичности в рудниках и шахтах [Текст] / А. Ж. Мендецки, Д. А. Маловичко // Интернациональный симпозиум по горным ударам и сейсмологии в рудниках и шахтах. – Rotterdam : Balkema, 1993. – С. 205-225.

53. Методические указания по прогнозу степени удароопасности участков массива горных пород, руд и угля по разделению керна на диски и выходу буровой мелочи [Текст] / под ред. И. А. Петухова, А. А. Филинкова. – Л. : ВНИМИ, 1985. – 24 с.

54. Методы и средства контроля состояния и свойств горных пород в массиве [Текст] / Е. С. Ватолин [и др.]. – М. : Недра, 1989. – 173 с.

55. Мониторинг геодинамической и геоэкологической безопасности освоения недр и земной поверхности [Текст] / Д. В. Яковлев [и др.] // Проблемы геодинамической безопасности : мат-лы II-го междунар. рабочего совещ. – СПб. : ВНИМИ, 1997. – С. 5-18.

56. Мулев, С. Н. Исследование концентрационного критерия сейсмогенных разрывов по данным сейсмостанции «Норильск» [Текст] / С. Н. Мулев, Е. В. Костромитина, А. В. Лопаткова // Горная геофизика–98 : мат-лы междунар. конф. – СПб.: ВНИМИ, 1998. – С. 451-457.

57. Некрасов, С. В. Анализ напряженно-деформированного состояния пород в окрестности забоя плоской и вогнутой форм [Текст] / С. В. Некрасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 350-352.

58. Нерсесов, И. Л. Эффект сейсмического затишья перед сильным землетрясением [Текст] / И. Л. Нерсесов, В. С. Пономарев, Ю. М. Тейтельбаум // Исследования по физике землетрясений. – М. : Наука, 1976. – С. 149-169.

59. Нестеренко, Г. Т. Приближенный метод оценки напряженного состояния горных пород [Текст] / Г. Т. Нестеренко, А. Т. Шаманская, П. В. Егоров. – Новосибирск : Изд-во ИГД СО АН СССР, 1970. – 133 с.

60. Нечаев, В. В. Некоторые результаты испытаний и опытной эксплуатации микросейсмической станции на Таштагольском железорудном месторождении [Текст] / В. В. Нечаев, А. Ю. Искра, Ю. И. Болотин // Труды VII Междунар. конгресса по маркшейдерскому делу. – М. : Недра, 1989. – С. 26-30.

61. Никольский, А. М. Геомеханическая оценка напряженного состояния убывающего целика при подходе очистного забоя к демонтажной камере [Текст] / А. М. Никольский // Уголь. – 2009. – № 6 – С. 49-51.

62. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I : Сейсмический режим [Текст] / В. Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – № 4. – С. 3-22.

63. Обоснование классификационных критериев динамических явлений при подземной разработке полезных ископаемых [Текст] / Ю. П. Шуплецов [и др.] // Горный журнал. – 2005. – № 6. – С. 18-22.

64. Обоснование параметров подземной геотехнологии крутопадающих сближенных жил Новоширокинского месторождения [Текст] / Е. Л. Сосновская [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 10. – С. 28-32.

65. Определение напряженно-деформированного состояния пород месторождения Антей для разработки методов мониторинга и прогноза проявлений горного давления на основе трехмерной геологической модели [Текст] : отчет о НИР / Петров В. А. [и др.]. – М. : ИГЕМ РАН, ОАО «ТВЭЛ», 2008. – 54 с.

66. Особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № ОВ9. – С. 167-177.

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

68. Особенности регистрации и обработки данных геоакустического контроля массива горных пород на действующем руднике [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 212-218.

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

70. Петухов, И. М. Геодинамика недр [Текст] / И. М. Петухов, И. М. Батугина. – М. : Недра, 1999. – 288 с.

71. Петухов, И. М. Научные основы управления толчкообразным деформированием блочного массива [Текст] / И. М. Петухов, Э. Н. Работа, И. М. Батугина // Управление удароопасностью массива горных пород. – Л. : ВНИМИ, 1987. – С. 4-18.

72. Петухов, И. М. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках [Текст] / И. М. Петухов, А. М. Ильин, К. Н. Трубецкой. – М. : Изд-во АГН, 1997. – 376 с.

73. Повзнер, М. Е. Геомехаика [Текст] / М. Е. Повзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – 2-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГГУ, 2008. – 438 с.

74. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока [Текст] / А. М. Фрейдин [и др.]. – Новосибирск : Наука ; СИФ, 1992. – 177 с.

75. Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, утвержденному приказом Федеральной службы по

экологическому, технологическому и атомному надзору №576 от 2 декабря 2013 г. [Электронный pecypc]. – http://docs.cntd.ru/document/499086982

76. Поляков, А. Н. Прогноз удароопасности горнотехнических ситуаций на перспективные глубины разработки [Текст] / А. Н. Поляков // Горный журнал. – 1993. – № 4. – С. 51-56.

77. Попов, Г. Н. Разработка месторождений радиоактивных руд [Текст] / Г. Н. Попов,Д. П. Лобанов. – М. : Атомиздат, 1970. – 328 с.

78. Попов, С. Н. Определение напряжений в нетронутом массиве по данным каротажных измерений в зоне влияния выработки [Текст] / С. Н. Попов, А. А. Князев // Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород. – Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 9-15.

79. Потемкин, Д. А. Моделирование процессов сдвижения массива горных пород при нисходящем порядке отработки рудного тела Яковлевского месторождения [Текст] / Д. А. Потемкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – С. 137-141.

80. Правила безопасности в угольных шахтах ПБ 05-618-03 [Текст]. – М. : Госгортехнадзор России, НТЦ «Промышленная безопасность», 2004.

81. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах [Текст] / В. А. Петров [и др.] // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 86-95.

82. Прогноз и профилактика горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений с позиций нелинейной геодинамики [Текст] / Н. Н. Мельников [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2001. – № 4. – С. 17-31.

83. Прогнозирование сейсмоопасных зон при сейсмическом мониторинге в рудниках и шахтах Западного Урала [Текст] / А. А. Маловичко [и др.] // Современная сейсмология : достижения и проблемы : мат-лы науч. конф. – М., 1998. – С. 33-43.

84. Райгородский, А. М. Модели случайных графов и их применения [Текст] / А. М.
Райгородский // Труды Московского физико-технического института. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 134-140.

85. Рассказов, И. Ю. Алгоритмы и программное обеспечение для локации источников акустической эмиссии в системе геомеханического мониторинга [Текст] / И. Ю. Рассказов, А. Ю. Искра, К. А. Кянно // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – ОВ № 15. – С. 130-142.

86. Рассказов, И. Ю. Влияние блочно-иерархического строения геологической среды на формирование природного и техногенного геодинамических полей в северо-западной

части Амурского геоблока [Текст] / И. Ю. Рассказов, Б. Г. Саксин // Записки Горного института. – 2010. – Т. 188. Современные проблемы геодинамической безопасности при освоении месторождений полезных ископаемых. – С. 26-30.

87. Рассказов, И. Ю. Влияние условий разработки на характер формирования техногенных полей напряжений в удароопасном массиве горных пород [Текст] / И. Ю. Рассказов, О. И. Чернышов, В. М. Марач // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 8. – С. 50-55.

88. Рассказов, И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона [Текст] / И. Ю. Рассказов. – М. : Горная книга, 2008. – 329 с.

89. Рассказов, И. Ю. Особенности геодинамики и геомеханических условий месторождения, залегающего в крутопадающих разрывных структурах погребенного фундамента [Текст] / И. Ю. Рассказов, Б. Г. Саксин // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 296-303.

90. Рассказов, И. Ю. Особенности природно-техногенной геодинамической структуры месторождения Антей и ее влияние на формирование удароопасности [Текст] / И. Ю. Рассказов, Б. Г. Саксин, П. А. Аникин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. – С. 122-127.

91. Рассказов, И. Ю. Оценка и контроль удароопасности массива горных пород на рудниках [Текст] / И. Ю. Рассказов, Г. А. Курсакин. – Владивосток : Дальнаука, 2001.–167 с.

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

93. Рассказов, И. Ю. Развитие средств акустического контроля опасных проявлений горного давления [Текст] / И. Ю. Рассказов, А. Ю. Искра // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 85-88.

94. Региональный прогноз сейсмоопасных зон на горнодобывающих объектах Верхнекамского промышленного района [Текст] / А. А. Маловичко [и др.] // Проблемы геотехнологии и недроведения. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – Т. 3. – С. 262-270.

95. Регистратор импульсов электромагнитной и акустической эмиссии "АЭР-ЭМЭ-Комби" : Паспорт ДВД 2.745.003 ПС [Текст]. – Фрунзе : ИФиМГП АН Киргизской ССР, 1991. – 57 с.

96. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород [Текст] / М. В. Курленя [и др.]. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000.

97. Ржевский, В. В. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве [Текст] / В. В. Ржевский, В. С. Ямщиков. – М. : Наука, 1973. – 224 с.

98. Ржевский, В. В. Физико-технические параметры горных пород [Текст] / В. В. Ржевский. – М. : Наука, 1975. – 212 с.

99. Ривкин, И. Д. Звукометрический метод наблюдения проявлений горного давления на шахтах криворожского бассейна [Текст] / И. Д. Ривкин. – М. : Металлургиздат, 1956. – 188 с.

100. Розанов, Ю. А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика [Текст] / Ю. А. Розанов. – М. : Наука. – 1985. – 320 с.

101. Рубан, А. Д. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Ч. Ш. Высокочастотные электромагнитные методы [Текст] : учеб. пособие / А. Д. Рубан, Ю. Н. Бауков, В. Л. Шкуратник. – М. : МГГУ, 2002. – 147 с.

102. Рудничные геолого-геофизические работы при эксплуатации урановых месторождений Стрельцовского рудного поля [Текст] / Б. Н. Хоментовский [и др.]. – Краснокаменск : АООТ "Приаргунское производ. горн.-хим. об-ние", 2002. – 210 с.

103. Руководство по применению метода разгрузки для определения напряженного состояния в глубине горных массивов [Текст]. – Л., 1960. – 15 с.

104. Руководство по применению метода разгрузки керна с центральной скважиной для определения напряжений в массиве осадочных горных пород [Текст]. – Новосибирск : ИГД СО РАН СССР, 1969. – 62 с.

105. Рыльникова, М. В. Геомеханика [Текст] : учебное пособие / М. В. Рыльникова, О. В. Зотеев. – М., 2003. – 240 с.

106. Савич, А. И. Рекомендации по изучению напряженного состояния горных пород геофизическими методами [Текст] / А. И. Савич, Б. Д. Куюнджич. – Москва-Белград, 1986.

107. Саксин, Б. Г. Исследование процессов геомеханической самоорганизации природно-технических систем на удароопасных месторождениях Востока России [Текст] / Б. Г. Саксин, И. Ю. Рассказов, Б. А. Просекин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 118-124.

108. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008615167. Программа обработки данных геомеханического мониторинга «GeoAcoustics-ADS» - версия v.1.0.7.5. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.10.2008 г.

109. Сейсмический комплекс "Очаг" автоматизированной системы горного давления для ПО "Североуралбокситруда" [Текст] / В. А. Стольников [и др.] // Экспериментальные

исследования напряженно-деформированного состояния шахт и рудников. – Новосибирск, 1990. – С. 114-117.

110. Сейсмичность при горных работах [Текст] / А. А. Козырев [и др.]. – Апатиты : КНЦ РАН, 2002. – 325 с.

111. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро» :
Горнотехнические аспекты [Текст] / А. А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2002. – № 1.
– С. 43-49.

112. Система разработки «Горизонтальные слои с твердеющей закладкой» : стандарт предприятия СТО 07621060-056-2012 [Текст].– Краснокаменск : ОАО «ППГХО», 2012.–88 с.

113. Система сейсмического мониторинга GITS [Текст] / Д. В. Яковлев [и др.] // Сборник научных трудов ВНИМИ : посвящен 100-летнему юбилею выдающегося горного инженера Б. Ф. Братченко / отв. ред. Д. В. Яковлев. – СПб. : ВНИМИ, 2012. – С. 18-25.

114. Соболев, Г. А. Сейсмическая опасность. Тематический том [Текст] / Г. А. Соболев. – М. : Издательская фирма «КРУК», 2000. – 296 с.

115. Соболев, Г. А. Физика землетрясений и предвестники [Текст] / Г. А. Соболев, А.
В. Пономарев ; ред. В. Н. Страхов. – М. : Наука, 2003. – 230 с.

116. Совершенствование методов и средств контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО «ППГХО» [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный журнал. – 2013. – № 8 (2). – С.10-20.

117. Совершенствование технических и программно-методических средств геоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 6. – С. 119-125.

118. Ставрогин, А. Н. Исследование акустической эмиссии при деформировании горных пород в условиях сложного осесимметричного напряженного состояния [Текст] / А. Н. Ставрогин, Г. Г. Зарецкий-Феоктистов, Г. Н. Танов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1986. – № 5. – С. 16-27.

119. Тарасов, Б. Г. Геоэлектрический контроль состояния массивов [Текст] / Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, В. В. Иванов. – М. : Недра, 1983. – 216 с.

120. Татаринов, В. Н. Методика проведения контроля устойчивости выработок сейсмоакустическим комплексом "Гроза-16" [Текст] / В. Н. Татаринов. – М. : ВНИПИпромтехнология, 1992. – 41 с.

121. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок [Текст] / И. А. Турчанинов [и др.]. – Л. : Наука, 1978. – 256 с.

122. Томилин, Н. Г. Статистическая кинетика разрушения горных пород и прогноз сейсмических явлений [Текст] / Н. Г. Томилин, Е. Е. Дамаскинская, П. И. Павлов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 5. – С. 955-959.

123. Трофименко, Н. С. Технология вскрытия запасов Стрельцовского рудного поля [Текст] / Н. С. Трофименко, П. В. Ганин // VII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых : сборник материалов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – С. 90-92.

124. Трубецкого, К. Н. Горные науки: освоение и сохранение недр Земли [Текст] / К. Н. Трубецкого. – М. : Изд-во Академии горных наук, 1997. – 478 с.

125. Турчанинов, И. А. Геофизические методы исследования напряженного состояния горных пород [Текст] / И. А. Турчанинов, В. И. Панин. – Л. : Наука, 1976. – 164 с.

126. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород [Текст] / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – Л. : Недра, 1989. – 488 с.

127. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождении Антей, опасном по горным ударам [Текст] / А. Н. Шабаров [и др.]. – СПб. : СППГИ, 2008. – 71 с.

128. Указания по безопасному ведению горных работ на Хинганском месторождении, опасном по горным ударам [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.]. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2004. – 53 с.

129. Управление геодинамическими рисками в горнотехнических системах [Текст] / А. А. Козырев [и др.] // Проблемы снижения природных опасностей и рисков : матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Геориск – 2012». – М. : РУДН, 2012. – Т. 2. – С. 161-166.

130. Урановое месторождение Антей – природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах [Текст] / Н. П. Лаверов [и др.] // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 387-413.

131. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов [Текст] / В.
С. Куксенко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –
1987. – № 1. – С. 9-22.

132. Филинков, А. А. Некоторые особенности проявления горных ударов на Таштагольском руднике [Текст] / А. А. Филинков, Л. М. Лазаревич, А. И. Пимец // Свойства горного массива и управление его состоянием. – СПб. : ВНИМИ, 1991. – С. 58-62.

133. Формы проявления горного давления на глубоких горизонтах Миргалимсайского месторождения [Текст] / А. В. Корн [и др.] // Горный журнал. – 1983. – № 2. – С. 53-56. 134. Фрейдин, А. М. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на золоторудном месторождении «Макмал» [Текст] / А. М. Фрейдин, С. А. Неверов, А. А. Неверов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 5. – С. 75–85.

135. Харари Φ. Теория графов = Graph theory [Текст] / Φ. Харари ; пер. с англ. ; под ред. Г. П. Гаврилова. – 3-е изд. – М. : КомКнига, 2006.– 296 с.

136. Чесноков, Н. И. Системы разработки месторождений урана с твердеющей закладкой [Текст] / Н. И. Чесноков, А. А. Петросов, Б. Ф. Шевченко. – М. : Атомиздат, 1975. – 296 с.

137. Шевченко, Б. Ф. Глубинное строение и морфоструктуры Амурской тектонической плиты (континентальная часть) [Текст] / Б. Ф. Шевченко, Б. Г. Саксин, И. Ю. Рассказов // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии : VII Косыгинские чтения : мат-лы всерос. конф., г. Хабаровск, 12-15 сент. 2011 г. – Хабаровск : ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2011. – С. 336-338.

138. Шерман, С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры [Текст] / С. И. Шерман. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. – 102 с.

139. Шкуратник, В. Л. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород [Текст] / В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко. – М. : Изд-во МГГУ, 2012. – 112 с.

140. Эволюция техногенной сейсмичности в Хибинском массиве, как отражение динамики напряженно-деформированного состояния геологической среды [Текст] / А. А. Козырев [и др.] // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : матер. VI Междунар. сейсмологической школы, Апатиты, 15-19 авг. 2011 г. – Обнинск : ГС РАН, 2011. – С. 165-169.

141. Ямщиков, В. С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов [Текст] / В. С. Ямщиков. – М. : Недра, 1982. – 296 с.

142. Ямщиков, В. С. Волновые процессы в массивах горных пород [Текст] / В. С. Ямщиков. – М. : Недра, 1984. 271 с.

143. Acoustic emission behavior during excavation of a large cavern in a deep mine [Text]
/ M. Utagawa [et al.] // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam. Brookfield, 1997. – pp. 131-135.

144. Ahorner, L. Ein untertagiges Uberwachungssystem in Kalibergwork Haitorf zur langzeiterfassung von seismischen Ereignissen im Werra-Kaligebiel [Text] / L. Ahorner, H.-G. Sobisch // Rali und Steinsalz. – 1988. – Band 10, Heft 2. – pp. 38-40.

145. Ahorner, L. Seismologishe Untersuhung des Gebirgsschlages am 13 [Text] / L. Ahorner // Marz 1989 bei Volkershausen (DDR) im Kalibergbangebiet an der Werra // Kali und Steinsalz. – 1989. – Band 10, Heft 4/5. – pp. 110-117.

146. Anikin, P. A. Improvement of technique of assessment of geomechanical condition of geoenvironment according geoacoustic monitoring data [Текст] / Р. А. Anikin, I. Y. Rasskazov, G. S. Tsitsiashvili // Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле: тезисы докладов Международной конференции (Петропавловск-Камчатский, 8-13 сент. 2014 г.). - Владивосток: Дальнаука, 2014. – С. 96

147. Arabasz, W. J. Mining seismicity in the Wasatch Plateau and Bok Cliffs coal mining districts, Utah, USA [Text] / W. J. Arabasz, S. J. Nava, W. T. Phelps // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam : Brookfield, 1997. – pp. 111-116.

148. Builer, A. G. Space-time clustering if potentially damaging seismic events and seismic viscosity at Western Deep-Levels East and West Mines [Text] / A. G. Builer // Rockbursts and seismicity in mines. – Roterdam : Brookfield, 1997. – Pt. a. – pp. 89-93.

149. Butler, A. G. Application of weighted energy index for routine evaluation of rockburst potential [Text] / A. G. Butler // Rockbursts and seismicity in minec. – Rotterbam : Brookfield, 1997. Pt. b. – pp. 317-323.

150. Cosentino, P. Evaluation of fractal dimension estimates: Quantitative differentiation of seismicity clusters [Text] / P. Cosentino, L. De Luca, D. Luzio, S. Lasocki // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam : Brookfield, 1997. – pp. 45-47.

151. Cote, M. Seismic and numerical modeling decision-making at Me Watters Sigma mine [Text] / M. Cote, C. Mitchelson, J. M. Alcott // Rockbursts and seismicity in mines – SAIMM, Johannesburg, 2001. – pp. 427-431.

152. Cranswick, E. How many earthquakes are caused by mining in Australia [Text] / E. Cranswick // Proceedings of the 2011 IUGG Conference. – Melbourne : IASPEI, 2011.

153. Dechelette, O. Seismo-acoustic monitoring in an operational long wall face with a high rate of advance [Text] / O. Dechelette, J. P. Josien, R. Revalor // Rockbursts and seismicity in mines. – Johannesburg, 1984. – pp. 83-87.

154. Domanski, B. Comparison of source parameters of seismic events at Polish coal and copper mines [Text] / B. Domanski // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam : Brookfield, 1997. – pp. 101-105.

155. Eccles, C. D. Seismic locations algorithms a comparative evaluation [Text] / C. D. Eccles, J. A. Ryder // Proceedongs of 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines, RaSim1 SAIMM. – Johannesburg, 1984. – pp. 89-92.

156. Gibson, G. The Newcastle earthquake aftershock and its implications [Text] / G. Gibson, V. Wesson, K. McCue // Proceedings of the Conference on the Newcastle Earthquake. – Newcastle, 1990. – pp. 14–18.

157. Hao, H. Reconnaissance report of structural damage in the Kalgoorlie-Boulder area [Text] / H. Hao // Tech. rep., AEES Newsletter, May 2010.

158. Helmstetter, A. Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering [Text] / A. Helmstetter, Y. Y. Kagan, D. D. Jackson // Journal of Geophysical Research. – 2005. – 110(B05S08). – pp. 1–13.

159. Investigation into the risks to miners, mines, and the public associated with large seismic events in gold mining districts, Expert opinion [Text] / R. J. Durrheim [et al.] // Department of Mineral and Energy of South Africa, 2006.

160. Koza, J. Digital Seismic System Used for Registration of Mining Tremors and Strain in Polish Coal and Copper Mines [Text] / J. Koza // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam. Brookfield, 1997. – pp. 145-147.

161. MacDonald, P. Microseismic monitoring in a uranium mine [Text] / P. MacDonald, S. N. Muppalaneni // Rockbursts: prediction and control. – London : Institution of Mining and Metalurgy, 1984. – pp. 11-36.

162. McGarr, A. Case histories of induced and triggered seismicity [Text] / A. McGarr, D.
Simpson, L. Seeber // International handbook of Earthquacke and Engineering Seismology, Part A.
– Amsterdam : Academic Press, 2002. – pp. 647-664.

163. Mendecki, A. J. Modelling seismic hazard in mines [Text] / A. J. Mendecki, E. C. Lotter // Proceeding of the Australian Earthquake Engineering Society 2011 Conference, 18-20 November, Barossa Valley. – South Australia, 2011.

164. Mendecki, A. J. Real-time quantitative seismology in mines [Text] / A. J. Mendecki // Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. – Rotterdam : Balkema, 1993. – pp. 287-295.

165. Mendecki, A. J. Seismic monitoring in mines [Text] / A. J. Mendecki. – London : Chapman and Hall, 1997. – 262 p.

166. Nuwen Xu, Application of Microseismic Monitoring Technique in Hydroelectric Projects [Text] / Nuwen Xu, Chun'an Tang, Hong Li, Zhengzhao Liang // InTech China, Hydropower - Practice and Application, 2012. – 320 p. 167. Ortlepp, W. D. A review of the contribution to the understanding and control of mine rockbursts [Text] / W. D. Ortlepp // Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings; 9 – 11 March, 2005. – Perth Australia, 2005. – pp. 3–20.

168. Ortlepp, W. D. Rock Fracture and Rockbursts - An Illustrative Study : monograph Series M 9. – South Afican Institute of Mining and Metallurgy, 1997. – 126 p.

169. Pechmann, J. C. Seismic event in the Trona mining district of southwestern Wyoming [Text] / J. C. Pechmann, W. R. Walter, S. J. Nava, W. J. Arabasz // Seismological Research Letters, February 3, 1995 ML 5.1. – 1995. – Vol. 66(3). – pp. 25-34.

170. Richardson, E. Some properties of gold-mine seismicity and implications for tectonic earthquakes [Text] / E. Richardson, T. H. Jordan // Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSIM5, SAIMM, Symposium Series S27. – Johannesburg, 2001. – pp. 149-156.

171. Riemer, K. L. Mining Seismicity in the Witwatersrand Basin: Monitoring, Mechanisms and Mitigation Strategies in Perspective [Text] / K. L. Riemer, R. J. Durrheim // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. $-2011. - N_{\odot} 3. - pp. 250-259.$

172. Spies, Th. Acoustic emission measurements as a contribution for the evaluation of stability in salt rock [Text] / Th. Spies, D. Meister, J. Eisenbldtter // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam. Brookfield, 1997. – pp. 135-141.

173. Vieira, F. M. Methods to mine the ultra-deep tabular gold-bearing reefs of the Witwatersrand Basin South Africa in Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies [Text] / F. M. Vieira, D. H. Diering, R. J. Durrheim // Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc (SME), 2001. – pp. 691-704.

174. Weile, D. Features of information DJ Characterizing the lime distribution structure of regional seismic activities before and after ten moderate strong earthquakes in Greater North China region [Text] / D. Weile [et al.] // Journal of Earthquake Preqiction Research. –1993. – Vol. 2, № 4. – pp. 515-527.