

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Кафедра автоматики и компьютерных технологий

На правах рукописи

ЛАПИН Сергей Эдуардович

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ
СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА В ПРОЦЕССАХ ПОДЗЕМНОЙ
РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 25.00.35 – «Геоинформатика»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант –
доктор геол.-минер. наук,
доцент В. Б. Писецкий

Екатеринбург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЗАДАЧИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО МАССИВА.....	14
Введение.....	14
1.1 Состояние специализированного геоинформационного обеспечения безопасности горного производства в угольных шахтах.....	19
1.2 Методы аэрологического обеспечения безопасности производства в угольных шахтах.....	28
1.3 Методы и системы контроля состояния устойчивости горного массива в практике применения российских и зарубежных технологий ведения подземных горных работ.....	34
1.4 Регламентные требования к информационной базе обеспечения без- опасности подземных горных работ.....	49
1.5 Задачи непрерывного контроля и прогноза развития опасных динамических явлений на основе создания геоинформационной системы	54
Выводы.....	63
2 ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ ВЗАИМОВЛИЯ- НИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МЕТАНО- ОБИЛЬНОСТИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА.....	65
Введение.....	65
2.1 Основные представления о связи напряженного состояния и газового потока в горном массиве.....	67

2.2 Оценка параметров газового потока в модели дискретных сред с внешними силовыми нагрузками.....	73
2.3 Геомеханический анализ напряженно-деформированного состояния пласта в задаче «градиент горного давления – газовый поток».....	76
2.4 Примеры расчета модели проницаемости для очистного и подготовительного забоев при отработке угольного пласта с учетом фактической метанообильности в выработках.....	86
Выводы.....	97
3 СТРУКТУРА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССАХ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	98
Введение.....	98
3.1 Характерные особенности контроля аэрогазового состояния горных выработок (аэрогазовый канал).....	101
3.2 Сейсмические методы оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива в ближней и дальней зонах влияния горных работ (сейсмический канал).....	109
3.3 Схема прогноза развития опасных явлений на основе совмещенного контроля параметров напряженного и аэрогазового состояний горного массива.....	122
3.4 Принципы построения геоинформационной модели с функциями непрерывного контроля состояния устойчивости горного массива и прогноза развития опасных явлений.....	135
Выводы.....	141

4 ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА ВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ НА ОСНОВЕ ГИС МИКОН.....	142
Введение.....	142
4.1 Базовые технические решения при реализации ГИС МИКОН.....	143
4.2 Панель геоинформационного мониторинга.....	157
4.3. Содержание информационных потоков и формат прогноза зон возмож- ного развития опасных ГДЯ (Блоки «АГК. Сбор данных», «ГЕО. Сбор дан- ных» и «Обработка данных».).....	162
Выводы.....	183
5 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИС МИКОН НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ.....	184
Введение.....	184
5.1 Функциональные испытания комплекса «Микон-ГЕО» на шахте «Северная» (ОАО «Воркутауголь»).....	185
5.2 Результаты технологической эксплуатации геоинформационной систе- мы ГИС МИКОН в составе систем «Микон-ГЕО» и «Микон-АГК» на угольных шахтах Кузбасса.....	205
5.3 Общие принципы проектирования и развертывания ГИС МИКОН при реализации контроля и прогноза ГДЯ на угольной шахте.....	213
Выводы.....	219
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	221
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	223

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На современном этапе эксплуатация угольных шахт характеризуется существенно возросшей интенсивностью отработки месторождений, десятками метров суточного продвижения лав и подготовительных выработок, что приводит к неэффективному применению известных зарубежных и отечественных технических средств оперативного своевременного прогноза возникновения и развития опасных геогазодинамических явлений (ГДЯ) в непрерывном (текущем) режиме подземной разработки угольных месторождений.

Актуальными с точки зрения своевременного прогноза развития ГДЯ в массиве и, как следствие, опасного изменения аэрогазового состояния горных выработок (проходческих и добычных) становятся лишь те методы, которые способны решать задачу прогноза на дистанциях первых десятков и сотен метров от мест ведения горных работ – в зоне активного взаимовлияния горного массива и самих горных выработок. Данное требование, в свою очередь, предопределяет несколько иные по сравнению с действующими подходы к теоретическому описанию, построению модели физико-геологических и связанных с ними информационных характеристик горного массива, способы и аппаратные решения контроля структуры и параметров этих зон.

Действующие в настоящее время «Правила безопасности в угольных шахтах» в редакции Приказа Ростехнадзора от 19 ноября 2013 г. № 550 и другие нормативные материалы предполагают использование интеллектуальных систем получения информации и управления ей на основе применения современных технических средств телекоммуникации в форматах единого комплекса контролируемых параметров горной среды, критериев и регламента управления состоянием среды, в том числе технологии ведения горных работ с учетом форматов многофункциональной системы безопасности (МФСБ).

Наиболее ответственным функционалом в составе рассматриваемой в работе МФСБ представляется система контроля безопасного состояния горного мас-

сива, прогноза внезапных выбросов, горных ударов, непрерывного текущего аэрогазового состояния горных выработок. Система должна предусматривать проведение процедуры мониторинга геодинамических, газодинамических и техногенных процессов средствами сейсмических и геомеханических наблюдений с учетом действующего аэрогазового контроля.

Особым образом необходимо подчеркнуть, что именно синхронизация оперативного анализа информационных потоков в системе мониторинга геодинамических и газодинамических процессов в зоне влияния горных работ способна обеспечить объективный контроль и прогноз развития опасного динамического явления. При этом должен быть реализован *дистанционный принцип* непрерывной регистрации параметров, функционально связанных с динамикой состояния контролируемой системы, что и составляет основу геоинформационной науки.

Несмотря на вышедшие в последние годы изменения и дополнения к «Правилам безопасности», до настоящего времени не существует однозначно трактуемых, единых нормативно-методических указаний по проектированию МФСБ, необходимой комплектации, архитектуре и методическому обеспечению функционирования систем контроля состояния горного массива, их аппаратурной и функциональной совместимости с другими системами, в частности с системами аэрогазового контроля (АГК). Указания на необходимость соответствия основных технических характеристик создаваемых многофункциональных систем контроля и их подсистем требованиям технических регламентов или национальных стандартов по промышленной безопасности, как минимум, потребуют значительного обновления ряда норм либо включения в них новых разделов, содержащих стандарты их комплектации и регламент функционирования.

Отметим, что каждый из рассматриваемых в настоящей работе информационных каналов (сейсмический и аэрогазовый, см. Рисунок 3.1) по определению содержат все основные атрибуты классических геоинформационных систем (ГИС), а именно: регистрацию, обработку, анализ, передачу той или иной параметрической пространственной информации с целью ее анализа, визуализации и принятия оперативного решения, соответствующего целевому функционалу.

Это дает все основания, используя принципы построения ГИС, добиться желаемых характеристик общешахтной МФСБ в целом. В данной работе таким образом рассмотрена система контроля структуры и оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива в синхронизированном режиме с системой АГК в координатном и физико-геологическом пространстве зон взаимовлияния горной выработки и горного массива. В дальнейшем понятие структуры массива в первую очередь будет предполагать наличие или отсутствие зон дезинтеграции горного массива естественной (тектонической) и наведенной техногенной (геодинамической) природы. При этом техногенная природа нарушения сплошности массива соответствует процессам перераспределения зон концентрации и деконцентрации компонент напряжений в области опорного горного давления, что в конечном счете приводит к развитию зон дезинтеграции в угольном пласте и во вмещающей толще и, следовательно, к перераспределению газового потока с концентрацией его в этих зонах.

Оперативное обнаружение зон дезинтеграции горного массива и контроль их напряженного состояния на достаточно безопасной дистанции от места ведения горнотехнических работ с учетом текущего контроля параметров динамики газового состава шахтной атмосферы обеспечит объективный расчет вариантов опасных сценариев развития ГДЯ.

Соответственно, в представленной работе основное внимание уделено анализу моделей связи между параметрическими потоками оценок напряженного и газового состояния горного массива.

Объектом исследований является природно-техническая система подземной разработки угольных месторождений (ПТС УМ).

Предмет исследований – компоненты структуры и параметров состояния устойчивости ПТС УМ в процессах проходческих и очистных работ с оценкой развития геогазодинамических явлений (ГДЯ) как непосредственно в подземных выработках, так и на безопасных расстояниях от места ведения горных работ.

Цель работы. Повышение эксплуатационной безопасности угольных шахт на основе применения геоинформационной системы, обеспечивающей непрерыв-

ный дистанционный контроль и оценку зависимости структуры и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива и метанообильности горных выработок в зоне их взаимовлияния.

Идея работы. Дистанционное обнаружение зон дезинтеграции горного массива от места ведения горнотехнических работ сейсмическими технологиями как потенциальных источников скопления газа метана под давлением и фиксация характера изменения тренда его концентрации по мере приближения к этим зонам позволяют эффективно осуществлять прогноз развития ГДЯ. Прогноз развития и характер ГДЯ качественно реализуется на уровне двух установленных регламентом «Правил безопасности» (ПБ) оценок «опасно» или «неопасно» в рамках разработанной геоинформационной системы. Система должна обеспечить регистрацию, обработку и анализ совмещенных пространственно-временных, независимых по способам измерений, геоданных сейсмического и аэрогазового контроля структуры и состояния горного массива и в варианте «опасно» сформировать возможный перечень технологических мероприятий в соответствии с установленным на предприятии регламентом.

Основные задачи исследований:

1. Анализ условий функционирования области взаимодействия динамической системы «геологическая среда–подземная выработка».
2. Обоснование схем непрерывного сейсмического контроля структуры и градиента горного давления на необходимую дистанцию в пределах зоны взаимного влияния подземной выработки и горного массива.
3. Разработка методологии и технологии активной и пассивной сейсмической локализации горного массива в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового контроля.
4. Обоснование системы интегральных критериев, формируемых по регламентным параметрам инструментальных методов оценки напряженного состояния горного массива и детерминированных геомеханических моделей на основе контролируемых сейсмических и аэрогазовых параметров горного массива.

5. Разработка системы непрерывного контроля и прогноза развития ГДЯ в формате специализированной геоинформационной панели как составной части многофункциональной системы безопасности шахты.
6. Организация функционирования геоинформационной панели с целью непрерывного контроля геогазодинамического состояния горного массива на региональном и локальном масштабных уровнях шахтного поля в прогнозных оценках «опасно» и «неопасно» с учетом процессов управления технологиями ведения горных работ.

Фактический материал и методы исследований. В основу диссертационной работы положены результаты производственной и научной деятельности кафедр автоматики и компьютерных технологий и геоинформатики Уральского государственного горного университета и ООО «ИНГОРТЕХ» в период с 1997 по 2018 гг.

Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках Комплексного плана Российской Академии наук «Безопасность горных работ». Результаты исследований отражены в подготовительных материалах доклада в Правительство РФ «Безопасность горных работ в Российской Федерации: состояние, проблемы, решения», 2017–2019 гг. Основной фактический материал получен при проведении сейсмических и аэрогазовых наблюдений на угольных шахтах Кузбасса, Печерского бассейна, Донбасса, в угольных шахтах Вьетнама, рудных шахтах АЛРОСА, в тоннельном строительстве (Сочи, Керчь, Китай). Кроме того, были использованы фактические материалы научно-производственных и производственных организаций, а также публикации по профилю проблемы.

В комплексе проведенных работ использовался широкий спектр инженерно-сейсмических и инженерно-геологических методов, а также методов из смежных наук, включающих изучение геолого-структурных условий, компонент напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств и геодинамических условий. Кроме основных методов были использованы аппараты математической статистики, численного моделирования и математического описания

информационных систем. Лабораторные исследования выполнялись в аккредитованных лабораториях по гостированным методикам.

Научная новизна работы:

- Теоретически обоснована модель динамической природно-технической системы «геологическая среда–подземная выработка» с дискретной структурой газовой проницаемости.
- Обоснована методология и геоинформационная схема непрерывного контроля структуры и относительных оценок градиента горного давления, сейсмоэнергетического состояния и приведенной величины метаноносности в зоне влияния подземной выработки и горного массива.
- Разработана технология удаленной подземной сейсмической локализации горного массива в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового анализа метанообильности призабойного пространства в единой информационной среде.
- Предложена система формирования интегральных критериев дистанционного прогноза развития опасных ГДЯ по контролируемым сейсмическим и аэрогазовым характеристикам горного массива с учетом установленного регламента.
- Разработана система и технология непрерывного контроля и прогноза развития ГДЯ в формате специализированной геоинформационной панели в составе многофункциональной системы безопасности шахты.

Личный вклад. Диссертант лично участвовал в организации и проведении полевых исследований, сборе, анализе, интерпретации, обобщении представленных в диссертации материалов, что явилось основой разработки научно-методических и технологических принципов построения геоинформационной системы контроля и прогноза развития опасных ГДЯ в процессах ведения подземных горнотехнических работ.

Практическая значимость и реализация работы. Практическая значимость работы заключается в непосредственной направленности функционала геоинформационной панели на оптимизацию схем изучения, эффективность оценки и достоверность прогноза текущей метанообильности, возникновения и развития

опасных ГДЯ. Разработан проект программно-технического сейсмического комплекса «Микон-ГЕО» и организован серийный выпуск этого комплекса на НПО «СИБГЕОФИЗПРИБОР» (г. Новосибирск). Обоснованные автором теоретические, методологические и программно-технические разработки реализованы в действующие системы безопасности ведения подземных работ на угольных шахтах Кузбасса (8 шахт), Вьетнама (4 шахты), использованы в геотехническом мониторинге строительства 9-ти автодорожных тоннелей в г. Сочи (2010–2018 гг.), строительстве железнодорожного тоннеля по Керченскому проекту (2018 г.), строительстве 5-ти автодорожных тоннелей в Китае, на рудниках СУБРа и АЛРОСА (2016–2018 гг.). В настоящее время на подземных предприятиях РФ и других стран функционирует более 60-ти комплексов. Полученные данные свидетельствуют об уровне детерминации прогноза опасных ГДЯ около 75 %.

Результаты исследований используются на кафедре автоматизации и компьютерных технологий и кафедре геоинформатики УГГУ при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам: «Структурная геофизика», «Методы моделирования физических процессов», «Операционные системы и базы данных», «Практика применения автоматизированных информационно-управляющих систем в горном производстве», в разработке курсовых и дипломных проектов и работ, магистерских и кандидатских диссертаций.

Степень достоверности научных положений, методических рекомендаций и выводов основана на значительном фактическом материале по результатам экспериментального и промышленного применения разработанных методик и технологий контроля геогазодинамического состояния горного массива и объектов проветривания в условиях угольных шахт, рудников и строительства тоннелей различного назначения.

Достоверность методических и теоретических разработок автора подтверждена проверкой и высокой сходимостью прогнозных оценок рисков развития опасных ГДЯ, выполненных в различных условиях ведения подземных горнотехнических работ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 13-й Международной конференции «Автоматизация в горном деле» «ISAMC-98», Республика Словакия, 8–11 сентября 1998 г.; 14-й Международной

конференции по «Автоматизации в горном деле» «ISAMC-2001», Финляндия, Тампере, сентябрь 2001 г.; 19-м Горном конгрессе Mining in the 21st century, Нью-Дели, 2003 г.; 21-м всемирном горном конгрессе, г. Краков, Польша, 2008 г.; 22-м всемирном горном конгрессе (ISAMC), г. Стамбул, Турция, 2011 г.; III Международной научно-практической конференции «ТЕХГОРМЕТ – 21 ВЕК» «Современные технологии управления процессами добычи и переработки полезных ископаемых», г. С.-Петербург, 15–16 октября 2012 г.; 13-м Всероссийском семинаре «Геодинамика. Геомеханика и Геофизика», Новосибирск, 2013 г.; республиканской конференции «Методы контроля и прогноза развития геодинамических явлений в процессах разработки месторождений твердого и углеводородного сырья, Екатеринбург, 2015 г.; 11-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная геофизика-2015», г. Геленджик, Россия, 2015 г.; VI Уральском горнопромышленном форуме III Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в горном деле», 2015 г.; I Международной научно-технической конференции «Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки», г. Екатеринбург, 2016 г.; 12-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная геофизика-2016», г. Анапа, Россия, 2016 г.; 13-й научно-практической международной конференции «Инженерная геофизика-2017».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе 19 работ – в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых журналов ВАК. Основные из них представлены в списке опубликованных работ.

Основные защищаемые научные положения:

1. Непрерывный контроль и прогноз развития опасных геогазодинамических явлений реализуется специализированной геоинформационной системой на основе методологической и программно-технической совместимости сейсмических и аэрогазовых телекоммуникационных средств сбора, обработки и анализа пространственно-временных геоданных.
2. Двухстадийный теоретический и экспериментальный подходы к развитию методологии прогноза метанообильности горных выработок ориентированы на первой стадии применением аналитического метода функционального

сведения относительных оценок общего горного давления и проницаемости выбранного объема среды и на второй стадии использованием расчета параметров газового потока в системе численного прочностного анализа деформируемого горного массива.

3. Непрерывный контроль относительных оценок градиента горного давления и приведенной величины объема газа в зоне взаимовлияния подземной выработки и горного массива обеспечивается технологиями сейсмической локализации в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового анализа.
4. Прогноз развития опасных ГДЯ в регламентных определениях «опасно» и «неопасно» осуществляется на основе функционала геоинформационной панели с учетом непрерывно контролируемых, независимых по способам измерений, сейсмических и аэрогазовых данных в координатном пространстве горного массива, что обеспечивает дистанционную оценку структуры и геогазодинамического состояния горного массива на региональном и локальном уровнях в реальных условиях угольных шахт.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 164 наименования.

Объем работы – 243 страницы машинописного текста, в том числе 88 рисунков, 8 таблиц.

Благодарности. Автор работы, используя ряд принципиальных выводов и рекомендаций, изложенных в представленной диссертации, искренне благодарит научного консультанта доктора геолого-минералогических наук Писецкого Владимира Борисовича, а также сотрудников Уральского государственного горного университета и ООО «Информационные горные технологии», принимавших в течение многих лет активное участие в разработке, конструировании, изготовлении и внедрении различной аппаратуры контроля и управления безопасностью подземных предприятий России.

1 ЗАДАЧИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО МАССИВА

Введение

Подземные выработки, опасные по газу, весьма надежно защищены программно-техническими средствами фиксирования опасной концентрации газа, входящими в состав шахтной системы автоматического газового контроля (АГК). Но, как известно, за редким исключением, система АГК до первых проявлений самого взрыва сигналов опасности не фиксирует и не передает по каналам связи. Как правило, на таком «спокойном» фоне и происходит выброс угля и газа (угольно-воздушно-пылевой смеси) и взрыв. Причин тому может быть множество, но основные из них обусловлены неразрывностью геомеханических и газодинамических процессов, развивающихся в зоне влияния горнотехнических работ. По общему мнению специалистов, основным фактором опасного развития этих процессов является отсутствие профессионального геологического изучения тектоногенетических процессов, основанного на современных методических и инструментальных средствах оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива впереди забоя выработки [2, 24, 28, 66, 125 и др.].

«В 1952 г. академиком А. А. Скочинским было отмечено: «Газ, горное давление и физико-механические свойства – таковы три фактора, совокупно обуславливающие склонность пластов угля к внезапным выбросам». Тем самым для надежного контроля уровня газовой и газодинамической опасности при ведении горных работ необходим учет (мониторинг) всех трех определяющих факторов. Следует отметить, что упомянутые факторы взаимосвязаны» [88, 89].

Серия тяжелых аварий на угольных шахтах России предопределяет усилия Ростехнадзора по принятию «кардинальных шагов по изменению стратегии контроля безопасности угольных шахт. В настоящий момент законодательно закреп-

лены новые требования к созданию современных многофункциональных систем безопасности угольных шахт» [20, 99, 106, 128, 134].

«В целом, разработка газоносных угольных месторождений сопряжена с риском динамической реализации их газовой компоненты в систему существующих горных выработок. Допустимым уровнем риска принято считать поддержание концентрации метана в рудничной атмосфере существенно ниже критических значений по условию взрывчатости [88,89]. Однако динамика структуры и параметров напряженного состояния горного массива свойств оказывают столь существенное влияние на динамику поступления метана в выработку, что технологическая реакция на повышение концентрации газа нередко фатально запаздывает» [30, 88,89].

Процесс проветривания горных выработок угольных шахт предполагает, как правило, несколько источников, принципиально определяющих их аэрологическое состояние. При этом в любой конкретный момент времени, в любой фиксированной точке выработки известен набор этих источников и их участие в определении основных параметров, что достаточно успешно осуществляется стандартными методами системы аэрогазового контроля [4, 42 и др.]. По доле влияния всех реальных источников, определяющих уровень концентрации газа метана в выработках шахт, они могут быть классифицированы на две категории: а) априори прогнозируемые по одному или нескольким газовым факторам; б) прогнозируемые с учетом негазовых характеристик, которые, в свою очередь, могут подразделяться на: 1) непосредственно зависящие от технологии ведения горных работ и 2) зависящие от тектонического и техногенного воздействия на угольный пласт, вызывающие изменение его напряженного состояния [31, 32, 56]. Исходя из сказанного, общая задача прогноза аэрогазового состояния в различных точках горных выработок сводится к задачам определения и расчета реальной (фактической) метанообильности в текущий момент времени и обоснованно предполагаемого и доказуемого, текущего значения метаноносности в ближней к выработке зоне горного массива. При этом все расчетные функции должны являться неотъ-

емлемой частью ПО единой шахтной многофункциональной системы безопасности (МФСБ).

Одной из наиболее фундаментальных основ МФСБ является проблема разработки эффективных программно-технических средств контроля безопасного состояния устойчивости горного массива по компонентам НДС, аэрогазового состояния шахтной атмосферы и прогноза внезапных выбросов и горных ударов [53, 88, 89, 113, 134]. При этом известно, что задача прогноза места и энергии развития сейсмических и иных динамических процессов требует привлечения значительных технологических, методических и научных усилий. Процессы техногенного воздействия на горный массив формируют зоны аномальных напряжений с развитием в них деформаций различной интенсивности на расстоянии от нескольких десятков до сотен метров от выработки. При этом следует определять контуры зоны влияния как область возрастающих деформаций пластического и упругого типов, которые приводят к значимой перестройке структуры газовой проницаемости массива горных пород. Соответственно, внутри контура этой зоны формируются, как минимум, две динамические области проницаемости, первая из которых примыкает непосредственно к обнажению выработки (контактная область), а вторая – вдали от нее на не прогнозируемом расчетными методами расстоянии. В этой зоне граница перехода упругих деформаций в пластические находится в крайне неустойчивом состоянии, что может приводить к развитию опасных ситуаций – резким (импульсным) повышениям метанообильности, выбросам угля, породы в забой и т. п. опасным динамическим явлениям [12, 29 и др.].

В настоящий момент все предлагаемые методики определения опасных концентраций газа метана в выработке предполагают контроль метанообильности контактной области [93], в связи с чем в полной мере не решается проблема прогноза возможного развития деформационных процессов и, следовательно, газовой проницаемости во второй области. Другими словами, с научной точки зрения необходим прогноз как вероятностное научно-обоснованное суждение о будущем состоянии какого-либо явления или объекта опасности.

По существу, упомянутые в ПБ регламентированные методы и средства контроля параметров НДС и газового состояния шахтной атмосферы фиксируют текущие значения названных параметров без оценки детерминированных связей между ними, определяющих уровни опасности возможных сценариев наступления опасных динамических процессов [20]. «Формирование и изменчивость параметров НДС горного массива в реальных условиях строительства подземных сооружений определяется суперпозицией естественных гравитационных и геодинамических полей в совокупности с процессами техногенной трансформации подземного пространства. В такой динамической природно-технической системе (далее – ПТС) развитие многих инженерно-геологических процессов происходит по неочевидным сценариям» [11, 30, 41, 52, 88 и др.].

«По этим причинам достоверность прогноза структуры и параметров НДС на безопасном удалении от обнажения массива возможна только с применением современных сейсмических технологий» [52, 80, 87, 161, 162 и др.], что определяет, в том числе, изменение газовой проницаемости в зоне взаимовлияния массива с подземной выработкой, и именно эти параметры могут быть положены в основу функционального перехода к регламентным оценкам уровней риска наступления опасных геогазодинамических явлений (ГДЯ).

Представленные в настоящей работе исследования посвящены обоснованию, теории, методологии и практике решения ряда основных вопросов влияния текущей метаноносности угольного пласта и вмещающих пород с учетом их напряженно-деформированного состояния с целью повышения *объективности опережающего прогноза* метанообильности для достижения основной цели – аэрологической безопасности в местах ведения очистных или подготовительных работ.

При этом в качестве постулата принято тривиальное положение: нормальный рабочий аэрогазовый режим в выработке соответствует межзональным состояниям горного массива с точки зрения наличия и развития в нем зон дезинтеграции – областей значительной трещиноватости – в соответствии с пространственным распределением и перераспределением компонент напряжений. Суще-

ственное изменение метанообильности определяет развитие двух возможных режимов газового состояния шахтной атмосферы – либо «всплески» концентрации метана до недопустимых с точки зрения аварийности значений, либо резкое снижение концентрации, если зона дезинтеграции не содержит газа. Какой из этих двух режимов наиболее вероятен в конкретной ситуации, представляется возможным установить по тренду изменения концентрации метана в процессе приближения забоя к названным зонам. Подчеркнем – положение этих зон должно быть заранее известно на достаточно удаленной дистанции от выработки, что и является проблемой, которую в условиях угольных шахт предлагается решать на основе известных и хорошо себя зарекомендовавших сейсмических технологий мониторинга процессов проходки транспортных тоннелей [16, 139, 141, 142, 143, 144, 145, 147, 158 и др.].

«Текущие рыночные условия заставляют угольную промышленность переходить на высокоинтенсивные технологии выемки угля, которые могут быть достигнуты за счет автоматизации производственных процессов угледобычи и увеличения производительности добычных участков. Использование высокоинтенсивных технологий выемки угля и существенное увеличение нагрузок на очистной забой требуют гибкого управления силовыми характеристиками механизированных крепей в соответствии с изменяющимися в пределах выемочных полей и блоков горно-геологическими и горнотехническими условиями, а также характером изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя с учетом его циклического движения. Это позволяет, в свою очередь, оптимизировать энергетические затраты, снижать, во многих случаях, себестоимость добытого угля, продлевать срок службы механизированных крепей, предотвращать возможность возникновения чрезвычайных ситуаций» [23, 24, 113].

«Одной из проблем, снижающих эффективность внедрения перечисленных мероприятий, является отсутствие предварительного прогноза геомеханического состояния горного массива» [113] в ближней и дальней зонах влияния проходческих или очистных работ. В связи с тем, что «протекание геомеханических про-

цессов в углепородном массиве при ведении горных работ сопровождается развитием ГДЯ различного типа, необходим системный подход к анализу взаимообусловленных разнородных факторов, влияющих на состояние углепородного массива. Такой анализ не представляется возможным без использования современных информационных технологий» [52] (и, в особенности, геофизических методов) регистрации, обработки и интегрированного анализа физических параметров состояния горного массива с целью своевременного прогноза развития опасных ГДЯ.

1.1 Состояние специализированного геоинформационного обеспечения безопасности горного производства в угольных шахтах

Активное внедрение и развитие геоинформационных программно-технических систем определяется необходимостью достижения оптимального соотношения «добыча/безопасность». На угольных шахтах и рудниках используются специализированные горно-геологические системы, обеспечивающие функциональную поддержку решения многих задач геологии, геомеханики, горного планирования, маркшейдерии и оптимизации различных производственных процессов. «Все автоматизированные системы горных предприятий могут быть классифицированы следующим образом» [70, 113].

1. Горно-геологические системы общего назначения. Системы такого профиля стандартно включают в себя такие разделы, как: геологическое и геомеханическое моделирование, проектирование и планирование горных работ и т. п. Наиболее известны в мире компании, которые разрабатывают системы подобного типа: Gemcom, Surpac и Datamine, Micromine (основная горно-геологическая система).

2. Специализированные горные системы. «Существует большое количество таких систем, которые создаются специализированными компаниями, самими горными предприятиями или исследовательскими учреждениями» [23] с учетом

специфики горно-геологических и технологических условий подземной разработки месторождений того или иного типов.

3. Многофункциональные системы безопасности горного производства. В настоящее время цели и задачи многофункциональных систем безопасности угольных шахт определены ГОСТом Р 55154-2012 «Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные» [20].

Достаточно хорошо известны и доступны отечественным предприятиям системы RockWare и Vulcan. Эти «системы сочетают в себе функции автоматизированного проектирования топологии угольных пластов с возможностью учета их геологических, геомеханических, геофизических и гидрогеологических характеристик для оптимального хранения и оперирования ими в геоинформационных форматах в ГИС» [23]. Пример моделирования подземной части угольного предприятия в системе RockWare представлен на Рисунке 1.1.

Близкие к названной специализированные системы горной автоматизации под названием MineScape, Gemcom и Surpac «включают в себя функционал, способный проводить различную обработку информации о состоянии горного предприятия» [23], начиная от ввода первичных данных и заканчивая каркасным и блочным моделированием месторождений, а также проектированием и планированием горных работ.

Широко известна и успешно применяется на угольных шахтах РФ австралийская геоинформационная система Micromine, поддерживаемая в РФ компанией ООО «Макромайн-Рус». «Данная система обладает широким спектром инструментария для разработки и поддержки решения задач автоматизации процессов открытой и подземной разработки твердого и углеводородного сырья. Средства этой системы позволяют решать следующие задачи: создание баз данных и их импорт-экспорт в текстовых и картографических форматах; создание графиков, разрезов, планов, 2D и 3D-изображений и гистограмм; статистический анализ геологоразведочной информации; интерактивная трехмерная интерпретация разрезов и планов; каркасное моделирование рудных тел и поверхностей; построение

и оперирование блочными моделями с заданным размером элементарных блоков; оценка запасов методом разрезов. В системе Micromine имеются специализированные пакеты для обработки геологических, геохимических, геофизических, геодезических данных с возможностью трансформации географических сетей, вы-

полнения функций проектирования карьеров и иных работ на шахтах и рудниках» [20]. Вид программного окна Micromine представлен на Рисунке 1.2.

«Большим плюсом данной системы является наличие специальных скриптов-макросов для автоматизации работ по заполнению больших объемов данных. Такая система дает возможности при минимальных затратах времени решать задачи с высокой степенью точности предоставляемых результатов» [23].

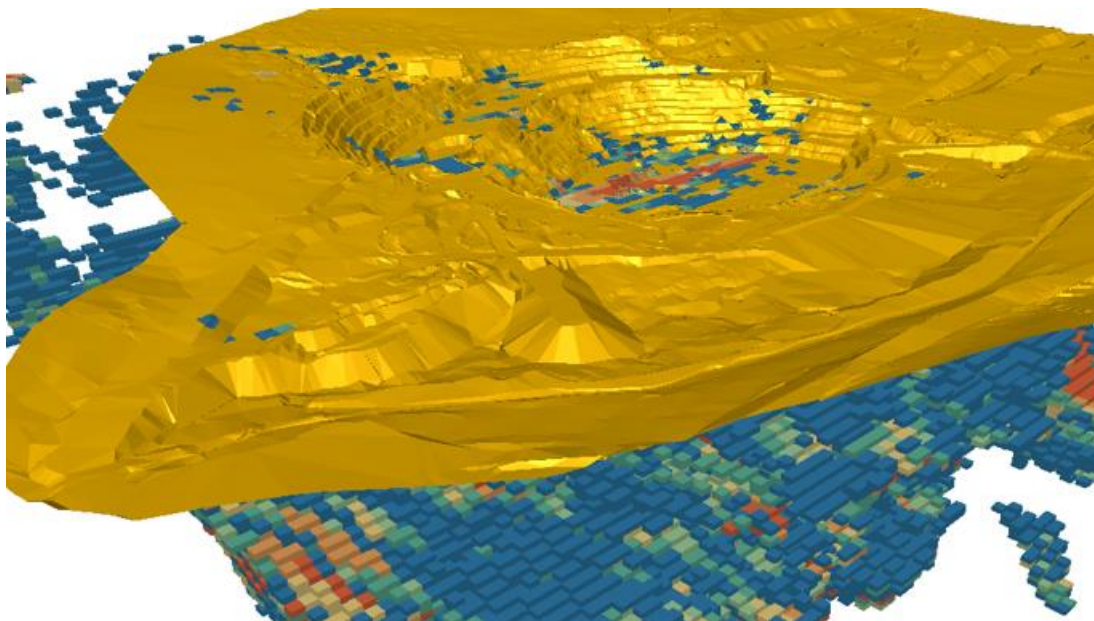


Рисунок 1.2 – Вид программного окна ГИС Micromine

Рассмотренный ряд горно-геологических геоинформационных систем не исчерпывает весь известный комплекс аппаратных и программных технологий, но отражает основные типы и возможности процессов сопровождения и управления горным производством.

Отметим особым образом, что все перечисленные системы и им подобные не предполагают оперативную поддержку принятия решений по краткосрочному прогнозу развития опасных ситуаций и, тем более, газогеодинимических процессов и явлений.

«При увеличении глубины разработки месторождений полезных ископаемых и усложнении горно-геологических и геомеханических факторов возрастает горное давление и снижается безопасность и эффективность ведения горных ра-

бот. Наличие непрерывной и достоверной информации о структуре и параметрах НДС горного массива вблизи горных выработок позволяет прогнозировать неблагоприятные проявления горных динамических явлений (ГДЯ), оценивать безопасность работы в примыкающих к наблюдаемому участку выработках, а также заблаговременно предупреждать о соответствующих опасностях персонал шахт» [23].

«В настоящее время изучение напряженно-деформированного состояния угольного пласта осуществляется различными комплексными методами, использующими в своём наборе как лабораторные и аналитические исследования, так и инструментальные наблюдения [33, 35 и др.]. Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками, что и предопределяет ограничения на их использование в определенных условиях. Все методы оценки напряженно-деформированного состояния угольного пласта можно подразделить на три группы, различные по физическим и методологическим подходам: геологические, геомеханические и геофизические» [23].

«Геологические методы основаны на анализе общей геологической обстановки, а также на визуальном осмотре горных выработок, деформированных под действием горного давления. Для точного определения величин и направлений, действующих в угольном пласте, необходимо пользоваться геомеханическими и геофизическими измерениями. Но для приближенной предварительной оценки допускается использование результатов анализа геологического и геотехнологического состояния массива горных пород» [23].

В первую очередь «определяется тип массива горных пород, который может относиться к одной из четырех групп: породный массив кристаллического фундамента, область контрастно выраженной складчатости чехла платформ, слабо метаморфизованные породы чехла, а также осадочные комплексы (к которым относятся месторождения бурого угля, солей и гипса). Для первых двух типов характерно существенное проявление тектонических сил, при этом горизонтальные напряжения разного знака могут превосходить вертикальные. В массиве третьей группы тектонические силы проявляются весьма слабо, для четвертой же группы

напряженно-деформированное состояние массива определяется исключительно весом налегающих пород» [40, 70] и подземной инфраструктурой.

«Дополнительная уточняющая информация о горизонтальных напряжениях может быть получена из анализа горизонтальных перемещений земной коры. Значительные перемещения обычно обусловлены высоким уровнем напряжений, действующих в горизонтальной плоскости. При этом в сильнотрещиноватых породах, к которым относится угольный пласт, максимальные величины напряжений меньше, чем в аналогичных сплошных кристаллических массивах, что и представляет основную угрозу развития опасных пластических и динамических деформационных процессов» [23].

«Развитие инженерно-геологических процессов, в том числе и опасных, в границах области активного влияния горнотехнических работ в подземной выработке (подготовительного или очистного забоев) на горный массив обусловлено, как известно, изменением структуры и параметров НДС» [12, 65, 70 и др.]. Здесь следует подчеркнуть особое значение термина «структура НДС», связанного с представлениями о дискретном (блоковом) строении горного массива, что определяет существенные особенности распределения и перераспределения компонент напряжений в зоне влияния подземных горных работ.

Оценка напряжений «в зоне обнажения массива (в пределах первых метров) осуществляется рядом инструментальных методов [33], регламентированных федеральными или ведомственными документами для тех или иных инженерно-геологических условий и технологий ведения горных работ (давлильные установки, дискование керна, извлечение штыба и др.). Широко известны и экспериментально-аналитические методы, основанные на расчетах напряжений в окрестности выработки по известным (измеренным) первоначальным напряжениям на обнажении массива» [26, 52, 70 и др.].

В настоящее время нет общепризнанных представлений о природе геогазодинамических явлений (ГДЯ). По мнению одних авторов, основная роль в процессе выбросов принадлежит горному давлению, по мнению других – сжатому газу; некоторые исследователи считают, что в зонах выбросов газ находится глав-

ным образом в свободной фазе, другие – в сорбированном или кристаллогидратном состояниях. Существует мнение, что давление газа в угольных пластах, расположенных ниже зоны газового выветривания, равно гидростатическому, подчинено закону Клайперона–Менделеева [11]. Зачастую противоположные представления о природе явления затрудняют возможности разработки методов прогноза таких метановыделений.

Общепризнанная методика расчета метановыделений из пласта предполагает суммирование по источникам выделения: обнаженная поверхность пласта и отбитый уголь. При этом прогноз метановыделений может определяться по данным геологического опробования природной метаноносности угольных пластов или по фактическому метановыделению в ранее пройденных подготовительных выработках.

Расчет метановыделения с обнаженной поверхности пласта с учетом природной метаноносности угля осуществляют, исходя из интенсивности метановыделения с единицы площади обнажения поверхности угольного целика и времени протекания процесса газовой выделения. При расчетах газовой выделения с обнаженных поверхностей пласта учитывают факторы, характеризующие снижение газоносности пласта и темпы снижения интенсивности метановыделения во времени. Газовыделение из отбитого угля оценивают на основе фактических данных об его интенсивности, времени нахождения отбитого угля в выработке и разности природной и остаточной метаноносности угля. Чаще всего взрывоопасная обстановка возникает в подготовительных выработках, проводимых по газоносным угольным пластам, и составляет 40–50 % взрывов и только 20–28 % – в очистных забоях и выработанном пространстве [30].

«В настоящее время принято считать, что концентрация метана и других горючих газов подвергается случайным изменениям во времени и пространстве. В связи с этим описание закономерностей образования метановоздушных смесей и прогноз возникновения взрывоопасных ситуаций принято производить на основе вероятностных методов, так как известные детерминированные критерии недостаточно отражают физическую сущность газовой выделения» [111]. Таким образом,

существующие методы определения газообильности приводят либо к значительным (фатальным) погрешностям, либо к значительным техническим трудностям. Методы носят эмпирический характер, связанный со спецификой исследуемых объектов и не учитывают газодинамические процессы, протекающие в горных выработках. Согласно известным исследованиям, расчетные значения в 80 % случаев дают отклонения от фактических данных с превышением значений более чем на 30 % [2]. Следовательно, необходимо предложить решения, основанные на очевидных и детерминированных связях в процессах эволюции НДС и газодинамических потоков.

«Принципиально важным обстоятельством в решении проблемы организации эффективного и детерминируемого на значимом уровне метода прогноза событий, связанных с ГДЯ, является необходимость дистанционной оценки структуры и параметров НДС по сейсмическому отклику горного массива» [52, 154]. «Действительно, фундаментальная связь тензора «малых» напряжений во фронте упругой волны с тензором «больших» напряжений, действующих в том же объеме массива [74, 139, 140], представляет собой прямую основу для функционального перехода от сейсмических атрибутов сигналов упругих волн различного типа к оценкам структуры и параметров НДС в объеме пространства от первых до нескольких десятков и сотен метров во все стороны от обнажения массива в выработке. Такие оценки не совпадают по уровню с оценками инструментальных методов на обнажении массива по следующим понятным причинам:

- различие в физических процессах прямых и дистанционных методов измерений;
- вблизи обнажения массива оценки напряжений искажены свободной поверхностью с неизвестной функцией релаксации» [70].

«Представление реального горного массива в виде дискретной системы позволяет получить решения для упругих модулей как функций дискретности и давления. Можно считать, что процессы течений твердой и флюидной (газовой) фаз в дискретных средах согласуются в диапазоне скоростей, сопоставимых со скоростями подземных горных работ (проходческие или очистные процессы). Такой

подход имеет целый ряд содержательных отличий и преимуществ, которые в первую очередь позволяют конструктивно решать проблемы миграции газа в приложении к геодинамическим процессам» [52]. С этой точки зрения общее давление в любой точке массива горных пород с дискретной структурой представляется следующим очевидным образом [16]:

$$P = P_g \pm P_d,$$

где P_g – нормальное (статическое, или гидростатическое) давление; P_d – добавочное (динамическое, или сверхгидростатическое) давление, зависящее от времени, технологий проходческих или очистных работ и текущего геодинамического режима бассейна.

«В моделях сред с дискретной структурой общая проницаемость k для выбранного объема среды определяется тремя типами проницаемости:

- матричной проницаемостью материала блоков kI ;
- проницаемостью межблокового пустотного пространства kII ;
- контактной проницаемостью на границах блоковых ансамблей $kIII$.

В порядке перечисления типов проницаемости понятно, что самое высокое значение проницаемости в модели дискретных сред – $kIII$. Проницаемость композиции слоев с дискретной структурой по нормальному (вертикальному) направлению будет существенно ниже, чем в горизонтальном направлении, т. к. величина пустотного промежутка между слоями (горизонтальный контакт блоков) всегда значительно меньше, чем между боковыми сторонами блоков. Пересечения сторон блоков в соседних слоях в отдельных точках также не могут существенно увеличить «вертикальную» проницаемость дискретной толщи. Тогда следует предположить, что при существовании какого-то общего направления газового потока в каждом из рассматриваемых слоев будут собственные величина и направление флюидного потока. Таким образом, дискретные системы обладают явной анизотропией параметров газовых течений и, следовательно, проницаемость в таких системах является тензором, зависящим от тензора напряжений» [10, 22, 52].

В следующих разделах настоящей работы рассматривается «функциональное сведение проницаемости и общего горного давления, что, в принципе, вполне приемлемо для решения оценочных миграционных задач» [52], в которых важно не столько знание абсолютных параметров газового потока, сколько определить зоны его истечения и стечения (концентрации) на безопасных расстояниях от выработок [16, 52].

1.2 Методы аэрологического обеспечения безопасности производства в угольных шахтах

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности [117, 118, 119] требуют оборудования шахты комплексом систем и средств, обеспечивающим организацию и осуществление безопасности ведения горных работ, контроль и управление технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных условиях. Эти системы и средства объединяются в многофункциональную систему безопасности (МФСБ). Одна из функций МФСБ — обеспечение аэрологической безопасности, в том числе, за счет обязательной реализации на шахтах систем аэрогазового контроля (АГК).

«Система АГК обеспечивает безопасность ведения горных работ путем непрерывного автоматического измерения (контроля) параметров, характеризующих газовый и пылевой режимы шахты, сбора, отображения, хранения и анализа информации, управления установками и оборудованием, поддерживающими безопасное аэрогазовое состояние в горных выработках шахт. Система АГК автоматически формирует и обеспечивает подачу управляющих команд на оборудование (устройства, агрегаты), осуществляющее нормализацию аэрогазового состояния, либо (в аварийной ситуации) блокировку производственной деятельности на контролируемом участке» [89].

Система АГК обеспечивает [37, 55, 62, 93]:

- «автоматическое непрерывное измерение (контроль) параметров рудничной атмосферы (концентрации газов, скорости и направления движения воздуха);
- непрерывный контроль параметров работы главных вентиляторных и газоотсасывающих установок и положения дверей вентиляционных шлюзов;
- контроль и управление вентиляторами местного проветривания;
- принятие своевременных мер по обеспечению промышленной безопасности путем отключения напряжения питания электрооборудования и оповещения работников;
- предоставление информации о контролируемых параметрах специалистам шахты, которые осуществляют оперативное управление горными работами и обеспечивают безопасность горных работ;
- хранение информации и возможность последующего ее использования при разработке комплексных общешахтных мероприятий по обеспечению промышленной безопасности, при расчетах количества воздуха, подаваемого в горные выработки, а также для установления категории шахты по газопроявлениям и в целях текущего (оперативного) обнаружения природных и техногенных опасностей, влияющих прямо или косвенно на состояние рудничной атмосферы;
- передачу информации об аэрологической обстановке на шахтах в режиме реального времени в территориальные органы государственного горного надзора и Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации».

«При реализации функций системы АГК с помощью многофункциональных программно-технических комплексов, используемых для построения автоматизированных систем управления шахт, на их части, реализующие

функции системы АГК, также распространяются все требования действующих нормативных документов» [93].

«При реализации на угольных шахтах основными функциями системы АГК являются:

- автоматический контроль (измерение) содержания метана, оксида углерода, других опасных и вредных газов, кислорода и пыли в рудничной атмосфере;
- автоматическая газовая защита;
- автоматический контроль расхода воздуха;
- автоматический контроль параметров работы главных вентиляторных установок и газоотсасывающих установок;
- автоматический контроль и управление работой вентиляторов местного проветривания;
- автоматический контроль положения дверей вентиляционных шлюзов;
- телесигнализация и телеизмерение контролируемых параметров рудничной атмосферы, вентиляционного оборудования (сооружений) и аппаратов электроснабжения;
- телеуправление вентиляционным и другим оборудованием, используемым для поддержания безопасного аэрогазового режима в горных выработках» [93].

«Функции системы АГК реализуются с помощью единой технической системы или совокупности технических устройств и систем, обеспечивающих реализацию одной или нескольких функций системы АГК.

В состав системы АГК входят:

- техническое обеспечение – совокупность технических средств, предназначенных для реализации функций системы АГК: стационарные датчики, обеспечивающие контроль состава и параметров рудничной атмосферы, запыленности и скорости (расхода) воздуха; стационарные подземные устройства контроля и управления; сигнализирующие устройства; источники питания; линии (каналы) связи; барьеры

искробезопасности и наземные устройства сбора, обработки, отображения и хранения информации;

- информационное обеспечение – совокупность систем классификации и кодирования технической и технологической информации, сигналов, характеризующих аэрогазовый режим и контролируемые технологические процессы, данных и документов, необходимых для реализации функций системы АГК. В состав информационного обеспечения также входят нормативы на автоматически формируемые документы, в том числе на машинных носителях информации, необходимые для осуществления контроля выполнения требований промышленной безопасности при эксплуатации шахты;
- математическое обеспечение – совокупность методов решения задач анализа, контроля и управления, модели, алгоритмы и их описание, предназначенные для обнаружения, прогнозирования и предупреждения аварий и аварийных ситуаций;
- программное обеспечение – совокупность программ, обеспечивающих реализацию функций системы АГК, и их описание;
- метрологическое обеспечение, в состав которого входят описание типа системы АГК и компонентов ее измерительных каналов, методики поверки, средства поверки и руководства по их эксплуатации;
- организационное обеспечение, состоящее из документов (инструкций, регламентов), определяющих структуры и функции подразделений, действия персонала, использующего систему АГК и обеспечивающего ее нормальное функционирование» [93].

Современные системы АГК, разработанные российскими и зарубежными организациями и внедряемые на угольных предприятиях РФ, в полной мере соответствуют всем требованиям отраслевой нормативной документации. На шахтах Российской Федерации эксплуатируются как отечественные системы АГК (Микон-I, III [100, 106], НПФ «Гранч», так и зарубежные (Девис Дерби Сибирь,

Тролекс). Многолетний опыт внедрения и взаимодействия со службами эксплуатации и обслуживания на шахтах позволяет производителям обеспечивать непрерывное совершенствование всех видов систем АГК, что особенно актуально в связи с многократным увеличением производительности современных добычных и проходческих комплексов.

Повышение эффективности систем АГК достигается за счет комплексного улучшения качества их функционирования. К наиболее актуальным можно отнести следующие направления работы, принципиально влияющие на повышение безопасности ведения горных работ [46, 62, 112]:

- увеличение быстродействия чувствительных элементов метанометров и датчиков токсичных и вредных газов, что обеспечивает меньшее время реакции на превышение допустимых концентраций и, соответственно, более оперативную выработку управляющих воздействий;
- уменьшение массогабаритных размеров и увеличение энергоэффективности технических средств системы АГК (датчиков, контроллеров, источников питания), что позволяет более эффективно внедрять, эксплуатировать и обслуживать системы АГК;
- использование цифровых физических интерфейсов передачи данных на всех уровнях (сервер, подземный коммутатор, контроллер, датчик), что в итоге позволяет повысить надежность и достоверность передаваемых данных, а также уменьшить количество используемой кабельной продукции;
- использование распределенных систем сбора и обработки данных (установка удаленных модулей сбора данных в месте установки группы датчиков и передача данных в контроллер по цифровому интерфейсу; использование удаленных модулей сбора данных вместо контроллера), что позволяет оптимизировать количество технических средств системы АГК, а также упростить их эксплуатацию и обслуживание;

- использование оптических линий связи и коммутаторов, обеспечивающих передачу данных в подземных горных выработках на скоростях до 1 Гбит/сек.;
- использование радиоканала для передачи данных, что позволяет передавать данные измерения (контроля) параметров АГК с движущихся машин и механизмов (очистные и проходческие комбайны, буровые станки, погрузочно-доставочные машины);
- увеличение емкости и срока службы источников питания, элементов систем АГК;
- постоянное совершенствование методов обработки данных, а следовательно и алгоритмов работы программного обеспечения системы АГК на всех уровнях (датчик, модуль удаленного ввод/вывода, контроллер, коммутатор, сервер), что позволяет существенно повысить объем передаваемых данных (количество, скорость, надежность, достоверность);
- техническая и программная совместимость с любой, внедряемой на шахтах, современной аппаратурой контроля и управления, что, в частности, позволило создать специализированную геоинформационную систему, подробное рассмотрение которой и является предметом исследований в представленной диссертационной работе;
- реализация взаимодействия системы АГК с другими системами МФСБ как на верхнем, так и на нижнем уровне, что позволяет проводить комплексный анализ данных и получать новую информацию, характеризующую состояние промышленной безопасности контролируемого объекта (в частности, передача данных АГК от персональных газоанализаторов с использованием беспроводного радиоканала системы позиционирования; передача подтверждения приема горнорабочим сигнала аварийного оповещения, что имеет существенное значение при реализации комплекса технических средств геоинформационной системы, призванной обеспечить

принятие оптимального решения персоналом шахты, если результатом прогноза будет сигнал «опасно»).

1.3 Методы и системы контроля состояния устойчивости горного массива в практике применения российских и зарубежных технологий ведения подземных горных работ

В соответствии с действующим законодательством подземные выработки (шахты, тоннели и т. п.) являются опасными производственными объектами, и внедрение систем горного мониторинга с целью прогноза процессов развития опасных динамических явлений и внезапного изменения инженерно-геологических условий для них должно осуществляться в соответствии с действием Федерального закона от 21 июля 1997 г. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [95].

«В состав геофизических наблюдений в зависимости от конкретных инженерно-геологических условий включаются [3, 73, 121, 122, 132, 133]:

а) сейсмоакустические наблюдения (сейсмическое профилирование с земной поверхности и из подземных выработок, сейсмический каротаж, многоточечное сейсмическое просвечивание целиков между выработками и скважинами в диапазоне частот 10–500 Гц);

б) методы шумового сейсмического мониторинга;

в) акустико-эмиссионные и ультразвуковые измерения в диапазоне частот 500–30 000 Гц на обнажении забоя тоннеля и пробы грунтов;

г) электрометрические наблюдения (электрическое профилирование, вертикальное электрическое зондирование на поверхности и в подземных выработках, измерения естественного поля, георадарное обследование);

д) каротажные исследования;

е) метод электромагнитного импульсного (ЭМИ) сверхширокополосного (СШП) зондирования» [73].

«Одной из составляющих системы методов пассивного шумового сейсмического мониторинга геосреды является сейсмическая эмиссионная томография» [124, 126]. «Физической основой отечественного варианта метода эмиссионной томографии, предложенного и запатентованного группой сотрудников ИФЗ РАН» [126], является тот факт, что в геосреде существуют области слабого шумоподобного высокочастотного (более 1 Гц) сейсмоакустического излучения, активизирующиеся при низкочастотных деформационных природных и техногенных воздействиях. Эффект существования сейсмической эмиссии был обнаружен в 1975 г. Л. Н. Рыкуновым, О. Б. Хаврошкиным и В. В. Цыплаковым и зарегистрирован как открытие» [126]. «Открытию, помимо работ авторов, предшествовал ряд экспериментов, для объяснения результатов которых оказывалось недостаточно представления об экзогенной генерации сейсмических шумов. Энергетический масштаб сейсмической эмиссии гораздо менее микроземлетрясений и сейсмических ударов, что позволяет изучать тонкую структуру сейсмического процесса. Механизмы генерации сейсмической эмиссии и эволюции высокочастотных эндогенных сейсмических сигналов при распространении в геосреде не достаточно ясны. Тем не менее, существующие экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности выделения высокочастотных пространственно-когерентных сигналов эмиссионного происхождения и локализации источников излучения, находящихся на больших расстояниях от регистрирующей системы. Это позволило развить систему методов пассивного мониторинга, позволяющую изучать структуру сейсмического процесса, отслеживать пространственно-временную динамику геосреды и подготовку опасных динамических событий, выявлять неоднородности строения среды: области повышенной трещиноватости и гетерогенности, разломы и большие трещины, зоны концентрации напряжений и миграции флюида» [126].

«Таким образом, эмиссионная томография в совокупности с другими развитыми методами является действенным инструментом для экспериментальных исследований геосреды: получение временных серий трехмерных изображений распределений излучателей сейсмической энергии с оценкой параметров излучения

позволяют идентифицировать неоднородности структуры и проследивать пространственно-временной ход развития динамических процессов. Первая экспериментальная работа с использованием метода эмиссионной томографии была сделана по данным группы NORSAR в Норвегии. Позже метод использовался для исследования в сейсмоактивных, вулканических, геотермальных областях и в горном деле многими отечественными и зарубежными учеными и специалистами-сейсмологами» [126, 145, 146 и др.].

«История применения геофизических систем контроля состояния устойчивости массива горных пород в подземном строительстве и в процессах разработки месторождений твердого сырья насчитывает несколько десятилетий. Наиболее развиты сейсмические системы регистрации сейсмоэнергетического состояния массива горных пород (пассивные методы регистрации сейсмоакустической эмиссии в контуре шахтных полей). В меньшей степени применяются методы сейсмической локализации массива горных пород (регистрация сигналов отраженных волн в режиме активного механического воздействия на забой горных механизмов или импульсных воздействий ударно-взрывных типов). Но решение основной проблемы – прогноза степени риска развития опасных геодинамических явлений – остается сложной, неопределенной задачей, не реализованной в настоящее время в какой-либо приемлемой технологической схеме» [73].

«Специализированная система сейсмического контроля PASAT M предназначена для получения, накапливания и передачи шумовой сейсмической информации для последующей обработки (Рисунок 1.3). Обработка такой сейсмической информации подразумевает определение напряжений в угольном пласте и их изменения по времени и пространству (аномалии напряжений, связанные с: наличием границ оставленной разработки, воздействием угольного остатка соседних пластов, активной лавой и т. п.); определение геологических неоднородностей впереди забоя; определение параметров, описывающих физико-механические свойства (модуль Юнга, коэффициент Пуассона); определение категории грунта до начала горнотехнических работ. Преимущества данной системы заключаются в её мобильности и простоте использования. Точность получаемых результатов со-

ответствует заданным критериям достоверности получаемых результатов для мобильных специализированных систем горного производства» [71].

«Геоинформационная сейсмоакустическая система ARES предназначена для оценки опасности горных ударов на участках шахты (Рисунок 1.4). Данная система разработана для шахт, опасных по горным ударам, с возможностью применения в шахтах, опасных по газу и пыли. Задачей системы является преобразование с помощью измерительных зондов скорости механических колебаний массива горных пород в электрический сигнал, последующее его усиление, фильтрация и передача на поверхность в центр геофизической станции для цифровой обработки сигналов и их компьютерной интерпретации. Данная система ведет



Рисунок 1.3 – Система PASAT M

сейсмоакустические наблюдения в особо опасных участках шахты – лавах, с последующей оценкой опасности горных ударов. Измерительные зонды, установленные на анкерах в боковой стене штреков, преобразуют скорости механических колебаний массива горных пород в электрический сигнал. С помощью специальных средств данная система может контролировать обрывы кабеля, поляризацию сигнала и прослушивание сигнала по выбранному каналу. Данная система обла-

дает специализированным функционалом для усиления, фильтрации и определения параметров сейсмоакустических сигналов вблизи измерительных зондов. При обнаружении крупных сейсмоакустических явлений производится многоканальная запись и анализ этих событий с синхронизацией по часам GPS. Специальные расчетные модули вычисляют распределение условных энергий сейсмоакустических явлений и активность их возникновения. Аналитические модули проводят специализированный анализ регистрируемых данных на основе статистических методов с использованием функции риска при возникновении неблагоприятных событий. Для хранения архива зарегистрированных данных используются базы данных, способные хранить большие объемы информации. Для удобного восприятия зарегистрированной информации предусмотрен специальный модуль визуализации. В целом функциональность геоинформационной системы ARES предусматривает наблюдение за призабойными частями пластов с целью мониторинга и анализа регистрируемых неблагоприятных событий».

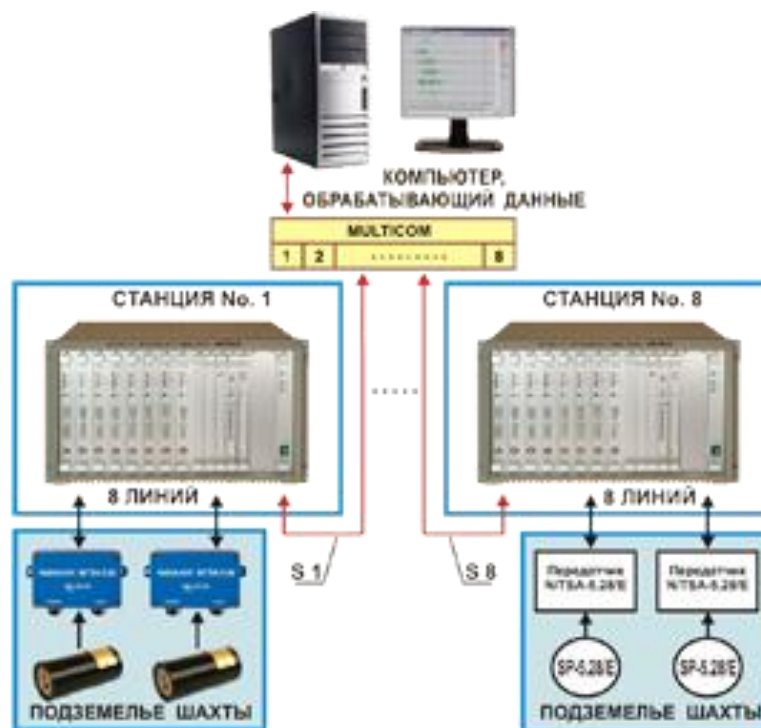


Рисунок 1.4 – Система ARES

«Геоинформационная сейсмическая специализированная автоматизированная горная система ARAMIS сочетает в себе множество инструментов для определения местоположения толчков, возникающих в районе шахты, оценку их энергии и степени опасности по горным ударам на основе применения сейсмических методик (Рисунок 1.5). Данная система, как и все ей подобные, имеет модульную структуру, каждый модуль обладает специфическим функционалом, в зависимости от выполняемых им опций. Определение энергии осуществляется на основе интегрального метода, а также спектрального анализа и цифровой фильтрации зарегистрированных событий. Модуль отображения результатов локализации на карте располагает возможностями для обеспечения масштабирования изображений сигналов, определения координат точки очага динамического явления. Дополнительные модули системы ARAMIS дают возможность расчета очага и энергии толчка в автоматическом режиме работы с предоставлением оператору отчета о зарегистрированных событиях в виде сейсмограммы. Функциональность этой системы обеспечивается за счет применения искробезопасных подземных передатчиков и аналого-цифровых преобразователей. Для максимального улавливания различного спектра сигналов применяются помехозащищенные датчики – сейсмометры (датчики скорости смещения почвы). Поверхностный центр сбора информации обеспечен высокопроизводительным регистрирующим сервером. Система анализа и визуализации на основе алгоритмов интерпретации данных проводит соотнесение опасных событий с регистрируемыми критериями обработки».

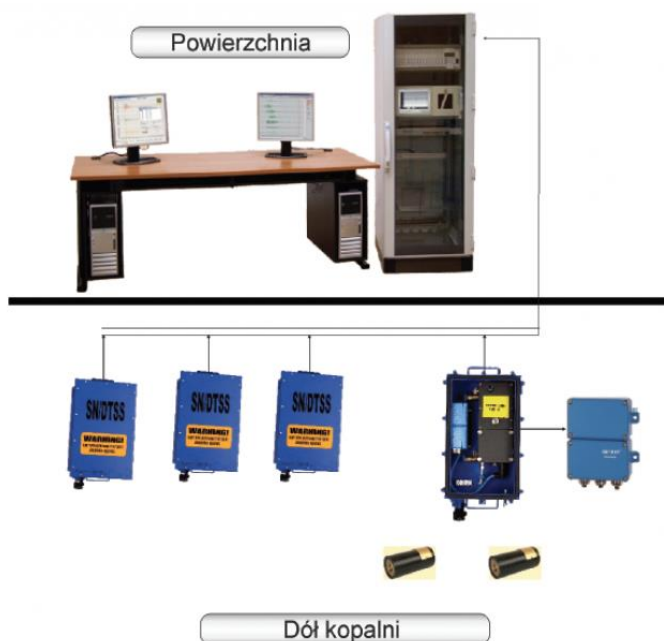


Рисунок 1.5 – Система ARAMIS

«Геоинформационная система сейсмического мониторинга GITS, разработанная ВНИМИ, представляет «собой программно-технический комплекс, предназначенный для осуществления непрерывного контроля шахтного поля на предмет выявления участков и зон активизации естественных и техногенных динамических процессов, происходящих в угольном пласте» [23, 137]. Поставленные задачи удастся достичь посредством использования распределенной сети датчиков. Данная система предполагает ввод и обработку «стационарной» информации (схемы подземных выработок, планов отработки полезного ископаемого, геологических разрезов, схем установки контрольных точек наблюдения) и текущей информации (ежедневные карты сейсмической активности, суточные графики акустической активности и т. д.). Данная система базируется на программном обеспечении фирмы Autodesk: RastArts – программа работы с растровыми изображениями, Softdesk – программа построения поверхностей, Vtchanical Desktop – программа твердотельного моделирования. Аналитические программы производят обработку сейсмических толчков и рассчитывают энергию, и в конечном счете, происходит определение зон повышенной сейсмоопасности. Пример состояния экрана диспетчера в системе GITS показан на Рисунке 1.6.

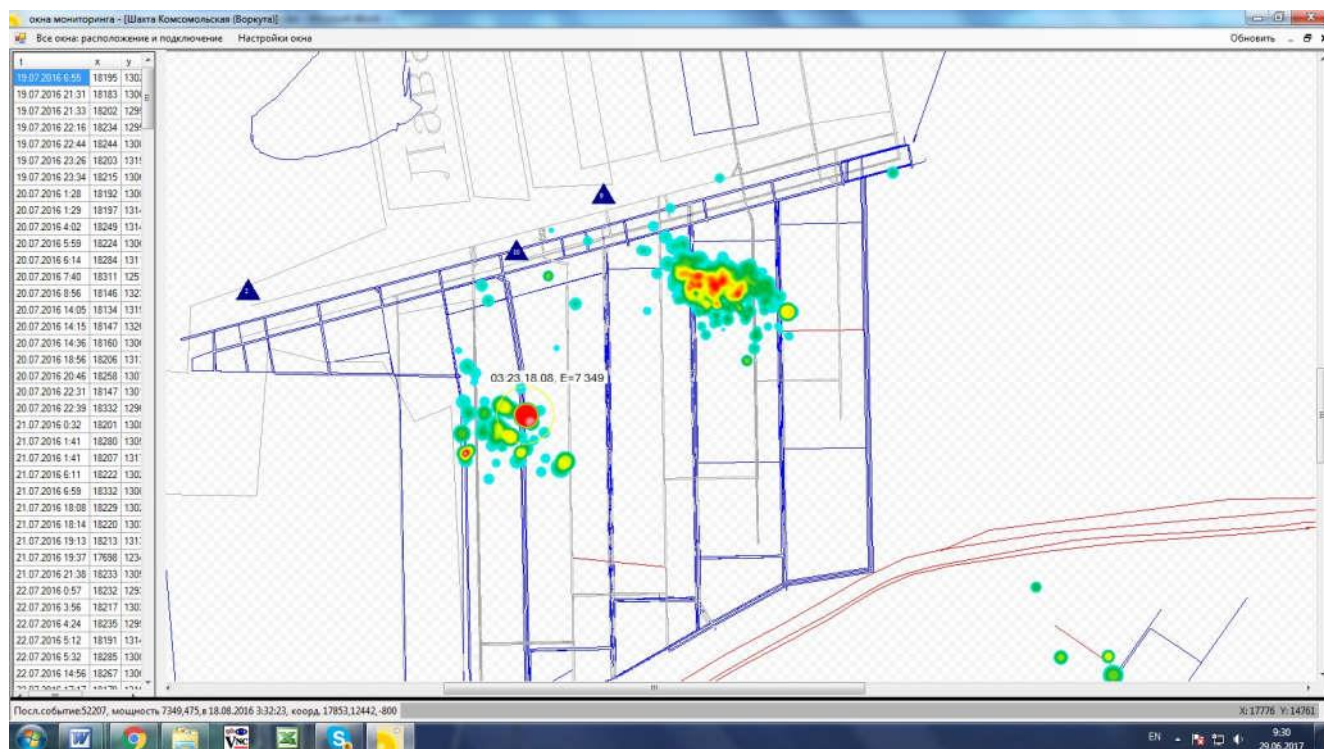


Рисунок 1.6 – Экран мониторинга ш. Комсомольская АО «Воркутауголь»

«Системы ARAMIS и GITS, как и многие другие, основаны на пассивном методе регистрации естественной и техногенной сейсмической активности горного массива. Применение этого метода и специализированной аппаратуры определено действующей Инструкцией по безопасному ведению горных работ» [94, 95].

В течение последних десятилетий в нашей стране были разработаны приборы и системы регистрации сигналов акустической эмиссии, такие как сейсмоакустический комплекс «Гроза-16», выпускаемый в Красноярске НПО «Сибцветметавтоматика», «Прогноз», Angel-M, выпускаемые силами ВНИМИ [108].

Хорошо зарекомендовала себя «сейсмоакустическая система под названием АПСС-1 (МакНИИ, Украина)» [66], которая активно используется на угольных предприятиях Украины и достаточно объективно контролирует устойчивость обнажения массива горных пород в ближней зоне груди забоя на основе интегрального амплитудно-частотного параметра. Главным преимуществом данной аппара-

туры, ввиду ее простоты, является низкая стоимость, отсутствие проблем с обработкой информации и небольшие затраты на обслуживание.

Все последние отечественные аппаратные разработки основаны на многолетних исследованиях советских и российских «геомеханических» школ.

На протяжении многих лет весьма успешно, особенно в области регионального прогноза ГДЯ, развивались и широко внедрялись в горной промышленности разработки ВНИМИ под руководством известного специалиста, профессора И. М. Петухова – основоположника геомеханики возникновения горных ударов при подземной разработке полезных ископаемых. В настоящее время исследования продолжаются коллективом, возглавляемым доктором технических наук Д. В. Яковлевым, активно внедряющим научные разработки ВНИМИ в практику создания геоинформационных систем прогноза геодинамических явлений [132].

Известны исследования в нефтяных осадочных бассейнах, направленные на разработку геоинформационных пакетов участков недр [114]. Структура этих пакетов и опыт практического применения свидетельствуют о высокой эффективности информационного сопровождения всех видов работ по разведке и разработке нефтегазовых месторождений, что в существенной степени применимо при создании геоинформационных систем и для угольных месторождений.

Значительный вклад в решение задач контроля и прогноза состояния горного массива при подземной разработке угля был внесен учеными Кузбасса: это и ВостНИИ, и Кузбасский технический университет, и Институт угля СО РАН. Известны своими трудами как коллективы, так и отдельные авторы – специалисты в области науки, рассматриваемой в данной работе: В. С. Зыков [31], Ю. А. Степанов [113] и др.

Московская школа (ИГД им. А. А. Скочинского и ИПКОН РАН) имеет свою богатую историю теоретических и методологических работ в области физических процессов, происходящих в горном массиве при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. В разные годы в институте по проблемам разрушения горных пород, борьбы с выбросами угля, газа, породы работали известные ученые: А. А. Скочинский, А. М. Тернигоров, Л. Д. Шевяков, создавшие научную

школу мирового уровня в области проектирования и внедрения самых современных систем разработки горных предприятий, обеспечивая разработанные школой методы безопасного ведения горных работ [24].

Затем работы, связанные с перспективным развитием горного дела в СССР и РФ, были продолжены в рамках Института проблем комплексного освоения недр РАН, организованного академиком И. В. Мельниковым. По настоящее время в ИПКОНе над проблемами безопасной отработки угольных пластов глубокого залегания успешно трудились и трудятся А. Д. Рубан, В. Н. Захаров, М. А. Иофис, С. С. Кубрин и др.

«Опыт применения пассивных методик контроля состояния устойчивости массива горных пород, как и других упомянутых систем, показал определенные возможности контроля элементов структуры массива горных пород и некоторых косвенных параметров состояния устойчивости массива горных пород, но чрезвычайно низкую эффективность объективного прогноза уровня риска развития опасных ситуаций в определенной области пространства» [73]. Это обстоятельство обусловлено принципиальной неопределенностью процесса подготовки и развития сейсмического события (И. П. Добровольский, 2009, ИФЗ РАН), т. к. критическая ситуация по превышению предела прочности горного массива может быть вызвана как повышением параметров НДС в локальной области (модель консолидации), так и при их снижении (модель деструкции).

Вышесказанное определено свойством двухмодульности реальных сред с дискретной структурой, в которых наборы упругих модулей в процессах сжатия и разгрузки массива горных пород принципиально не совпадают [68, 69, 71]. Соответственно, осуществить прогноз координат области и времени наступления опасного сейсмического события на уровне детерминации выше 50 % представляется весьма сложной задачей, что подтверждается многолетней историей сейсмологических наблюдений. Так, например, за 11 последних лет колоссальные затраты на создание сейсмологической сети штата Калифорния из более 1500 стационарных сейсмологических станций не обеспечили существенное превышение

уровня детерминации прогноза землетрясений, который по факту составил 52–53 %.

Далее рассматриваются различные методы активного прогноза оценки состояния устойчивости горного массива, которые рекомендованы в большей степени для решения сформулированных задач при строительстве тоннелей, но принципиально могут быть использованы и используются при эксплуатации горных предприятий с подземным способом добычи полезного ископаемого.

К наиболее известным методам активного прогноза геологического строения горного массива впереди забоя выработки относятся системы «сейсмической томографии TRT 6000 (NSA Engineering, США)» [150] и «TSP 303 (Amberg Measuring Technique Ltd., Швейцария)» [157, 164]). Эти методы основаны на регистрации сигналов отраженных волн от источников импульсного типа (удары и взрывы) и достаточно давно применяются в практике тоннельного и шахтного строительства (например, в Китае с 2000 года).

На Рисунке 1.7 приведена схема прогноза структуры горного массива «в методе TRT 6000 с фрагментом теоретического волнового поля и лучевой схемой вариантов сейсмических отражателей в массиве горных пород. На этом же Рисунке приведена сейсмограмма исходного волнового поля сейсмических сигналов и результат ее пространственно-частотной фильтрации с целью выделения однократно отраженных волн» [73, 150].

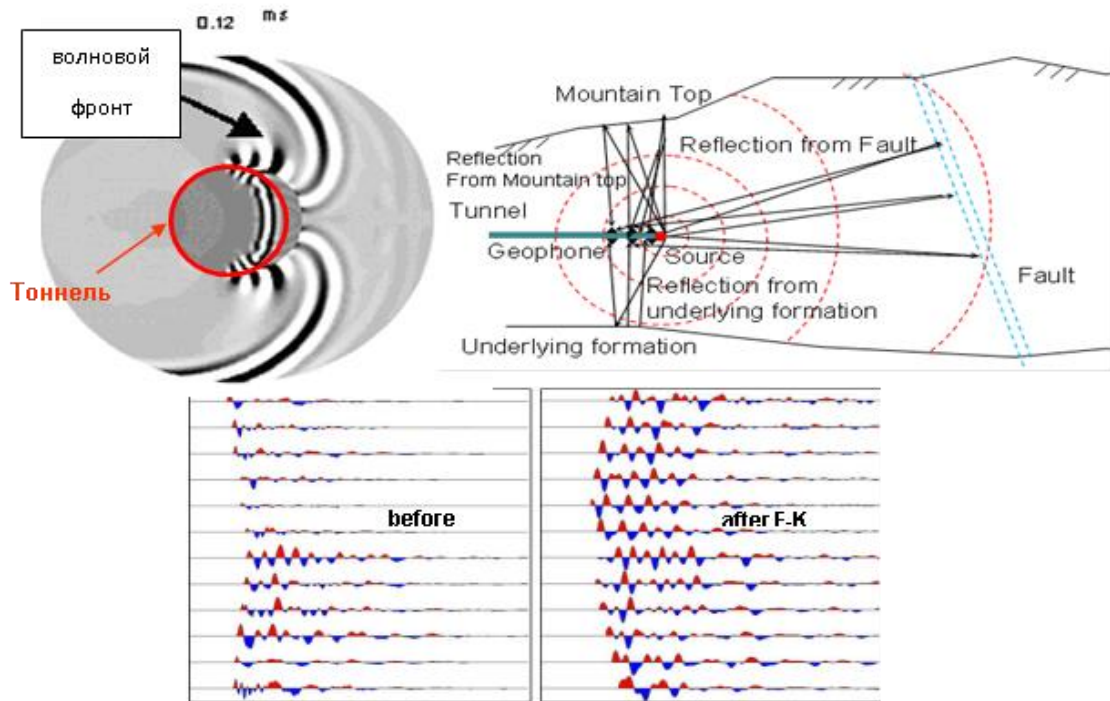


Рисунок 1.7 – Схема реализации метода TRT 6000

На Рисунке 1.8 показаны схемы полевых наблюдений в тоннеле по методу TRT 6000, в соответствии с идеей метода томографии сочетание расстояния от плоскости отражателя для каждой пары «источник–приемник» определяется геометрической фигурой в виде эллипса, с фокусов которого находятся координаты источника и приемника. Увеличивая количество этих пар и меняя координаты источников и приемников, можно определить форму отражающей геологической границы. При обработке полевых измерений формируется сеточная модель исследуемой среды забоя для расчета положения и контраста акустического импеданса геологической среды.

«Разрешение метода TRT 6000 определяется шагом решетки в модели от 1 м и значительно ухудшается с увеличением расстояния. Точное позиционирование передатчика и приемника имеет важное значение для определения пространственного положения сейсмических отражателей в массиве горных пород» [73, 150]. Время технологического цикла наблюдений на забое тоннеля составляет около 2–3 часов.

Следует подчеркнуть, что данная схема возможна только при технологии непрерывной чистовой обделки забоя. При новоавстрийской технологии проходки с временной крепью применение этого метода невозможно.

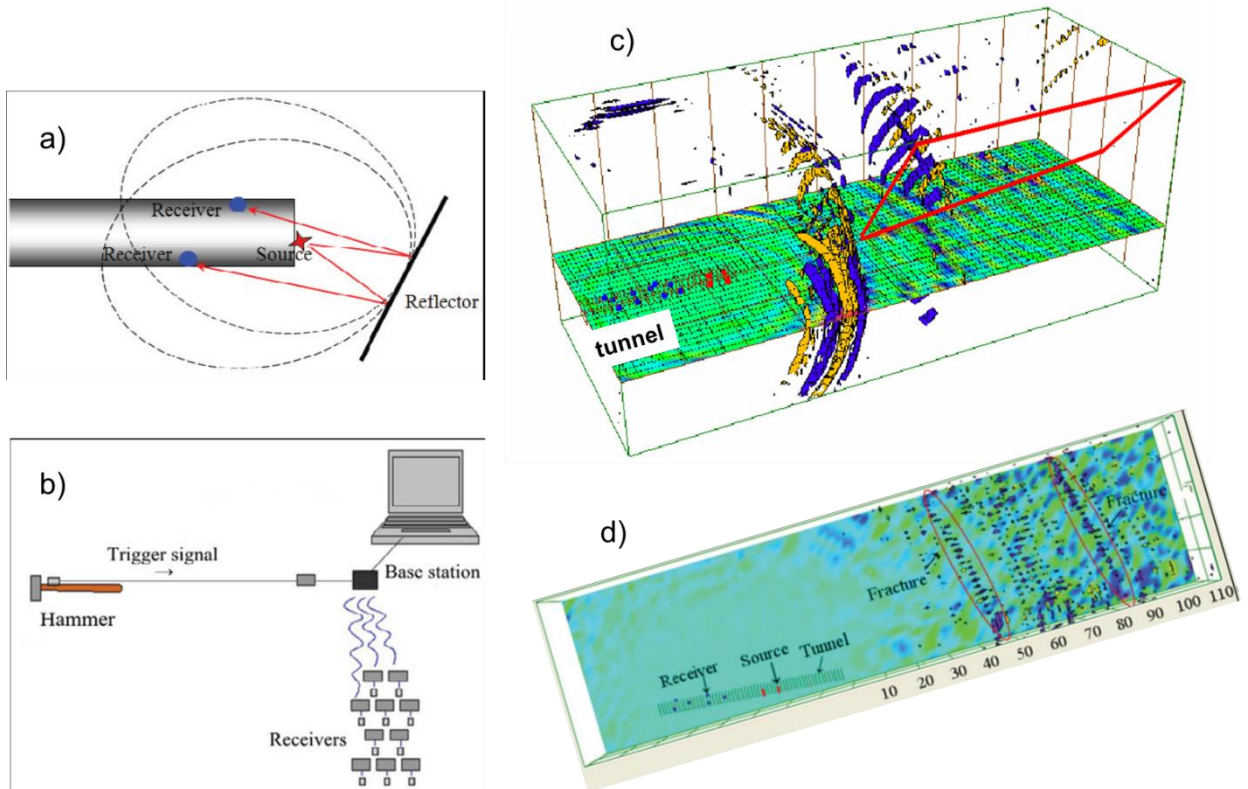


Рисунок 1.8 – Система наблюдений в методе TRT 6000 (фрагменты а и b и результаты обработки волнового поля (фрагменты с и d)

«Метод TSP (Tunnel Seismic Prediction) как система сейсмического прогноза для работы в условиях строительства тоннелей был разработан в фирме Amberg Technologies AG (Швейцария) в начале 1990-х годов» [73, 164]. «Текущей версией этого метода является TSP 303. Принцип метода основан на модификации системы вертикального сейсмического профилирования в предположении, что тоннель аналогичен габаритам горизонтального ствола скважины» [73].

«Система наблюдений в TSP-методе состоит из 30–40 сейсмических источников, представленных зарядами взрывчатого вещества (200 г аммонита), помещенными в шпур, пробуренные через равные промежутки в борту или в почве

тоннеля на глубину 1,5 метра. Позади взрывных шпуров по обе стороны тоннеля в бортах бурятся 2 горизонтальных шпура на глубину 2 м, в которые устанавливаются анкеры с трехкомпонентными сейсмоприемниками. Геометрия расстановки и положения приемников волн жестко закреплена в алгоритме обработки данных и в процессе полевых измерений не изменяется» [73] (Рисунок 1.9). Полевой технологический цикл наблюдений по этому методу длится около 2 смен (10–15 часов).

«После обработки и интерпретации данных TSP прогнозируются геологические неоднородности впереди забоя в массиве туннеля на расстоянии до 200 метров (Рисунок 1.10). Выделяются зоны разломов, карстовые полости и водообильные зоны, рассчитываются прочностные характеристики массива горных пород (коэффициент Пуассона, статический и динамический модули упругости, плотность). Обработка полевых материалов на месте проведения работ невозможна и исходная информация в формате аппаратных средств системы передается по коммуникационным средствам связи (IP) в центр обработки в Швейцарии в компанию разработчика технологии (затраты времени на обработку в этом варианте занимают около 1-й недели) или в специализированный центр исполнителя работ с высококвалифицированным персоналом» [73].

«Необходимо отметить, что с точки зрения надежности и качества регистрации сигналов отраженных волн система TSP, безусловно, является эталоном, с которым следует сравнивать любую другую схему активной сейсмической локации горного массива. Подчеркнем, что система TSP – это специализированная система для технического мониторинга горного массива в тоннельном строительстве в локальном применении и, таким образом, не отвечает всем требованиям непрерывного контроля в угольных шахтах» [73].

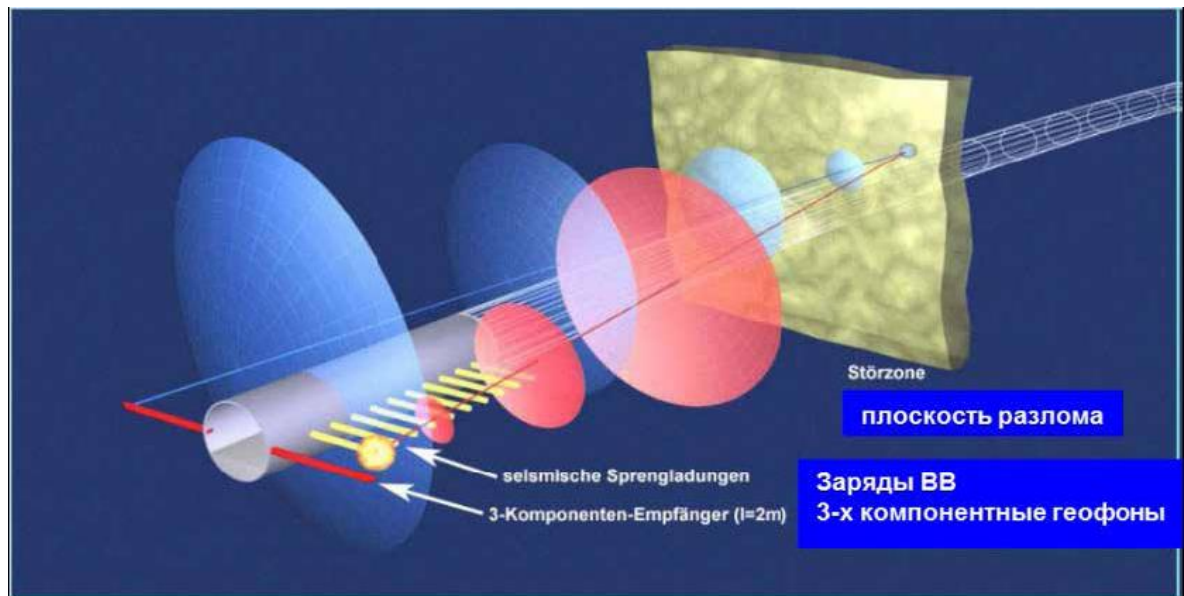


Рисунок 1.9 – Схема метода TSP 303 – Tunnel Seismic Prediction (Amberg Messtechnik AG, Швейцария, 1990)



Рисунок 1.10 – Схема наблюдений и результаты по методу TSP 303
 а – установка 3С геофона на анкере в шпур 2 м; б – система регистрации;
 с – объемные и плоские изображения поля сигналов отраженных волн;
 д – геологическая модель с зоной разлома

«Результаты применения систем TRT и TSP принимаются в формате прогнозных геологических моделей с оценкой физико-механических свойств и элементов нарушения сплошности массива горных пород» [73].

В целом, на основе метода активной локации массива сейсмическими волнами отраженного типа впереди забоя подземной выработки по приведенным примерам можно сделать вывод о перспективности этого подхода в тоннельном строительстве, но о его ограниченном применении в силу целого ряда содержательных, технических и экономических проблем в шахтных условиях (особенно – в Российской Федерации).

Кроме того, эти типы систем нельзя применять в опасных по газу угольных шахтах, т. к. они не предполагают наличие необходимых средств взрывозащиты, использование которых явно повлияет и на процедуру, и на качество исследований.

1.4 Регламентные требования к информационной базе обеспечения безопасности подземных горных работ

В настоящее время действует «Инструкция по осуществлению мониторинга гео- и газодинамического состояния массива горных пород, прогноза горных ударов, внезапных выбросов угля (породы) и газа при отработке угольных месторождений». В основу Инструкции положены требования следующих законодательных и нормативных документов:

- Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ (с изменениями и дополнениями);
- Федеральный закон от 17.07.2009 г. № 172-ФЗ «Об антикоррупционной экспертизе нормативных правовых актов и проектов нормативных правовых актов»;

– Постановление Правительства РФ от 13.08.1997 г. № 1009 «Об утверждении Правил подготовки нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти и их государственной регистрации».

Требования, изложенные в Инструкции, распространяются на шахты Российской Федерации (независимо от форм собственности), разрабатывающие опасные и угрожаемые по горным ударам и внезапным выбросам угля (породы) и газа пласты, и соответственно явились основными критериями при решении поставленных в диссертационной работе задач. Отметим наиболее значимые требования Инструкции с точки зрения построения геоинформационной системы контроля и прогнозирования геодинамических явлений при подземной отработке месторождений угля.

Инструкция содержит требования к порядку:

- а) проведения инструментального состояния углепородного массива;
- б) проведения автоматизированного мониторинга состояния углепородного массива;
- в) проведения прогноза внезапных выбросов угля (породы) и газа;
- г) проведения прогноза горных ударов;
- д) контроля эффективности противовыбросных мероприятий.

Основные задачи непрерывного контроля и прогноза развития опасных динамических явлений, установленные названной «Инструкцией», определяют необходимость проведения комплексного мониторинга с целью автоматизированного непрерывного контроля и прогноза развития опасных геогазодинамических явлений (ГДЯ) при проведении подготовительных и очистных горных выработок в шахтах с применением современной высокопроизводительной горной техники, обеспечивающей высокие скорости их продвижения и высокие темпы добычи угля. Комплексный мониторинг конструируется на сочетании взаимодополняющих инструментальных и автоматизированных методов получения и использования данных состояния массива горных пород.

Мониторинг организуется на комплексном принципе использования геофизических, геомеханических и газодинамических способов контроля и оценки со-

стояния массива впереди забоя и в окрестности очистной и подготовительной горной выработки. Отличительной особенностью его является универсальность, обеспечивающая возможность прогноза степени опасности всех известных типов ГДЯ, диагностику основных причин их возникновения и контроль эффективности применяемых способов их предотвращения.

Метод комплексного мониторинга оценки уровня опасности горных работ строится по блочно-модульному принципу построения и формируется из четырех основных автоматизированных подсистем (блоков) [25, 39]:

а) подсистемы акустического контроля напряженно-деформированного состояния призабойной зоны массива и оценки опасности газодинамических явлений;

б) подсистемы контроля газодинамической активности призабойного массива и оценки опасности газодинамических явлений;

в) подсистемы контроля сейсмической активности шахтного поля (участка) и оценки опасности газодинамических явлений;

г) подсистемы геомеханического прогноза, диагностики и оценки риска газодинамических явлений.

Это позволяет при дальнейшем изложении материала диссертационной работы классифицировать рассматриваемый метод как автоматизированный мониторинг, основная функция которого реализуется по определению геоинформационной системой.

При этом реализуемый процесс мониторинга предприятий большинства угольных компаний проводится автоматизированной системой, построенной на основе современных технических и программных средств, которая осуществляет непрерывный мониторинг параметров, характеризующих гео- и газодинамическое состояние разрабатываемого массива горных пород и аэрогазовых характеристик проветривания выработок, производит сбор, преобразование, передачу, обработку, отображение, хранение и анализ информации, представление ее в режиме реального времени, а также контролирует противоаварийные мероприятия, поддерживающие безопасное гео- и газодинамическое состояние

углепородного массива [13].

Если объединить общие нормативные требования к геоинформационным системам, опыт эксплуатации ГИС на горных предприятиях и специфические условия их применения при отработке угольных месторождений, могут быть сформулированы основные задачи, возлагаемые на геоинформационную систему в общей структуре МФСБ угольной шахты.

Геоинформационная система должна обеспечивать информационно-аналитическое сопровождение процессов предприятия по части:

- мониторинга состояния угольного пласта, вмещающих пород и горного массива в целом;
- прогноза состояния угольного пласта, вмещающих пород и горного массива в целом;
- прогноза опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых;
- оценки риска опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых;
- выработки технологических решений по снижению или предотвращению ущерба от выявленных в прогнозе опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых;
- мониторинга работы очистного комплекса: токовые нагрузки, температура отдельных узлов, уровень вибрации, состояние аппаратных защит энергетических узлов, текущее положение комбайна, направление и скорость его перемещения;
- оценки и анализа технического состояния очистного комплекса по данным мониторинга его работы;
- прогнозирования состояния очистного комплекса;
- выработки программ обслуживания и ремонта очистного комплекса;
- формирования и ведения нормативно-справочной информации, базы данных очистного комплекса, мероприятий, выполненных работ и их результатов, показателей и индексов технического состояния очистного комплекса;
- анализа полученных прогнозов, выработанных и выбранных технологиче-

ских решений на основе фактически наблюдаемых состояний горного массива, рудничной атмосферы и очистного комплекса [38].

Геоинформационная система, отвечая требованиям иных нормативных материалов [1, 13], должна обеспечивать:

- контроль состояния угольного пласта, вмещающих пород и горного массива в целом при подземной разработке твердых полезных ископаемых;
- контроль состояния очистного комплекса;
- повышение эффективности работы очистного комплекса на основе полученных данных о состоянии, строении, нарушенности угольного пласта, вмещающих пород и горного массива в целом и возможности обеспечения заданной производительности лавы;
- повышение отказоустойчивости очистного комплекса на основе своевременного обслуживания и ремонтов;
- повышение качества принятия технологических решений за счет оперативности представления, полноты, достоверности и удобства форматов отображения информации;
- повышение безопасности ведения горных работ при подземной разработке твердых полезных ископаемых за счет своевременного обнаружения и предупреждения опасных природных и техногенных явлений и проведения технологических мероприятий по предотвращению их проявления.

Геоинформационная система должна строиться по иерархическому принципу и включать в себя:

- подсистему и устройства нижнего уровня, предназначенные для получения информации об объекте мониторинга от первичных датчиков контроля горного массива и параметров очистного комплекса, выполненных во взрывобезопасном исполнении;
- подсистему и устройства среднего уровня, предназначенные для сбора информации от первичных датчиков контроля, предварительной обработки информации, обмена информацией с техническими средствами верхнего уровня, состоящую из контроллеров и использующую общешахтную высокоскоростную

информационную магистраль, выполненную с резервированием;

- подсистему и устройства верхнего уровня, предназначенные для визуализации состояния параметров и объектов управления системы с использованием графических образов и анимации, операторского интерфейса, регистрации и хранения данных, документирования и генерации отчетов, автоматической диагностики состояния технических средств всех уровней, протоколирования учетных показателей работы системы, архивирования информации в базах данных, механизма выработки технологических решений, блока учета, планирования, обеспечения трудовыми и материально-техническими ресурсами для проведения технического обслуживания и ремонта, мониторинга, анализа и оценки технического состояния очистного комплекса;

- устройства и линии связи, обеспечивающие обмен информацией и командами между различными устройствами и подсистемами ГИС МИКОН;

- устройства электропитания;

- системное программное обеспечение и прикладное программное обеспечение.

В целом, перечисленные выше условия и требования невозможно и нецелесообразно реализовать в рамках одной системы, что требует сосредоточения усилий на разработку таких программно-технических средств, которые целенаправленно фиксируют текущие параметры напряженного и аэрогазового состояния горного массива и специализированы на своевременный прогноз уровня риска развития опасных ГДЯ.

1.5 Задачи непрерывного контроля и прогноза развития опасных динамических явлений на основе создания геоинформационной системы

Опыт экспериментальных и аналитических исследований развития аварийных ситуаций в процессах ведения подземных горных работ в угольной отрасли

свидетельствует об очевидной необходимости фиксировать в непрерывном режиме структуру и параметры НДС горного массива в зоне ведения подземных работ, что является основой для оценки уровня риска развития опасных геогазодинамических процессов и связанных с ними процессов перераспределении газовых потоков.

На Рисунке 1.11 приведена сводка основных элементов природно-технической системы (ПТС), создаваемой подземным сооружением в реальных геологических условиях, что определяется понятием горного массива. В основу модели такой ПТС положено представление о дискретной структуре массива горных пород, которая сформирована генетическими и геодинамическими процессами образования осадочного бассейна [77, 85].

На фрагменте «а» (Рисунок 1.11) показана ситуация обрушения горного массива над подземной выработкой, которая свидетельствует о блоковом характере реакции слоистой системы с дискретной структурой на потерю состояния устойчивости горного массива. По Byerlee J. D. [137, 138] устойчивость дискретной системы сохраняется до тех пор, пока выполняется неравенство $\tau < 0.85\bar{\sigma}$, где τ – горизонтальная компонента напряжения, $\bar{\sigma}$ – вертикальная. При нарушении этого условия в дискретном массиве горных пород начнутся процессы трения, что может вывести систему в состояние пластического течения (интервал графика от т. А до т. В) или в варианте трения более крупных дискретных ассоциаций (блоков) – к импульсным процессам – трескам или ударам. Тому свидетельство – зеркала скольжения, в большом количестве встречаемые в кернах скважин и в обнажениях массива на бортах или груди забоев.

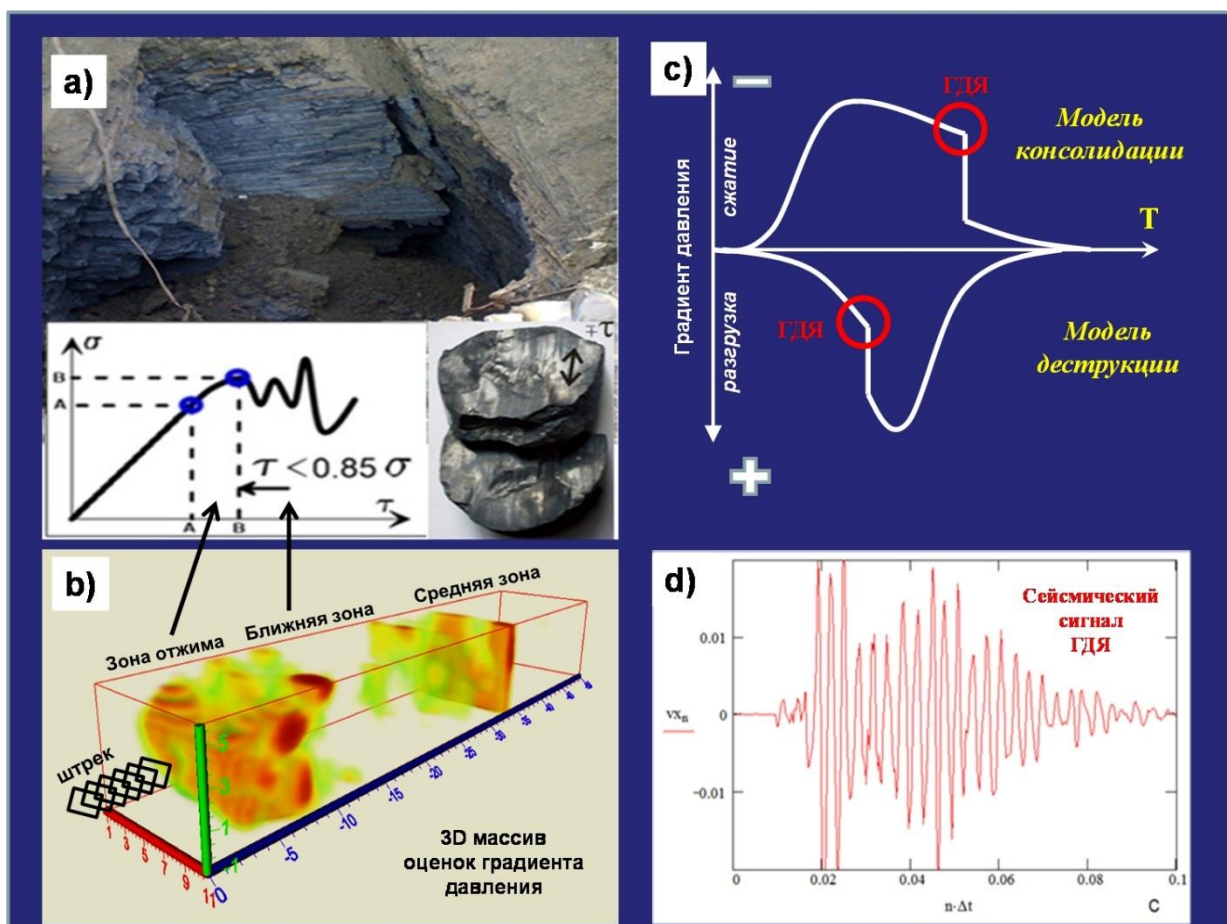


Рисунок 1.11 – Основные элементы модели горного массива с дискретной структурой

Границы блоковой структуры формируют в массиве зоны дезинтеграции горных пород, что определяет аномальные значения компонент напряжений (разрыв функций компонент, или – высокие значения градиента напряжений). Заметим, что для среды с дискретной структурой вполне приемлем термин «давление» по аналогии с жидкой средой, и далее можно оперировать таким важным определением как «градиент давления», полагая возможный диапазон его изменчивости в отрицательных (сжатие) и положительных (растяжение) значениях. На фрагменте «b» показан пример распределения относительных оценок градиента давления в массиве впереди забоя проходческого штрека.

В соответствии с классическими определениями вся зона влияния подземной выработки на горный массив подразделяется на несколько зон – зона отжима,

ближняя зона, средняя зона и дальняя зона. В первых двух зонах преобладают пластические деформации, далее предельно упругие. Границы названных зон могут фиксироваться аномальными значениями градиентов давления (новообразованные блоковые структуры), кроме сформированных геодинамическими процессами зон в земной коре, которые будут отражаться более интенсивными аномалиями градиентов давления.

Соответственно, процессы трения в активной пликтивной системе блоков приведут к развитию динамических процессов – «тресков», ударов и т. п., по одной из двух известных моделей сценариев – консолидации и деструкции (фрагмент «с»). В первом случае динамический процесс развивается при нарастающих напряжениях, во втором – при разгрузке массива. В обоих вариантах произойдет импульсный скачок напряжений или – другими словами – сейсмическое событие, которое может быть зафиксировано сейсмической регистрирующей системой (фрагмент «d»).

Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что инвариантность двух сценариев развития сейсмических событий порождает полную неопределенность прогноза в двухмодульной среде (упругие модули для сжимающих и растягивающих нагрузок принципиально различны) – критическая ситуация в варианте нарастающих напряжений наступит значительно позже, чем в варианте растягивающих напряжений. Из этих соображений вполне понятен достижимый уровень вероятности прогноза наступления сейсмического события, который несущественно превышает 50–60 %. Именно такие показатели прогноза характерны для существующих пассивных сейсмических систем прогноза горных ударов, установленных на угольных и рудных шахтах.

«Механизмы генерации сейсмической эмиссии и эволюции высокочастотных эндогенных сейсмических сигналов при распространении в геосреде не достаточно ясны. Тем не менее существующие экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности выделения высокочастотных пространственно-когерентных сигналов эмиссионного происхождения и локализации источников излучения, находящихся на значительных расстояниях от регистрирующей систе-

мы. Это позволило развить систему методов пассивного мониторинга, позволяющую изучать структуру сейсмического процесса, отслеживать пространственно-временную динамику геосреды и подготовку опасных динамических событий, выявлять неоднородности строения среды: области повышенной трещиноватости и гетерогенности, разломы и большие трещины, зоны концентрации напряжений и миграции флюида» [126].

На Рисунке 1.12 «а» представлено изображение среды при использовании ординарного алгоритма, в котором использованы «записи времени сильного всплеска амплитуд пульсаций» [126]. «На нем видны только интенсивные техногенные источники. Истинные источники техногенной помехи локализуются в восточной части объема (справа) в положении шумящих скважин. Протяженный источник в западной части объема (слева) является вторичным. Он совпадает с положением разломной зоны и является результатом захвата разломной зоной и последующего рассеивания техногенного излучения. Техногенные источники являются настолько интенсивными, что полностью экранируют естественные глубинные источники. В результате адаптивной фильтрации они устраняются и проявляются две наклонные глубинные зоны излучения, Рисунок 1.12 «б», с тонким квазивертикальным источником в верхней части» [126].

«Эмиссионная томография является методом пассивного мониторинга и не предполагает необходимости искусственного воздействия на среду. В качестве входных данных используются многоканальные записи сейсмического шума» [126, 148]. В результате компьютерной обработки получается трехмерное изображение источников излучения в виде «облака», заполняющего излучающую область среды.

Достаточно давно и успешно в практике регионального прогноза динамики сейсмоэнергетического состояния горного массива в контуре шахтного поля по методу пассивной локации сейсмических событий применяются технологии ВНИМИ [«Указания по безопасному ведению горных работ на Талнахском и Октябрьском месторождениях, склонных и опасных по горным ударам», ВНИМИ, 2007]. На Рисунках 1.13 и 1.14 показаны карты сейсмической активности терри-

тории рудников «Октябрьский» и «Таймырский» за сутки до горного удара и после него. Данная иллюстрация горного удара свидетельствует, в первую очередь, о том, что динамика плотности и энергии сейсмических событий точно соответствует месту очага развития горного удара, но не представляет возможности уверенно прогнозировать время наступления этого явления.

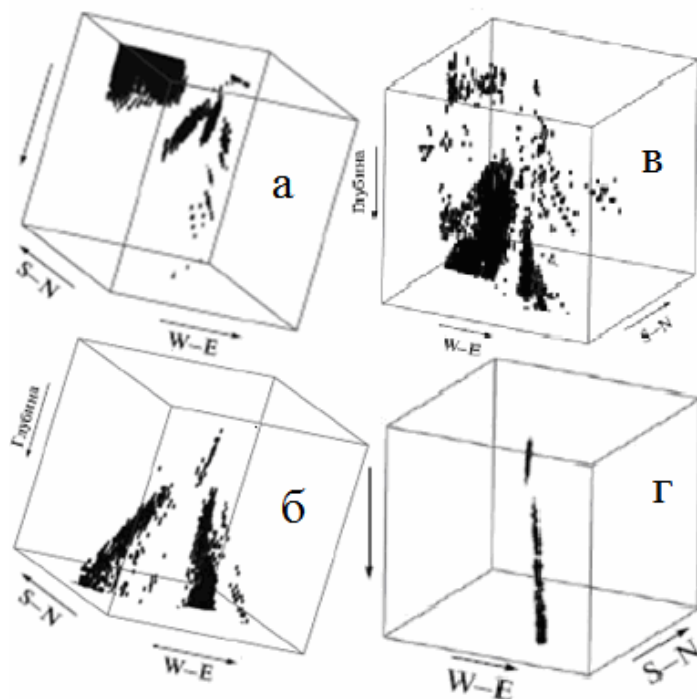


Рисунок 1.12 – Изображения источников первого дня наблюдений при наличии сильной техногенной помехи, полоса частот 10–50 гц (из [126]):

а – алгоритм с использованием простейшего группового фильтра (записи типа II),
 б – алгоритм с применением адаптивной фильтрации, в – алгоритм с использованием простейшего группового фильтра с выравниванием вклада различных частот (записи типа I), г – изображение источников второго дня наблюдений, алгоритм с использованием простейшего группового фильтра с выравниванием вклада различных частот

Таким образом, зоны различных техногенных воздействий на горный массив могут рассматриваться как множество источников сейсмических сигналов в широком диапазоне энергий и частот. При этом каждый источник представляет собой структурную неоднородность горного массива, что определяет и его отра-

жательную способность. Отсюда следует принципиально важный вывод: объективный прогноз структуры и параметров НДС горного массива должен осуществляться совмещенными средствами регистрации эмиссионных и отраженных сейсмических волн.

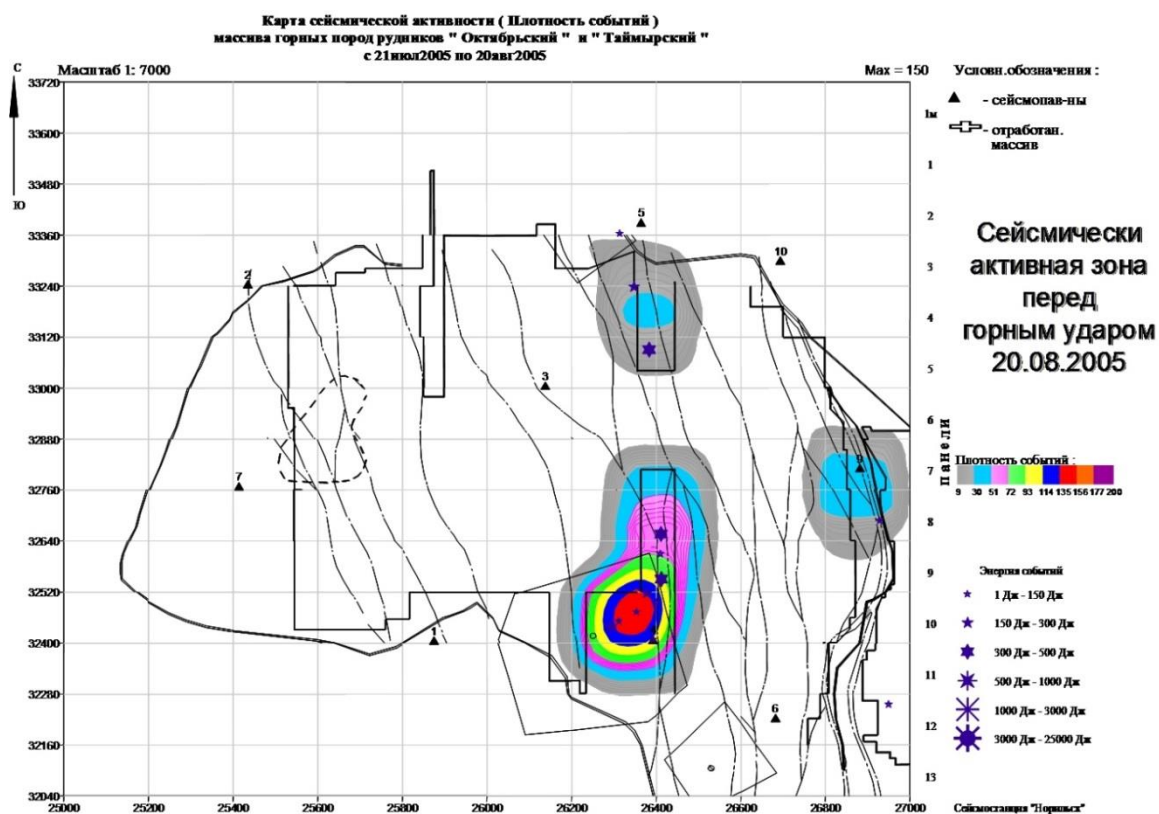


Рисунок 1.13 – Карта сейсмической активности за сутки перед горным ударом (ВНИМИ, 2005, сеймостанция «Норильск»)

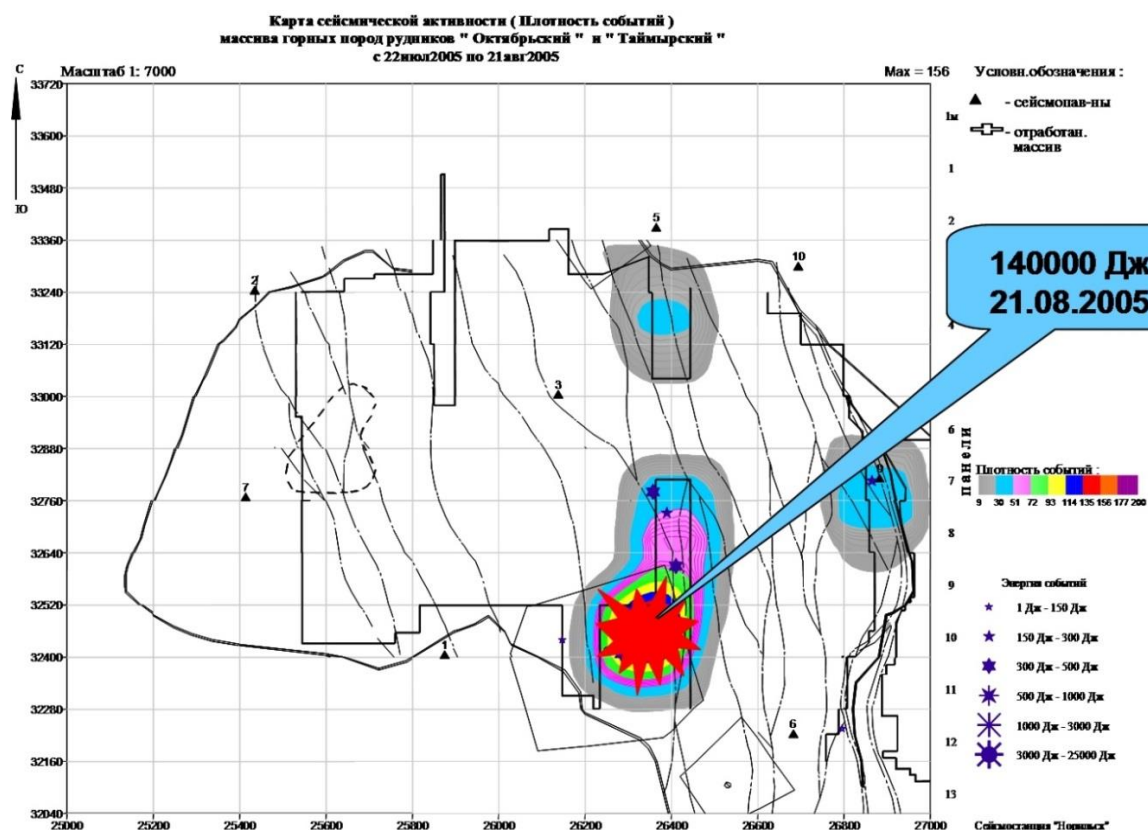


Рисунок 1.14 – Карта сейсмической активности в момент горного удара
(ВНИМИ, 2005, сейсмостанция «Норильск»)

Учитывая приведенные элементы модели горного массива ПТС, следует назвать принципиально важную последовательность решения следующих задач:

1) дистанционное определение положения зон дезинтеграции массива и оценки величины градиента давления на границах этих зон (что возможно только на основе метода сейсмических отраженных волн – активная локация отражателей сейсмических волн);

2) непрерывная регистрация сейсмических событий с определением координат событий и их энергетических параметров (пассивная локация сейсмических событий);

3) непрерывная оценка метанообильности атмосферы подземной выработки с контролируемым трендом этих оценок по мере приближения выработки к выявленным зонам дезинтеграции.

4) оценка уровня риска возникновения и развития опасных ГДЯ как интегрального параметра: «градиент давления–энергия сейсмических событий–тренд метанообильности».

Необходимо особым образом отметить, что каждая из перечисленных задач в индивидуальном решении не способна обеспечить надежный уровень оценки уровня риска развития опасного ГДЯ, однако значимый уровень детерминации может быть достигнут на основании решения задачи № 4. По существу, основной функционал геоинформационной панели в составе многофункциональной системы безопасности угольной шахты должен отвечать на вопросы: дистанция до объекта риска, относительная оценка градиента давления, энергетическое состояние объекта во времени и прогнозируемый объем газа в выработке при встрече с выявленным объектом. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов итоговая оценка риска должна принимать два значения – «опасно» или «неопасно».

На Рисунке 1.15 приведена предлагаемая далее в работе общая схема текущего прогноза метанообильности в подготовительном забое выработки, пройденной по углю, по обсуждаемому ранее алгоритму.

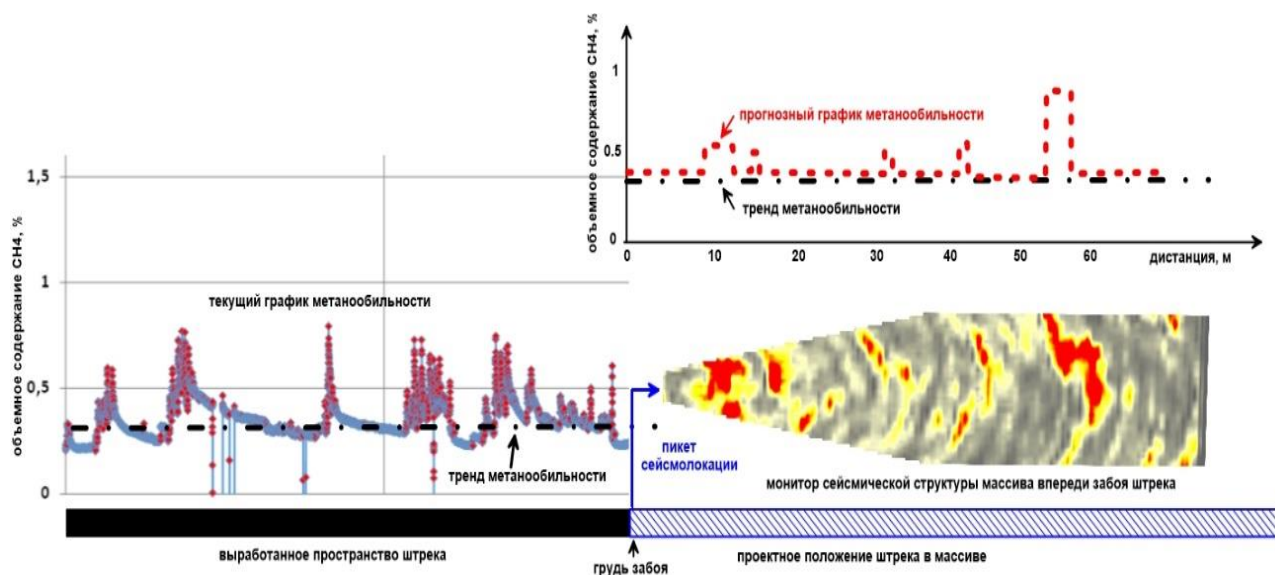


Рисунок 1.15 – Схема текущего прогноза метанообильности в проходческом забое

Общая идея прогноза в данной схеме основана на трансформации 3D-массива сейсмического атрибута (амплитуды и частоты сигналов отраженных волн) или его плоского сечения в прогнозный график метанообильности впереди забоя выработки на необходимую дистанцию. Последовательность такого прогноза предполагает:

- суммирование всех значений сейсмического атрибута по 3D-массиву или (в его плоском сечении в линейный массив) значений по центру массива или его сечения (относительные значения структуры сплошности горного массива);

- нормирование полученных значений структуры сплошности массива к тренду метанообильности, найденному по результатам аэрогазового контроля на выбранном интервале проходки забоя (относительные значения метанообильности);

- нормирование диапазона относительных значений метанообильности к достигнутому диапазону метанообильности по интервалу проходки (абсолютные значения метанообильности на всю дистанцию прогноза).

Приведенная схема действий может быть положена в основу разработки геоинформационной панели системы безопасности шахты, которая предполагает техническую и программную синхронизацию по времени регистрируемых параметров двух систем текущего (непрерывного) контроля: аэрогазового и сейсмического.

Выводы

По результатам выполненного обзора проблемы прогноза структуры и параметров горного массива на безопасную дистанцию от забоя подземной выработки можно сделать несколько следующих, наиболее принципиальных, выводов:

1. Существующие системы сейсмической локализации горного массива пассивного и активного типов обеспечивают фиксирование объектов нарушения сплош-

ности (зон дезинтеграции горных пород) и координат источников сейсмического шума в зоне влияния горнотехнических работ.

2. Достоверность прогноза места возможного развития опасного геодинамического явления на основе индивидуальной оценки опасности по активному или пассивному методам не превышает допустимый уровень детерминации.

3. Представляется целесообразным далее рассматривать варианты функционирования средств пассивного и активного сейсмического контроля в согласованном по времени режиме аэрогазового контроля в едином координатном пространстве горного массива.

Реализация совместного применения средств сейсмического и аэрогазового контроля требует принятия согласованных решений по оптимальному программно-техническому обеспечению проходческих и добычных работ на уровне текущего и локального контроля и прогноза развития опасных геодинамических явлений.

2 ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МЕТАНООБИЛЬНОСТИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Введение

Теоретический подход к определению зависимости метановыделения в горных выработках и параметров горного массива в зонах их взаимовлияния предлагается осуществлять в два этапа.

На первом этапе используется известный аналитический метод функционального сведения общего горного давления и проницаемости выбранного объема среды [10, 11].

На втором этапе предлагается производить расчет параметров напряженно-деформированного состояния массива с использованием принципов конечно-элементного моделирования [13, 14]. В частности, применительно к оценке потока газа предлагается использовать геомеханический анализ напряжений в горном массиве с учетом реальной геометрической модели выработки. Моделирование процесса взаимовлияния горных выработок, массива угольного пласта и вмещающих пород одновременно решает задача фазовой дифференциации флюида по прямым и косвенным показателям, таким как: относительная оценка горного давления, фактический коэффициент Пуассона, количественный тренд метанообильности и т. д.

Рассмотрим методологию подхода к решению этой задачи применительно к горной выработке – очистному забою, проводимому по углю вдоль простирания пласта и подготовительному забою с вариантом проходки при продвижении его к угольному пласту, например квершлагу, в процессе вскрытия угольного месторождения.

Задача I этапа состоит в определении зависимости между градиентом давления в горном массиве и основными характерными параметрами самого массива.

II этап позволяет на основе опережающего сейсмического прогноза произвести оценку характера течения газа в массиве с точки зрения опасности его притока в горную выработку.

Действующий в настоящее время регламент по газовым шахтам на основе относительной величины метанообильности (объем газа, поступающего в выработку за сутки на 1 т среднесуточной добычи угля) устанавливает следующую градацию шахт по категориям опасности [93]:

1-я категория шахт опасных по газу – выделяется до 5 м³ метана из 1 добытой тонны угля;

2-я категория – от 5 до 10 м³/т;

3-я категория – от 10 до 15 м³/т;

сверхкатегорийные шахты – более 15 м³/т.

Предположительно, газ (метан) в угольном пласте может находиться в трех фазовых состояниях:

- в газовой фазе – до давления 16 атм (1,5 МПа);
- в жидкой фазе – при давлении выше 16 атм;
- в твердую (кристаллическую) фазу может перейти в некоторых химических соединениях (газогидрат и пр.).

Отсюда можно сделать вывод: газ может переходить из одного фазового состояния в другое при изменении структуры и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) как в естественных условиях формирования осадочного бассейна (погружение угольного пласта на все большую глубину и нестационарный геодинамический режим), так и в процессах ведения проходческих и добычных работ.

Та же логика справедлива и в варианте существования (или новообразования) зоны дезинтеграции горных пород в пласте, в пределах которой горное давление минимально и, следовательно, газ в ней будет находиться до уровня давления 16 атм.

Наибольшее значение имеет исследование частных и общих закономерностей связи эволюции структуры и параметров НДС и газового потока в зоне взаимовлияния выработки и горного массива.

Наиболее опасным источником метана с позиций, недопустимых по безопасности концентраций, но заранее неконтролируемых типовой системой АГК, является газ, находящийся в составе угольного пласта в различных состояниях: адсорбированном твердом (а при больших давлениях – кристаллическом), газообразном под большим давлением; в виде водно-газового флюида и т. п., обусловленных геогазодинамическими характеристиками самого угольного пласта и вмещающих пород.

Теоретическому обоснованию взаимосвязи параметров угольной толщи и вектора газового потока в нормальных и критических ситуациях и посвящено содержание данного раздела.

2.1 Основные представления о связи напряженного состояния и газового потока в горном массиве

Известны работы, в которых рассматриваются различные аспекты процессов газовых течений в ходе проходческих и добычных работ. Наибольшее внимание исследователей занимает проблема прогнозирования вариантов поступления газа в атмосферу выработанного пространства и сценариев развития геодинамических явлений (ГДЯ) с участием газового давления. На основании материала, изложенного в работах [31, 88, 89, 92], можно представить следующую классификацию ГДЯ (Рисунок 2.1).

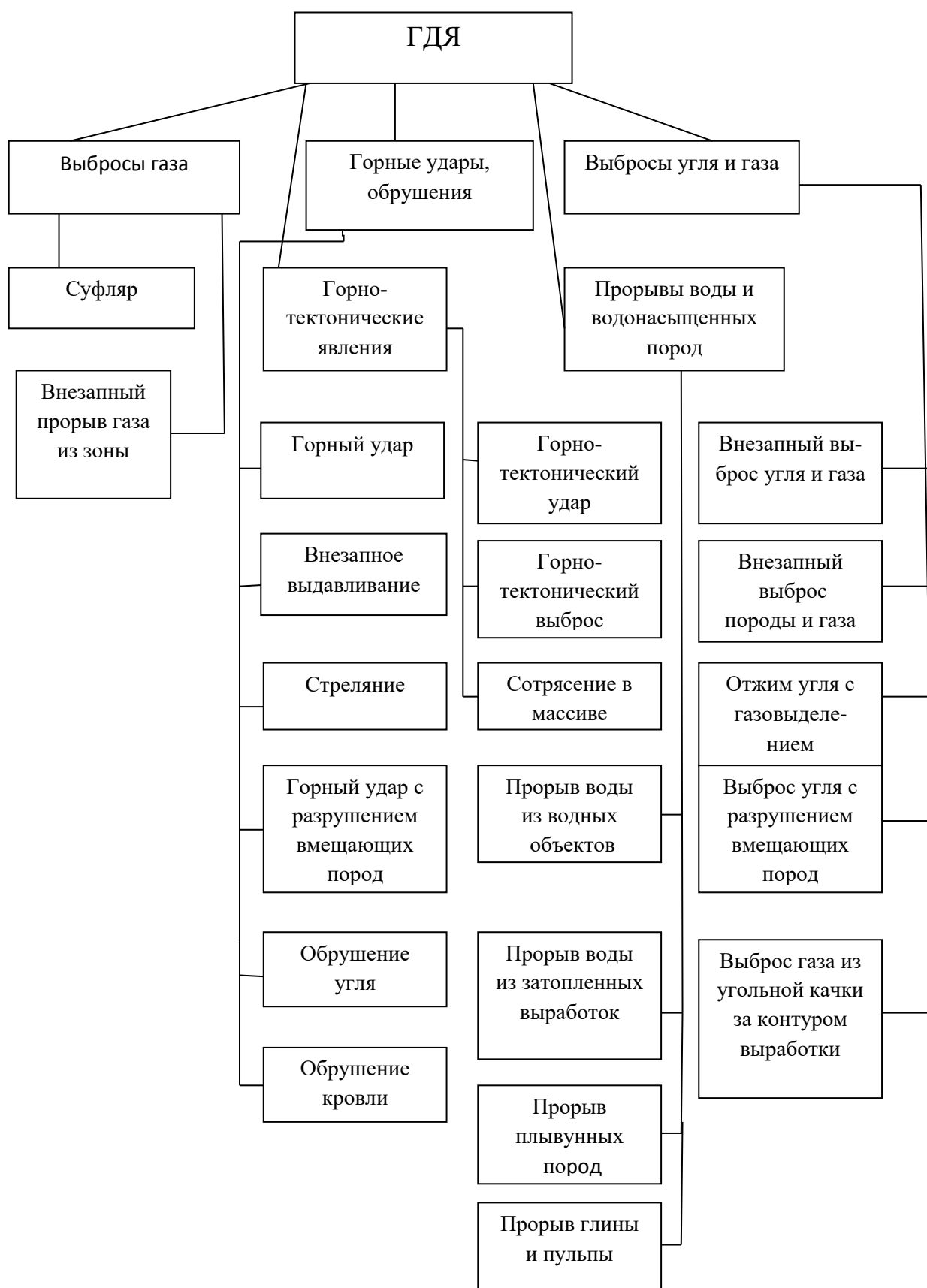


Рисунок 2.1 – Классификация газодинамических явлений

В обсуждаемой проблеме в соответствии с приведенной классификацией ГДЯ существует ключевое звено: если есть фактические свидетельства распространения газа от источника зоны его скопления или генерации по мере приближения к ней выработки, то процессом распространения газового потока и, следовательно, формированием и развитием ГДЯ с участием газового давления управляет процесс изменения структуры и параметров НДС в зоне влияния проходческих или очистных работ на горный массив.

Известны достаточно многочисленные факты закономерного нарастания метанообильности по мере приближения подготовительного забоя к тектоническому нарушению или к зоне дезинтеграции массива любой природы. Так, например, на Рисунке 2.2 приведен график метанообильности по трассе проходки штрека, проводимого по угольному пласту и осложненного тектоническим нарушением [28].

Огибающая кривая этого графика имеет симметричную форму, и в данной горно-геологической ситуации экстремальное поступление газа закономерно прогнозируется за 100–150 метров от тектонического нарушения – источника скопления газа.

Подобная ситуация иллюстрируется и на Рисунке 2.3 для очистного забоя [89, 90, 91, 130].

«Согласно действующим Правилам безопасности для угольных шахт на всех угрожаемых и опасных по внезапным выбросам пластах при проведении подготовительных выработок применяется метод текущего прогноза выбросоопасности, основа которого разработана почти полвека назад. Метод предусматривает измерение скорости газовыделения при бурении шпуров через четыре метра подвигания забоя» [35, 80, 110].

«При всей своей объективности методу свойственна большая трудоемкость, существенно влияющая на темпы проведения выработок. При этом оценка ситуаций носит качественный характер («опасно» – «неопасно») и, тем самым, не отражает изменений горнотехнологических условий при подвигании забоя и исклю-

чает возможность заблаговременного принятия инженерных решений по технологической подготовке к применению профилактических мероприятий» [80].

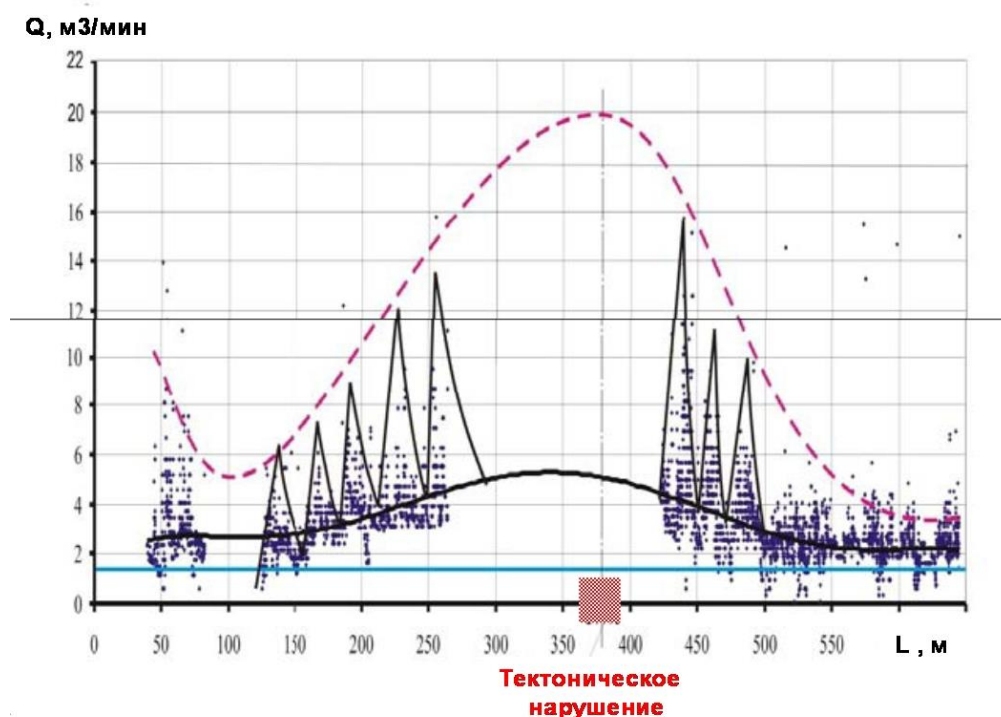


Рисунок 2.2 – Среднечасовая метанообильность штрека, проводимого по верхнему слою мощного пласта

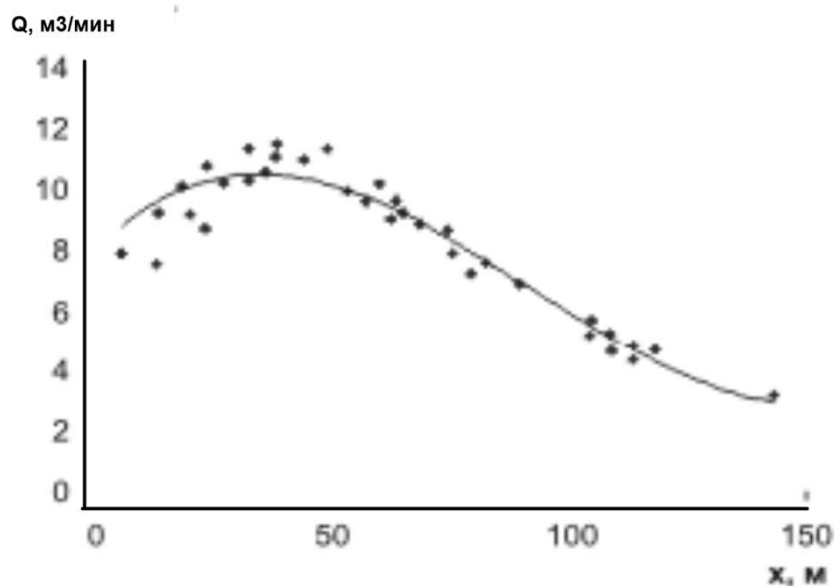


Рисунок 2.3 – Изменение интенсивности поступления метана в выработанное пространство по мере удаления от лавы [90, 91]

«За последнее десятилетие подготовительные выработки, проводимые по потенциально выбросоопасным участкам угольных пластов, составляют не более 10 % от общей протяженности выработок, и только в 10 % от протяженности этих участков регистрируется реальная опасность. Статистика динамических газопроявлений показывает, что при движении забоя переход от неопасной ситуации к опасной далеко не мгновенен» [30, 80, 133]. В частности, многочисленные исследования специалистов Кузбасского государственного технического университета, Института угля СО РАН, филиала ВНИМИ [38, 66], проведенные в последние годы, однозначно свидетельствуют о наличии увеличения концентрации метана по мере приближения к зоне трещиноватости массива.

Результаты этих работ служат дополнительным основанием к использованию их при формировании двухэтапного подхода к теоретическому обоснованию характера и параметров флюидного потока в слоистой угольной толще, предлагаемого в данной работе, в плане решения на втором этапе моделирования задачи дифференциации типа флюида, оценки его физического характера.

На Рисунке 2.4 показана «схема, поясняющая и конкретизирующая смысл вышесказанного, где параметр r_n отражает зону влияния выработки l_n (глубина заходки комбайна» [80]) с четким отображением тренда возрастания концентрации метана при приближении комбайна к зоне дезинтеграции.

Перечисленные примеры свидетельствуют о прямой зависимости проницаемости угольного пласта от НДС. Иллюстрацией к этому утверждению служит также Рисунок 2.5, построенный на основе обработки данных, приведенных в работах [80, 89]. Из Рисунка 2.5 видно, что в диапазоне напряжений 4,1–7,25 МПа газопроницаемость массива уменьшается с ростом напряжения в нем (на рисунке газопроницаемость приведена в относительных единицах).

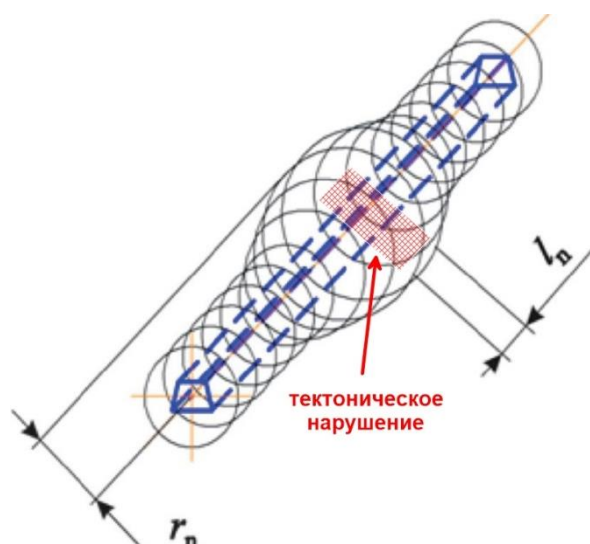


Рисунок 2.4 – Условная схема изменения газоистощения угольного пласта в окрестности подготовительной выработки при пересечении тектонического нарушения [80]

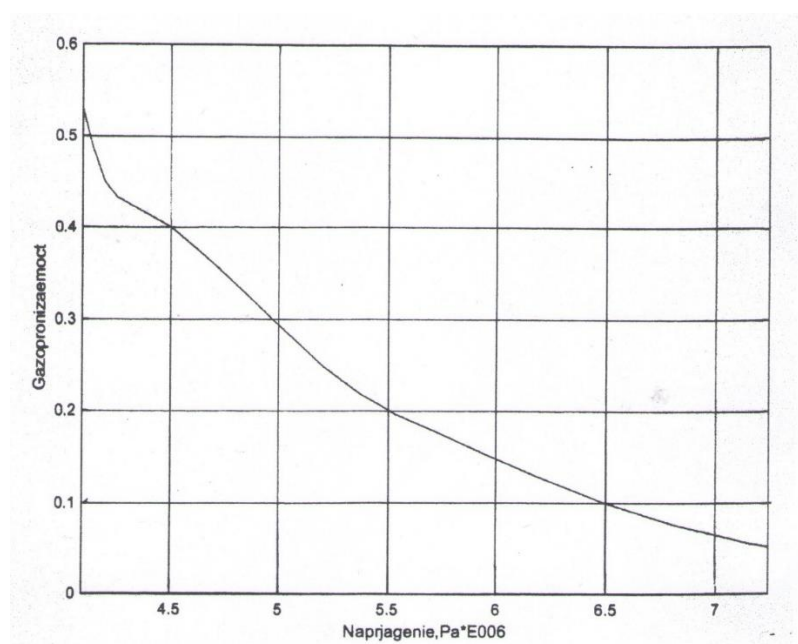


Рисунок 2.5 – Зависимость газопроницаемости (в относительных единицах) от напряжения в массиве

С учетом приведенных соображений выполнен анализ особенностей флюидных течений в деформируемых средах применительно к слоистой осадочной толще с угольным пластом. При этом примем за основу допущение о физической

близости процессов флюидного (жидкого) и газового потока с ненулевой вязкостью с учетом различного фазового состояния газа (ТУГР и др.) и далее, при создании теоретического обоснования решения поставленных в работе задач, будем оперировать обобщенным понятием флюид с последующей оценкой специфики «течения» газа при рассмотрении II этапа теоретических расчетов этого раздела (параграф 2.3).

2.2. Оценка параметров газового потока в модели дискретных сред с внешними силовыми нагрузками

В работе предлагается двухстадийный теоретический подход к оценке метанообильности горных выработок на основе их взаимного влияния с горным массивом и ориентированным на первой стадии применением классического аналитического метода функционального сведения общего горного давления и проницаемости выбранного объема среды и на использовании во второй стадии расчета параметров газового потока в системе численного прочностного анализа деформируемого горного массива.

Как уже отмечалось в первом разделе, «общее давление в любой точке осадочной толщи представляется следующим образом:

$$\tilde{P} = P_g \pm P_d, \quad (2.1)$$

где P_g – нормальное (статическое, или гидростатическое) давление; P_d – добавочное (динамическое, или сверхгидростатическое) давление, зависящее от времени.

Проницаемость композиции слоев блоковой структуры по вертикальному направлению будет существенно ниже, чем в горизонтальном направлении, т. к. величина пустотного промежутка между слоями (горизонтальный контакт блоков) всегда значительно меньше, чем между боковыми сторонами блоков. Пересечения сторон блоков в соседних слоях в отдельных точках (Рисунок 2.6) также не могут существенно увеличить «вертикальную» проницаемость дискретной

толщи. Тогда следует предположить, что при существовании какого-то общего направления флюидного потока, в каждом из рассматриваемых слоев будут собственные величина и направление флюидного потока $\vec{V}$ » [85]. Таким образом, есть все основания считать, что дискретные системы обладают явной анизотропией параметров флюидного течения, и, следовательно, проницаемость в таких системах является тензором (Рисунок 2.7) [85, 151, 152].

Наличие в угольном пласте крупных трещин, реально образующих зоны дезинтеграции, связано с возникновением свободных поверхностей. Как следствие возникает процесс изменения (градиент) порогового давления флюида различной теологии (в том числе и газа), заполнившего трещины зачастую под действием значительного динамического давления. Данное обстоятельство является классическим обоснованием для использования уравнения Дарси [126, 140] на I этапе рассматриваемой нами задачи. В этом случае скорость и направление течения флюидного потока:

$$\vec{V} = -\frac{k}{f} \nabla P_d, \quad (2.2)$$

где k – проницаемость среды в данной точке; f – вязкость флюида.

Заметим, что уравнение Дарси справедливо для жидкого флюида, но применительно к анализу газовых течений в угольном пласте с очень низкими значениями газовой проницаемости угольного «куска» или одного дискрета; значимыми типами проницаемости являются k_{II} и k_{III} (раздел 1.2), что позволяет прибегнуть к качественной аналогии флюидных и газовых течений в условиях сравнительно медленного изменения горного давления в контуре зоны влияния забоя подготовительной выработки по мере ее подвигания или в процессе отработки очистного забоя.

В ряде работ, выполненных за последние десятилетия в УГГУ и посвященных рассмотрению задачи, которую мы сформулировали как I этап теоретического подхода к определению параметров газового потока в горном массиве с зонами дезинтеграции, получены зависимости распределения динамического давления и распределения характеристик массива (k и f) в виде уравнения Пуассона [52]

$$\nabla^2 P_d = -\frac{f}{k} \nabla^k \nabla P_d + \frac{f}{k} q, \quad (2.3)$$

где q – скорость изменения трещинно-порового пространства (с^{-1}); $k = k_{III}$.

Решением на модели дифференциального уравнения (2.3), если искомыми являются вязкость f и проницаемость k , можно определить действующее на рассматриваемую область пласта давление P_d и, зная P_d , можно найти параметры f и k , и по ним оценить структуру проницаемости и состояние устойчивости рассматриваемой области.

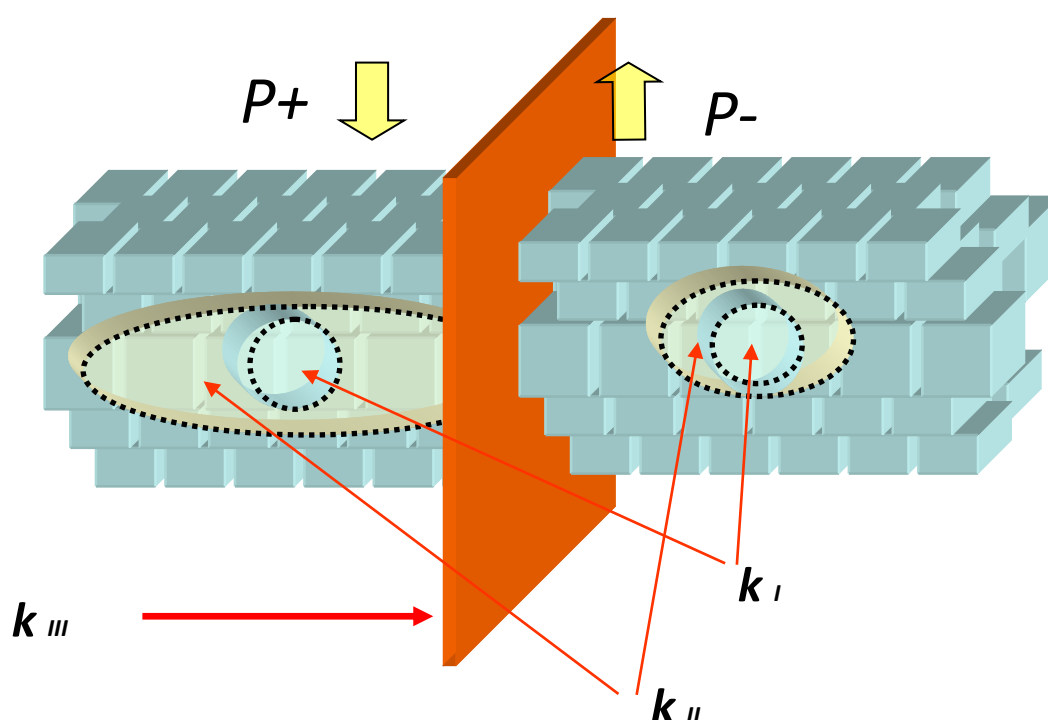


Рисунок 2.6 – Схема модели проницаемости дискретного массива

«Достоинством предлагаемого решения является функциональное сведение проницаемости и общего горного давления, что, в принципе, вполне приемлемо для решения оценочных миграционных задач, в которых не столько важно знание абсолютных параметров течения, сколько важно определить – куда направлено течение» [85].

Следовательно, в пакете прочностного анализа Fidesys (Фидесис) [13, 14, 52] логично реализовать вышеназванные решения как следствие применения сей-

смического прогноза структуры и параметров НДС в подземных условиях с целью опережающего прогноза параметров флюидных течений и оценки критериев опасности притока флюида (газа).

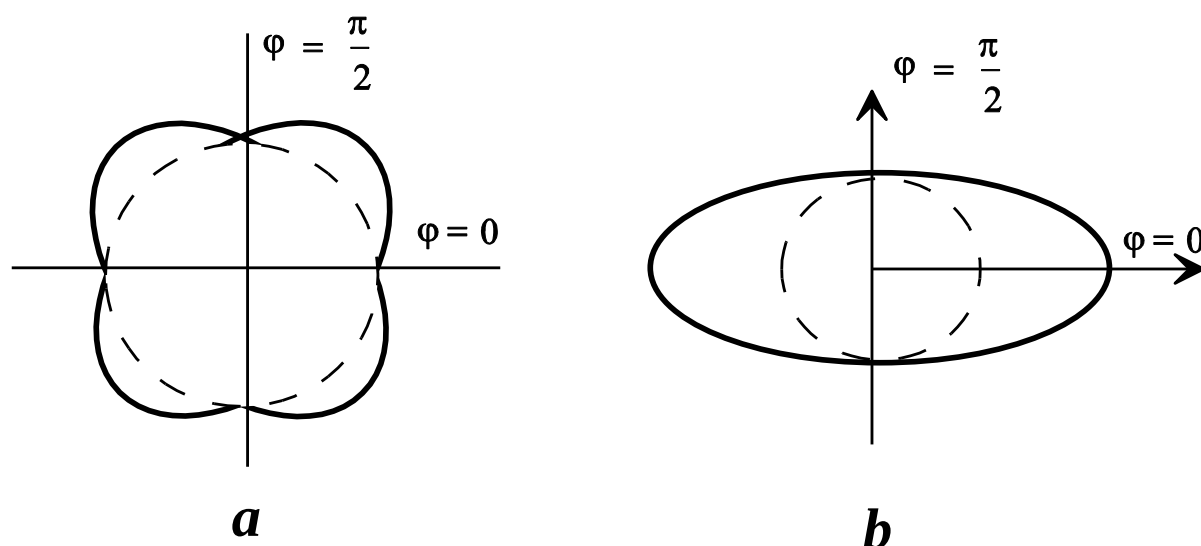


Рисунок 2.7 – Качественные диаграммы параметров флюидного течения в тонком дискретном слое: а – для градиентов давления при двуосной анизотропии, б – для градиентов давления при трехосной анизотропии

2.3. Геомеханический анализ напряженно-деформированного состояния пласта в задаче «градиент горного давления–газовый поток»

На текущий момент модель напряженно-деформированного состояния массива калибруется на информацию о текущем уровне напряжений в забое, получаемую на основе бурения шпуров, как было отмечено в подразделе 2.1, а также измерения наведенной анизотропии скоростей упругих волн в ближней зоне по данным сейсмического зондирования [85, 105, 106]. Подобный подход, к сожалению, не позволяет учесть глубину и размеры зоны дезинтеграции, наличие неоднородной структуры трещин между угольными блоками. При этом одной из

ключевых задач по-прежнему остается определение технологических характеристик, при котором стенки забоя будут сохранять свою стабильность.

«Массив имеет свои характеристики (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, углы внутреннего трения и дилатансии, пределы прочности и текучести на растяжение и сжатие, удельное сцепление, пористость, проницаемость, сжимаемость и пр.). Кроме того, горный массив находится в напряженном состоянии, которое определяется компонентами тензора напряжений в каждой его точке» [13]. При проведении добычных и горнопроходческих работ в зоне взаимовлияния выработки и массива происходит перераспределение напряжений, что и формирует динамическую систему «среда–выработка».

Первым приближением для решения задачи устойчивости стенок забоя становится аналитическое решение задачи. Однако недостатками такого метода являются неопределенности в решении, связанные с неидеальной формой выработки, сложной геометрией пласта и пренебрежением неоднородностью свойств и дискретной структурой массива. Кроме того, подход, основанный на аналитическом решении задачи об определении НДС, рассматривает точное решение уравнения равновесия в упрощенной постановке с рядом допущений (например, только случай плоской постановки забоя в виде кругового отверстия и граничными условиями по напряжениям). Таким образом, как правило, рассматривается:

- а) «поведение материала в линейно упругой области;
- б) идеальное круговое сечение штрека (срез всегда берется нормально к оси штрека);
- в) плоское деформированное состояние;
- г) плоскости напластований (при наличии), перпендикулярные оси штрека» [12,13, 44].

Рассмотренный в предыдущем параграфе аналитический метод расчета давления в пласте имеет также ограниченное применение для реальных трехмерных моделей угольного пласта и сложной геометрии очистного забоя.

Анализ НДС горного массива применительно к решаемым в работе задачам требует проведения конечно-элементного моделирования [64, 79, 95, 109]. Поэтому становится важным «применение фундаментальных численно-аналитических подходов к расчету напряжений и деформаций в массиве» [64, 79, 95]. Программное обеспечение CAE Fidesys [13, 69] позволяет проводить трехмерный геомеханический анализ напряжений как в угольном пласте, так и в окружающих его породах с учетом заданной геометрической модели забоя и вызванных его наличием концентраций напряжений, иными словами, предлагается рассматривать процесс взаимовлияния угольной толщи и горной выработки, представляя сам массив в виде классического пороупругого тела, имеющего в своем строении трещины, швы, в которых может находиться флюид различного рода (жидкость, газ, жидкостно-газовая смесь и т. п.). Определенное напряженное состояние может стать причиной сдвигового или разрывного поведения массива – появления вывалов, трещин, динамических эффектов (горный удар, выбросы угля и т. п.). Данные проявления разрушения горного массива под действием изменяющегося поля напряжений при переменных во времени граничных условиях являются причиной проблем и при проведении горнопроходческих работ – извлечении угля, породы, бурении, крепеже. В связи с этим становится актуальной задача точной оценки переменных во времени напряжений в общей трехмерной постановке.

Учет всей имеющейся информации о геометрии угольного пласта, включая его дискретную структуру и возможное наличие каверн (элементы карстовых процессов), позволяет решить задачу о равновесии напряженно-деформированного состояния в пласте и окружающих породах в связанной постановке – с учетом изменяемого давления насыщающего газа и его влияния на НДС, а также переменной проницаемости (в общем случае анизотропной) вследствие развития деформаций в пласте [67, 78, 116]. Такой подход позволяет извлекать дополнительную информацию о напряжениях в горной породе даже в условиях недостатка или низкого качества данных, полученных непосредственно на забое, что, зачастую, характерно для проблемных, с точки зрения безопасности проходческих и добычных работ, зон.

Оценка деформаций в зависимости от граничных условий на давление в забое позволяет существенно расширить возможности геомеханического моделирования. Решить ряд проблем стало возможным с помощью численного моделирования в отечественной системе конечно-элементного анализа CAE Fidesys, на основе метода конечных элементов (МКЭ) [14, 64, 79, 95], или метода приближенного численного решения физических задач. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-полиномиальная аппроксимация исследуемых функций. Именно этот подход соответствует реальной дискретной структуре слоистой осадочной толщи.

Основное отличие МКЭ от классических алгоритмов, основанных на вариационных принципах и методах взвешенных невязок, заключается в выборе базисных функций. Они берутся в виде кусочно-гладких функций, которые обращаются в нуль всюду, кроме ограниченных областей, являющихся компактными носителями данных функций. Это ведет к разреженной структуре матрицы коэффициентов итоговой системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Основные преимущества МКЭ:

- а) исследуемые объекты могут иметь любую форму и различную физическую природу – деформируемые твердые тела, жидкости, газы;
- б) конечные элементы могут иметь различную форму, порядок и размеры, адаптивные трехмерной геометрии модели;
- в) можно исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;
- г) можно решать стационарные и нестационарные задачи;
- д) можно решать контактные задачи на границах между блоками;
- е) вычислительный алгоритм, представленный в матричной форме, формально единообразен для различных физических задач и для задач различной размерности, что удобно для компьютерного программирования;
- ж) на одной и той же сетке конечных элементов можно решать различные физические задачи, что облегчает анализ связанных задач гидрогеомеханического сопряжения;

и) разрешающая система уравнений имеет экономичную разреженную матрицу «жесткости», что ускоряет вычислительный процесс на ЭВМ.

На второй стадии рассматриваемого подхода применение ПО CAE Fidesys для геомеханического моделирования позволяет повысить точность определения безопасных режимов проходческих и добычных работ, спрогнозировать возникновение вывалов и трещин в стенках забоя, учитывать развитие пластических деформаций в пласте, оценивать риски, связанные с прохождением выработки через структурные неоднородности (зоны дезинтеграции массива), моделировать нестационарные эффекты (например, распространение сейсмических волн). Дополнительно это позволит расширить область учитываемых физических эффектов и повысить точность предсказания зон с повышенным риском развития геогазодинамических явлений на безопасном удалении от выработок.

Кроме того, применение аппарата трехмерного конечно-элементного моделирования позволяет проводить расчет напряжений и деформаций в пороупругой постановке с учетом динамического изменения поля давлений насыщающего газа. Оценка деформаций угольного пласта в зависимости от давления газа внутри него, направления метанового потока позволяет расширить возможности геомеханического моделирования и уточнить рекомендации к управлению технологиями ведения горных работ.

Математическая постановка рассматриваемой задачи геомеханического анализа угольного пласта включает в себя систему уравнений, описывающих динамическое изменение напряженно-деформированного состояния пороупругого тела, насыщенного газом [52]:

$$\operatorname{div}(\sigma(u(x, t)) - \alpha p(x, t)I) + f(x, t) = \rho \ddot{u}(x, t). \quad (2.4)$$

где u – вектор перемещений точек пороупругого тела; p – давление насыщающего газа, полученное из решения уравнений фильтрации, рассмотренных на 1-ом этапе ($p = P_d$); p – поровое давление; α – коэффициент Био; $f(x, t)$ – массовые силы, действующие на массив (например, гравитационное давление P_g); σ – тензор напряжения; I – единичный тензор; $\ddot{u}$ – ускорение точек пороупругого тела.

Связь между напряжениями и деформациями в горном массиве задается с помощью следующего соотношения:

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2.5)$$

где λ – первый параметр Ламе; θ – первый инвариант тензора деформации.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_j u_i + \nabla_i u_j), \quad (2.6)$$

$$\theta(\varepsilon) = \sum_{i=1}^d \varepsilon_{ij}, \quad (2.7)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензора напряжений и тензора деформаций соответственно; δ – символ Кронеккера; $d(= 2,3)$ – размерность задачи.

Параметры Ламэ:

$$\lambda = \lambda(x) = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}, \mu = \mu(x) = \frac{E}{2(1+v)}, \quad (2.8)$$

где $E = E(x)$ – модуль Юнга; $v = v(x)$ – коэффициент Пуассона.

Ввиду анизотропности (в общем случае) поля напряжений рассчитанная на его основе проницаемость межблоковых трещин также будет анизотропной. Максимальная проницаемость достигается при максимальном раскрытии трещин, т. е. при минимальном уровне сжимающих напряжений по нормали к поверхности блоков.

Новая проницаемость материала блоков вычисляется согласно уравнению Козени–Кармана [128] как функция пористости материала массива и геометрических характеристик каналов в пористой среде:

$$k = \frac{\phi}{f_c \tau \Sigma_p^2}, \quad (2.9)$$

где ϕ – начальная пористость; f_c – параметр формы пористых каналов; $\tau = (L_a/L)^2$ – коэффициент извилистости пористых каналов; L_a – длина извилистого канала;

L – длина контрольного объема, вдоль которого проходит извилистый канал; Σ_p – площадь удельной поверхности порового пространства.

Измененная пористость материала блоков ϕ_m пересчитывается на основе полученных значений объемной деформации блока и пористости ϕ_i на предыдущем шаге:

$$\phi_m = \phi_i(1 + \varepsilon_v). \quad (2.10)$$

Объемная деформация ε_v определяется на основе значений главных деформаций ε_1 , ε_2 и ε_3 .

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) - 1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \{\varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\} \quad (2.11)$$

где $\Delta V/V$ – соотношение изменения контрольного объема к его значению до деформации. В предположении, что при локальных ГДЯ и достаточно малых деформациях горного массива, член, заключенный в фигурные скобки, стремится к нулю, объемную деформацию можно представить в простом виде:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3. \quad (2.12)$$

Соотношение (2.12) позволяет на модели однозначно определить модуль вектора распространения газового потока в массиве в любом из трех направлений.

Известны также эмпирические зависимости «напряжение–проницаемость» вида [128]:

$$k = 0.1 d v^3, \quad (2.13)$$

где k – проницаемость объема массива с дискретной структурой, d – плотность дискретов в выбранном объеме массива, а v – объем пустотного пространства, который является, по существу, функцией общего горного давления.

Следовательно, не только рассмотренные рассуждения, но и другие теоретические и эмпирические зависимости «напряжение–проницаемость», реализованные в известных программных разработках и технологиях моделирования

флюидных потоков, позволяют выполнить численный анализ газовых течений в условиях отработки угольного пласта.

Определенные таким образом значения проницаемости матрицы и межблочных трещин передаются на расчет очередного шага по времени в газодинамический симулятор фильтрации метана для определения новых полей давлений.

Выбор алгоритма сопряжения геомеханического и газодинамического симуляторов «существенно зависит от решаемой задачи. Наиболее точные результаты могут быть получены применением полностью сопряженных алгоритмов (что может быть реализовано лишь при внутреннем сопряжении) значений скорости газа и смещения внутри массива, когда они вычисляются одновременно в процессе решения линейных уравнений, дискретизирующих единообразно замкнутую систему» [13, 14].

«Однако такое сопряжение требуется далеко не всегда или практически неосуществимо. В реальных условиях инженер, как правило, обладает лицензиями двух коммерческих пакетов (например, CAE Fidesys и Eclipse 300 или tNavigator) и ищет пути их наиболее эффективного совместного использования. В настоящей работе сделан акцент на внешнем сопряжении двух коммерческих пакетов» [13].

Рассматриваемая в данной работе геомеханическая модель блочно-трещиноватой среды состоит из двух взаимодействующих на разных масштабах континуумов – как и в стандартной модели двойной пористости один включает в себя пористую среду материала блоков, второй соответствует естественным трещинам между блоками. Следуя модели упрощенной трещиноватой породы, принятой в [68, 128], «будем далее моделировать второй тип континуума состоящим из нескольких множеств трещин, в каждом множестве содержится некоторое количество одинаково направленных трещин с одинаковой толщиной, но различным распределением в объеме массива. Каждое множество трещин характеризуется собственным коэффициентом жесткости, который определяет реакцию трещин на приложенное напряжение» [67].

Выбранная геомеханическая модель взаимодействует с газодинамической моделью при помощи обмена с определенной частотой значениями проницаемо-

сти блоков и «трещин, давлений в порах и трещинах, насыщенных метаном. При этом, не менее важный эффект заключается в возможности контроля изменений величины раскрытия межблоковых трещин и, возможно, их направления, что позволяет определить в явном виде наведенную НДС анизотропию тензора проницаемости» [14, 67].

«Таким образом, одним из главных результатов использования геомеханической модели является прямое моделирование *динамической проницаемости*, вызванной деформированием» [14, 149] блочно-трещиноватого угольного пласта в процессе фильтрации газа. При этом, как уже отмечалось, моделирование и расчет параметров НДС осуществляется в 2 этапа.

На первом этапе находятся эффективные механические характеристики (эквивалентная матрица жесткости) для каждой подобласти (пористая упругая матрица + системы трещины внутри нее) на основе решения серии задач на ячейке периодичности [14, 74, 155]. Далее на основе найденных эффективных механических параметров в подобластях решается геомеханическая задача о нахождении НДС во всей области. Затем идет обратная процедура – на основе рассчитанных глобальных напряжений решаются серии задач о нагружении матрицы и трещин в каждой из подобластей для определения деформаций внутри матрицы материала блоков и раскрытий трещин между ними, соответствующих текущему локальному НДС в окрестности конкретной грани блока. Наконец, рассчитанные деформации матрицы и раскрытия трещин используются при вычислении нового тензора проницаемостей угольного пласта. Рассчитанные проницаемости (матрицы и межблочных трещин) передаются в газодинамический симулятор на основе модели двойной проницаемости, который определяет поле давлений метана во всей модели. Затем на основе рассчитанных давлений в матрице p_m и трещинах p_f определяется среднее давление в эффективном континууме и повторяется расчет НДС и параметров геомеханической модели. Уравнение для пористости в этом подходе не используется.

В случае итерационного сопряжения описанный цикл повторяется в рамках одного шага по времени до тех пор, пока не будет достигнута сходимость между

геомеханическим решателем и газодинамическим симулятором. Для улучшения сходимости внутренних итераций можно зафиксировать проницаемость трещин (проницаемость матрицы при этом продолжает меняться) и производить их пересчет только в конце текущего шага по времени.

В итоге, определив величину и направление газового потока из зон дезинтеграции (2.11), используя общепринятый в таких ситуациях подход к построению модели по рейтинговому критерию устойчивости массива, предложенный Бенявским (RMR) или Бартоном (Q), принимается в качестве оценки уровня развития опасного динамического явления на дистанцию d интегральный критерий $R(d)$ в виде следующего выражения:

$$R(d) = m \cdot gP_d \cdot E_d \cdot F_i \cdot b \cdot I_T \cdot I_P \cdot d, \quad (2.14)$$

где m - региональный экспериментальный коэффициент;

gP_d - градиент динамического давления, нормированный к диапазону 1-100;

E_d - энергия сейсмического отклика;

F_i - частота сейсмического отклика;

b - классификационные показатели, нормированные к диапазону 0,1-1,0;

I_T - текущая (фактическая) метанообильность;

I_P - прогнозная метанообильность;

d - глубина контроля.

Принятие решения «опасно» или «неопасно» может быть установлено на середине диапазона $R(d)$ или в любой его точке, сообразуясь с конкретными физико-механическими свойствами.

2.4. Примеры расчета модели проницаемости для очистного и подготовительного забоев при отработке угольного пласта с учетом фактической метанообильности в выработках

Основной целью моделирования является подтверждение ранее рассмотренных положений теории формирования зон концентрации и деконцентрации в горном массиве с учетом функционала «проницаемость–напряжение».

Анализ особенностей газовых течений приведен на модели очистного забоя (Рисунок 2.8). Здесь в целях сокращения процедуры вычислительных расчетов взят фрагмент угольного пласта с характеристиками, точно воспроизводящими по размерам величины реальной современной лавы.

Свойства гидродинамической модели (используется ПО EclipseCompositional ESMB3):

- проницаемость куба – 10 мД;
- давление в толще угольного пласта – 200 атм;
- давление в штреке – 1 атм;
- реализованы открытые граничные условия с постоянным давлением 200 атм и индексом продуктивности 340,56 м³/сутки/атм (поверхностные условия).

Замечание: За основу гидродинамической модели использовался модуль ECLIPSE. Свойства геомеханической модели:

- коэффициент Пуассона – 0,4;
- модуль Юнга – 20 МПа;
- продолжительность расчета – 480 минут с шагом 1 минута.

На Рисунках 2.9–2.11 приведены результаты расчетов параметров газового потока.

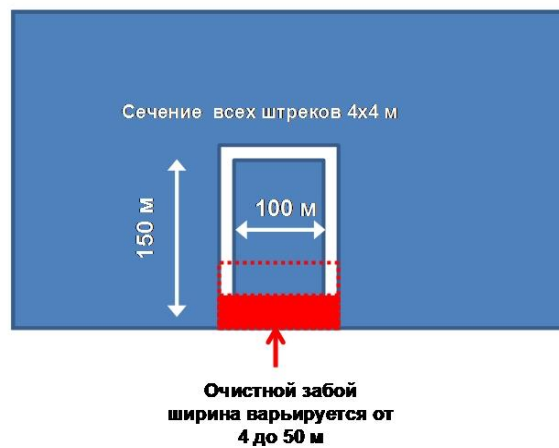
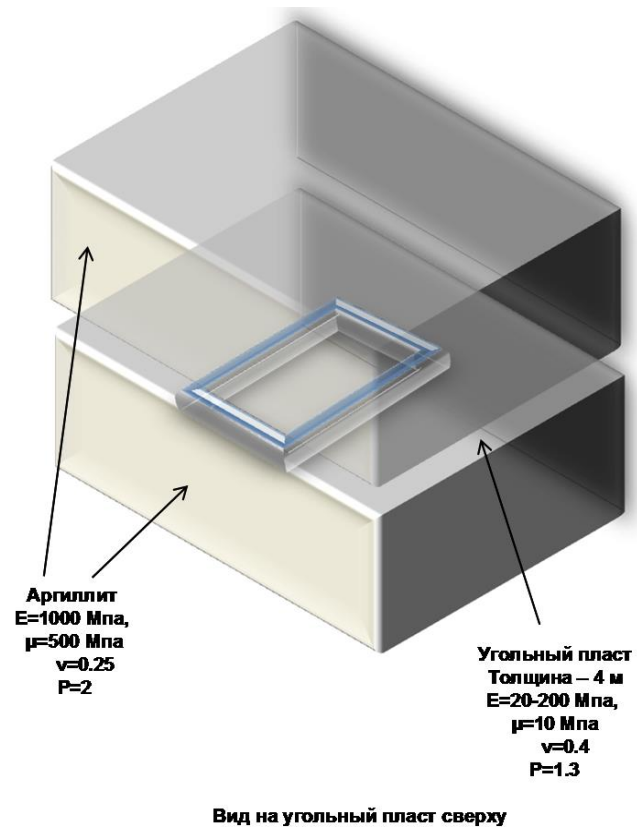
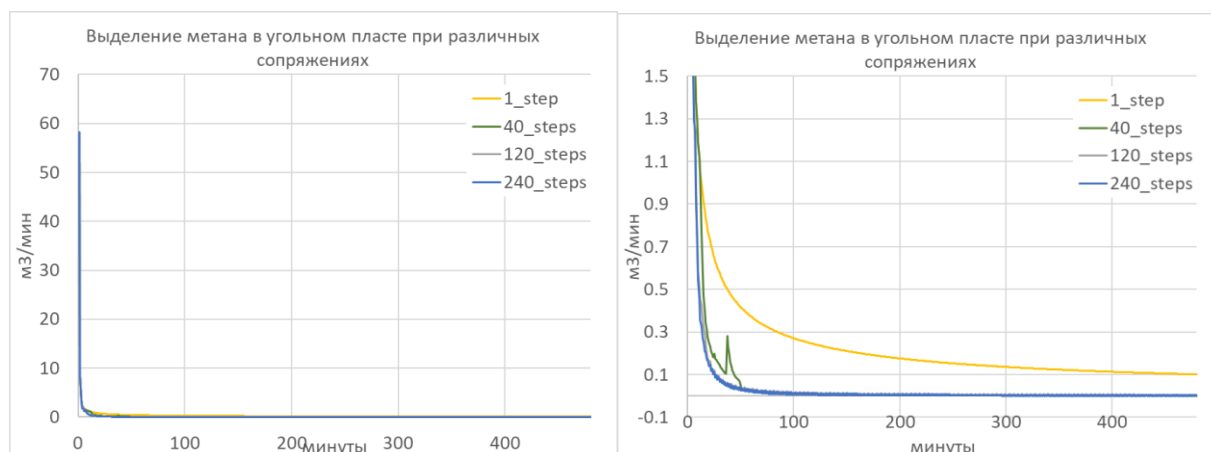


Рисунок 2.8 – Геометрия и свойства модели очистного забоя

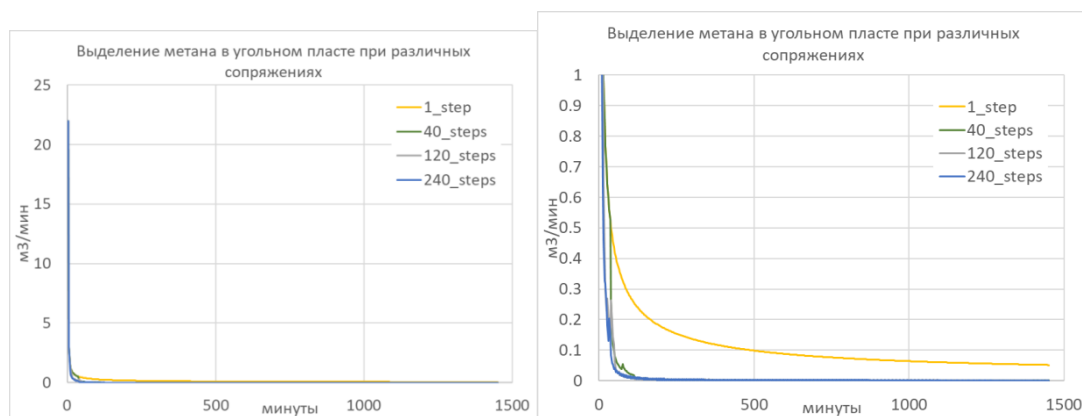
Параметры модели:

- размер куба 500 x 500 x 500 м;
- внутреннее сечение штреков: 4 x 4 м;
- количество ячеек 27 x 104 x 1.

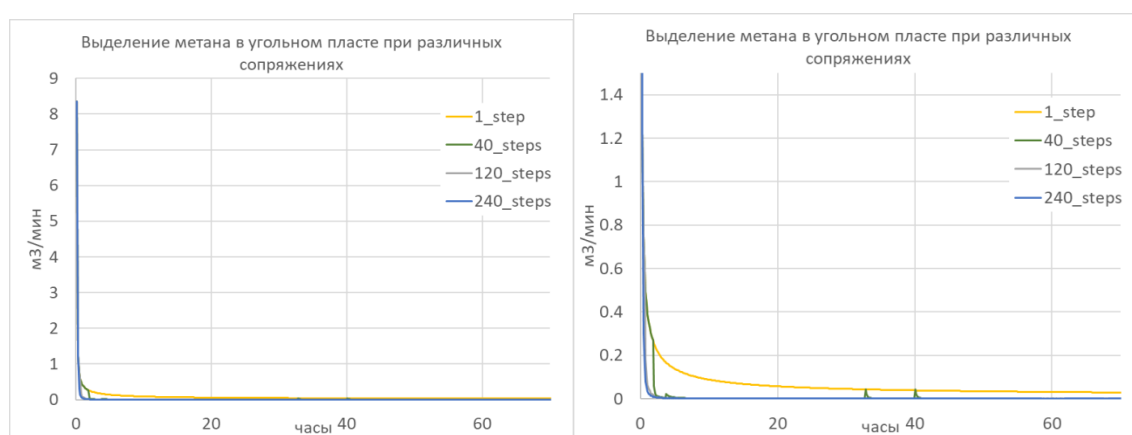
Вариант № 1: Продолжительность расчета 480 минут с шагом в 1 минуту



Вариант № 2: Продолжительность расчета 1440 минут с шагом в 3 минуты



Вариант № 3: Продолжительность расчета 4320 минут с шагом в 9 минут



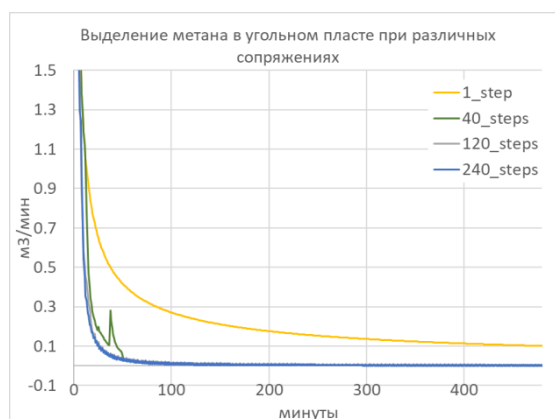


Рисунок 2.9 – Графики выделения метана при различных сопряжениях

1_step – без сопряжения. 40_steps – 60 шагов сопряжения гидродинамического и геомеханического симуляторов, каждый 12 расчетный шаг гидродинамического симулятора. 120_steps – 120 шагов сопряжения гидродинамического и геомеханического симуляторов, каждый 4 расчетный шаг гидродинамического симулятора. 240_steps – 240 шагов сопряжения гидродинамического и геотехнического симуляторов, каждый 2 расчетный шаг гидродинамического симулятора

Графики свидетельствуют о вполне ограниченном временном интервале истечения газа из зоны разгрузки в очистной забой – 1 час. Другими словами, в данном случае через один час угроза суффлярных течений газа существенно снижается.

На Рисунке 2.10 приведены результаты оценки проницаемости пласта после приложения нормальной гравитационной нагрузки. Важным элементом в модели проницаемости пласта в окрестности очистного забоя является локальная зона

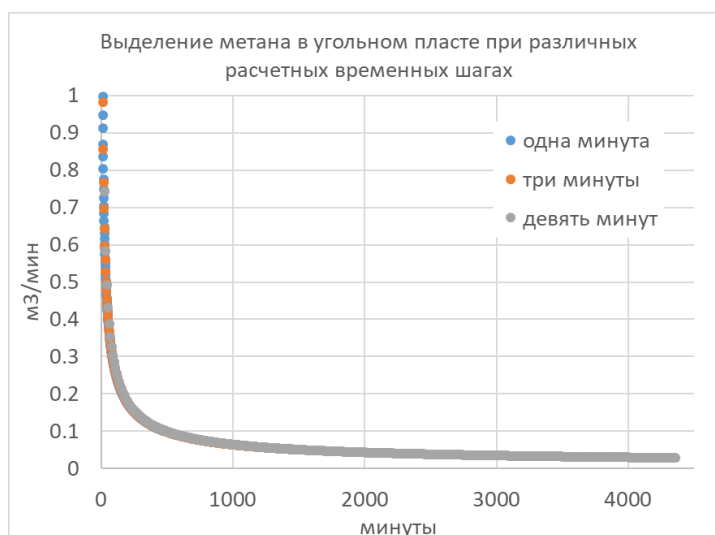


Рисунок 2.10 – Сопоставление результатов расчетов вариантов без сопряжения с разными расчетными временными шагами

высокой проницаемости в центре забоя, которая способна выполнить роль аккумулятора газа и представлять значимую угрозу развития ГДЯ. Введем термин «центральная зона» и далее будем его использовать как основной объект риска для очистного забоя. Именно эта зона и должна рассматриваться как наиболее вероятная область риска скопления газа, в которую следует своевременно планировать бурение разгрузочных скважин.

Анализ гистограмм (Рисунок 2.11) позволяет сделать вывод о равновесном перераспределении проницаемости в десятикратном диапазоне увеличения и уменьшения от исходного значения.

Следовательно, метанообильность угольного пласта в данном варианте модели может возрасти в десятикратном диапазоне от фонового значения.

Второй машинный эксперимент посвящен визуализации изображения массива проницаемости в проходческой выработке при приближении ее к угольному пласту (Рисунок 2.12).

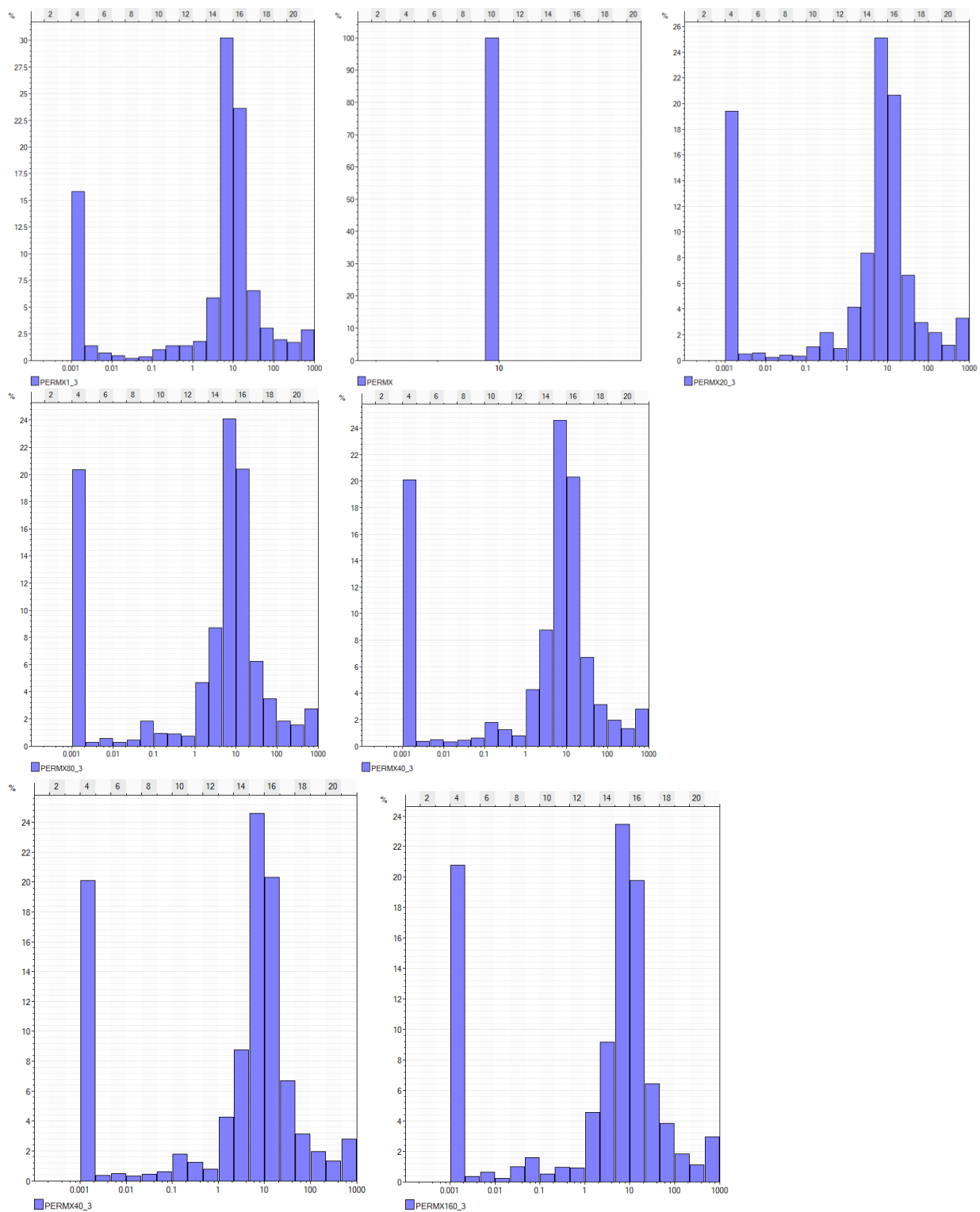


Рисунок 2.11 – Гистограммы массива проницаемости пласта угля при различных шагах сопряжения:

1. PERMX – начальный куб проницаемости;
2. PERMX1_3 – куб проницаемости после первого шага сопряжения;
3. PERMX20_3 – куб проницаемости после 20 шага сопряжения;
4. PERMX40_3 – куб проницаемости после 40 шага сопряжения;
5. PERMX80_3 – куб проницаемости после 80 шага сопряжения;
6. PERMX160_3 – куб проницаемости после 160 шага сопряжения

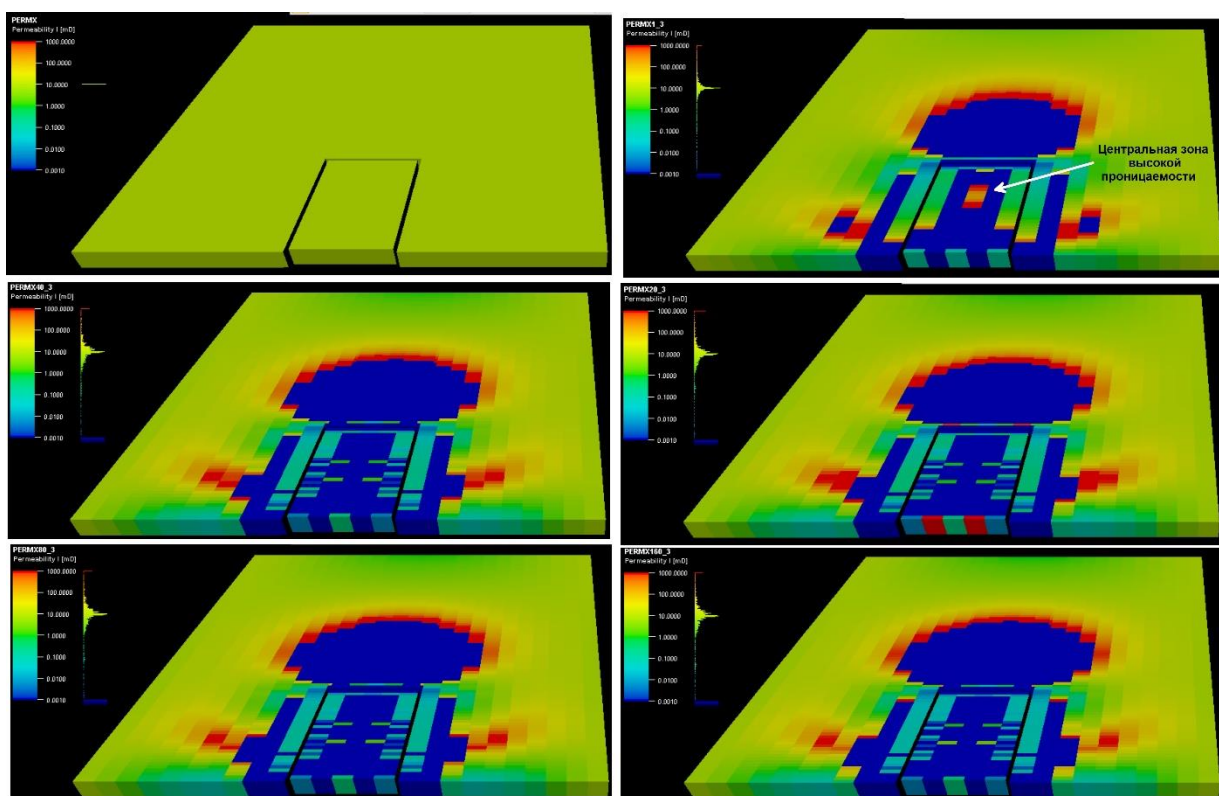


Рисунок 2.12 – Изображение массива проницаемости угольного пласта после приложения нормального гравитационного давления на различных моментах сопряжения

Решена задача определения зависимости метанообильности от расстояния выработки до угольного пласта, показано, что зона деконцентрации напряжения располагается вблизи центра пласта, что, в свою очередь, с прагматической точки зрения одновременно решает практическую задачу нахождения расстояния от этой зоны до источника сейсмического сигнала.

Для определения факта нарастания метанообильности при приближении проходческого забоя к угольному пласту рассмотрим данный процесс, предполагающий выполнение следующих условий:

- в проходческом забое установлена аэрогазовая аппаратура;
- забой должен встретить и пересечь угольный пласт;
- должен обнаружиться факт приближения к газоносному пласту по положительному тренду метанообильности;

– поскольку зона опорного давления впереди груди забоя штрека распространяется на расстояние нескольких десятков метров, то и факт нарастания тренда метанообильности должен быть зафиксирован на этой дистанции.

Представляется целесообразным промоделировать эту ситуацию на упрощенных моделях следующим образом (Рисунок 2.13).

Параметры по проницаемости пород (коэффициенты фильтрации K_ϕ и проницаемости K_n и абсолютная проницаемость K):

Уголь: $K_\phi = 1,2 \times 10^{-5}$ м/с, $K_n = 1,2 \times 10^{-12}$ м² или $K = 10$ мД (миллидарси);

Вмещающие породы: $K_\phi = 1,2 \times 10^{-3}$ м/с, $K_n = 1,2 \times 10^{-10}$ м² или $K = 300$ мД.

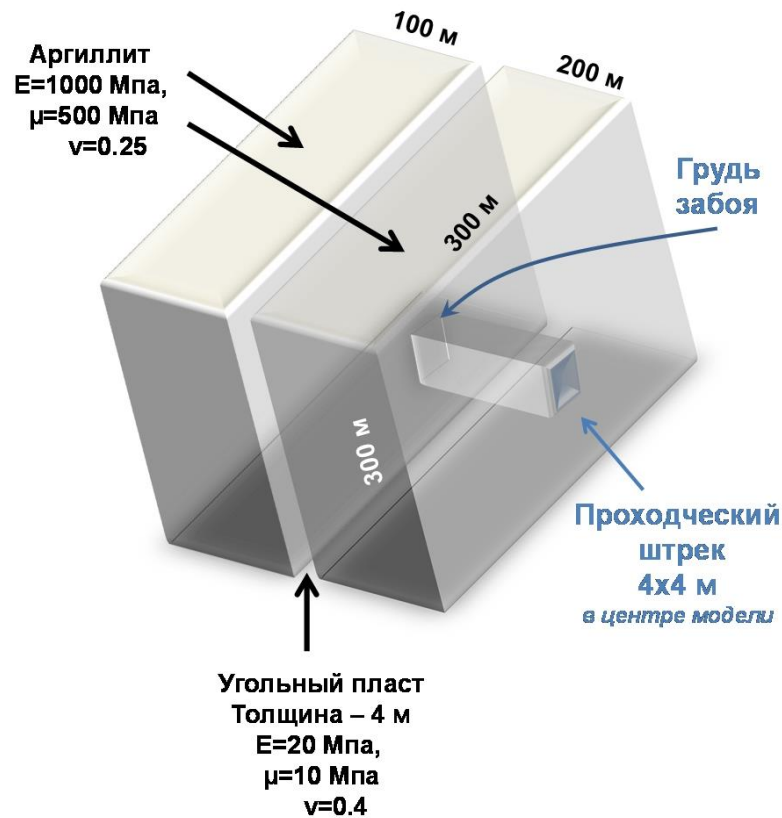


Рисунок 2.13 – Модель процесса приближения проходческого штрека к угольному пласту

Модели были просчитаны при давлении на верхнюю грань около 200 МПа (это соответствует глубине около 1000 м). В пласте угля начальное давление газа было принято равным 1,5 МПа (15 атм), во вмещающей породе – 0,1 МПа (1 атм).

Для решения данной задачи построены сопряженная трехслойная газодинамическая и геомеханическая модели угольного пласта с изменяющейся проницаемостью угля в зависимости от геомеханических напряжений и пластового давления газа. Итерационный процесс сопряжения происходит следующим образом:

1. Задается временной промежуток, в течение которого все проницаемости считаются неизменными;
2. Рассчитываются параметры упругости трещин из исходных данных о поведении проницаемости в зависимости от приложенного давления;
3. Производится расчет газодинамической задачи в течение заданного временного промежутка;
4. В геомеханическую модель передаются данные о поле порового давления газа, и производится расчет напряженно-деформированного состояния модели пласта;
5. По полученным значениям напряжений в пласте вычисляются изменения раскрытия трещин и изменения проницаемости породы;
6. Измененные проницаемости передаются в газодинамическую модель, переход к п. 3.

Были произведены расчеты для четырех положений проходческого забоя относительно угольного пласта:

1. 180 м;
2. 80 м;
3. 60 м;
4. 20 м.

Пример качественного распределения полей напряжений и деформаций в угольном пласте при приближении к нему подготовительной выработки приведен на Рисунке 2.14.

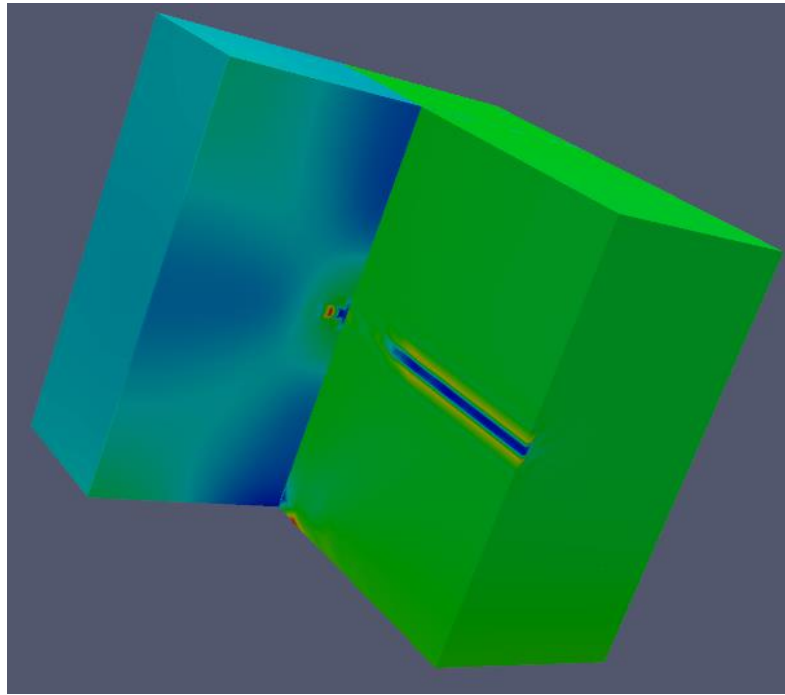


Рисунок 2.14 – Распределение напряжений в угольном пласте (вертикальный срез) при наличии проходческой выработки

Результаты расчетов – зависимость метановыделения ($\text{см}^3/\text{мин}$) от времени (в сутках) – для приведенных четырех конфигураций расположения проходческого забоя по отношению к пласту представлены на Рисунке 2.15.

Как и в предыдущих расчетах, в варианте очистного забоя для принятых удалений подготовительного забоя от угольного пласта время полного газового насыщения атмосферы забоя не превышает нескольких часов для самого большого удаления (180 м).

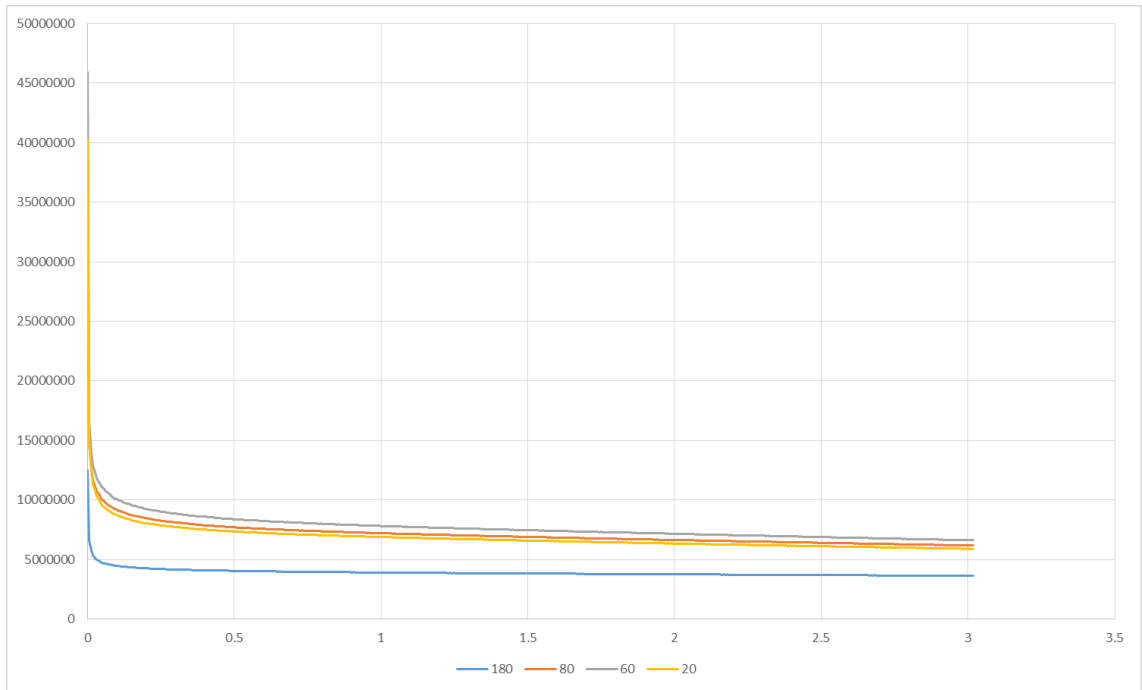


Рисунок 2.15 – Графики зависимости метановыделения ($\text{см}^3/\text{мин}$) от времени (в сутках) для разных удалений подготовительной выработки от угольного пласта (180, 80, 60 и 20 м)

На основе этих данных построен график зависимости метановыделения от расстояния до пласта (Рисунок 2.16). Отметим близость полученного графика к графику, приведенному ранее в подразделе 2.1 (Рисунок 2.3).

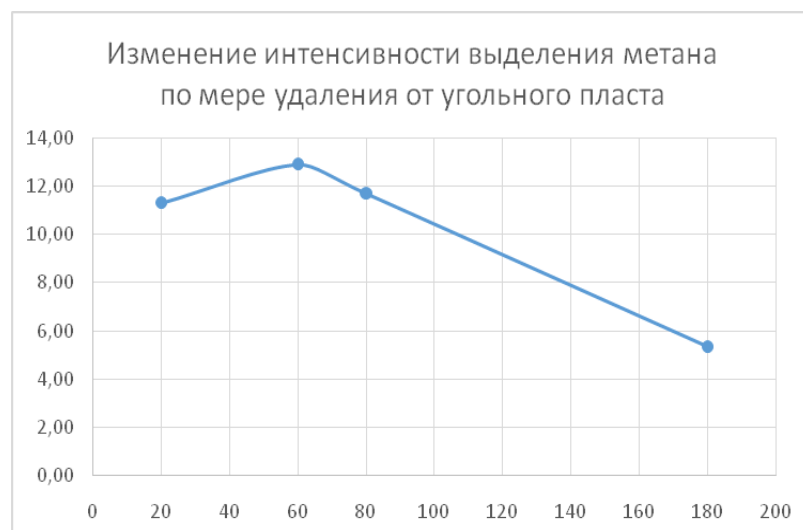


Рисунок 2.16 – График метановыделения для различных расстояний подготовительного забоя от угольного пласта (в метрах)

Выводы

На основании выполненного анализа и известных обобщений по рассматриваемой проблеме следует отметить наиболее важные элементы природно-технической системы «массив горных пород–подземная выработка–газ» (горный массив) в следующем виде:

- текущие параметры напряженно-деформированного состояния горного массива с дискретной структурой формируют динамическую систему «градиент горного давления–газовый поток»;
- зоны риска развития динамических явлений сопряжены с зонами газового насыщения горного массива в периферийной области, что может являться пространственным и временным предвестником опасных явлений.

Подчеркнем, что важное утверждение о вероятности появления такого предвестника «автоматически» предполагает предварительное (дистанционное) знание структуры проницаемости угольного пласта и параметров горного давления, в противном случае фактические вариации метанообильности в шахтной атмосфере, вызванные многими сопутствующими факторами и соизмеримые с интенсивностью предвестников, не могут быть приняты за индикаторы развития опасных газодинамических явлений.

3 СТРУКТУРА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССАХ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Введение

Действующие Правила безопасности в угольных шахтах (ПБ) [118] и другие нормативные материалы [20, 93, 94, 95, 96, 117, 119], как упоминалось ранее, предполагают «использование интеллектуальных систем получения информации и управления ею на основе применения современных технических средств телекоммуникации в форматах единого комплекса контролируемых параметров горной среды, критериев и регламента управления этим состоянием» [132], в том числе технологией ведения горных работ в виде многофункциональной системы безопасности (МФСБ) шахты [5-9].

При этом значительные задачи возлагаются на функционал систем контроля аэрогазовых режимов в горных выработках, безопасного состояния горного массива, прогноза внезапных выбросов и горных ударов, предусматривающих проведение мониторинга геодинамических, газодинамических и техногенных процессов средствами сейсмических, геофизических и геомеханических наблюдений с учетом действующих систем аэрогазового контроля, систем предварительной и текущей дегазации пласта [4, 34, 39, 48].

Развитие опасных геогазодинамических явлений в угольных шахтах «определяется границами области активного влияния подземной выработки на изменение структуры и параметров НДС горного массива в наиболее опасной зоне с радиусом в первые десятки метров в окрестности забоя выработки, что требует применения дистанционного метода непрерывной оценки параметров НДС и опережающего прогноза наступления опасных ГДЯ с необходимым пространственным разрешением. При этом скорости развития ГДЯ существенно опережают скорости проходки и крепления выработки, а само опасное событие реализуется

по неочевидному сценарию интерференции ряда динамических процессов в природно-технической системе «геологическая среда–выработка–крепь»» [80]. Еще раз отметим важное обстоятельство: скорости проходки подземных выработок по современным технологиям достигают уровня 20–30 метров в сутки, что порождает совершенно новые и непредсказуемые геомеханические процессы на дальних дистанциях от места ведения горнотехнических работ.

С учетом этих принципиальных соображений функционал предлагаемой геоинформационной системы (далее ГИС МИКОН) «должен решать в оперативном режиме следующие основные задачи:

а) непрерывную оценку структуры и параметров НДС горного массива в процессе ведения проходческих или добычных горнотехнических работ в ближней зоне забоя выработки с радиусом не менее 100 метров (с учетом конкретных геологических и инфраструктурных условий);

б) определение фактических деформационно-прочностных свойств вмещающего массива и прогноз их критического изменения на всех этапах подготовительных и добычных работ (непрерывный и периодический локальный контроль состояния массива в опасных зонах выработок в пределах шахтного поля);

в) организацию системного геотехнического мониторинга инженерно-геологических процессов и динамических явлений в горном массиве на дневной поверхности и в подземном пространстве в пределах контура шахтного поля (региональный контроль всей природно-технической системы «геологическая среда–подработанное пространство» на уровне масштабов 1:2000–1:5000)» [83];

г) организацию синхронного с геотехническим мониторингом контроля нормативных характеристик АГК.

Немаловажное значение имеет максимальная унификация программно-технических модулей подсистем сейсмического и аэрогазового контроля. В последние годы новые разработки предприятия ООО «ИНГОРТЕХ» были направлены на создание стратегии объединения в единое информационное пространство локальных (автономных) подсистем автоматизации, выпускаемых отечественны-

ми и зарубежными фирмами и основанных на разнообразных программно-технических решениях [37, 61. 63, 76].

Для того чтобы информационная система предприятия решала задачу снижения общей себестоимости продукции и приводила к интегрированному повышению уровней безопасности и экономической эффективности производства в целом, информационная система должна включать следующие компоненты:

- необходимое и достаточное количество унифицированного полевого и контроллерного оборудования во всех технологических процессах, в том числе, средств оперативного дистанционного обнаружения объектов риска в горном массиве;
- «универсальную и развитую систему промышленных коммуникаций;
- эффективный компьютерный парк;
- современный программный инструментарий;
- развитую коммуникационную инфраструктуру предприятия» [72] и головной компании с научной поддержкой процессов подземного горного производства.

В предыдущих разделах настоящей работы приведен анализ обсуждаемой проблемы, результаты которого свидетельствуют о необходимости включения в состав системы обеспечения безопасности и эффективности подземного производства аппаратно-технических средств дистанционного сейсмического обнаружения объектов риска в контуре шахтного поля как основного элемента функции прогноза развития опасных ГДЯ. При этом нельзя не отметить, что, если выполняется прогноз опасных ГДЯ, то функционал системы должен быть ориентирован на возможность технологического вмешательства персонала горных выработок для проведения необходимых мероприятий по предотвращению аварийной ситуации. Данное обстоятельство тем более актуально в связи с существенным повышением темпов проходческих и добычных работ.

С учетом названных обстоятельств необходима, в том числе, разработка геоинформационной базы для обеспечения эффективного функционала подсистемы аэрогазового контроля угольных шахт на основе учета структуры и парамет-

ров напряженного состояния горного массива в зоне влияния, примыкающей к местам ведения добычных и подготовительных работ [15, 21, 77, 85]. Функционал разработанной ГИС МИКОН представлен на Рисунке 3.1. Ключевыми информационными блоками системы являются фактографическая база данных и концептуальная база знаний, полученная на основе формализованного интегрированного анализа аэрогазовых и сейсмических параметров, переданных из фактографической базы [61]. Процедуру формирования такого функционала и предложено рассмотреть в настоящей работе.

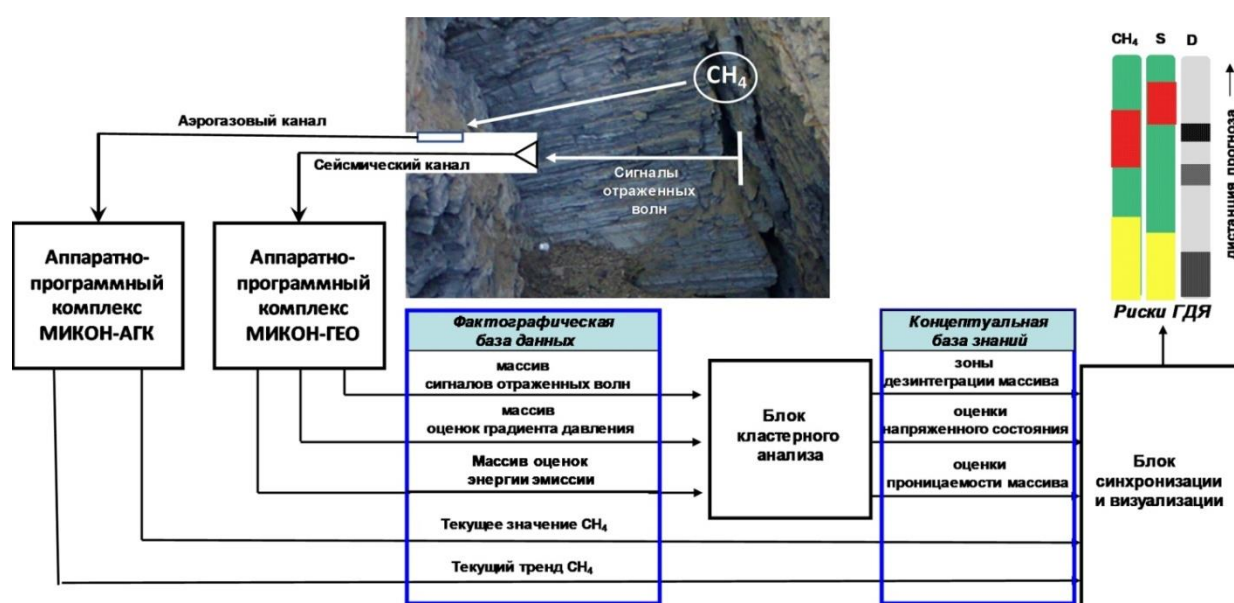


Рисунок 3.1 – Функционал геоинформационной системы ГИС МИКОН

3.1 Характерные особенности контроля аэрогазового состояния горных выработок (аэрогазовый канал)

Структура ГИС МИКОН отражает формализованную реализацию геоинформационной системы, базовой основой которой являются два канала: аэрогазовый и сейсмический.

Аэрогазовый канал («Микон-АГК») представляет собой аппаратно-программный комплекс, предназначенный для непрерывного измерения параметров состояния промышленных и горнотехнологических объектов, в том числе па-

раметров рудничной атмосферы и микроклимата, состояния основного и вспомогательного технологического оборудования, передачи информации на диспетчерский пункт, ее обработки и отображения.

«Микон-АГК» позволяет на основе использования единых технических и программных средств реализовывать различные системы централизованного диспетчерского и местного, ручного, автоматического и автоматизированного контроля, мониторинга и управления. Объектами управления и контроля могут быть шахтная атмосфера и микроклимат, основное и вспомогательное технологическое оборудование, транспортные и вентиляционные системы, системы электро-, пневмо- и водоснабжения, системы пожаротушения и пр. [36, 43].

Последний вариант канала «Микон-АГК» (система «Микон-III») относится к третьему поколению многофункциональных шахтных информационно-управляющих систем разработки и производства ООО «ИНГОРТЕХ», совместим с иными системами АГК и отличается [53]:

- наличием высокоскоростной универсальной системы передачи информации, которая является единой для всех систем, поставляемых ООО «ИНГОРТЕХ», в том числе не рассматриваемых в настоящей работе;
- применением универсального шахтного контроллера (КУШ) с развитыми инженерными средствами программирования и отладки;
- применением датчиков с цифровым интерфейсом.

«Многофункциональность системы основана на использовании программируемых микропроцессорных устройств в подземных выработках и на поверхности, применении стандартных протоколов и интерфейсов связи, унифицированных электрических сигналов, цифровых методов обработки, хранения, передачи и представления информации».

«Реализуемые функции определяются программами работы подземных и наземных вычислительных устройств, набором и местом расположения используемых датчиков, исполнительных устройств и устройств сигнализации. Область применения – подземные выработки шахт и рудников и их наземные помещения,

в том числе опасные по газу, пыли, внезапным выбросам в соответствии с нормативными документами» [20, 94, 95, 96, 100, 106, 117, 118, 119].

Положение системы «Микон-АГК» в уровневой структуре предприятия представлено на Рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Положение системы «Микон-АГК» в уровневой структуре предприятия

Подсистема «Микон-АГК» также, как и рассматриваемая далее подсистема «Микон-ГЕО», имеет «многоуровневую структуру, в частности:

- на полевом уровне обеспечивается непосредственное сопряжение системы с горнотехнологическими и горнотехническими объектами и персоналом с помощью датчиков, преобразователей, сигнализирующих и исполнительных устройств, щитов, постов и панелей управления;

- контроллерный уровень реализуется на подземных устройствах контроля и управления, которые обеспечивают преобразование сигналов, получаемых от

аналоговых, дискретных и цифровых датчиков, формирование и реализацию управляющих сигналов для исполнительных и сигнализирующих устройств;

– коммуникационный уровень обеспечивает обмен информацией между устройствами полевого, контроллерного и диспетчерского уровней;

– диспетчерский уровень реализуется на наземных компьютерах: серверах, которые обеспечивают высокоуровневый доступ к информации, собираемой системой на объектах контроля» [37, 100].

Структурная схема «Микон-АГК» представлена на Рисунке 3.3.

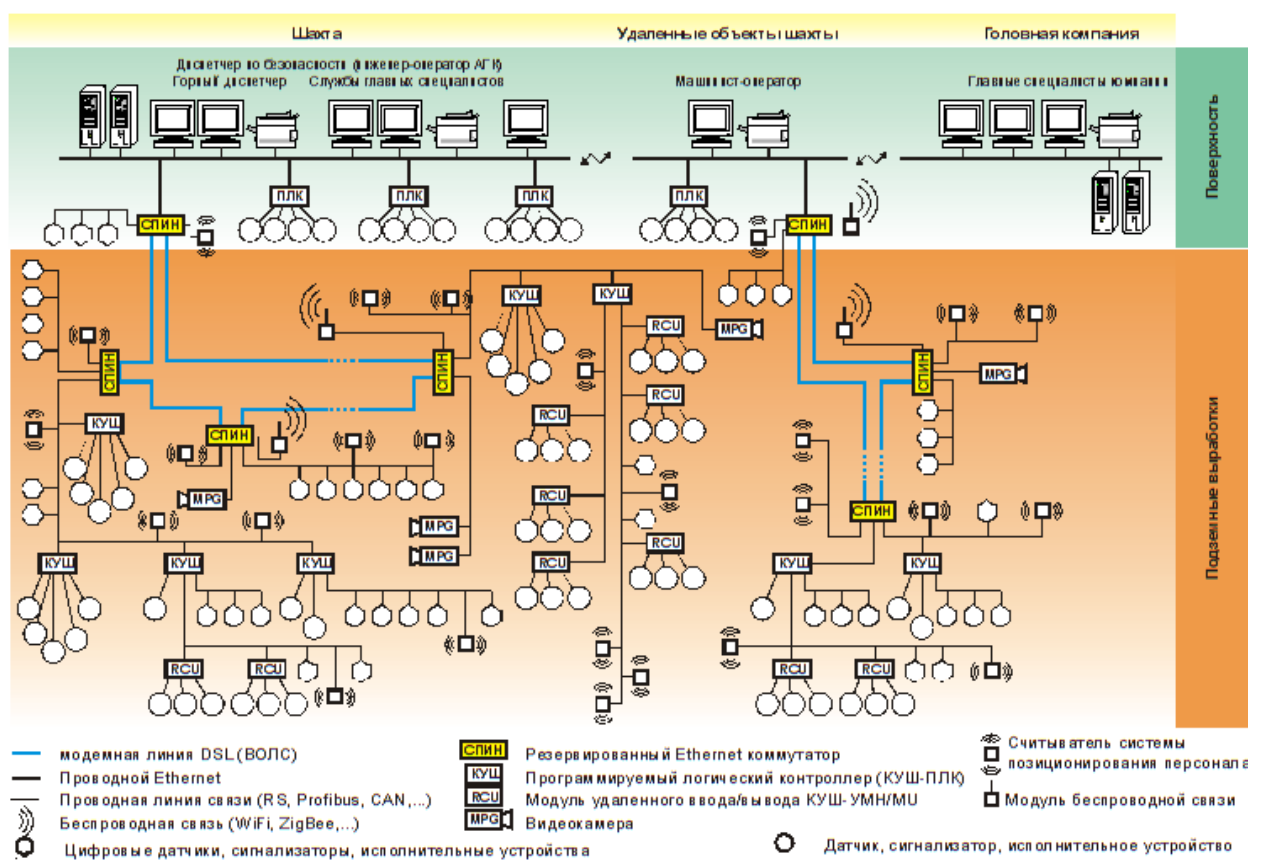


Рисунок 3.3 – Схема структуры подсистемы «Микон-АГК»

Рассматриваемые в настоящем разделе этапы построения и содержание геоинформационной панели носят общий характер для любых шахтных ГИС МИКОН. Однако предлагается основные принципы реализации подхода к формированию отдельных аспектов панели представлять применительно к выпускаемой в

последнее время универсальной цифровой системе «Микон-III». Вместе с тем, имея в виду общность рекомендуемых в разделе выводов применительно ко всем модификациям серийно и широко используемых в РФ систем аэрогазового контроля угольных предприятий, выпускаемых компанией ООО «ИНГОРТЕХ» более двадцати лет под общим брендовым названием «МИКОН», полностью выполняющих нормативные требования, предъявляемые к системам АГК в тот или иной период, принято в дальнейшем условное обозначение «Микон-АГК».

«Комплекс технических средств системы «Микон-АГК» состоит из стационарных, устанавливаемых в подземных выработках датчиков, средств контроля и управления, каналов связи и средств обработки, отображения и хранения информации на диспетчерском пункте» [37, 100].

«Все устанавливаемые в подземных выработках шахты технические средства системы «Микон-АГК» и связанные с ними наземные технические средства, имеющие маркировку взрывозащиты, имеют разрешение на применение в рудниках и угольных шахтах, в том числе опасных по газу и пыли» [37, 100].

«Технические средства системы «Микон-АГК» разделены: по пространственному положению на подземные и наземные; по выполняемым функциям на: датчики, сигнализирующие и исполнительные устройства; подземные и наземные устройства контроля и управления, обработки, хранения и отображения информации; каналы связи и источники питания» » [37, 100].

Основным структурным элементом является система передачи информации СПИН (Рисунок 3.4), которая обеспечивает работу на двух уровнях связи: высокоскоростная связь (магистральный уровень); низкоскоростная связь (полевой уровень). Высокоскоростная связь реализуется с использованием технологии DSL (медные проводники) или Ethernet FX (оптическое волокно). Низкоскоростная связь реализуется с использованием технологии RS-485 по медным проводникам. СПИН обеспечивает сетевую интеграцию: системы газоаналитической шахтной многофункциональной «Микон-АГК», системы локального и текущего контроля горного массива «Микон-ГЕО», системы позиционирования горнорабочих и транспорта СПГТ-41, системы многофункциональной связи СМС «ИСЕТЬ», ап-

паратуру контроля эффективности работы газоотсасывающих установок и дегазационных сетей «КРУГ» [37, 100].

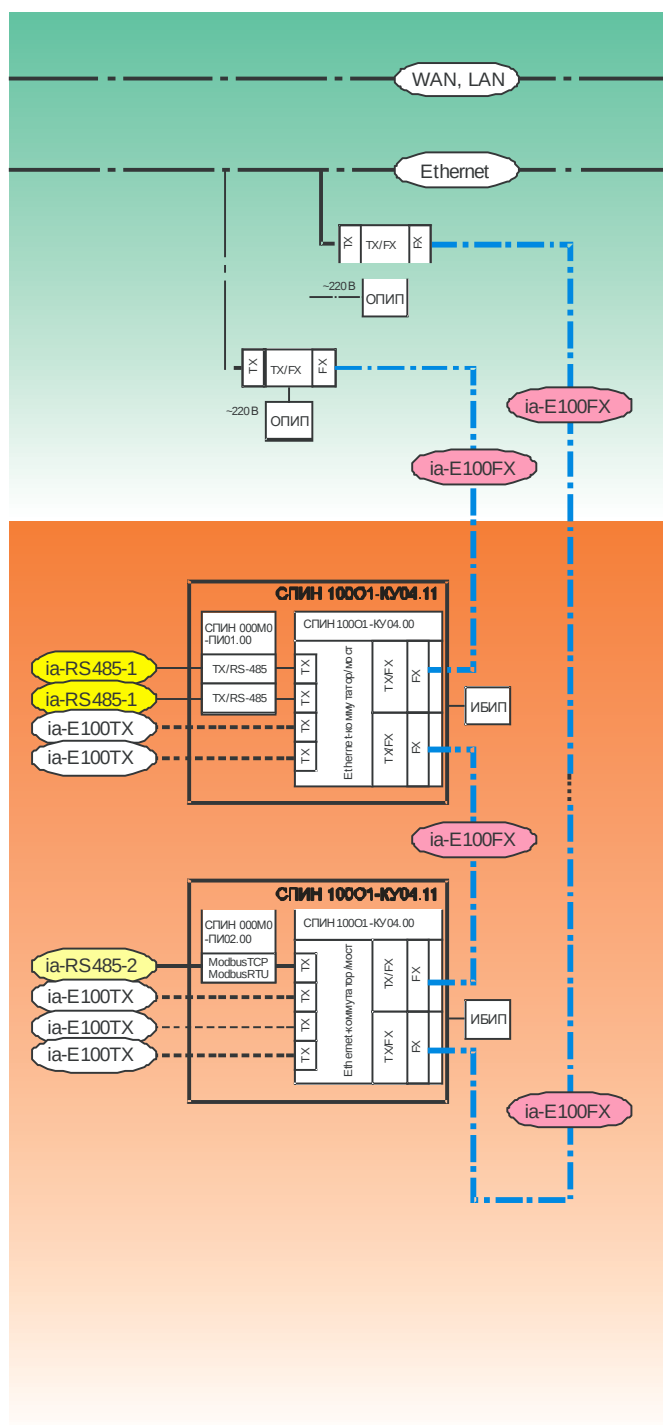


Рисунок 3.4 – Система передачи информации СПИН [37, 100]

«Система «Микон-АГК» имеет измерительные каналы и соответствующие им датчики, обеспечивающие контроль следующих основных параметров шахтной атмосферы:

- концентрация метана;
- скорость воздушного потока или расхода воздуха;
- концентрация оксида углерода» [37, 100].

«Автоматическое формирование и осуществление команд блокирования производственной деятельности (автоматическая газовая защита) осуществляются датчиками системы «Микон-АГК» и связанными с ними подземными устройствами контроля и управления без использования наземных устройств обработки информации и каналов связи с ними.

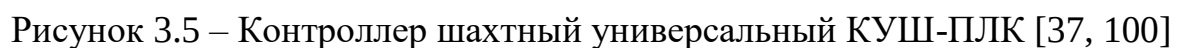
В состав каналов связи системы «Микон-АГК» входят:

- подземные приемники и передатчики информации, к которым относятся датчики и подземные вычислительные устройства, обеспечивающие сбор и обработку информации, а также уплотнение каналов связи и кодирование информации;
- наземные приемники и передатчики информации, к которым относятся наземные устройства приема и передачи информации и компьютеры, обеспечивающие прием, обработку и декодирование информации;
- барьеры искробезопасности, устанавливаемые вне взрывоопасной зоны;
- линии связи» [37, 100].

Основные параметры, которые измеряются подсистемой «Микон-АГК» и используются в математической модели на сервере геоинформационного мониторинга – концентрация метана и скорость воздуха, потом пересчитываются в величину расхода» [37, 100]. В разделе 4.1 представлена более подробная информация о средствах измерения данных параметров.

«Вычислительные функции в системе «Микон-АГК» выполняет контроллер шахтный универсальный КУШ-ПЛК (РО ExiaI X) (Рисунок 3.5):

- обеспечивает гибкость конфигурации и пространственную распределенность;



3.2 Сейсмические методы оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива в ближней и дальней зонах влияния горных работ (сейсмический канал)

«Процесс деления массива горных пород любого генезиса (осадочного или магматического) под действием нестационарного геодинамического поля Земли формирует иерархический дискретный ряд блоков на всех масштабных уровнях. На Рисунке 3.6 приведены основные элементы модели горного массива с типичной блоковой структурой в пределах осадочного бассейна» [83].

«На верхнем уровне осадочной толщи формируются активные блоки B_k с зонами дезинтеграции (дробления) массива горных пород по контактам между ними. На следующем масштабном уровне формируются блоки B_n меньшего размера и так далее до достижения предельно малого размера d_i , после которого процессы деления останавливаются. По существу, именно зоны дезинтеграции массива горных пород по контактам блоков разного иерархического уровня и представляют основную опасность развития динамических явлений при встрече с горной выработкой» [83] (завал тоннеля, водо- или газовые потоки и т. п.). При этом следует считать, что понятие блока на каждом иерархическом уровне является ансамблем блоков более высокого уровня (блоков меньшего размера).

На Рисунке 3.6 контактные зоны блоков помечены как «зоны дезинтеграции» и эти элементы структуры горного массива в контексте рассматриваемой проблемы имеют чрезвычайно важное значение по следующим причинам [62]:

- в естественном переменном геодинамическом состоянии осадочной толщи зоны дезинтеграции представляют собой вертикальные области дробления горных пород (области высокой плотности трещин, замкнутых друг на друга);
- зоны дезинтеграции являются зонами самой высокой проводимости флюида (газа), что и формирует в осадочном чехле неоднородный гидрогазодинамический режим;
- флюидная (газовая) проводимость зон дезинтеграции управляется величиной горизонтальных компонент напряжений;

— каждая зона дезинтеграции является контрастным сейсмическим отражателем сейсмических волн.

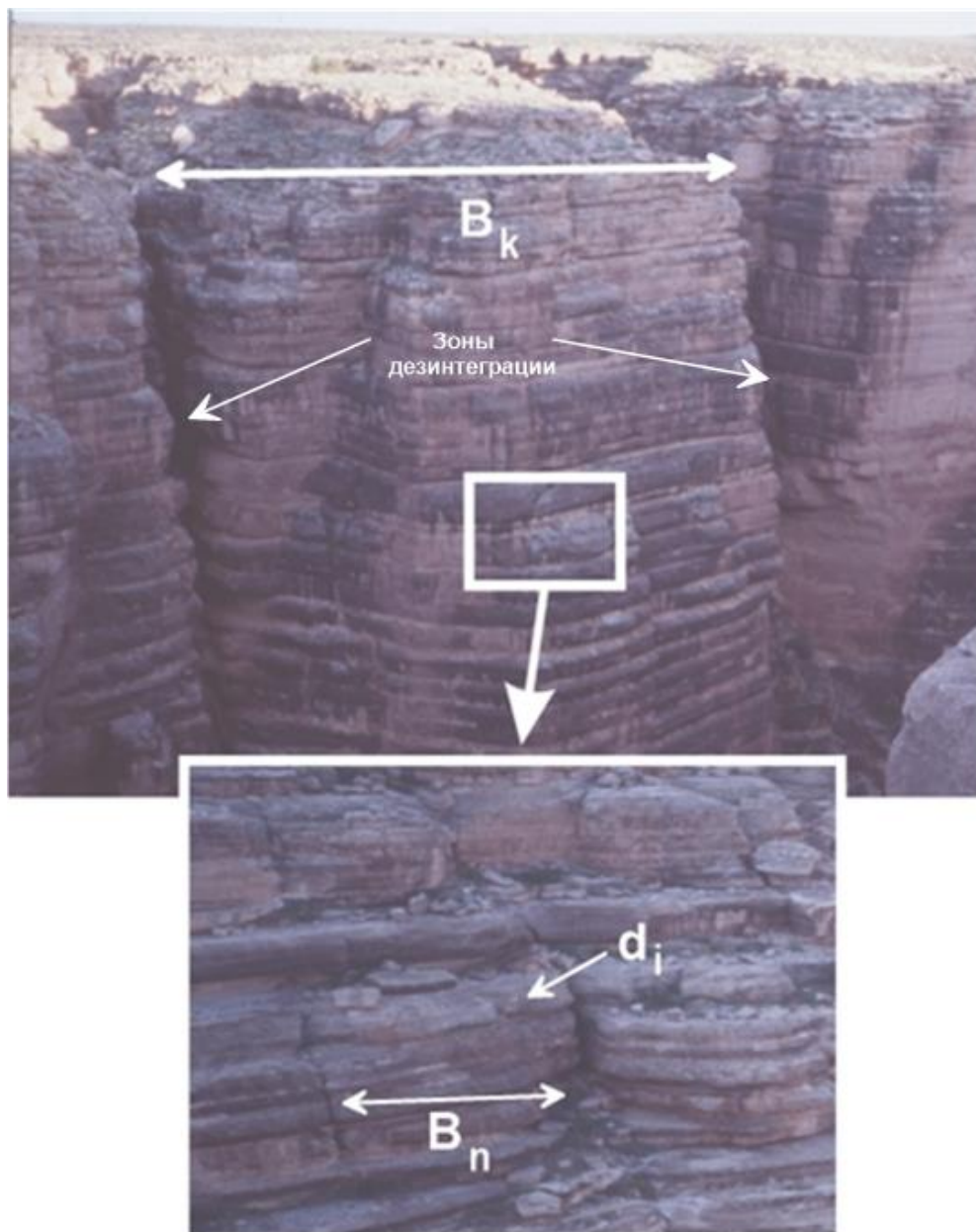


Рисунок 3.6 – Типичная структура блоковых процессов осадочного бассейна

«В мировой практике в последнее время сформировано принципиально новое научно-прикладное направление развития сейсмических технологий – сейсмогеомеханика, целью которой является оценка структуры и параметров НДС горного массива по динамическим и кинематическим атрибутам сигналов сейсмических волн различной поляризации» [27, 73, 75, 82, 120].

«Принцип решения названных задач прогноза структуры и параметров НДС горного массива основан на доказанном положении, что для любой точки, лежащей на границе раздела двух сред с различной дискретной структурой, с различными упругими свойствами твердого материала и заполненных флюидом (газ, вода), коэффициент отражения R нормально падающей волны в схематическом виде может быть представлен следующим образом» [73, 154]:

$$R = R_a + R_d$$

«Компонента R_a (акустический импеданс) определяется упругими модулями сплошного материала среды в высокочастотном приближении для малого объема осадочных пород (упругие модули «куска»). Компонента R_d обусловлена упругими модулями, соответствующими модели дискретных сред с трением и нестационарным давлением в объеме среды, соответствующем мгновенной частоте сигнала падающей волны (масштабный эффект в метровых диапазонах длины сейсмических волн). Компоненты R_a и R_d являются основными и по многочисленным расчетам составляют не менее 90 % от значения общего коэффициента отражения, причем компонента R_d в этом соотношении отвечает за частотную зависимость общего коэффициента отражения от параметров тензора «больших» напряжений, дискретной плотности и трения» [16, 73, 81, 135]. При этом вклад каждой из этих компонент в различных осадочных комплексах для нормально падающей волны может составлять по 50 %, а для углов подхода падающей волны на уровне 20–30 градусов наибольший вклад вносит компонента R_d .

Соответственно, алгоритм перехода от динамических атрибутов сигналов отраженных волн различной поляризации (мгновенные амплитуды и частоты) к относительным оценкам компонент напряжений строится по следующей схеме:

- одним из известных методов определяется компонента R_d в высокочастотном приближении сейсмического сигнала отраженной волны (алгоритмы сейсмической инверсии);
- определяется компонента R для варианта расчета, «настроенного» по частоте этого же сигнала;
- исключается R_d из R и остаток приравнивается к R_d .

Под термином «настройка» подразумевается восстановление формы сигнала, соответствующего длине падающей волны, захватившей в колебательный процесс оптимальный объем среды (оператор специализированной деконволюции). Считается, что R_d является функцией приращения градиента общего давления в точке отражения упругой волны, и на основании этого установлена следующая приближенная функциональная зависимость [81]:

$$G_s(t_i) = \left(\frac{A_s(t_i)}{A(t_i)} \right)^n \left(\frac{\overline{F}(t_i)}{F_s(t_i)} \right)^m$$

где G_s – функция относительного приращения градиента общего давления P в точке отражения; A_s и F_s – амплитуда и частота сигнала отраженной волны (по Гилберт-преобразованию) в этой же точке; A и F – амплитуда и частота сигнала отраженной волны, значения которых рассчитаны в высокочастотном приближении.

«Показатели степени n и m устанавливаются с учетом генезиса и других геологических особенностей в конкретном осадочном бассейне.

Характерное распределение компонент сдвиговых (радиальных) напряжений вблизи вертикальных зон дезинтеграции массива (границы геодинамических блоков) приводит к появлению резких вертикальных сейсмических границ с контрастным (скачкообразным) изменением эффективных напряжений и упругих модулей по обе стороны от них». [15, 16, 19, 73, 129].

С позиции теории распространения сейсмических волн следует очевидное утверждение – зона дезинтеграции массива горных пород является контрастным отражателем сейсмической волны, или, другими словами, является границей 1-го рода с разрывом производной функции по компонентам напряжений и деформаций [107, 159, 160].

На Рисунке 3.7 показана модель основных сейсмических отражателей в горном массиве. Если в этот массив внедряется подземная выработка, и в ней срабатывает источник упругих волн (вибрация ротора комбайна, удар, взрыв), то сигналы отраженных волн вернутся к этой выработке от субвертикальных зон дезинтеграции. Если в зоне источника упругих волн расположены приемники сейсмических колебаний, то каждый из них зарегистрирует функцию $G(t)$, в которой будут присутствовать сигналы отраженных волн, соответствующие положению «сильных» и «слабых» сейсмических отражателей [63].

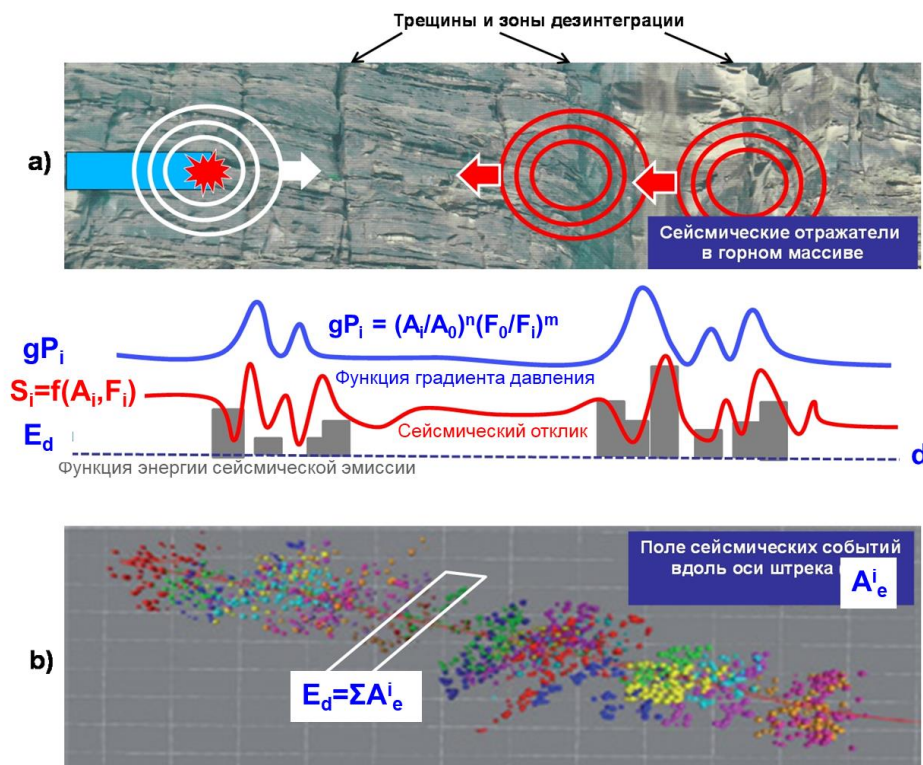


Рисунок 3.7 – Сейсмические отражатели и источники упругих волн в горном массиве с блоковой структурой

В то же время, непрерывная динамика аномальных напряжений в ближней зоне подземной выработки поддерживает неравномерный сейсмический режим горного массива с дискретной структурой в отсутствии источников упругих волн (сейсмическая эмиссия массива в формах «стреляния», микроударов и т. п. импульсных явлений) [126, 127, 131, 156]. В этом режиме «тишины» геофоны регистрируют сейсмические события с различной энергией, что может быть представлено функцией $E_d(t)$, которая отражает накопленную энергию сейсмической эмиссии в той или иной области горного массива за определенный интервал времени (окно E_s). Общая ситуация по пространственному распределению источников сейсмических событий и их энергий отображается параметрическим 3D-массивом, например так, как это показано на нижнем фрагменте Рисунка 3.7.

Такой режим регистрации сейсмических событий принято обозначать термином «пассивный режим». В этом примере, как и во многих других, изображение ансамбля сейсмических событий со всей очевидностью подтверждает блоковый принцип динамики горного массива – микроперемещения блоков относительно друг друга при изменении напряжений разного знака в ближней и других зонах влияния выработки и их совокупности в пределах шахтного поля. Кроме техногенного воздействия на массив горных пород, существует и естественный фон сейсмических событий как результат нестационарного геодинамического режима земной коры.

Известно [81, 135], что амплитуда сигналов отраженной волны является функцией, зависящей от величины градиента компонент напряжений, действующих в этой точке отражения (плоскость разрыва сплошности массива горных пород, область дезинтеграции и т. п.). Чем больше величина градиента напряжения на этой плоскости или зоны разрыва сплошности, тем больше амплитуда сигнала отраженной волны при одновременном изменении частотного спектра этого сигнала.

Соответственно, сейсмо-геомеханическую «модель горного массива в одномерном представлении можно передать трассой коэффициентов отражений, значения которых имеют динамический характер: коэффициент отражения, соот-

ветствующий «жесткой» границе смены пород не меняется в процессе изменения компонент напряжений при подвигании забоя, а коэффициент отражения, соответствующий границам зон дезинтеграции массива, будет меняться определенным образом при приближении забоя выработки к этой зоне. Именно это обстоятельство позволяет идентифицировать в волновой картине сигналы отраженных волн, связанных с зонами дезинтеграции массива (квази-Допплер эффект) самой различной природы, включая техногенную и, соответственно, выявлять зоны, наиболее опасные для формирования и развития ГДЯ» [16, 64, 68, 69, 73, 75, 80, 81, 84, 129].

Принципиальным элементом системы регистрации и обработки сейсмического волнового поля является приведение его к импульсному типу при условиях применения источников упругих волн вибрационного типа (роторы добычных или проходческих комбайнов). На Рисунке 3.8 показаны примеры подобных трансформаций волновых полей от различного типа источников для одной и той же системы регистрации упругих волн. Данные примеры свидетельствуют о практически полной идентичности преобразованных сейсмограмм и сейсмограмм от импульсного источника (удар).

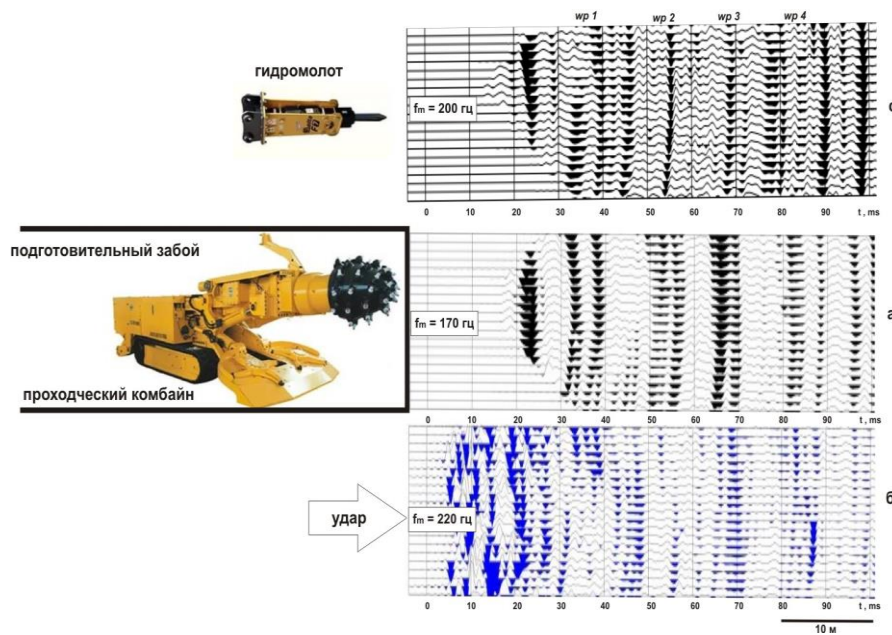


Рисунок 3.8 – Сопоставление волновых полей, трансформированных от вибрационных и импульсных источников упругих волн

С учетом сказанного следует вывод: система приема сейсмических волн должна иметь свойство направленности в пространстве горного массива и ограничивать регистрацию сигналов отраженных волн в заданном 3D-контуре таким образом, чтобы обеспечивать избирательный прием сигналов монотипных сейсмических волн от отражателей, близких к нормальному направлению относительно оси апертуры приема колебаний. В таком варианте наблюдений минимизируется прием от субгоризонтальных отражающих границ, в том числе, от дневной поверхности. В теории и практике сейсморазведки хорошо известны такие технологии, созданные по основной идее поляризационного приема сейсмических колебаний [81, 123, 153, 163, 164].

Применительно к варианту сейсмических наблюдений на забое тоннеля идея поляризационного приема сигналов отраженных волн приведена на схеме (Рисунок 3.9). На груди или стенках забоя тоннеля устанавливаются несколько трехкомпонентных геофонов (3C-geophone), в каждом из которых смонтированы по три сейсмоприемника с осями максимальной чувствительности в ортогональной системе координат x, y, z . Если в точке «Source» возбудить сейсмическую волну (удар кувалдой), то к 3C-геофонам через определенный отрезок времени поступит отраженная волна от «refractora», амплитуды сигнала которой (A и A') будут иметь значения, зависимые от направления подхода волны к тем или иным компонентам геофонов.

По каждой тройке амплитуд (A_y, A_x, A_z и A'_y, A'_x, A'_z) и времени регистрации сигнала вычисляются координаты точки отражения $R_{x,y,z}$. Если все вычисления верны, то для геофонов № 1 и № 2 должна быть найдена одна и та же точка $R_{x,y,z}$ и, следовательно, мы для нее получим некоторую обобщенную амплитудно-частотную характеристику сигнала отраженной волны $\bar{A}_{x,y,z}$.

Для условий применения поляризационного метода регистрации отраженных волн в подземных условиях применяются два основных типа систем наблюдений: на груди или стенках забоя выработки [75, 76].

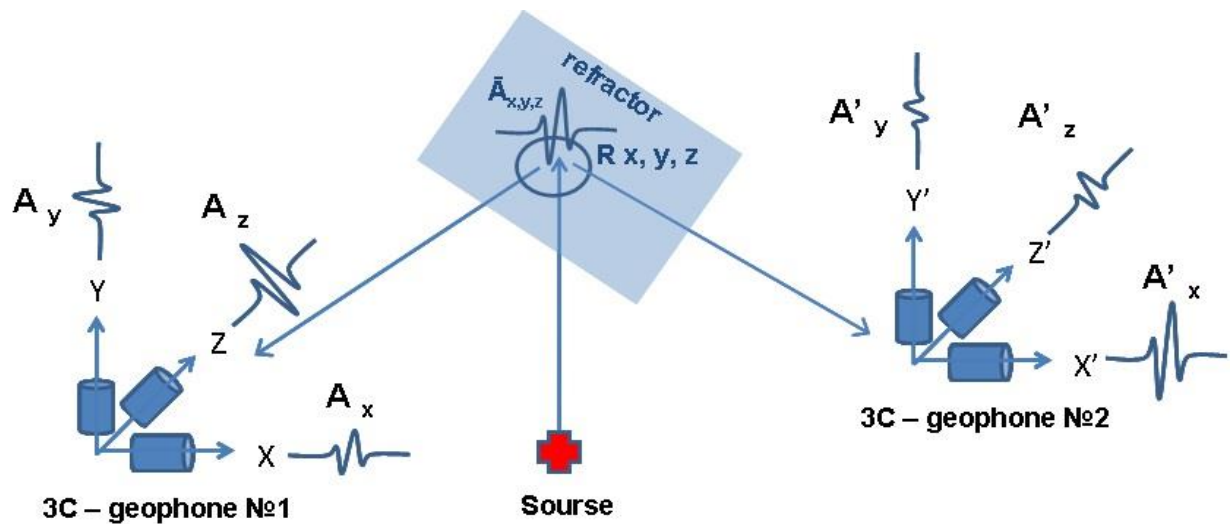


Рисунок 3.9 – Схема поляризационного приема сейсмических волн

На Рисунке 3.10 приведен пример 3D-массива сейсмического волнового поля, на котором обозначен конус объективного отображения сейсмических сигналов отраженных волн. По этому информационному массиву далее рассчитывается массив относительных значений модуля градиента горного давления и параметрические массивы упругих модулей (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), необходимые для аналитических расчетов геомеханических моделей.

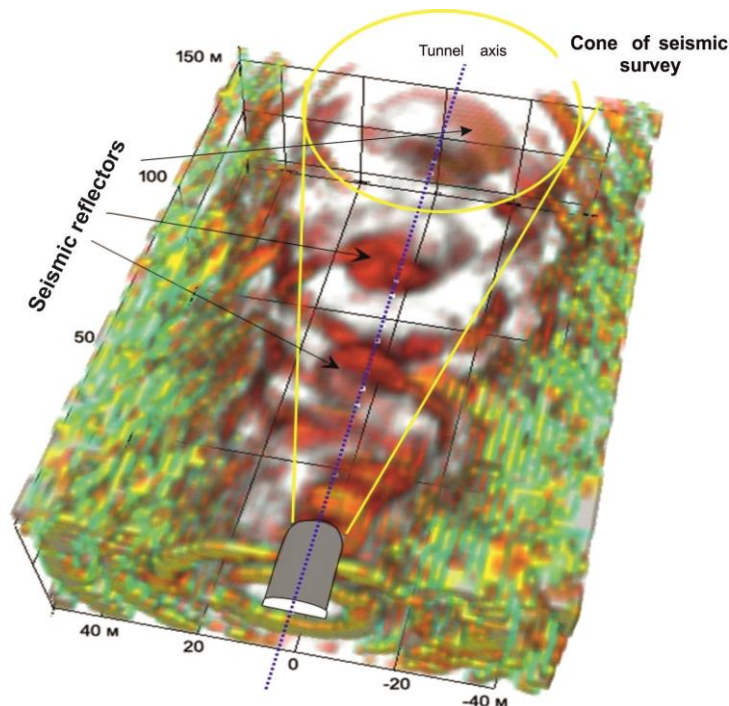


Рисунок 3.10 – Пример 3D-массива сейсмического изображения сигналов отраженных волн впереди забоя подготовительной выработки

На Рисунке 3.11 показан вариант размещения системы сейсмолокации в очистном («а») и подготовительном («б») забоях. В обоих вариантах систем наблюдений результатом сейсмического локационного обзора горного массива в границах зоны влияния выработки является 3D-массив сейсмического изображения этой «зоны (100 x 100 x 200 метров) в относительных оценках градиента общего давления, рассчитанный по исходному 3D-массиву сейсмических параметров того же размера в сигналах отраженных волн той или иной поляризации» [80]. Такие массивы в непрерывном автоматическом режиме сохраняются на сервере верхнего уровня и отображаются на экране диспетчера тем или иным способом с заданным промежутком времени (от 1-ой минуты), что и определяет существо текущего контроля структуры и параметров НДС горного массива в процессе ведения горных работ.

Особым образом следует подчеркнуть, что «принцип локации сейсмических сигналов в активном режиме (регистрация отраженных волн в режиме вибрационного силового воздействия ротора комбайна) сохраняется и для пассивного режима (режим тишины), что позволяет регистрировать с накоплением векторное поле сейсмоакустической эмиссии. В этом режиме результатом является 3D-массив сейсмоэнергетического состояния горного массива в том же объеме пространства, что и в активном режиме. Совпадение зон повышенной сейсмической энергии пассивного режима с зонами концентрации напряжений в массиве активного режима позволяет независимым образом объективно определить уровень риска развития ГДЯ по установленным критериям для данных горно-геологических условий» [76].

На Рисунке 3.12 показаны плоские горизонтальные сечения 3D-массивов активной и пассивной сейсмической локации в очистном забое.

Сопоставление матриц относительных оценок градиента давления (левый фрагмент Рисунка 3.12) и энергии сейсмической эмиссии (правый фрагмент) свидетельствует о принципиальном соответствии распределения независимых сейсмических оценок структуре геомеханического состояния массива угольного пласта в контуре лавы.

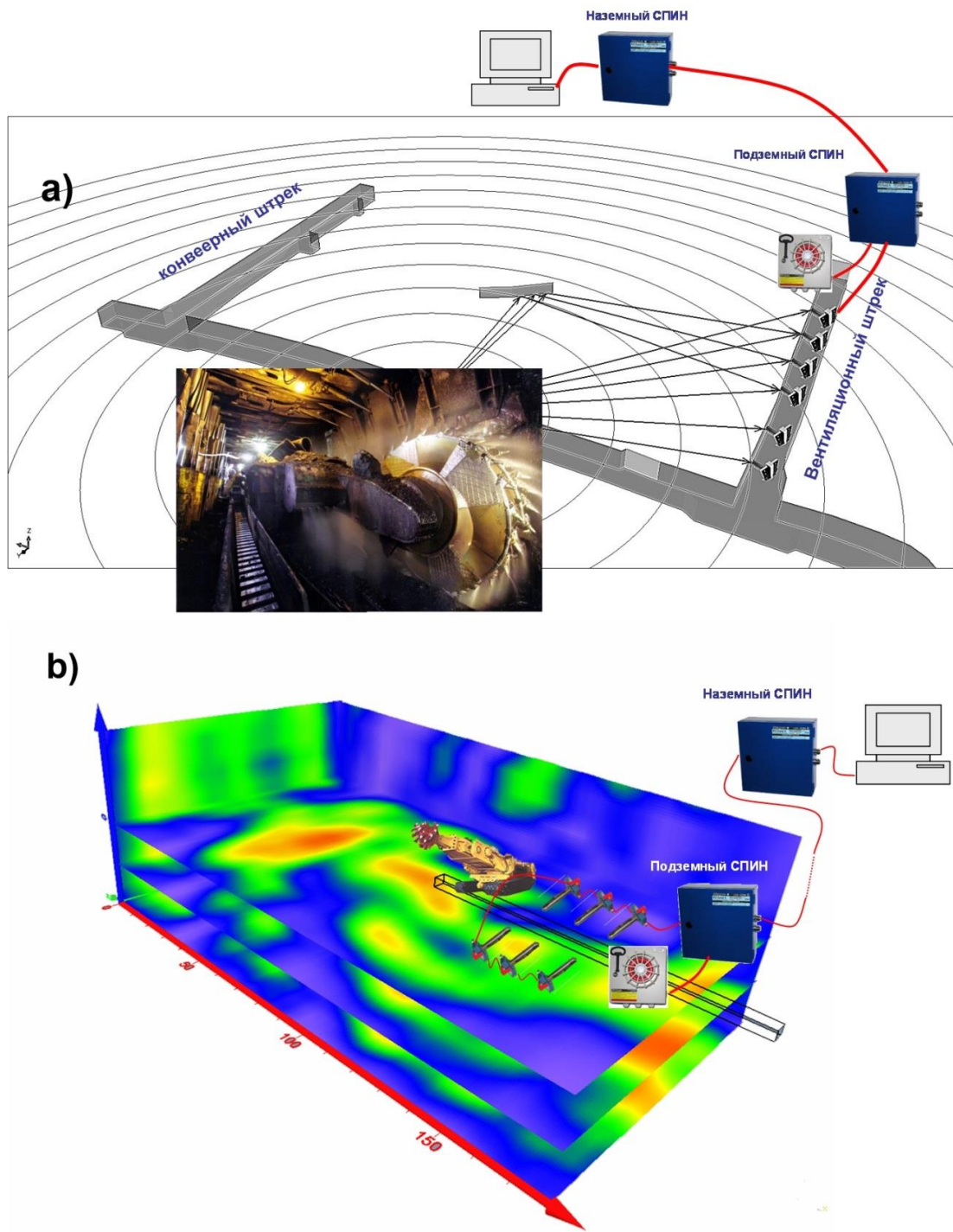


Рисунок 3.11 – Схема размещения 3С-геофонов в очистном (а) и подготовительном (б) забоях

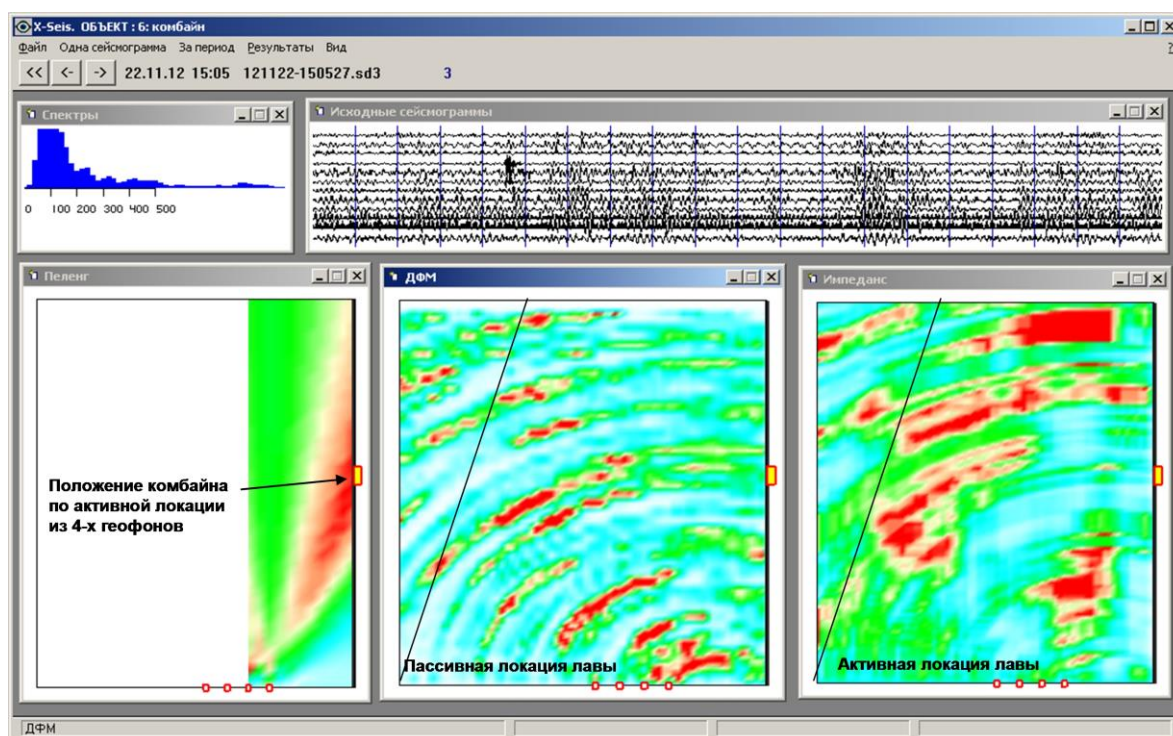


Рисунок 3.12 – Сопоставление матриц активной и пассивной сейсмической локации (Кузбасс, ш. Байкаимская, «Микон-ГЕО», 2015)

Мониторинг этой ситуации по мере продвижения очистного забоя позволяет целенаправленным образом управлять процессами дегазации и разгрузки массива. При этом непрерывный анализ динамики сейсмических параметров будет объективно контролировать эффективность проводимых технологических мероприятий.

С целью оперативного анализа процесса текущего сейсмического контроля на экране диспетчера непрерывно отображаются 3D-массивы относительных оценок градиента давления в формате плоских сечений, полученных в результате суммирования оценок по выбранному фрагменту 3D-массива (такой вариант изображения 3D-массива оценок градиента давления показан на Рисунке 3.7 «б»). По форме и величине оценок относительных значений градиента давления определяется степень риска формирования и развития ГДЯ в контуре сейсмического обзора горного массива [78, 84, 86].

Канал «Микон-ГЕО», как и канал «Микон-АГК», формируется по иерархическому принципу. В состав устройств нижнего уровня системы «Микон-ГЕО»

входят: адресуемые в сети цифровые сейсмоакустические датчики, регистрирующие сигналы наведенного и эмиссионного полей упругих волн в активном (работа очистных и проходческих комбайнов) и пассивном (отсутствие механических воздействий на забой) режимах ведения горнотехнических работ; сетевые искробезопасные источники питания.

В силу конкретных горно-геологических и технологических условий на некоторых шахтах (угольных предприятиях, компаниях) могут быть обоснованно применены дополнительные датчики:

- датчики контроля горного массива, измеряющие терморadiационную характеристику массива (адресуемый в сети цифровой датчик теплового излучения горных пород);

- датчики контроля горного массива, измеряющие тензометрическую характеристику массива (адресуемый в сети цифровой датчик напряжений горных пород);

- датчики, обеспечивающие получение данных о режиме работы очистного комплекса, входящие в состав системы контроля горного оборудования, установленные производителем.

В состав устройств среднего уровня системы входят:

- программируемые контроллеры;
- сетевые искробезопасные источники питания;
- система передачи информации.

В состав устройств верхнего уровня системы входят:

- компьютерный комплекс, состоящий из серверной и операторской частей (автоматизированные рабочие места – АРМы – операторов системы);
- устройства бесперебойного питания.

Система «Микон-ГЕО» выполняет функции:

- сбора первичной информации системой поляризационного приема сейсмических волн в активном и пассивном режимах функционирования;
- передачи первичной информации в подсистему верхнего уровня;

- автоматизированной обработки массива сигналов отраженных волн и сигналов сейсмической эмиссии;
- обнаружения зон критических напряжений и деформаций в массиве и их релаксаций с целью прогноза развития опасных ГДЯ;
- обнаружения квазистатического движения в массиве горных пород (оседание пород в кровле выработок, формирование мульды сдвижения);
- снижения риска и предотвращения опасных природных и техногенных явлений посредством использования комплексного мониторинга с последующей оценкой и принятием выработанных и выбранных технологических решений.

На нижнем уровне размещаются также элементы ГИС МИКОН в очистных и подготовительных забоях с целью непрерывного контроля структуры и параметров НДС в активном режиме ведения горнотехнических работ, что обеспечивает прогноз развития опасных ГДЯ в ближней зоне горного массива – текущий прогноз.

Здесь же размещаются элементы ГИС ГЕО по оптимальной пространственной схеме с целью регистрации сейсмических событий в пассивном режиме (контроль сейсмоэнергетического состояния горного массива – региональный контроль).

3.3 Схема прогноза развития опасных явлений на основе совмещенного контроля параметров напряженного и аэрогазового состояний горного массива

Ранее подчеркивалось, что построенные на основе принципов геоинформационных систем, системы комплексного геотехнического мониторинга типа ГИС МИКОН в полной мере могут быть отнесены к классу многофункциональных систем безопасности [23, 99, 113]. В соответствии с п. 22 «Правил безопасности в угольных шахтах (в ред. Приказа Ростехнадзора от 19.11.2013 г. № 550)», в том числе, «МФСБ такого рода должны обеспечивать мониторинг и предупреждение условий возникновения опасности

геодинамического и техногенного характера. При этом состав конкретной ГИС МИКОН определяется проектной документацией с учетом установленных опасностей шахты и предусматривает контроль и прогноз геогазодинамических явлений (ГДЯ) в соответствующей конфигурации системы геофизических и сейсмических наблюдений при реализации регионального и локального прогноза газодинамических явлений» [4, 24, 71, 72, 984].

При этом целью применения ГИС МИКОН является организация процессов обеспечения эффективного управления течением горнотехнических работ и своевременный прогноз риска развития опасных ГДЯ «на основе построения многофункциональных систем регистрации и интегрированной обработки данных независимых параметрических наблюдений с учетом новых подходов к построению программно-технических средств и применением передовых технологий сейсмических методов регионального, локального и текущего прогноза аварийных ситуаций с учетом фактического аэрогазового состояния» [71].

ГИС МИКОН, «реализуя непрерывный мониторинг параметров, характеризующих гео- и газодинамическое состояние разрабатываемого массива горных пород, производит сбор, отображение, хранение и анализ информации, поддерживает безопасное гео-, газодинамическое состояние углепородного массива, осуществляет информационно-аналитическое обеспечение процессов угольной шахты в части:

- мониторинга и прогноза состояния угольного пласта, вмещающих пород и горного массива в целом, оценки риска возникновения и развития опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых;

- анализа результатов полученных прогнозов, выработанных и выбранных технологических решений на основе фактического состояния горного массива, рудничной атмосферы и очистного комплекса;

- в перспективе разработка технологических решений по снижению или предотвращению ущерба от выявленных в прогнозе зон возможного развития

опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых. (В настоящее время эту функцию выполняют специалисты маркшейдерской службы на основе анализа результатов полученных прогнозов)» [71].

В целом, логика построения ГИС МИКОН ориентирована на развертывание многофункциональной системы безопасности шахты с унифицированным составом программно-технических блоков, обеспечивающих непрерывную регистрацию и интегрированный анализ структуры и параметров НДС горного массива с одновременным учетом данных аэрогазового контроля (Рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Схема системы сейсмического контроля и прогноза развития опасных ГДЯ «Микон-ГЕО» с учетом системы аэрогазового контроля атмосферы выработки «Микон-АГК»

При этом ГИС МИКОН, как и входящие в ее структуру оба канала, «должна строиться по иерархическому принципу и включать в себя (Рисунок 3.14):

– устройства нижнего (полевого) уровня, «предназначенные для получения информации об объекте мониторинга от датчиков контроля горного массива, выполненных во взрывобезопасном исполнении;

– устройства среднего (контроллерного) уровня, предназначенные для сбора информации от датчиков контроля, предварительной обработки информации, обмена информацией с техническими средствами верхнего уровня» [71,83], состоящие из контроллеров и использующие общешахтную высокоскоростную информационную магистраль;

– устройства верхнего (диспетчерского) уровня, «предназначенные для визуализации состояния параметров и объектов управления системой с использованием графических образов и анимации, операторского интерфейса, регистрации и хранения данных, документирования и генерации отчетов, автоматической диагностики состояния технических средств всех уровней, протоколирования учетных показателей работы системы, архивирования информации в базах данных, механизма выработки технологических решений» [67,79];

– устройства и линии связи, обеспечивающие обмен информацией и командами между различными устройствами ГИС МИКОН;

– устройства электропитания;

– системное программное обеспечение и прикладное программное обеспечение» [71].

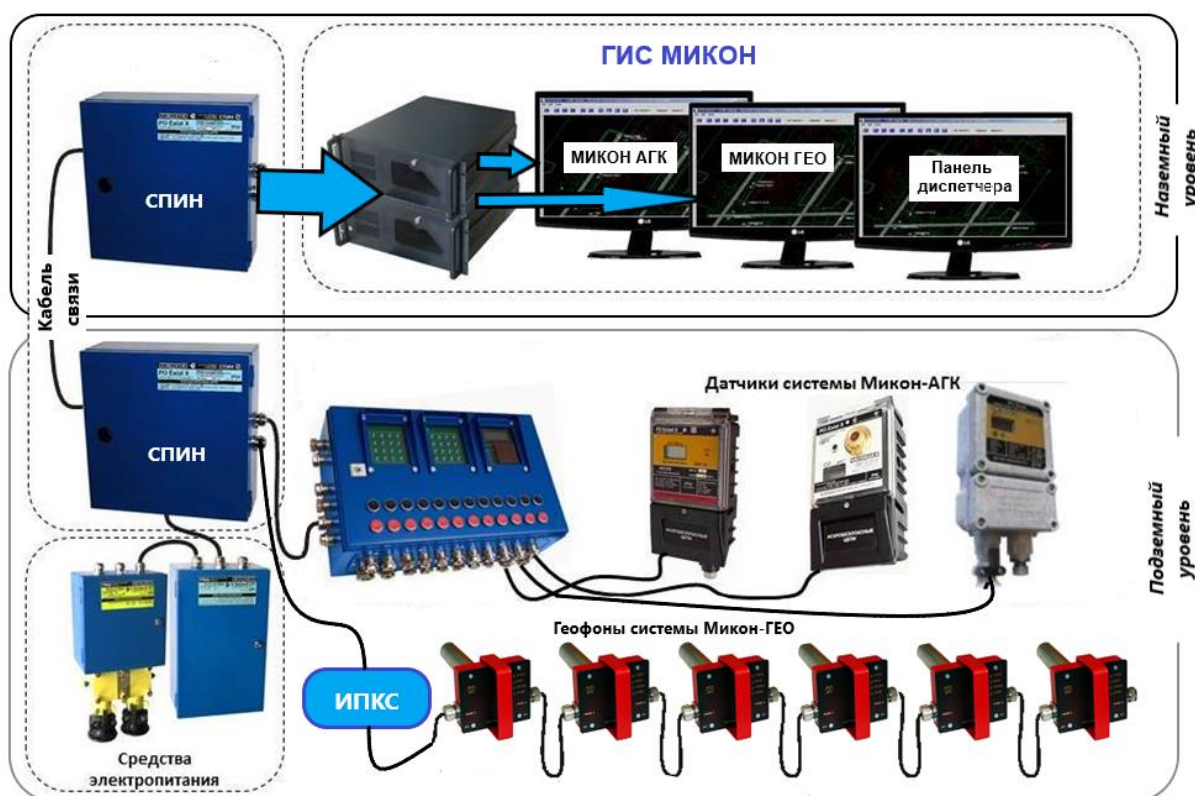


Рисунок 3.14 – Технические компоненты ГИС МИКОН [77]

На структурной схеме Системы (Рисунок 3.15) «выделены следующие уровни:

- полевой уровень (контролируемый горный массив в месте ведения горных работ если они ведутся на территории одного ГТО). Если же на одном горном предприятии эксплуатируются несколько ГТО, должны использоваться несколько комплектов, состоящих из ИПСМ и ИПКС. В один комплект входит несколько ИПСМ и один или более ИПКС в зависимости от параметров контролируемого ГТО. Данные от ИПСМ и ИПКС используются как единый информационный массив, характеризующий объект сейсмической локализации. Также на полевом уровне применяются специальные ударно-тестовые инструменты (УТИ), которые обеспечивают генерацию сейсмических волн в горном массиве, для реализации которых может быть использован ИДУ;

- уровень передачи данных (горные выработки и наземные помещения предприятия, в которых размещены технические средства и кабельные линии, обеспечивающие передачу данных с полевого уровня на уровень обработки и

представления информации). На этом уровне используются наземные и подземные узлы связи СПИН;

– уровень обработки, представления и хранения данных. На этом уровне используется компьютерная техника (сервер и АРМ) и прикладное программное обеспечение (ПО), которые обеспечивают получение данных с полевого уровня, их обработку, хранение и представление информации лицам, принимающим организационные решения. Уровень обработки информации может быть реализован с помощью наземного компьютерного комплекса и/или ПУ» [71].

Система является «искробезопасной системой» в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60079-25. Система в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60079-25 образует «искробезопасную систему» совместно с шахтным источником питания ШИП, устройствами СПИН и ПУ. Каждый из уровней имеет средства электропитания: в подземных выработках используются особо-взрывозащищенные (ШИП), в наземных помещениях – общепромышленные источники питания.

На Рисунке 3.15 показаны различные варианты Системы при использовании в угольных шахтах:

– для ГТО № 1 и № 2 показана типичная структура Системы, обеспечивающая локальный текущий контроль в месте и во время ведения горных работ, в которой для одного ГТО используется один ИПКС, к которому подключено несколько ИПСМ. При этом для воздействия на горный массив специалист использует УТИ с ИДУ;

– для ГТО № 3 показана возможная структура Системы, обеспечивающая локальный текущий контроль в месте и во время ведения горных работ на горном участке большой протяженности, что делает необходимым использование несколько комплектов ИПКС-ИПСМ, при этом ИПКС должны быть синхронизированы;

– для ГТО № 4 показана возможная структура Системы, обеспечивающая локальный контроль в произвольном месте шахтного поля. При этом для воздействия на горный массив специалист использует УТИ с ИДУ.

«Система обеспечивает работу в следующих режимах функционирования:

а) автоматический активный режим, который обеспечивает регистрацию сейсмосигналов на полевом уровне и их передачу на уровень обработки, визуализации и хранения данных. Этот режим решает задачу «СТРУКТУРА МАССИВА» для определения структурных элементов горного массива (блоков) и отображения добычного комбайна в лаве при его работе и «ПРОГНОЗ» для определения степени опасности развития аварийных ситуаций. Отличительной чертой автоматического режима является использование рабочего органа комбайна в качестве источника сейсмического сигнала. Автоматический активный режим является основным режимом работы Системы;

б) автоматический пассивный режим, который осуществляет контроль в периоды «тишины», когда комбайн не воздействует на горный массив и отключено все вспомогательное оборудование, при этом Система фиксирует собственные шумы горного массива (сейсмическую эмиссию) и выполняет расчет энергии этих сейсмических событий в Джоулях. Этот режим решает задачу «ТРЕСКИ», т. е. определение сейсмознергетического состояния горного массива в режиме «тишины». Совокупность данных, полученных в режимах «ТРЕСКИ» и «СТРУКТУРА МАССИВА», позволяют контролировать динамику изменения состояния горного массива и определять степень опасности развития аварийных ситуаций – задача «ПРОГНОЗ». Для работы данного режима в масштабе регионального контроля и прогноза приоритетным является соединение контроллеров ИПКС линией синхронизации;

в) автоматизированный инициативный режим, при котором в качестве источника сейсмического сигнала используется ручное воздействие на горный массив с помощью ударно-тестового инструмента (далее УТИ). Запуск этого режима происходит по сигналу внешней синхронизации. Режим является приоритетным, т. е. при получении синхросигнала от внешнего устройства начинается новая запись трассы. Этот режим позволяет построить фоновую (начальную) сейсмогеологическую модель угольного пласта – задача «СТРУКТУРА МАССИВА»;

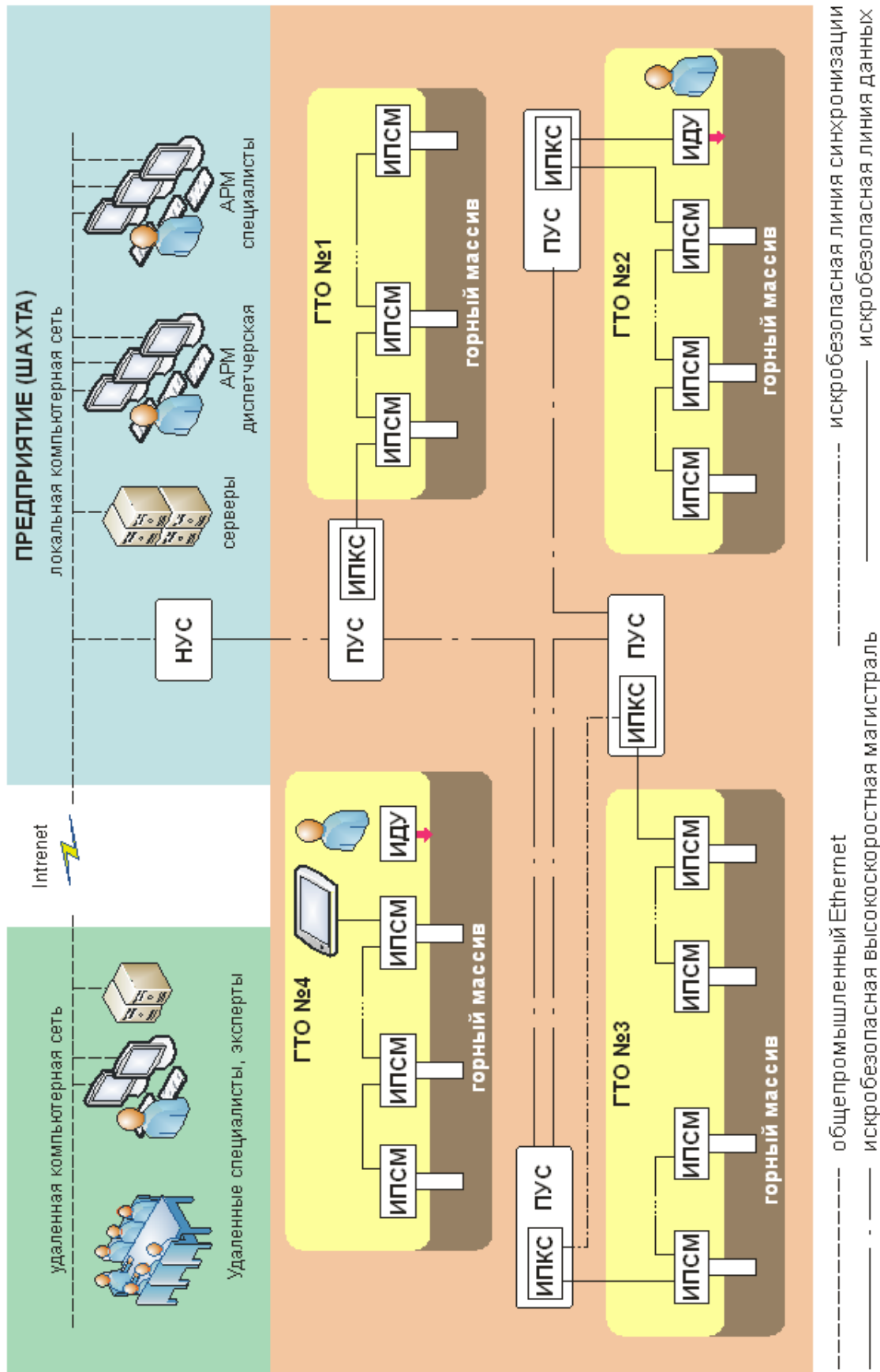


Рисунок 3.15 – Структурная схема Системы в искробезопасном исполнении (НУС и ПУС – наземный и подземный узлы связи СПИН соответственно, на схеме не показаны средства электропитания)

г) ремонтный режим, при котором осуществляется перемонтаж и замена технических средств полевого уровня и связи, монтаж кабельных сетей» [71].

Система «Микон-ГЕО» позволяет определить структуру и состояние горного массива, а именно, локализовать зоны трещиноватости, геологические нарушения, а также выявить и оценить распределение напряжения в горном массиве.

Информационный поток от всех элементов ГИС МИКОН нижнего уровня коммутируется в унифицированном формате на штатную систему связи шахты аэрогазового комплекса АГК и далее загружается в общую базу данных вместе с текущими аэрогазовыми параметрами.

Способ мониторинга уровня риска развития опасных ГДЯ включает:

- непрерывный сейсмический контроль структуры и параметров напряженно-деформированного состояния призабойной зоны массива (ближняя зона) и оценку опасности ГДЯ (активный режим локации);
- непрерывный сейсмический контроль геодинамической активности в ближней зоне забоя выработки и оценку опасности развития газодинамических явлений (пассивный режим локации сейсмических событий);
- непрерывный контроль тренда метанообильности;
- непрерывный контроль сейсмической активности шахтного поля (средняя и дальняя зоны) и оценку опасности геогазодинамических явлений;
- локальный прогноз целиков, перемычек и т. п.;
- прогноз, диагностику и оценку риска развития геогазодинамических явлений.

В ГИС МИКОН параметры НДС горного массива переводятся из относительных единиц сейсмического контроля в регламентные параметры инструментальных методов (литры штыба, МПа и т. п.) и в энергетические единицы (Джоули), «что обеспечивает повышение:

- эффективности работы очистного и проходческого комплексов на основе полученных данных о структуре и параметрах напряженно-деформированного состояния, геолого-тектоническом строении угольного пласта, вмещающих пород

и горного массива на разных масштабных уровнях и возможности обеспечения заданной производительности лавы;

– качества принятия технологических решений за счет оперативности представления, полноты, достоверности и удобства форматов отображения информации;

– безопасности ведения горных работ при подземной разработке твердых полезных ископаемых за счет своевременного обнаружения, предупреждения и прогноза опасных природных и техногенных явлений и проведения технологических мероприятий по предотвращению их проявления» [71].

«Система оперативной обработки результатов регистрации полного набора векторных компонент волнового поля, при многократном или непрерывном возбуждении из различных положений источника колебаний, обеспечивает получение гарантировано устойчивого суммарного трехмерного сейсмического изображения горного массива в сигналах отраженных волн различной поляризации. Далее осуществляется переход к параметрическим трехмерным изображениям структуры и относительных оценок компонент НДС горного массива и элементам геолого-тектонического строения с различной степенью детальности (1–3 метра) в заданном системой наблюдения и обработки направлениях вперед от забоя, вверх, в стороны, назад. Размер сейсмического 3D-изображения может составлять 100 x 100 x 200 метров. Такой размер изображения примерно соответствует размеру ближней зоны влияния проходческого или очистного забоев на горный массив» [71, 75].

«Функционирование сертифицированного для угольных шахт оборудования, реализующего метод сейсмолокации на нижнем уровне регистрации данных, не требует привлечения квалифицированного персонала как в варианте непрерывного текущего контроля, так и в вариантах локального применения в зонах периодического контроля состояния целиков, кровли (отслоение кровли и т. п. деформаций) и решения других задач в конкретных горно-геологических условиях» [76, 80].

Как уже «отмечалось ранее, достоверность прогноза наступления опасного события обеспечивается за счет регистрации сигналов отраженных волн в активном режиме локации при работающем комбайне и регистрации сейсмической эмиссии горного массива в технологических промежутках при остановках горных работ (пассивном режиме).

Функционал программного обеспечения ГИС МИКОН ориентирован на непрерывный технологический режим «ДИСПЕТЧЕР» с вариантами перехода в режим «СПЕЦИАЛИСТ» при возникновении критических прогнозных ситуаций. «При этом отображение сейсмических параметров структуры и состояния массива осуществляется в маркшейдерском координатном пространстве с полной инфраструктурой шахтного поля (формат горно-геологической системы Micromine, адаптированной к условиям режимов «ДИСПЕТЧЕР» и «СПЕЦИАЛИСТ»))» [71,80].

На Рисунках 3.16 и 3.17 показаны примеры изображения результатов текущего контроля на мониторе диспетчера в процессе проходческих и очистных работ. Изображения на мониторе представляют собой содержательные панели с отображением непрерывного анализа сейсмических данных в активном и пассивном режимах локации. Предусмотрен вывод на экран следующих панелей:

- текущая сейсмограмма (панель «исходные сейсмограммы»);
- обобщенный спектр по сейсмограмме (панель «спектр»);
- статистика по всем сейсмограммам за установленный период (часы, сутки, недели) с автоматическим определением факта воздействия на забой (панель «количество записей по времени»);
- статистика сейсмических событий, зарегистрированных в отсутствие воздействия комбайна на забой (панель «кол-во событий по времени»);
- графики интегральных целевых параметров («напряжение», «события» или энергия сейсмической эмиссии, степень удароопасности, приведенная к литрам штыба и т. п.);
- параметрическое сечение информационного массива сейсмического обзора в моменты функционирования комбайна (горизонтальное или

вертикальное) с типовым размером 100 х 200 метров с отметками положения геофонов и забоя в маркшейдерских координатах (номера пикетов).

Программно-технические средства ГИС МИКОН позволяют осуществлять «настройку» сейсмических параметров на «выявление конкретных объектов геологической, геодинамической и техногенной природы (в частности: относительных оценок горного давления, упругих модулей массива, зон дезинтеграции естественного и техногенного происхождения, прогноза типа флюида в пустотном пространстве этих зон, участков литологического замещения пластов, отслоения кровли в ближней окрестности подготовительных и очистных забоев и т. п.)» [71, 80].

«В приведенных примерах структура и параметры НДС горного массива в ближней зоне забоя выработки отображаются в относительных оценках градиентов давления. Далее возможны варианты пересчета относительных оценок в некоторые регламентные единицы, например, категории устойчивости массива по классификации Булычева Н. С. в конкретных условиях ведения горных работ, объем «штыба», единицы напряжений (МПа) и т. п. [71, 80].

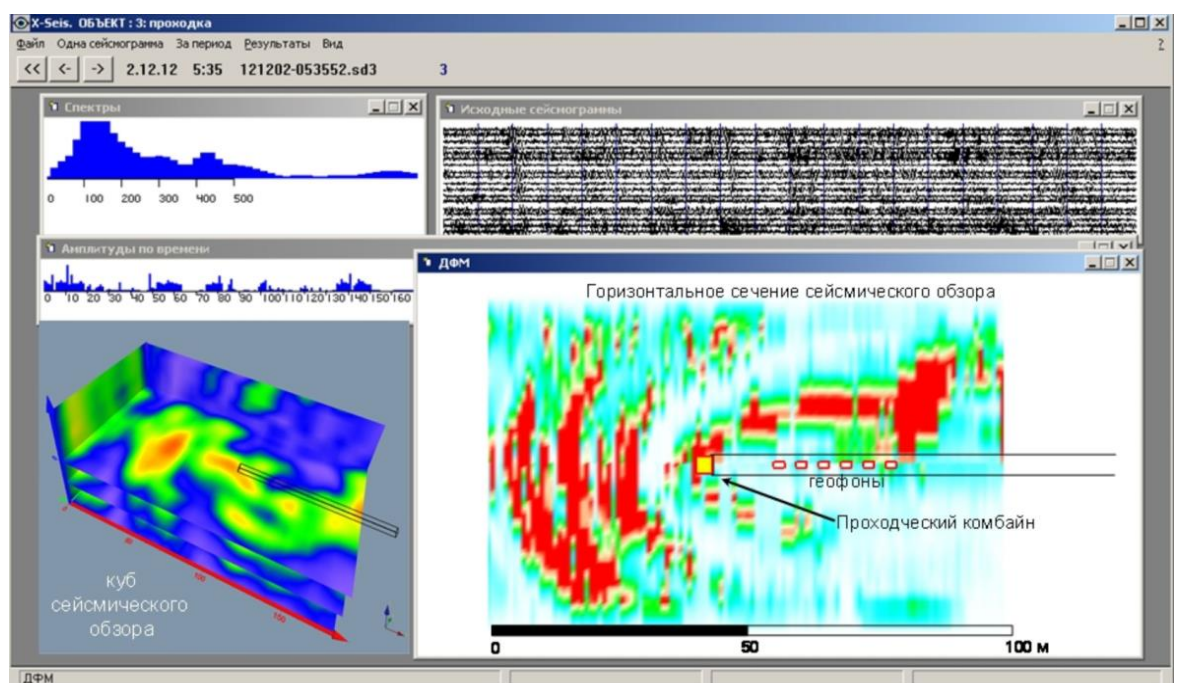


Рисунок 3.16 – Пример текущего контроля проходческих работ на диспетчерском мониторе только системой «Микон-ГЕО»

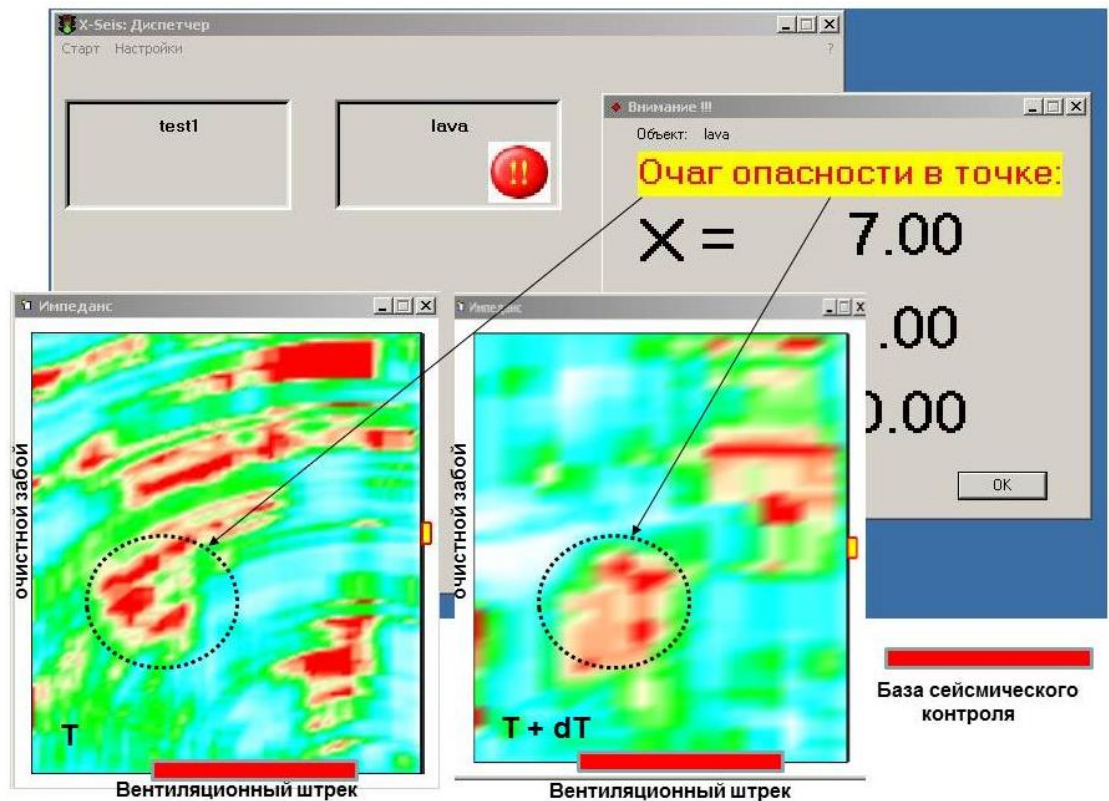


Рисунок 3.17 – Пример текущего контроля очистного забоя с интервалом $dt = 7$ ч

Таким образом, общая идея обнаружения объекта риска, места его положения в массиве, оценка уровня опасности прогнозируемого ГДЯ (Рисунок 3.18) реализуется предложенной ГИС МИКОН, объединяющей сейсмическую систему «Микон-ГЕО» и штатный аэрогазовый комплекс АГК шахты.



Рисунок 3.18 – Общая схема прогноза опасного развития ГДЯ

3.4 Принципы построения геоинформационной модели с функциями непрерывного контроля состояния устойчивости горного массива и прогноза развития опасных явлений

Прогноз возникновения и развития опасных геогазодинамических процессов в любой производственно-технической системе при отработке месторождений подземным способом реализуем лишь с учетом устойчивости горного массива.

«Принципиальной физической основой для постановки и решения задач по оценке устойчивости горного массива является представление о структуре дискретности горных пород. По существу, любую трещинную систему можно рассматривать с двух точек зрения: как систему плоских элементов нарушения сплошности и как систему отдельных блоков, на которые среда разделилась в системах трещин, замкнутых друг на друга. Вторая точка зрения позволяет оперировать не с параметрами трещин, которые практически невозможно измерить, а с параметрами блоковой (дискретной) структуры тех или иных литологических элементов» [52].

«Поскольку геометрия и физические свойства стратиграфических и литологических объектов в процессах подземной разработки устанавливаются по факту проходки выработок, то представляется возможным оценить и параметры дискретной структуры этих объектов в формате геоинформационной горно-геологической модели с дискретной структурой. Как уже говорилось в предыдущих разделах, переход природно-технической системы (ПТС) в динамическое состояние с последующим разрушением подчиняется блоковому механизму» [52].

Напомним, что «ключевым понятием развития деформационных процессов в дискретных средах с переменными напряжениями в окрестности подземной выработки является фрикционный механизм, который «разрешает» каждому дискрету и их ансамблям (блокам), входящим в рассматриваемый объем среды, деформироваться индивидуально за счет процессов проскальзывания. В свою очередь, фрикционный механизм, кроме величины и знака внешнего силового воздействия,

будет управляться коэффициентом трения, величина которого связана с «качеством» контактных плоскостей блоков и с фазовым состоянием флюида, «смазывающим» эти контакты (газ, вода и прочие заполнители пустотного пространства)» [52].

Экспериментальным путем установлено [137, 138], что в интервале глубин 0,2–10,0 км блоки (дискреты) горной породы могут совместно и линейно деформироваться до того момента, пока выполняется неравенство $\tau < 0,85\sigma$ (для «сухой» среды), где τ – сдвиговое напряжение, σ – нормальное напряжение. Как только это условие будет нарушено, линейная деформация перейдет в нелинейную форму – в состояние пластического течения в интервале А–В графика фрагмента «а» на Рисунке 1.7 (раздел 1). При наличии «смазки» (вода, глинистый заполнитель, газ и пр.) коэффициент трения (0,85) существенно снизится. За точкой В могут начаться процессы импульсного характера от «тресков» до горных ударов и выбросов различного рода.

Соответственно, информационный 3D-массив с относительными оценками модуля градиента давления, поступающий в непрерывном режиме контроля ГИС МИКОН в геоинформационную базу данных при определенных допущениях может быть преобразован в массив значений закритических псевдосдвиговых напряжений. Такой переход в реальных геологических и геодинамических условиях может обеспечить вполне приемлемый прогностический критерий оценки уровня риска развития опасных ГДЯ.

В более общем случае наборы контрольных параметров могут быть использованы в аналитических расчетах прогностических критериев по усложненным схемам геомеханического анализа. Схема формирования массивов контрольных параметров показана на Рисунке 3.19, откуда следует целесообразность представления этих массивов в виде блочных моделей геоинформационных форматов (ArcGIS, Micromine, Surpac и т. п.). Заметим, что для целей аналитических расчетов, кроме блочных параметрических моделей потребуются и модели в каркасных форматах геоинформационной базы данных (геологические, тектонические, инфраструктурные объекты и т. п.).



Рисунок 3.19 – Схема формирования массивов контрольных параметров

На Рисунке 3.20 приведен пример сформированных геоинформационных моделей геологического строения шахтного поля в каркасном и блочном форматах. Каркасные модели представляют собой геологическую структуру шахтного поля и модель подземной инфраструктуры, а блочная модель содержит оценки относительных значений градиента модуля давления, сформированная по данным текущего сейсмического контроля горного массива в контуре очистного забоя.

Сформированная таким образом база данных позволяет перейти к реализации серии аналитических расчетов. В данном случае названные каркасные и блочные модели экспортируются в базу данных системы прочностного анализа «FIDESYS» [69], что позволило сформировать модели компонент НДС и на основании этих моделей выполнить расчет прогнозных моделей газового потока (Рисунок 3.21). На сечениях 3D-модели газового потока фиксируются зоны концентрации газа, объем поступления которого может быть спрогнозирован на момент

достижения расчетной дистанции подвигания очистного или проходческого забоев к опасной зоне массива.

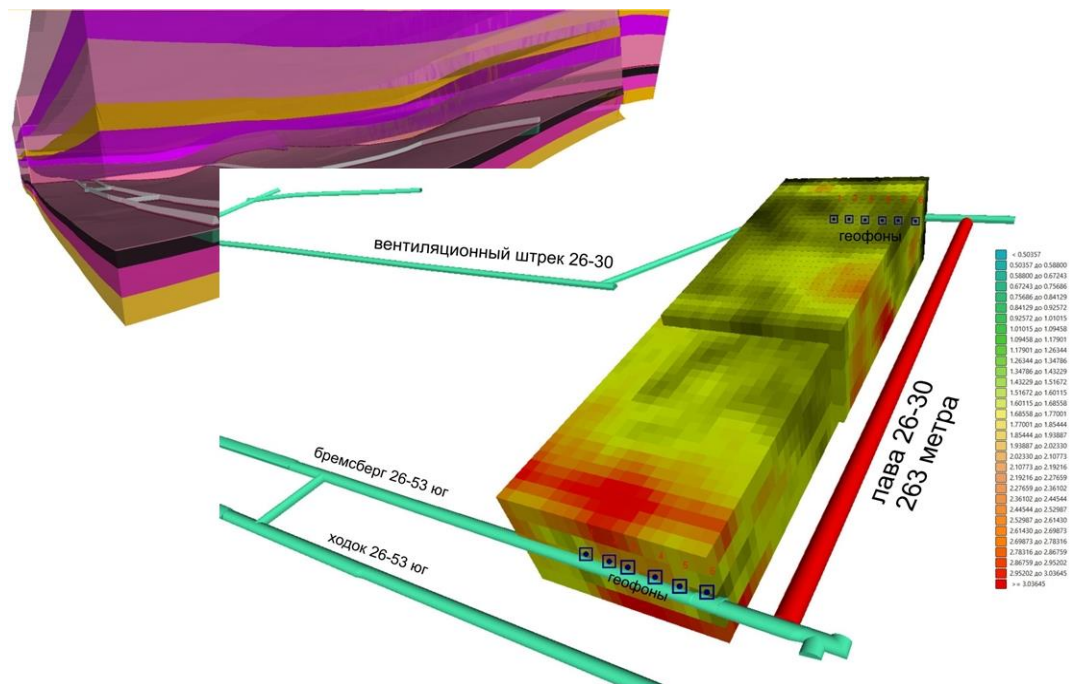


Рисунок 3.20 – Примеры геоинформационных моделей каркасного и блочного форматов

Полнофункциональный анализ сценария проходки выработок на дистанцию сейсмического обзора в особо сложных геолого-тектонических условиях предлагается выполнять по следующей схеме:

- в 3D-массивы значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона, вычисленные по атрибутам сигналов отраженных волн, вносятся зоны дезинтеграции горного массива с учетом 3D-массива оценок градиента давления (зоны снижения упругих модулей);
- массив значений модуля Юнга с введенными зонами дезинтеграции корректируется на статический диапазон нагрузок с учетом известных физико-механических свойств пород (лабораторные данные);
- полученный 3D-массив модуля Юнга и 3D-массив значений коэффициента Пуассона в формате блочных моделей загружается в базу данных системы прочностного анализа;

– с учетом априорной геологической модели (каркасный формат) задаются силовые нагрузки на верхнюю плоскость загруженных блочных моделей упругих модулей и выполняется расчет компонент НДС (пример такого расчета приведен на Рисунке 3.22);

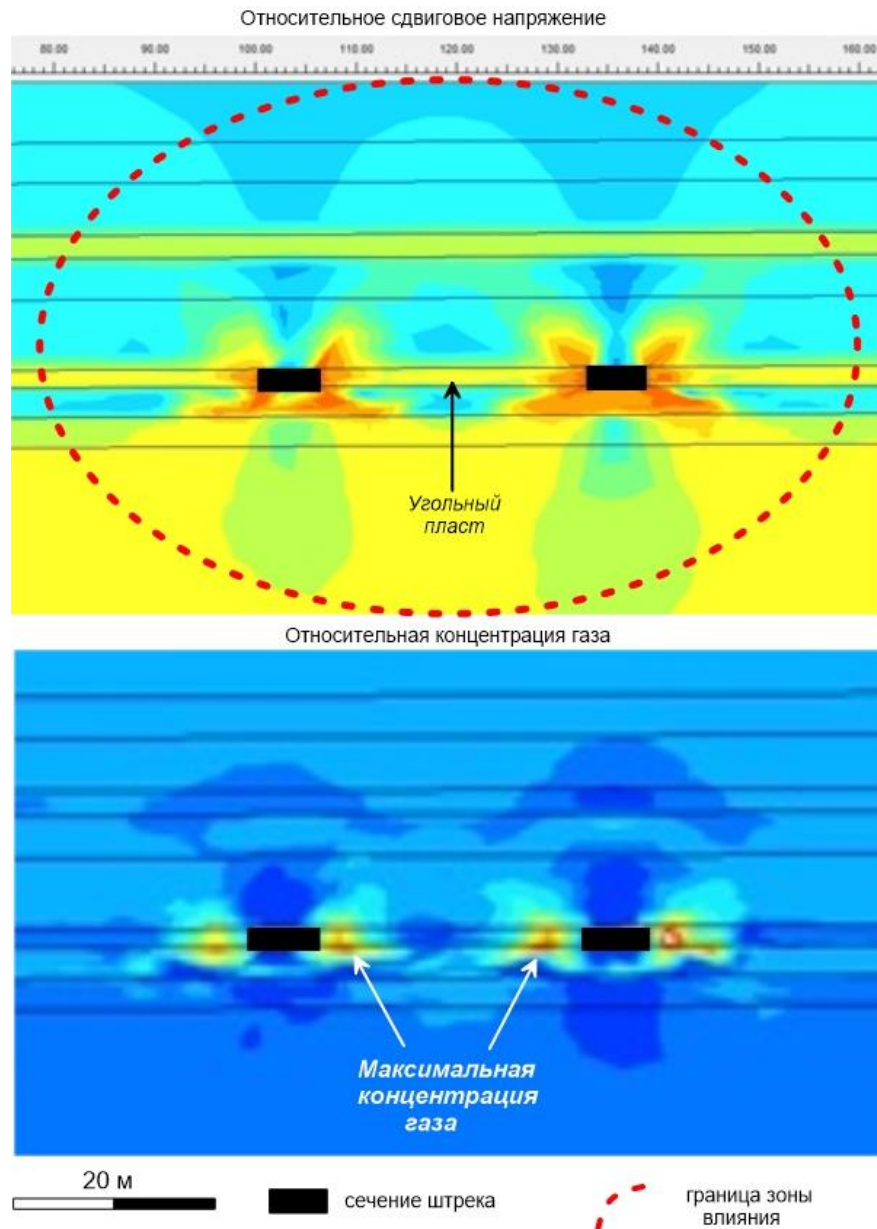


Рисунок 3.21 – Параметрические сечения геомеханической и газодинамической моделей

– найденные массивы компонент НДС с учетом априорной информации о проницаемости литологических элементов геологической модели являются осно-

вой для решения газодинамической задачи (дополнительная функция пакета прочностного анализа) с целью расчета объема поступления газа в атмосферу подземного пространства.

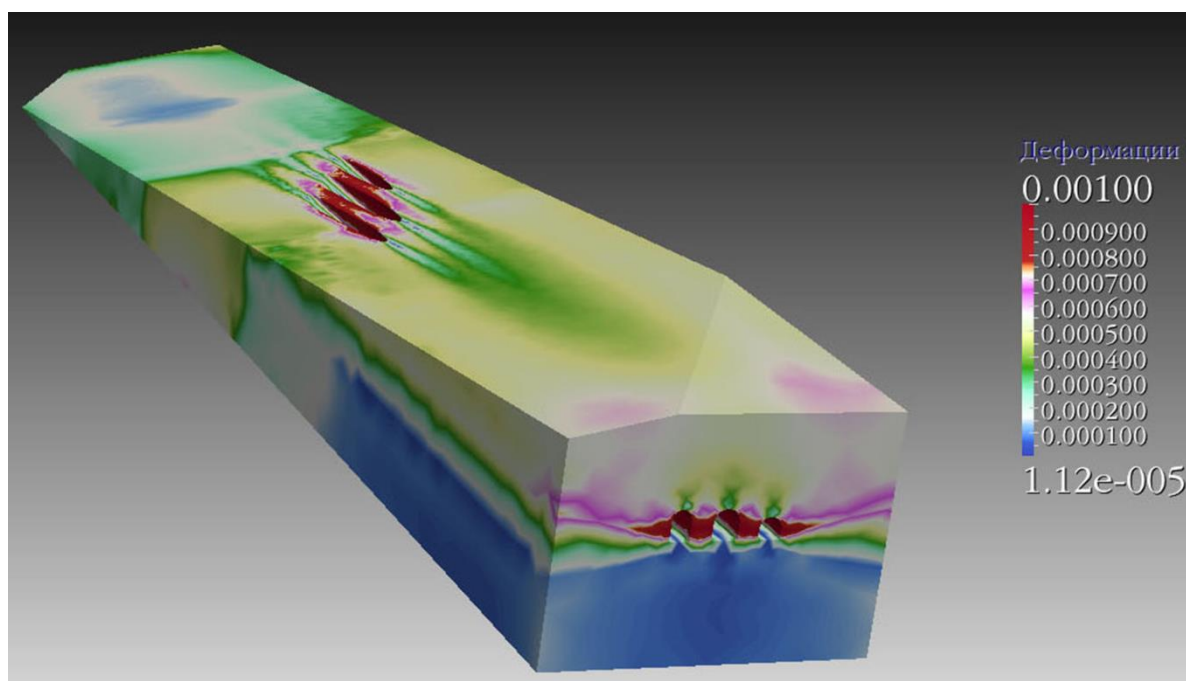


Рисунок 3.22 – Фрагмент геомеханической модели в контуре системы подготовительных штреков по данным сейсмического мониторинга (пакет прочностного анализа «FIDESYS»)

Приведенный сценарий следует разрабатывать в специализированном подразделении с научной поддержкой и применять готовый скрипт в технологическом режиме на конкретном предприятии с учетом истории подработки территории и особенностей геолого-тектонических условий.

Предложенный функционал геоинформационной системы в максимальной степени интегрирован в существующую инфраструктуру обеспечения безопасности подземной разработки угольных месторождений. В первую очередь, такой подход к созданию аналитической геоинформационной системы в целях сбора, систематизации, хранения, анализа, преобразования, отображения и распространения пространственно-координированных данных о состоянии ближней к гор-

ным выработкам зоны массива обеспечивает повышение эффективности аэрогазового контроля угольных шахт.

Выводы

По существу обсуждаемого функционала геоинформационной системы можно сделать следующие выводы:

- текущие параметры напряженного состояния горного массива с дискретной структурой фиксируются на полевом уровне средствами регистрации сейсмических сигналов отраженных волн (сейсмическая оценка градиента горного давления);
- оценка градиента горного давления в зоне влияния выработки на горный массив позволяет своевременно выявить зоны дезинтеграции на необходимую дистанцию от забоя;
- оценка градиента горного давления и приведенной величины объема газов в зоне влияния подземной выработки на горный массив в полной мере обеспечивается технологиями сейсмической локации в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового контроля;
- непрерывный контроль аэрогазового состояния шахтной атмосферы обеспечивает анализ тренда метанообильности с автоматическим фиксированием возможных предвестников прорыва газа из обнаруженных зон дезинтеграции горного массива.

4 ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА ВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ НА ОСНОВЕ ГИС МИКОН

Введение

Логика построения геоинформационной системы «ГИС МИКОН», функционирующей совместно с текущим оцениванием аэрогазового состояния выработок и прилегающего к ним горного массива, ориентирована на существенное повышение эффективности прогноза общешахтной многофункциональной системы безопасности с унифицированным составом программно-технических блоков, обеспечивающих непрерывную регистрацию и интегрированный анализ структуры и параметров угольного пласта и вмещающих пород с одновременным учетом данных аэрогазового контроля, что в итоге приводит к своевременному принятию управленческих решений [45, 50, 51, 53, 54, 60]. Иными словами, решаемые в предыдущих разделах задачи привели, как следствие, к необходимости разработки и реализации технологической схемы нетривиальной структуры, чем в итоге и является ГИС МИКОН.

Панель ГИС МИКОН представляет собой программное обеспечение верхнего уровня, осуществляющее сбор, накопление и представление информации о пространственно-координированных объектах и явлениях на контролируемом участке выработки и прилегающего к ней горного массива.

Важным и необходимым условием применимости геоинформационной панели является актуальность, достаточность и достоверность данных.

Панель геоинформационного мониторинга входит в состав ГИС МИКОН, построенной по трехуровневой схеме, где на нижнем, полевом уровне, расположены датчики, на среднем – контроллеры, а на верхнем – рабочие места операторов и программное обеспечение, выполняющее функции обработки и визуализации информации. Панель геоинформационного мониторинга обрабатывает и визуализирует данные от двух подсистем – шахтной газоаналитической системы

«Микон-АГК» и подсистемы локального и регионального контроля и прогноза состояния горного массива «Микон-ГЕО» [63].

4.1 Базовые технические решения при реализации ГИС МИКОН

Для технической реализации задач, вытекающих из сформулированного в 3 разделе функционала ГИС МИКОН, предложены и внедрены различные программно-технические средства.

Для измерения концентрации метана в составе подсистемы «Микон-АГК» могут быть использованы датчики ДМС-01, ДМС-03 и ИТС-2, серийно выпускаемые ООО «ИНГОРТЕХ». Рассмотрим более подробно датчик ДМС-03.

Датчик ДМС-03 (см. Рисунок 4.1) предназначен для непрерывного автоматического контроля концентрации горючих газов (метано-водородной смеси) в рабочей зоне на угольных предприятиях, в том числе шахтах, опасных по газу и пыли и внезапным выбросам. Область применения – взрывоопасные зоны помещений и наружных установок согласно маркировке взрывозащиты, ГОСТ Р 51330.19-99 (МЭК 60079-14-96), гл. 7.3 ПУЭ и другим нормативным документам, регламентирующим применение электрооборудования, установленного во взрывоопасной зоне, а также подземные горные выработки угольных шахт и рудников, опасных по газу (метану) или пыли согласно ПБ 05-618-03 и ПБ 03-553-03.

ДМС-03 может использоваться в составе системы газоаналитической шахтной многофункциональной первого поколения, «Микон-АГК», в других измерительных и информационно-управляющих системах, а также как самостоятельный измерительный прибор [101]. Датчик проводит циклические измерения концентрации метана с периодом 2,5 с. Каждый цикл начинается с диагностики чувствительных элементов (ЧЭ) и других наиболее важных подсистем. При выявлении неисправностей датчик осуществляет местную сигнализацию и телесигнализацию об отказе и обеспечивает срабатывание выходного реле.



Рисунок 4.1 – Датчик ДМС-03

Датчик периодически определяет характеристики ЧЭ, которые учитываются при проведении дальнейших измерений, – этот уникальный алгоритм самонастройки позволяет обеспечить работу датчика без подстройки показаний (без калибровки) в течение 30 суток при гарантированной погрешности измерений не более $\pm 0,1$ % об. и до 120 суток – для погрешности $\pm 0,2$ % об.

Датчик оборудован выносной измерительной головкой, которая может быть удалена от основного корпуса на расстояние до 30 м. Измерительная головка имеет защиту чувствительных элементов от прямого попадания воды, что позволяет использовать датчики для контроля концентрации метана в трубопроводах систем дегазации и газоотсоса.

Датчик оборудован кнопкой, предназначенной для проверки срабатывания контура АГЗ. Проверка срабатывания также может осуществляться дистанционно по команде телеуправления.

Основные функции ДМС-03:

- измерение концентрации метана в диапазонах измерения;
- индикация на жидкокристаллическом дисплее (далее – ЖКД) значений концентрации в диапазоне от 0 до 99,99 %, объемная доля;

– преобразование величины измеренной концентрации метана в цифровой код стандарта MODBUS (ДМС 03-03);

– сравнение измеренного значения концентрации метана с заданным значением порогов срабатывания сигнализации и формирование управляющего (защитного) воздействия (изменение состояния выходного реле) с учетом коэффициента возврата (по ГОСТ 24032-80) при превышении порога (ДМС 03-03);

– местная сигнализация о превышении значений предаварийного порога срабатывания сигнализации;

– местная сигнализация о превышении аварийного порога срабатывания сигнализации и изменение состояния «сухого» контакта реле порогового устройства;

– местная и телесигнализация о наличии напряжения питания;

– местная и телесигнализация об отказе;

– возможность установки защиты от несанкционированного доступа (через пароль доступа);

– возможность формирования управляющего (защитного) воздействия (изменение состояния выходного реле) при потере связи;

– возможность задания значения аварийного порога срабатывания сигнализации и коэффициента возврата;

– возможность переключения с НЗ контакта выходного реле на НР контакт выходного реле;

– возможность задания типа выходного сигнала (ток или напряжение);

– возможность формирования управляющего воздействия (изменение состояния выходного реле порогового устройства) при нажатии на встроенную кнопку проверки (кнопка «КОНТР»).

Скорость воздушного потока измеряется с помощью датчика СДСВ 01 [102] (см. Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Датчик СДСВ 01

Измеритель скорости воздушного потока СДСВ 01 предназначен для непрерывного измерения скорости движения воздушных потоков в горных выработках, каналах вентиляторов главного проветривания, вентиляционных системах угольных предприятий, воздуховодах систем газоотсоса и дегазации. Область применения – контроль скорости движения (расхода) воздуха (газовых смесей) в подземных выработках шахт и рудников и их наземных строениях, в том числе опасных по газу, пыли и внезапным выбросам в соответствии с «Правилами безопасности в угольных шахтах» ПБ 05-618-03. СДСВ [105] может использоваться как отдельное устройство – измеритель скорости движения воздуха (газовой смеси) или в составе систем газоаналитических шахтных многофункциональных «Микон-АГК» и аппаратуры контроля эффективности работы газоотсасывающих установок «КРУГ». СДСВ может подключаться к подземным вычислительным устройствам и другим устройствам, совместимым с ним по электрическим параметрам.

Основные функции датчика СДСВ 01:

- измерение скорости воздушного потока в диапазоне $\pm (0,1 \dots 30)$ м/с;
- контроль скорости воздушного потока в диапазоне $-60 \dots +60$ м/с;

- определение направления воздушного потока;
- преобразование модуля измеренной скорости воздушного потока в диапазоне $-60 \dots +60$ м/с в выходной электрический аналоговый сигнал (напряжения в диапазоне $0,4 \dots 2,0$ В для СДСВ 01.01.XX-t.dd или тока в диапазоне $0(1) \dots 5$ мА для СДСВ 01.02.XX-t.dd) или преобразование измеренной скорости в диапазоне $-60 \dots +60$ в цифровой кодированный сигнал (интерфейс RS-485, протокол Modbus RTU для СДСВ 01.03.XX-t.dd);
- индикация на ЖКД скорости воздушного потока со знаком в диапазоне $-60 \dots +60$ м/с;
- телесигнализация (с помощью выходного релейного сигнала) о смене направления воздушного потока или о преодолении пороговых уровней;
- телеуправление выходным реле (для СДСВ 01.03.XX-t.dd);
- индикация наличия напряжения питания;
- индикация состояния выходного реле;
- индикация процесса передачи данных (для СДСВ 01.03.XX-t.dd) на ЖКД;
- местная сигнализация на ЖКД и телесигнализация об отказе СДСВ;
- оперативное изменение верхней границы диапазона преобразования: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 60 м/с (для СДСВ 01.01.XX-t.dd и СДСВ 01.02.XX-t.dd);
- оперативное задание параметров фильтрации результатов измерений: 2, 8, 32 с;
- оперативное задание низкого и высокого пороговых уровней;
- оперативное задание нижней границы диапазона выходного тока для исполнения СДСВ 01.02.XX-t.dd: 0 или 1 мА;
- оперативное задание алгоритма работы релейного выхода (срабатывание при инверсии воздушного потока или при преодолении порогового уровня для СДСВ 01.01.XX-t.dd и СДСВ 01.02.XX-t.dd и дополнительно телеуправления для СДСВ 01.03.XX-t.dd);
- задание нормального состояния релейного выхода (замкнут/разомкнут).

Компьютеры, используемые в наземной части системы «Микон-АГК», по функциональному назначению подразделяются следующим образом:

- компьютер сбора и централизованного хранения информации (сервер);
- компьютеры автоматизированных рабочих мест (АРМ) оператора АГК и горного диспетчера, служащих для отображения информации (телеизмерения, телесигнализации) и ввода управляющих воздействий (телеуправления).

Организация программного обеспечения системы «Микон-АГК» представлена на Рисунке 4.3.

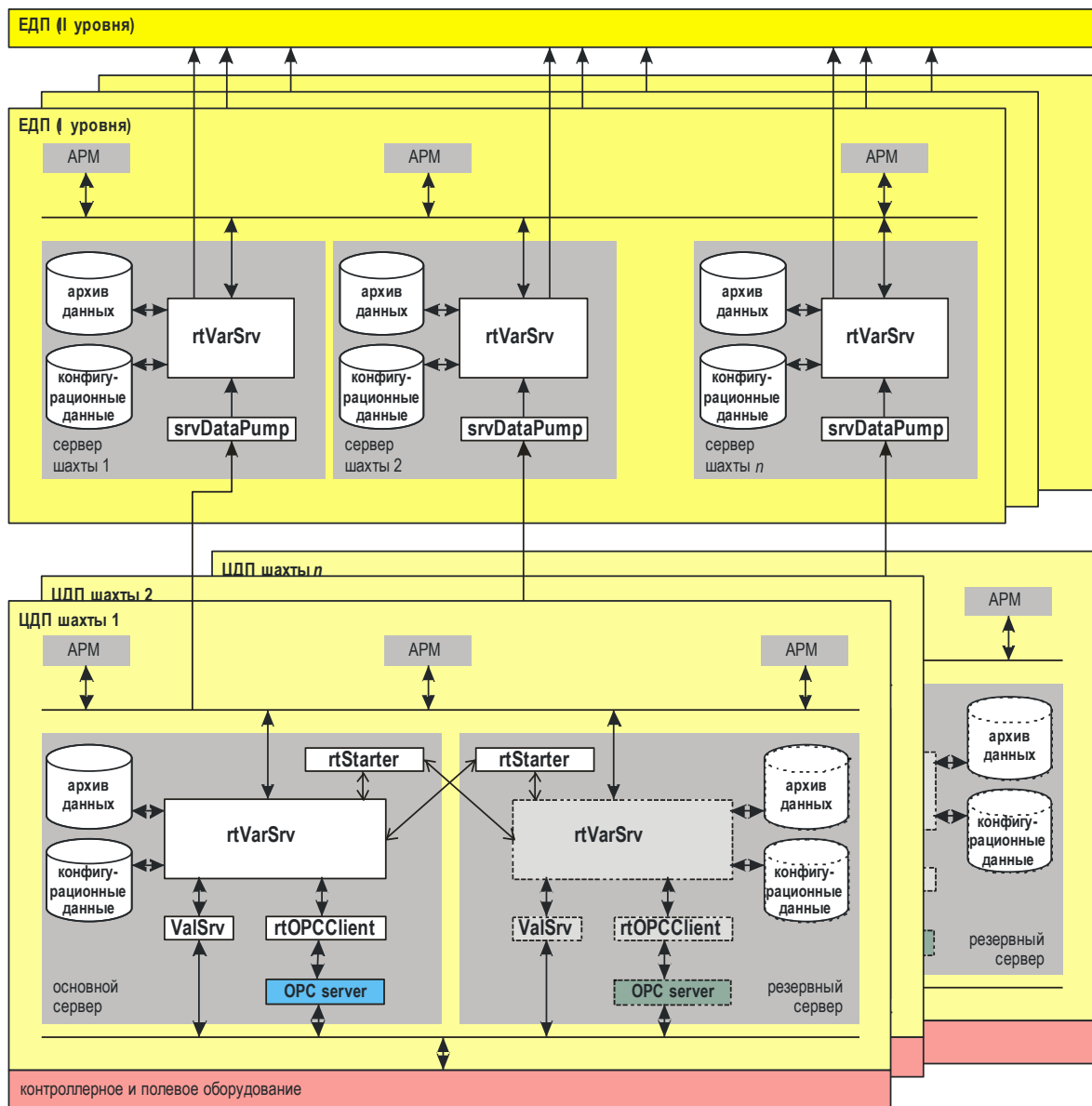


Рисунок 4.3 – Пример структурной схемы программного обеспечения верхнего уровня ЕДП – Единый диспетчерский пункт; ЦДП – центральный диспетчерский пункт шахты; ValSrv – ПО связи с подземными вычислительными устройствами; rtOPCCClient – OPC клиент; srvDataPump – ПО синхронизации данных; АРМ – автоматизированное рабочее место; rtVarSrv – сервер сбора данных (основной элемент SCADA системы)

Основные технические характеристики системы представлены в Таблице 4.1, метрологические характеристики – в Таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики системы

Параметр	Значение
Характеристики структуры	
Количество датчиков с цифровым и аналоговым интерфейсами	без ограничений
Количество дискретных датчиков типа «сухой контакт»	
Количество каналов управления (релейные выходы)	
Подземные устройства контроля и управления	
Устройства системы передачи информации	
Наземные вычислительные устройства	
Характеристики искробезопасных входов и выходов	
Аналоговые входы: – напряжение постоянного тока, В – постоянный ток, мА	0,4...2,0 (0,0...2,0) 1...5 (0...5)
Частотные входы, Гц	0...120
Дискретные входы	«сухой контакт» с диодом
Релейный выход: максимально коммутируемые напряжение/ток/мощность, В/А/Вт	60 / 1000 / 3 (200 / 150 / 3)
Характеристики электропитания	
Напряжение питания датчиков, подземных устройств контроля и управления, подземных элементов системы передачи информации	искробезопасное
Напряжение питания/ток потребления датчиков, В/мА	7...15 / 5...250
Напряжение питания элементов подземной части, В	~ 36 / ~ 127 / ~ 380 / ~ 660
Напряжение питания элементов наземной части, В	~ 220
Длительность питания от аккумуляторных батарей элементов подземной/наземной частей, час/мин., не менее	16 / 5

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	Значение
<i>Характеристики системы передачи информации (СПИН)</i>	
Низкоскоростные искробезопасные каналы связи СПИН: – тип – скорость передачи данных, кБод – расстояние (с повторителями), км, не более	RS-485, SAP 0,6...19,2 без ограничения
Высокоскоростные искробезопасные каналы связи СПИН: – тип – скорость передачи данных, МБод – расстояние (с повторителями), км	DSL/EthernetTX/EthernetFX 0,0006 ...100 6,5 (без ограничения)/0,15 /40
Максимальное расстояние, км: – от датчиков до подземных устройств контроля и управления – от подземных устройств контроля и управления до наземных вычислительных устройств	3,5 без ограничения

Таблица 4.2 – Метрологические характеристики

Первичный измерительный преобразователь	Диапазон показаний содержания определяемого компонента	Диапазон измерений содержания определяемого компонента	Пределы допускаемой основной погрешности
<i>Измерительный канал объемной доли метана и метано-водородной смеси</i>			
ДМС 01-(0-5)	от 0 до 100 % (об. д.)	от 0 до 2,5 % (об. д.)	±0,2 % (об. д.)
ДМС 01-(0-100)	от 0 до 100 % (об. д.)	от 0 до 60 % (об. д.) св. 60 до 100 % (об.д.)	±5,0 % (об. д.) ±15 % (об. д.)
ДМС 03	от 0 до 100 % (об. д.)	от 0 до 2,5 % (об. д.) св. 5 до 100 % (об. д.)	±0,1 % (об. д.) ±3 % (об.д.)
ДМС 03Э	от 0 до 100 % НКПР	от 0 до 57 % НКПР	±5 % НКПР 2)
<i>Измерительный канал объемной доли токсичных газов, водорода и диоксида углерода</i>			
СДТГ 01, СДОУ 01 (СО)	от 0 до 200 млн-1	от 0 до 50 млн-1	±(2 + 0,1'Свх) млн-1

Продолжение таблицы 4.2

Первичный измерительный преобразователь	Диапазон показаний содержания определяемого компонента	Диапазон измерений содержания определяемого компонента	Пределы допускаемой основной погрешности
ДОУИ (СО)	от 0 до 200 млн-1	от 0 до 50 млн-1	$\pm(3 + 0,1' \text{Свх})$ млн-1
СДТГ 02 (Н2)	от 0 до 999 млн-1	от 0 до 50 млн-1	$\pm(2 + ,15' \text{Свх})$ млн-1
СДТГ 03 (Н2)	от 0 до 1,0 % (об. д.)	от 0 до 0,5 (об. д.)	$\pm 0,1$ % (об. д.)
СДТГ 05 (NO)	от 0 до 100 млн-1	от 0 до 10 млн-1	$\pm(0,5 + 0,1' \text{Свх})$ млн-1
СДТГ 06 (NO2)	от 0 до 100 млн-1	от 0 до 10 млн-1	$\pm(0,2 + 0,05' \text{Свх})$ млн-1
СДТГ 11 (O2)	от 0 до 25% (об. д.)	от 0 до 25% (об. д.)	$\pm(0,5 + 0,1' \text{Свх})$ % (об. д.)
<i>Измерительный канал скорости воздушного потока</i>			
СДСВ 01	от –60 до +60 м/с	от 0,1 до 0,6 м/с св. 0,6 до 30 м/с	$\pm 0,1$ м/с $\pm(0,09 + 0,02' \text{V})$ м/с
<i>Измерительный канал давления</i>			
СДД 01: – диф. давлений газа; – абс. давление газа; – абс. давление воды	— — —	от 0 до 5,89; от 0 до 40; от 0 до 100; от 0 до 500; от 0 до 1000 кПа от 53,2 до 114,4; от 60 до 2500 кПа от 0 до 0,6; от 0 до 1; от 0 до 2,5; от 0 до 6; от 0 до 10 МПа	± 2 % прив.

В разделе 3.2 приведено описание сейсмического метода поляризационного приема упругих волн, что объективно позволяет перейти от атрибутов сигнала отраженной волны к оценке относительных значений градиента давления. В свою

очередь этот подход требует особых функциональных возможностей регистрирующей аппаратуры и, в первую очередь, эти требования относятся к неискаженному приему амплитудно-частотных характеристик сигнала отраженной волны. Для реализации этих требований разработан цифровой трехкомпонентный геофон, показанный на Рисунке 4.4 [25, 53, 60, 103, 104].



Рисунок 4.4 – Трехкомпонентный сейсмический модуль (ИПСМ)

Технические характеристики модуля:

- количество каналов регистрации сейсмического сигнала – 3;
- тип геофона для регистрации продольной (Z) волны сейсмического поля – GMT-12,5 V;
- собственная частота геофона – $(12,5 \pm 0,6)$ Гц;
- верхний предел частоты пропускания геофона не менее 200 Гц;
- сопротивление катушки геофона с шунтом 1,5 кОм – $(562,5 \pm 28,12)$ Ом;
- коэффициент нелинейных искажений (КНИ) геофона на частоте 12 Гц не более 0,4 %;
- коэффициент преобразования (чувствительность) геофона с шунтом 1,5 кОм (при затухании $0,73 \pm 0,07$) – (20 ± 2) В/м/с;

- коэффициент затухания колебаний геофона с шунтом 1,5 кОм, – $(0,73 \pm 0,07)$;
- рабочее положение геофона от горизонтали – 90° ;
- допустимый угол наклона геофона от рабочего положения – $\pm 20^\circ$;
- диапазон рабочих температур геофона – от -40 до $+160^\circ\text{C}$;
- габаритные размеры геофона не более $\varnothing 25,4 \times 25,4$ мм;
- тип геофона для регистрации поперечных (X, Y) волн сейсмического поля – GMT-12,5 Н;
- собственная частота геофона – $(12,5 \pm 0,6)$ Гц;
- верхний предел частоты пропускания геофона не менее 200 Гц;
- сопротивление катушки геофона с шунтом 1,5 кОм – $(562,5 \pm 28,12)$ Ом;
- коэффициент нелинейных искажений (КНИ) геофона на частоте 12 Гц не более 0,4 %;
- коэффициент преобразования (чувствительность) геофона с шунтом 1,5 кОм (при затухании $0,73 \pm 0,07$) – (20 ± 2) В/м/с;
- коэффициент затухания колебаний геофона с шунтом 1,5 кОм, – $(0,73 \pm 0,07)$;
- рабочее положение геофона от горизонтали – 0° ;
- допустимый угол наклона геофона от рабочего положения – $\pm 15^\circ$;
- диапазон рабочих температур геофона – от -40 до $+160^\circ\text{C}$;
- габаритные размеры геофона не более $\varnothing 25,4 \times 25,4$ мм;
- уровень собственных шумов регистрирующего канала, при коэффициенте предварительного усиления $K_u = 64$ и периоде квантования $T = 2$ мс, не более 0,15 мкВ;
- коэффициент предварительного усиления (K_u) регистрирующего канала равен 1, 2, 4, 8, 16, 32 и 64;
- мгновенный динамический диапазон регистрации сигнала не менее 130 дБ;
- коэффициент подавления входного синфазного сигнала не менее 100 дБ;

- частотный диапазон регистрируемого сигнала, по уровню -3 дБ, от 0 до 103 (206, 413, 826 и 1652) Гц;
- период квантования регистрируемого сигнала равен 4, 2, 1, 0.5 и 0,25 мс;
- коэффициент нелинейных искажений регистрирующего канала не более 0,001 %;
- количество разрядов АЦП (ADS1282 Texas Instruments) – 32;
- тип встроенного инклинометра для контроля пространственной ориентации полевого модуля – SCA100T (MURATA);
- разрешающая способность регистрации угла отклонения инклинометром, при отклонениях не более $\pm 30^\circ$, не более $\pm 1^\circ$;
- интерфейс и протокол передачи данных и команд управления – специальный;
- максимальная скорость передачи данных и команд управления – 8192 Кбит/сек;
- режим регистрации данных – непрерывный.

Подключение геофонов ориентировано на индивидуальный бортовой модуль для локального применения системы или на специализированный контроллер СПИН для связи с наземными службами.

Общий вид бортового модуля показан на Рисунке 4.5.

Основные технические характеристики модуля:

- количество линий связи (каналов) для приема данных, передачи команд управления и синхронизации равно двум;
- максимальное количество полевых модулей, подключаемых к одной линии связи – 12;
- максимальное количество каналов регистрации сейсмической информации – 72;
- режим регистрации данных – непрерывный/заданной длины;
- тип управляющего микрокомпьютера – Colibri T20 512MB IT;
- тип операционной системы – LINUX;
- объём энергонезависимой памяти не менее 16 GB;

– интерфейс типа ETHERNET 10/100 Мбит/с.



Рисунок 4.5 – Бортовой модуль

На Рисунке 4.6 показаны возможные варианты организации сейсмического канала ГИС МИКОН в процессах ведения проходческих и добычных работ (текущий режим непрерывного контроля) и в локальных исследованиях горного массива – контроль структуры целиков, кровли и других участков подземного пространства, требующих оперативного изучения в мобильном варианте (в том числе, для организации геотехнического мониторинга строительства и эксплуатации любых других подземных сооружений – тоннелей, штолен и т. п.).

Все вышеназванные модули системы «Микон-ГЕО» выполнены в искробезопасном исполнении для применения в опасных по газу подземных условиях.

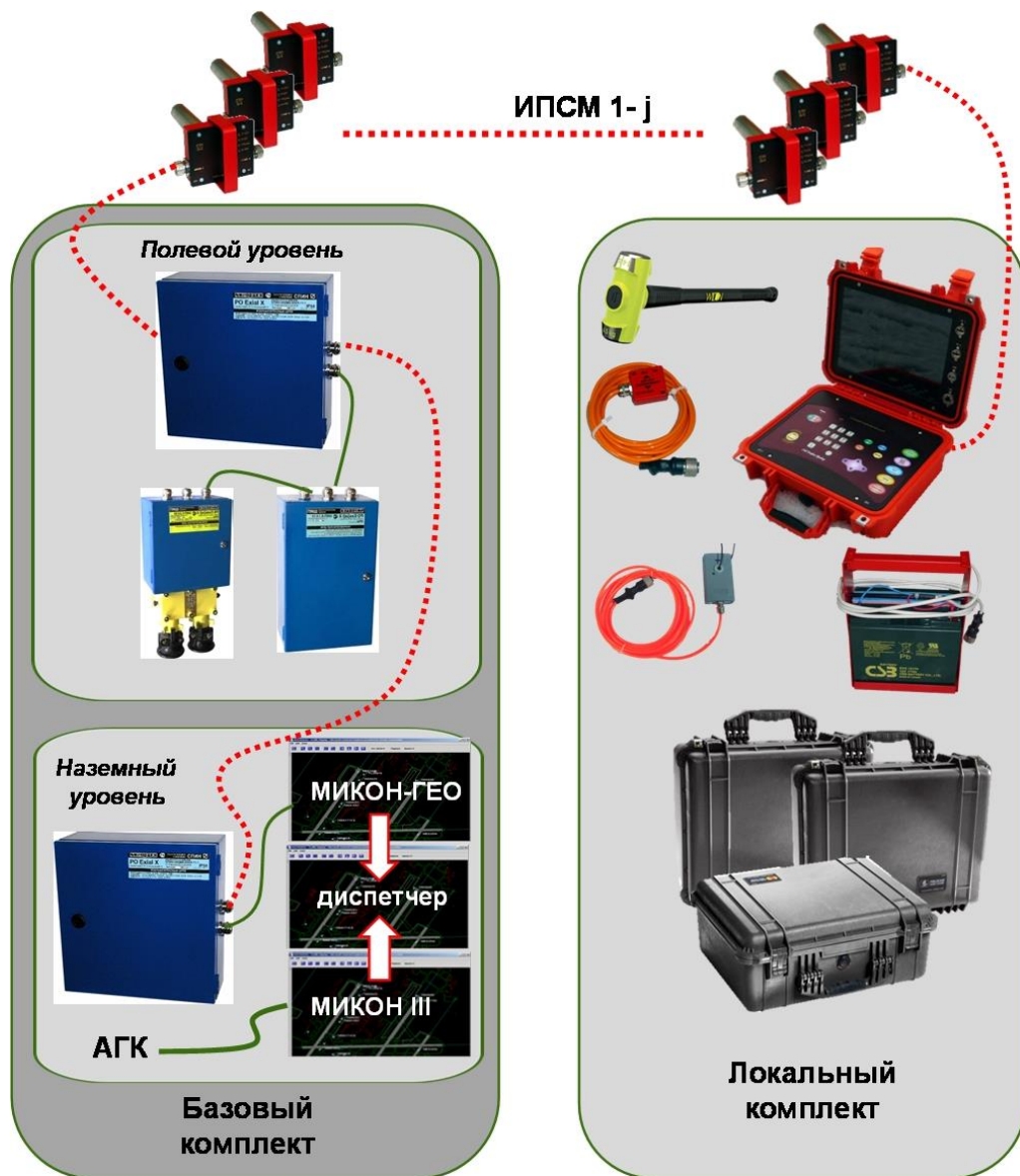


Рисунок 4.6 – Структура ГИС МИКОН в процессах текущего контроля горного массива (базовый комплект) и локального применения (локальный комплект)

Отметим, что все описанные полевые и наземные аппаратно-технические средства системы «Микон-ГЕО» выполнены с учетом идеи совместного применения с аэрогазовым комплексом «Микон-АГК» и полностью согласованы с его блоками СПИН, средствами электропитания и другими конструктивами. Соответственно, стоимость и эксплуатация комплексной (объединенной) системы в максимальной степени оптимизированы.

4.2 Панель геоинформационного мониторинга

Одним из основных элементов панели геоинформационного мониторинга является Сервер интеграции и анализа данных (СИАД), на котором запущено программное обеспечение для сбора данных из систем «Микон-АГК» и «Микон ГЕО», последующей их обработки, получения численных значений необходимых показаний и предоставления доступа к ним.

Общий вид структуры сервера интеграции и анализа данных «ГИС МИКОН» представлен на Рисунке 4.7.

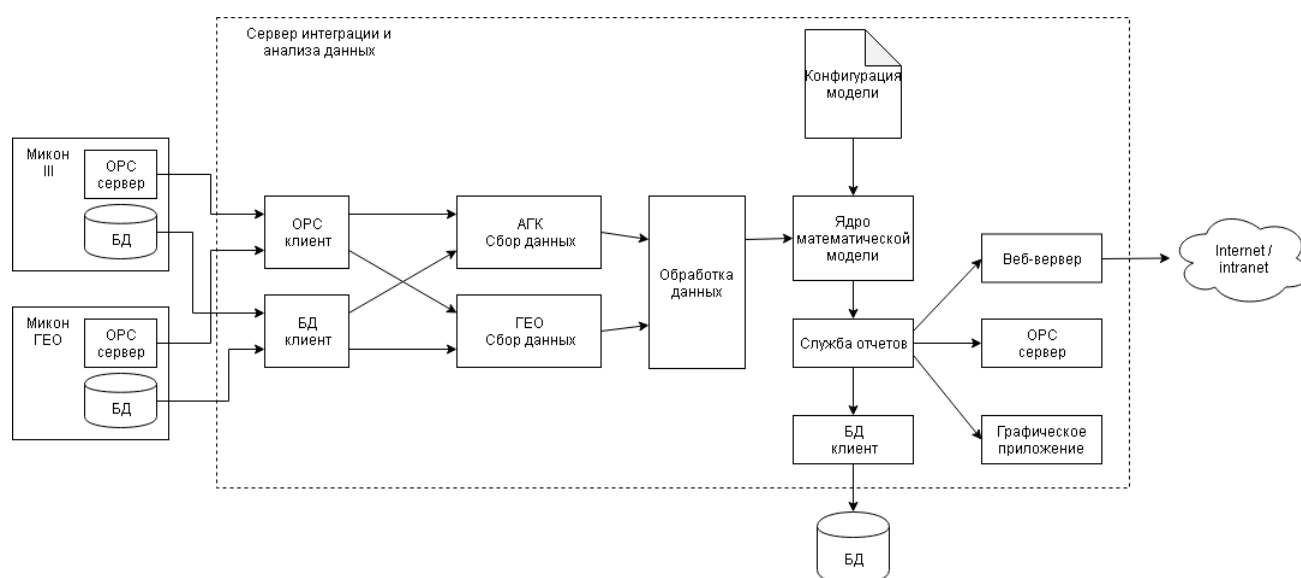


Рисунок 4.7 – Структура сервера интеграции и анализа данных
ГИС МИКОН

Для начала кратко опишем основное назначение изображенных на данной схеме блоков. Для связи с системами «Микон-АГК» и «Микон ГЕО» может быть использован ОРС-интерфейс либо клиент соответствующей базы данных. За сбор и подготовку данных для последующей обработки из системы «Микон-АГК» отвечает «АГК. Сбор данных», из системы «Микон ГЕО» – «ГЕО. Сбор данных». В рамках перечисленных модулей осуществляется приведение данных к формату, который требуется для последующей обработки, также на этом уровне могут быть

выполнены специфические для указанных систем операции над данными – фильтрация, масштабирование и т. п. Подготовленные данные поступают в блок «Обработка данных», в этом модуле производится синхронизация данных по времени, подготовка для передачи в математическую модель. «Ядро математической модели» – это основной компонент данной системы, он отвечает за корректировку математической модели связи метанообильности и состояния горного массива и расчет прогноза метанообильности по текущему состоянию массива. Описание математической модели передается в виде конфигурационного файла и может быть изменено при необходимости. Результат работы «Ядра математической модели» передается в «Службу отчетов», которая подготавливает данные для предоставления их через OPC-интерфейс, Веб-сервер и специальное программное обеспечение для работы с СИАД (GUI). Дополнительно эти данные записываются в соответствующую базу данных через соответствующий клиент.

Рассмотрим более подробно устройство перечисленных блоков.

Блоки «OPC-клиент» и «БД-клиент». OPC (OLE for Process Control) – промышленный стандарт, созданный консорциумом всемирно известных производителей оборудования и программного обеспечения при участии Microsoft. Этот стандарт описывает интерфейс обмена данными между устройствами управления технологическими процессами. Главная его цель – предоставить разработчикам систем диспетчеризации некоторую независимость от конкретного типа контроллеров. OPC основывается на технологии OLE/COM/DCOM компании Microsoft, Inc.

Как правило, большинство SCADA-систем дают возможность использовать данный интерфейс для предоставления доступа к переменным в реальном времени. Для работы с историческими данными может быть использован БД-клиент.

OPC-технология более специфична, поэтому рассмотрим ее подробно. Спецификация OPC Data Access 2.0 является основной и наиболее популярной среди используемых в OPC-серверах и клиентах, на текущий момент также довольно востребованной является OPC UA. Они применяются для получения следующих типов данных:

- данные, полученные от датчиков в реальном времени;
- управляющие воздействия;
- информация о текущем состоянии оборудования и исполнительных программ систем и подсистем.

Рассмотрим более подробно устройство OPC-сервера Data Access, с которым придется работать OPC-клиенту. Для начала определим типы объектов (Рисунок 4.8), с которыми работает OPC-сервер Data Access: OPC-сервер, OPC-группа и OPC-ячейка. OPC-сервер является источником данных для реального сервера и является местом сбора всех данных. OPC-группа обеспечивает информацией участников группы и предоставляет механизм обновления и логической организации OPC-ячеек. OPC-ячейки обеспечивают связь источника данных с сервером.

Для каждого OPC-клиента OPC-сервер формирует соответствующий объект и создает специальный канал связи с ним. Это защищает обмен данными от влияния других OPC-клиентов и повышает производительность OPC-сервера. Из всех перечисленных (OPC Server, OPC Group, OPC Item) он единственный является СОМ-объектом, все остальные объекты доступны через его интерфейсы, которые он предоставляет клиенту.

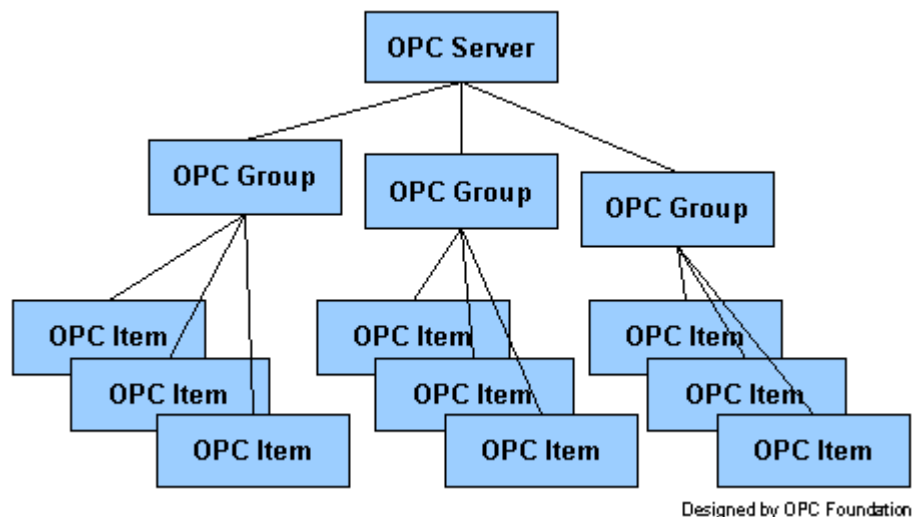


Рисунок 4.8 – Объектная модель OPC-сервера Data Access

Переменные в OPC-сервере могут быть собраны в простой список либо в дерево. В любой момент времени можно запросить дерево переменных, поддерживаемых OPC-сервером. Если оборудование допускает, дерево может изменяться динамически. При этом необходимо помнить, что интерфейс, необходимый для просмотра дерева, объявлен в OPC-спецификации как необязательный, но практически все OPC-серверы его реализуют.

Далее данные переходят на уровень OPC-группы. Каждая OPC-группа имеет уникальное имя среди всех групп данного OPC-клиента. OPC-клиент может задавать активное или пассивное состояние группы. Он может также включить или выключить получение данных от OPC-сервера без перевода OPC-группы или OPC-ячейки в пассивное состояние. Таким образом, он не влияет на обмен данными между OPC-сервером и системой управления (PLC).

OPC-группы создаются динамически, согласно требованиям текущего приложения (Клиента) по списку тэгов и их свойств. В зависимости от этих требований может варьироваться как содержание группы, так и число включенных в нее OPC-ячеек по ходу связи.

OPC-группы предоставляют способ организации данных. Группа может представляться тегами в соответствующем операторском экране (кадре) или отчете. Данные могут быть считаны или записаны. Соединения, основанные на исключительных ситуациях, также могут быть созданы между клиентом и тегом в группе, который может быть включен или выключен в зависимости от требований. OPC-клиент может определять частоту, с которой OPC-сервер должен предоставлять изменения данных OPC-клиенту. Отдельно стоящих вне группы элементов быть не может. Клиент может создать для себя на сервере несколько групп, различающихся требуемой частотой обновления. Для каждого клиента всегда создается своя группа (кроме так называемых публичных групп), даже если состав элементов и частота обновления совпадают. Отсоединение клиента приводит к уничтожению группы.

Возможны два типа групп: публичные (общедоступные) или локальные (конфиденциальные). Публичные группы необходимы для разделения между

множеством клиентов. Локальные группы существуют только для одного клиента. Для публичных групп существуют отдельные/специфичные интерфейсы.

В отличие от OPC-группы и OPC-сервера, OPC-ячейка не поддерживает OPC-интерфейс и не является, таким образом, СОМ-объектом (Component Object Model). Это внутренний объект OPC-сервера, который содержит важную информацию о запросах OPC-клиента (например, тип данных, использующихся для загрузки значений, или состояние (активное или пассивное) запрашиваемых значений и т. п.).

Каждый элемент данных имеет значение, время последнего обновления (timestamp) и признак качества, определяющий степень достоверности значения. Значение может быть практически любого скалярного типа – булево, целое, плавающее с точкой и т. п. – или строкой (так называемый OLE VARIANT). Время представляется со 100-наносекундной точностью (FILETIME Win32 API). Реальная точность измерения времени обычно бывает хуже и, в общем случае, зависит от реализации сервера и аппаратуры. Качество – это код, содержащий в себе грубую оценку, – UNCERTAIN, GOOD и BAD (не определено, хорошее и плохое), а на случай плохой – еще и расшифровку, например, QUAL_SENSOR_FAILURE – неисправность датчика.

С точки зрения OPC-клиента, OPC-ячейка не представляет собой реальный источник данных, а лишь обеспечивает с ним логическую связь. При помощи идентификатора ItemID, OPC-ячейка однозначно ассоциируется с пунктом в физической конфигурации OPC-сервера. Это означает, что количество OPC-ячеек, связанных с одним источником данных, не ограничено (даже в рамках одной OPC-группы одного OPC-клиента).

ItemID – уникальный идентификатор тэга и используется OPC-клиентом для связи с OPC-сервером. ItemID представляет собой последовательность имен всех уровней конфигурации. Например, в трехуровневой конфигурации OPC-сервер, ItemID будет выглядеть так: имя_станции.имя_буфера.имя_ячейки.

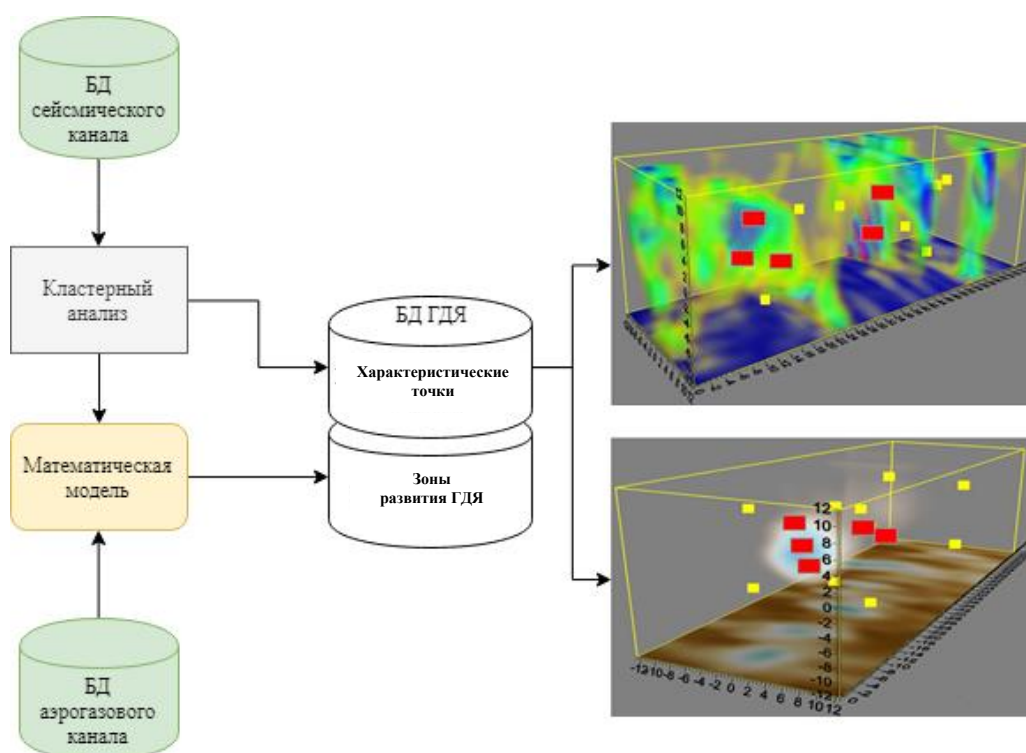


Рисунок 4.9 – Схема информационных потоков и формат прогноза зон возможного развития опасных ГДЯ

4.3 Содержание информационных потоков и формат прогноза зон возможного развития опасных ГДЯ (Блоки «АГК. Сбор данных», «ГЕО. Сбор данных» и «Обработка данных»)

Схема предлагаемого содержания реализуется и в варианте ведения добычных работ (лава), и в варианте ведения проходческих работ (подготовительные штреки) (Рисунок 4.9).

Основное назначение данных блоков – это подготовка данных для обработки в «Ядре математической модели». Одним из этапов подготовки является выделение характеристических точек в массиве сейсмических данных, с целью их первичной обработки (экспресс-анализа).

Главной задачей системы геомониторинга является прогноз зон возможного возникновения геогазодинамических явлений (внезапного выброса породы, газа,

вывалов), геологических нарушений и линз с флюидом (т. е. водой и/или газом), зон трещиноватости горного массива или зон дезинтеграции.

При этом процедура прогноза состояния горного массива может быть разделена на четыре основные части:

- сбор данных (так называемых – сейсмограмм);
- обработка сейсмограмм в соответствии с принятой методикой;
- визуализация данных с привязкой к объекту исследования;
- интерпретация образов.

Сбор данных представляет собой процесс регистрации сейсмодатчиками упругих волн, распространяемых в среде. Задача тривиальна, так как сейсморазведка, зародившаяся в 1920 году, на сегодняшний день может предложить сейсмодатчики и регистрирующую аппаратуру различных исполнений и широкого спектра характеристик.¹

Обработка сейсмограмм, в соответствии с принятой разработчиком системы методикой, представляет наибольший интерес, так как именно от правильности обработки зависит результат, который после интерпретации позволит решить главную задачу – осуществить прогноз состояния горного массива. Если в «большой» сейсморазведке, где с дневной поверхности производят изучение толщи земной коры, размещая датчики на несколько километров, применяются, в основном, стандартные методики, то в условиях подземного строительства, с применением микросейсмического подхода (то есть небольшого количества сейсмодатчиков, распределенных по площади в несколько десятков метров) рациональным и более эффективным являются авторские методики, разработанные и запатентованные для конкретных условий применения. Например, запатентованная и представленная в работе [81, 154] методика позволяет определить не только структуру (зоны трещиноватости, геологические нарушения, зоны смены структуры пород),

¹Для применения в шахтах и рудниках, опасных по газу и пыли, требуется взрывобезопасное исполнение как регистрирующей аппаратуры, так и средств электропитания и передачи информации.

но и параметры исследуемого горного массива (напряженность, скорость волны в среде, прочность, пластичность).

Визуализацию данных можно было бы отнести к пункту обработки данных, если бы процесс не был столь уникальным и не требовал разработки специальных средств для отображения обработанных данных. На этом этапе осуществляется соотнесение параметров исследованного участка горного массива и его ориентации в пространстве (привязка к координатным осям, пикетам и другим отметкам).

Финальным этапом процедуры является интерпретация результатов и, собственно, сам прогноз. Если все предыдущие операции не требуют от пользователя глубоких знаний предмета и выполняются в автоматическом или полуавтоматическом режимах, то интерпретация требует наличия высококвалифицированных кадров (геологов, сейсмиков, геофизиков), одновременно владеющих современными методами алгоритмизации и программирования, что само по себе является далеко не простой персонализированной специальной образовательной задачей.

Необходимо также иметь в виду, что в соответствии с правилами промышленной безопасности, как и АГК, геомониторинг должен осуществляться в непрерывном режиме. Процесс автоматического получения и обработки данных, несомненно, упрощает задачу специалиста, выполняющего прогноз, но не исключает необходимости постоянного наблюдения за результатами обработки, отображаемыми на мониторе.

Еще одной достаточно серьезной проблемой непрерывного геомониторинга, с технической точки зрения, являются большие объемы данных, накапливаемые при работе системы, которые необходимо анализировать, архивировать и в ряде случаев, пересылать через глобальные сети соответствующим каналам.

С учетом вышесказанного становится актуальной задача предварительного экспресс-анализа данных, заключающегося в подготовке набора характерных точек, на которые следует обратить внимание в первую очередь в рамках исследуемой части горного массива, что в итоге позволяет решить сразу несколько задач:

- наличие такого набора позволяет упростить обучение оператора/специалиста, работающего с системой визуализации и оценивающего состояние горного массива и уровень исходящей от него опасности;

- упрощает визуальный анализ обработанных данных и прогноз, снижая временные затраты ответственного за прогноз специалиста (геолога, геофизика);

- число таких точек, в сравнении с сейсмоданными, имеют значительно меньший объем, что позволяет без значительных затрат их хранить, анализировать и передавать в иные системы.

Одним из подходов к решению задачи экспресс-анализа сейсмоданных может быть предложен кластерный анализ, результатом которого является нахождение центров кластеризации, которые могут быть использованы в качестве характерных точек. Предварительно производится оценка значимости параметров сейсмоданных, позволяющая на основе экспериментальных данных ранжировать факторы, влияющие на состояние массива с применением методики, предложенной в работе [1].

Далее представим процедуру и результаты исследования применимости различных алгоритмов кластеризации для анализа сейсмоданных, необходимых и достаточных для решения конкретных задач функционала геоинформационной панели в системе оперативного контроля и прогноза возникновения и развития опасных динамических процессов в массиве.

В результате обработки сейсмоданных по методике [5], пользователю доступны несколько параметров, характеризующих исследуемый участок горного массива:

а) *Stress* – напряженность массива (или горное давление). Относительный параметр, измеряется в условных единицах от 0 до 10, где 0 – означает декомпрессию, 2 – нормальное литостатическое давление для данных условий, а 10 – максимальную компрессию;

б) *Water* – вероятность водопроявления. Это параметр, позволяющий определить местоположение и вероятность нахождения флюида (газа/воды), измеряет-

ся в процентах от 0 до 100, где 100 – наибольшая вероятность нахождения флюида в отмеченной зоне, а 0 – минимальная вероятность;

в) V_p – средняя скорость распространения продольных волн в среде, измеряется в м/с и принимает значения в зависимости от типа среды и ее состояния. Так, для угольного массива средняя скорость продольных волн составляет примерно 2000 м/с;

г) V_s – средняя скорость распространения поперечных волн в среде, измеряется в м/с и принимает значения в зависимости от типа среды и ее состояния;

д) V_p / V_s – отношение скоростей, измеряется в условных единицах;

е) *Poisson* – коэффициент Пуассона. Параметр принимает значение в диапазоне от 0 до 0,5, где 0 – это абсолютно хрупкие материалы, а 0,5 – абсолютно несжимаемые;

ж) *Young* – значения модуля Юнга (модуля упругости), измеряется в МПа;

з) *Category* – категории устойчивости массива по шкале Бениавского [134]. Параметр принимает значения от 1 до 5, где 1 – устойчивый массив, а 5 – неустойчивый, требующий максимального крепления и осторожности при разработке.

Методика предусматривает применение восьми сейсмодатчиков, рассредоточенных в пространстве горной выработки, и позволяет исследовать массив размером (В x Ш x Г): 25 x 25 x 100 м. Дискретность сетки значений параметров составляет 1 метр.

Предварительно выполняемая работа. Нами был проведен сравнительный анализ различных алгоритмов кластеризации данных, получаемых от системы «Микон-ГЕО». Для сравнения алгоритмов были подготовлены выборки, содержащие координаты точек исследованной части горного массива и значения технологических параметров в них. Для оценки алгоритмов данные были предварительно размечены – в них, на основании экспертной оценки, были выбраны точки, на которые в первую очередь следует обратить внимание при их анализе специалистами. Результатом работы алгоритма кластеризации является набор центров кластеризации. Будем считать, что центр кластеризации совпадает с экс-

пертной выборкой, если Евклидово расстояние между центром и точкой выборки составляет не более двух метров, данная величина определяется точностью измерительной аппаратуры.

Для оценки качества алгоритмов использовались следующие метрики:

- количество точек кластеризации, попавших в экспертную выборку – c_k ;
- количество точек из экспертной выборки, обнаруженных алгоритмом кластеризации – c_m ;
- индекс *Calinski–Harabasz* – VRC ;
- индекс *Davies–Bouldin* – DB ;
- силуэтный коэффициент – SWC .

В качестве технологических параметров были выбраны *Stress* и *Water*. Количество точек, отмеченных экспертом для признака *Stress* составляет 12, для признака *Water* – 3.

Общая схема исследования алгоритмов кластеризации представлена на Рисунке 4.10.

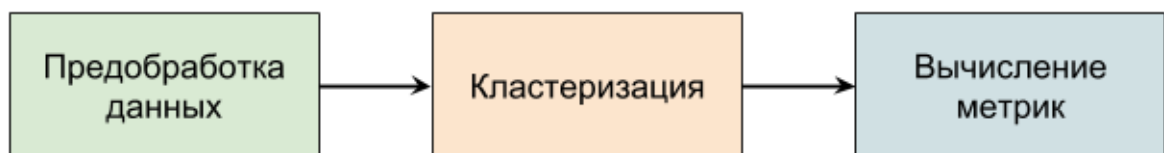


Рисунок 4.10 – Схема исследования алгоритмов кластеризации

На первом этапе производится предобработка данных – масштабирование. Для приведения признаков к одному масштабу используем стандартизацию. Эксперименты с применением других подходов к масштабированию (нормализация и т. п.) показали, что они не оказывают существенного влияния на результат.

На втором этапе выполняется непосредственно кластеризация данных с использованием одного из выбранных алгоритмов. Проведен сравнительный анализ трех алгоритмов: *k-means*, *Mean shif* и *DBSCAN* [1]. Для каждого алгоритма был предварительно выбран диапазон изменения гиперпараметров, оказывающих наибольшее влияние на результат работы алгоритма. Гиперпараметры, не попав-

шие в вариативную группу, установлены в константные значения. Количество запусков алгоритма определяется числом сочетаний различных значений модифицируемых гиперпараметров.

На третьем этапе вычисляются метрики. Список метрик приведен выше. Дополнительно для алгоритма *k-means* использовался «метод локтя», основанный на анализе внутрикластерных искажений.

Далее произведен анализ применимости различных алгоритмов кластеризации при обработке сейсмических данных и определены параметры, характеризующие состояние горного массива.

Алгоритм k-means. Алгоритм *k-means* является одним из наиболее простых и популярных алгоритмов кластеризации на сегодняшний день и относится к классу алгоритмов на основе прототипов. Каждый кластер в рамках алгоритма *k-means* определяется его центроидом – средним значением подобных точек.

У алгоритма есть ряд недостатков, которые делают его малоприменимым для кластеризации данных из системы «Микон-ГЕО», а именно: он плохо работает с кластерами сложной формы, размера и плотности, неустойчив к шумам, чувствителен к выбору первоначального распределения кластеров, но при этом работает быстро, поэтому был выбран для оценки нижней границы наших возможностей. Для снижения влияния конфигурации первоначального распределения кластеров используем модификацию этого алгоритма *k-means++*, которая дает лучший результат при прочих равных условиях.

Задание гиперпараметров для алгоритма k-means. Зададимся следующими значениями гиперпараметров алгоритма:

- количество кластеров: от 2-х до 20-ти, шаг изменения: 1;
- метод начальной расстановки центров кластеризации: *k-means++*;
- количество различных расстановок центров кластеризации: 10;
- максимальное количество итераций при прогоне алгоритма: 300.

В качестве верхней границы количества кластеров выбрано число 20, потому что на практике редко встречается количество областей, требующих большие значения.

Работа с признаком Stress. По полученным значениям внутрикластерных искажений невозможно определить оптимальное количество кластеров: нет явно выраженной точки, где искажения начинают увеличиваться быстрее по сравнению с предыдущими значениями (Рисунок 4.11).

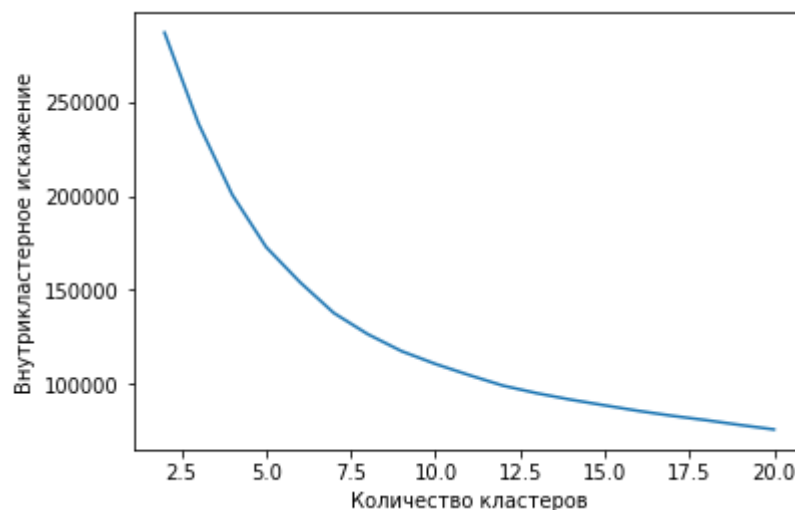


Рисунок 4.11 – Величина внутрикластерных искажений для различного количества кластеров (признак *Stress*, алгоритм *k-means*)

На основе полученных данных вычислены заданные нами метрики. В Таблице 4.3 приведены результаты – параметры алгоритма, при которых метрики принимают оптимальные значения. Там же указано количество точек из экспертной выборки, которые обнаруживает алгоритм при настройках, соответствующих данному значению метрики.

Алгоритм кластеризации *k-means* практически бесполезен для обработки данных от системы «Микон-ГЕО». При количестве кластеров 11, 12 или 13 он находит не более одной точки, отмеченной экспертом. Увеличение количества кластеров, а также изменение других гиперпараметров алгоритма (количество различных расстановок центров кластеризации и максимальное количество итераций при прогоне алгоритма) не улучшили результат.

На Рисунке 4.12 представлено расположение центров кластеризации, найденных алгоритмом *k-means*, при количестве кластеров равном 11.

Таблица 4.3 – Численные значения метрик и соответствующее количество кластеров для признака *Stress* (алгоритм *k-means*)

Метрика	Значение	Количество кластеров	Количество точек из экспертной выборки
c_k	1	11	1
c_m	1	11	1
<i>VRC</i>	23766.779	5	0
<i>DB</i>	1.124	7	0
<i>SWC</i>	0.237	12	1

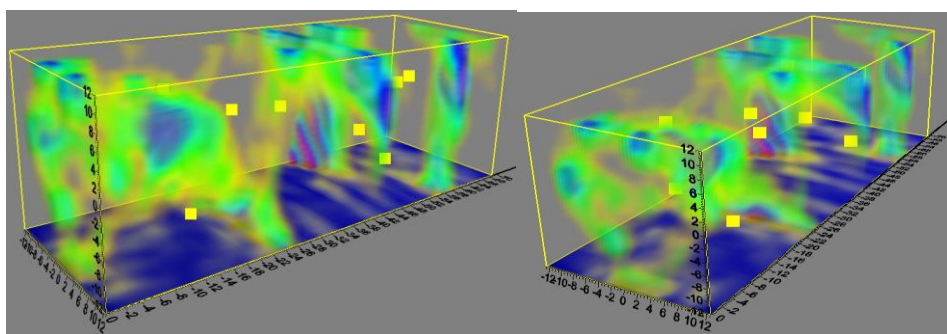


Рисунок 4.12 – Алгоритм *k-means*. Признак *Stress*. Количество кластеров – 11

Работа с признаком *Water*. Для признака *Water* «метод локтя» также не работает. По полученному графику зависимости внутрикластерных искажений от количества кластеров (Рисунок 4.13) невозможно определить оптимальное их (кластеров) количество.

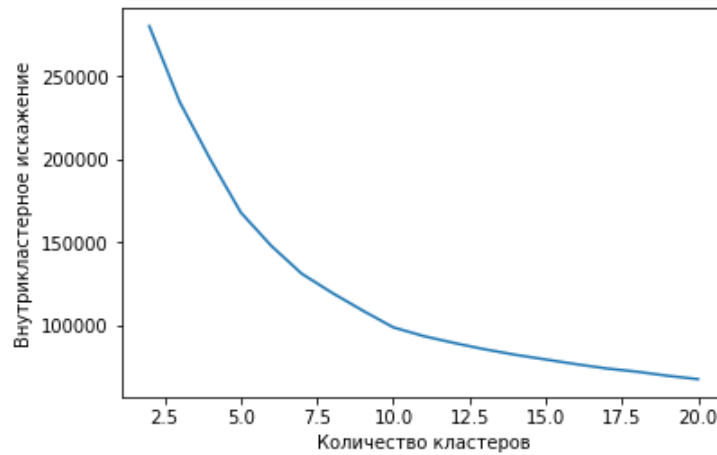


Рисунок 4.13 – Величина внутрикластерных искажений для различного количества кластеров (признак *Water*, алгоритм *k-means*)

Оптимальные значения метрик и соответствующие им параметры алгоритма *k-means* для признака *Water* представлены в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Численные значения метрик и соответствующее количество кластеров для признака *Water* (алгоритм *k-means*)

Метрика	Значение	Количество кластеров	Количество точек из экспертной выборки
c_k	1	12	1
c_m	1	12	1
VRC	26004.799	8	0
DB	1.057	8	0
SWC	0.255	9	0

Для работы с признаком *Water* так же, как и в случае со *Stress*, алгоритм *k-means* не может быть использован. Получен аналогичный результат, и улучшить его практически не удалось. Расположение центров кластеризации для признака *Water* (лучший результат по метрикам c_k и c_m) представлено на Рисунке 4.14.

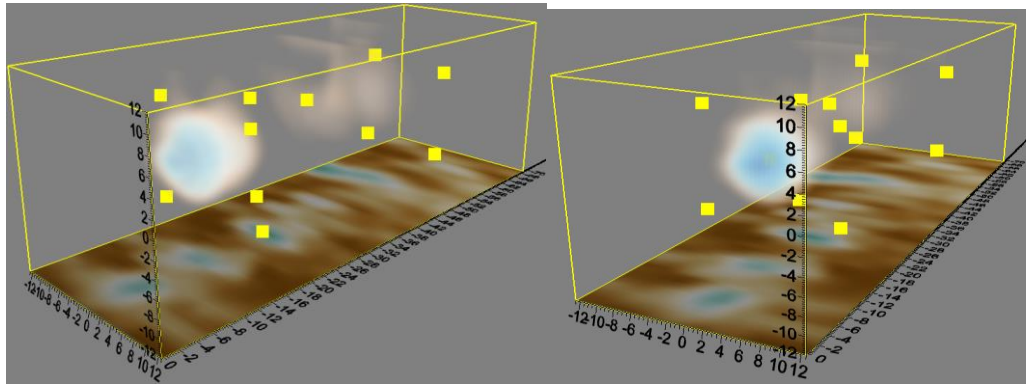


Рисунок 4.14 – Алгоритм *k-means*. Признак *Water*. Количество кластеров – 12

Алгоритм Mean shift. Алгоритм *Mean shift* является плотностным непараметрическим алгоритмом кластеризации. Количество кластеров при его настройке, в отличие от алгоритма *k-means*, не задается, оно определяется в процессе работы. Идея *Mean shift* заключается в поиске моды – максимума функции плотности вероятности. В процессе работы центры кластеризации смещаются по направлению к максимальной плотности.

Основным гиперпараметром данного алгоритма является величина ядра, которая, фактически, определяет размеры и количество кластеров.

Данный алгоритм не требует предварительного задания форм кластеров и может работать в произвольных признаковых пространствах. Его основной недостаток заключается в сложности выбора размера ядра, которое является определяющим гиперпараметром алгоритма.

Задание гиперпараметров для алгоритма Mean shift. Предварительные исследования показали, что при величине ядра меньше, чем 0.8 количество кластеров на рассматриваемых данных становится больше 20, что в нашем случае является верхней оценкой. Если величина ядра становится больше 1.3, то количество кластеров становится меньше 2-х, а это нижняя оценка. Поэтому указанный гиперпараметр подвергался изменению в диапазоне от 0.8 до 1.3 с шагом 0.5.

Работа с признаком Stress. В таблице 4.5 представлены оптимальные значения метрик для данного алгоритма кластеризации.

Таблица 4.5 – Численные значения метрик и соответствующее количество кластеров для признака *Stress* (алгоритм *Mean shift*)

Метрика	Значение	Количество кластеров	Количество точек из экспертной выборки
c_k	3	20 (размер ядра = 0.85)	3
c_m	3	20 (размер ядра = 0.85)	3
<i>VRC</i>	20075.953	2 (размер ядра = 1.2)	0
<i>DB</i>	1.277	23 (размер ядра = 0.8)	3
<i>SWC</i>	0.193	15 (размер ядра = 0.9)	1

Качество алгоритма кластеризации *Mean shift* лучше, по сравнению с *k-means*. Анализ полученных результатов кластеризации показал, что при величине ядра более 1.0 все центры кластеризации начинают располагаться на расстоянии более 8 метров от тех, что отмечены экспертом. Несмотря на то, что максимальное количество найденных точек из экспертной выборки равно трем, среди центров кластеризации при размере ядра меньше 0.9 есть точки, находящиеся на удалении не более 3-х метров, что близко к погрешности измерительной аппаратуры. Наложение полученных результатов на данные сейсмических наблюдений может помочь в их анализе.

На Рисунках 4.15 и 4.16 представлены расположения центров кластеризации, полученные с помощью алгоритма *Mean shift*, для размеров ядра 0.8 (лучшее значение по метрике *DB*) и 0.85 (лучшее значение по метрикам c_k и c_m).

Работа с признаком *Water*. Численные значения метрик, вычисленные для результатов, полученных с помощью алгоритма *Mean shift* для признака *Water*, представлены в Таблице 4.6.

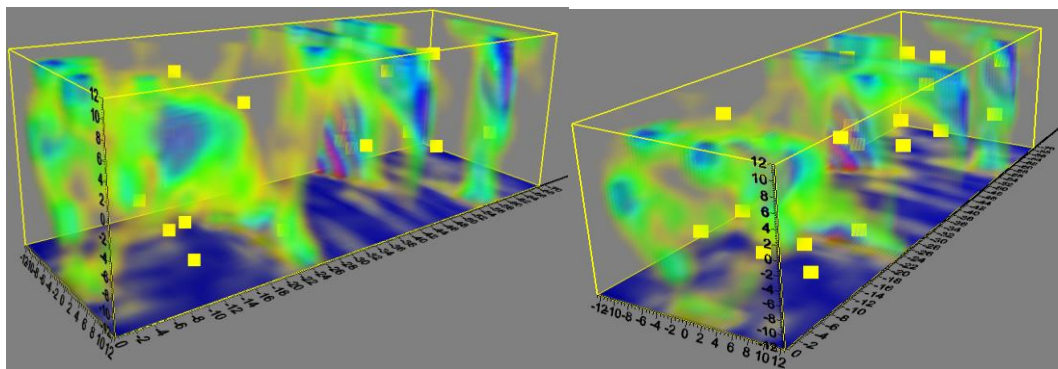


Рисунок 4.15 – Алгоритм *Mean shift*. Признак *Stress*. Размер ядра – 0.8

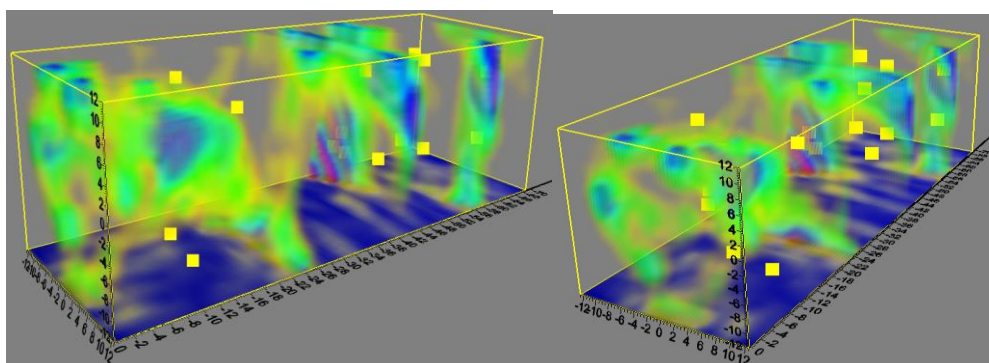


Рисунок 4.16 – Алгоритм *Mean shift*. Признак *Stress*. Размер ядра – 0.85

Таблица 4.6 – Численные значения метрик и соответствующее количество кластеров для признака *Water* (алгоритм *Mean shift*)

Метрика	Значение	Количество кластеров	Количество точек из экспертной выборки
c_k	3	20 (размер ядра = 0.80)	2
c_m	2	20 (размер ядра = 0.80)	2
VRC	22813.589	11 (размер ядра = 1.0)	1
DB	1.171	11 (размер ядра = 1.0)	1
SWC	0.232	11 (размер ядра = 1.0)	1

Несмотря на то, что для признака *Water* алгоритм *Mean shift* находит две из трех точек, отмеченных экспертом, среди 20-ти полученных кластеров их будет трудно найти без проведения дополнительного анализа.

Центры кластеризации для размера ядра, равного 0.8, показаны на Рисунке 4.17, для размера ядра 1.0 – на Рисунке 4.18.

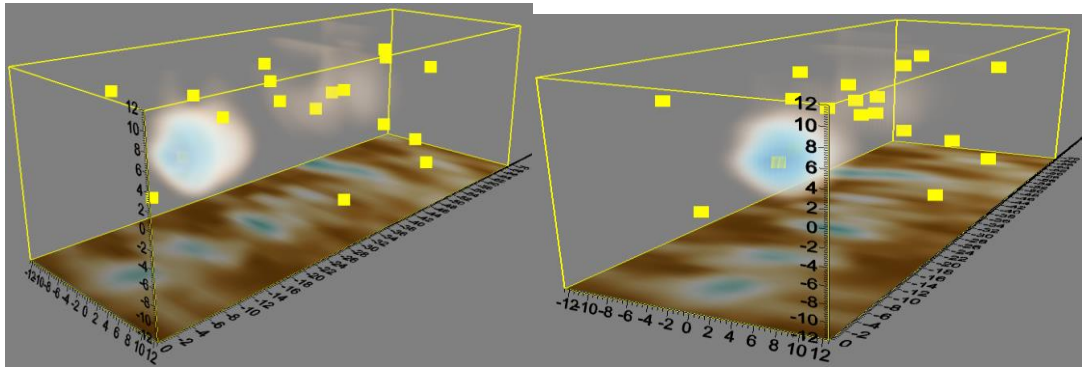


Рисунок 4.17 – Алгоритм *Mean shift*. Признак *Water*. Размер ядра – 0.8

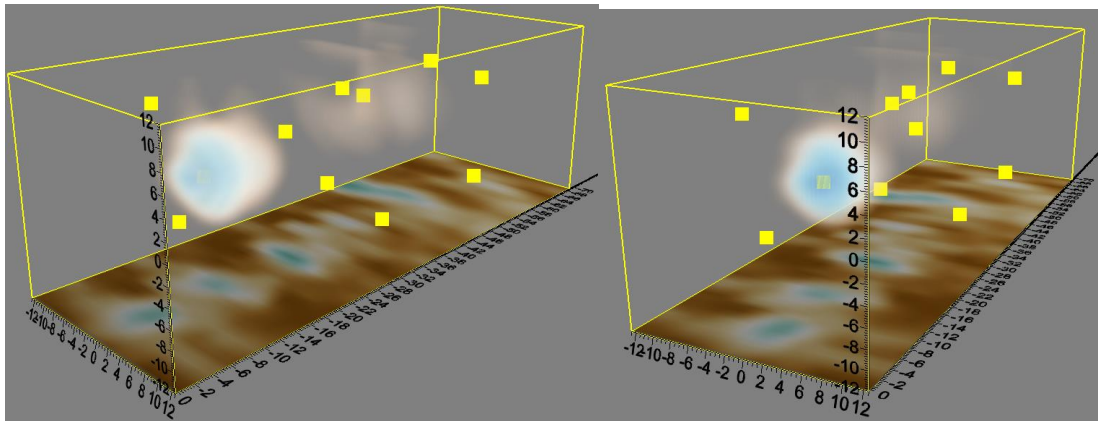


Рисунок 4.18 – Алгоритм *Mean shift*. Признак *Water*. Размер ядра – 1.0

Алгоритм DBSCAN. *DBSCAN* является плотностным алгоритмом кластеризации. Он так же, как и *Mean shift*, не требует предварительно задания кластеров, их количество определяется в процессе работы и зависит от гиперпараметров алгоритма и обрабатываемых данных. *DBSCAN* может находить кластер произвольной формы, устойчив к выбросам и хорошо работает на больших объемах данных.

Из недостатков можно отметить, что алгоритм не очень хорошо работает на данных, плотность элементов в которых сильно отличается, требует предварительного масштабирования признаков.

Задание гиперпараметров для алгоритма DBSCAN. Два основных гиперпараметра алгоритма – это минимальное количество точек, которые образуют плотную область ($minPts$) и радиус окрестности (esp). Минимальное значение $minPts=3$, в качестве верхней оценки можно ориентироваться на величину $minPts=2*dim$ [1], где dim – это размерность признакового пространства. В нашем случае размерность равна четырем, поэтому максимальное значение $minPts=8$. Таким образом, для величины $minPts$ был взят ряд значений 3–8. Для выбора минимального значения esp использовался график зависимости расстояния до k -го соседа от количества точек, расстояние до k -го соседа у которых меньше. Максимальное значение esp определяется по итоговому количеству кластеров: их должно быть не меньше трех.

Работа с признаком Stress. Построим график для оценки минимального значения esp (Рисунок 4.19).

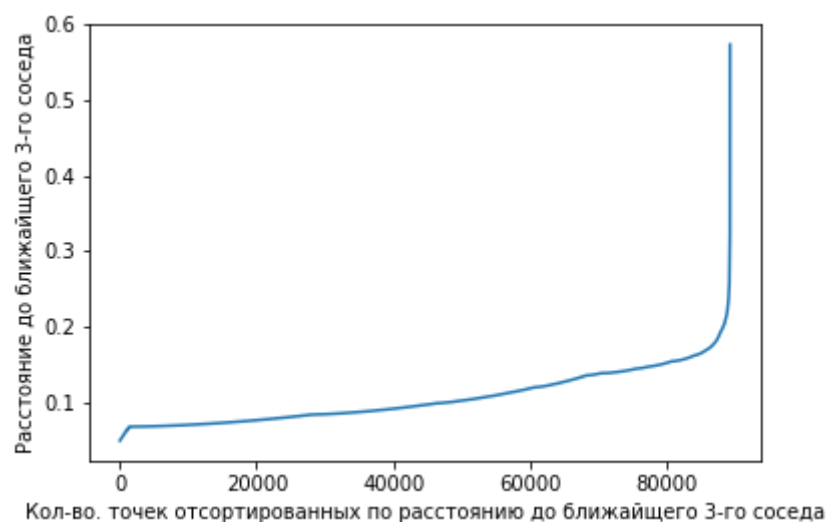


Рисунок 4.19 – График для оценки величины радиуса окрестности для признака *Stress*

Из графика видно, что начиная с определенного количества точек, у которых расстояние до k -го соседа меньше заданного радиуса окрестности, происходит резкий рост расстояния (0.22). Эта величина используется в качестве опорной. Максимальное значение для параметра *Stress* по предварительно проведенным экспериментам составляет 0.35.

В Таблице 4.7 представлены оптимальные значения метрик для данного алгоритма кластеризации.

Таблица 4.7 – Численные значения метрик и соответствующее количество кластеров для признака *Stress* (алгоритм *DBSCAN*)

Метрика	Значение	Количество кластеров	Количество точек из экспертной выборки
c_k	16	73 ($eps=0.22$, $minPts=8$)	9
c_m	9	73 ($eps=0.22$, $minPts=8$)	9
<i>VRC</i>	245.797	16 ($eps=0.26$, $minPts=8$)	5
<i>DB</i>	0.455	4 ($eps=0.35$, $minPts=3$)	2
<i>SWC</i>	0.417	3 ($eps=0.35$, $minPts=7$)	1

Анализ результатов кластеризации алгоритмом *DBSCAN* показал, что помимо центров кластеризации, совпадающих (с заданной погрешностью) с точками из экспертной выборки, есть довольно много центров, которые находятся на небольшом от них отдалении (в радиусе 4–6 метров). Эти центры образуют скопления, позволяющие выявить области, на которые следует обратить внимание при анализе. Также необходимо отметить, что количество ложных срабатываний, когда центр кластеризации находится на удалении более 6–7 метров от точки, отмеченной экспертом, составляет, как правило, не более 20 % от общего количества центров. В итоге по метрике *VRC* можно получить оптимальный результат с подтверждением его пригодности в процессе дальнейших практических исследований.

На Рисунках 4.20 и 4.21 представлены расположения центров кластеризации, найденные алгоритмом *DBSCAN*, при ($\epsilon=0.22$, $\minPts=8$) и ($\epsilon=0.26$, $\minPts=8$). Первая группа соответствует лучшему варианту согласно метрикам c_k и c_m , вторая выбрана по метрике *VRC*.

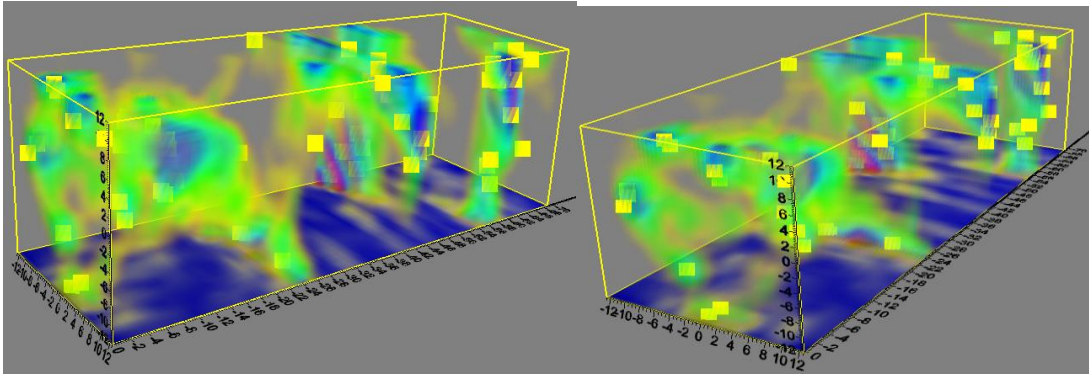


Рисунок 4.20 – Алгоритм *DBSCAN*. Признак *Stress*. Значения параметров:

$\epsilon=0.22$, $\minPts=8$

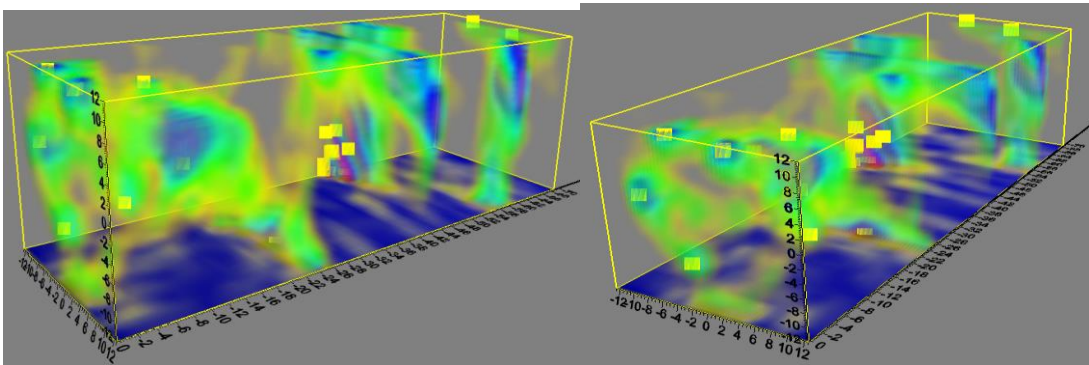


Рисунок 4.21 – Алгоритм *DBSCAN*. Признак *Stress*. Значения параметров:

$\epsilon=0.26$, $\minPts=8$

Работа с признаком *Water*. Для оценки ϵ построен график (Рисунок 4.22), аналогичный тому, что был создан для признака *Stress*.

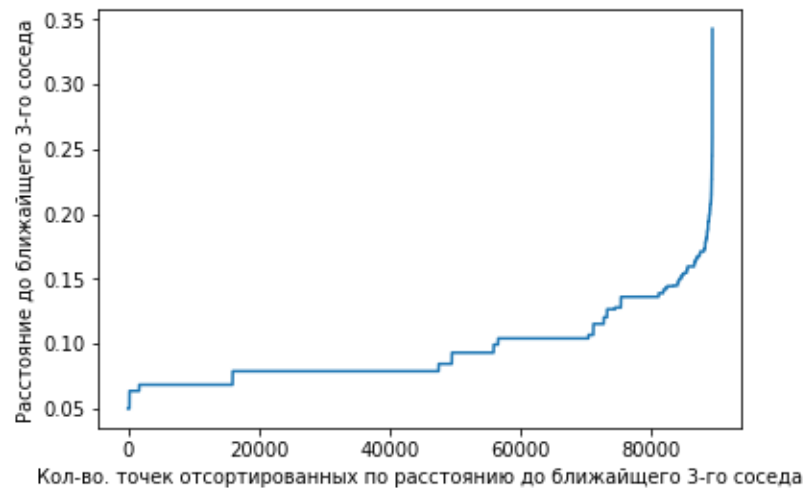


Рисунок 4.22 – График для оценки величины радиуса окрестности для признака *Water*

Из графика определяется минимальное значение радиуса окрестности по методике, изложенной для признака *Stress* (0.18). Максимальное значение $esp=0.29$. Полученные численные значения метрик представлены в Таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Численные значения метрик и соответствующее количество кластеров для признака *Water* (алгоритм *DBSCAN*)

Метрика	Значение	Количество кластеров	Количество точек из экспертной выборки
c_k	14	77 ($eps=0.2$, $minPts=4$)	2
c_m	2	24 ($eps=0.24$, $minPts=8$)	2
VRC	551.665	6 ($eps=0.29$, $minPts=7$)	1
DB	0.368	6 ($eps=0.29$, $minPts=7$)	1
SWC	0.733	6 ($eps=0.29$, $minPts=7$)	1

Результаты кластеризации данных с признаком *Water* алгоритмом *DBSCAN* аналогичны тем, что получены для признака *Stress*: вместе с центрами, совпадающими с экспертной выборкой. Есть центры, формирующие скопления возле них. На Рисунке 4.23 представлены распределения центров кластеризации при

($\text{eps}=0.24$, $\text{minPts}=8$), что соответствует лучшему результату по метрике s_m . На Рисунке 4.24 – оптимальный результат по метрикам VRC , DB и SWC .

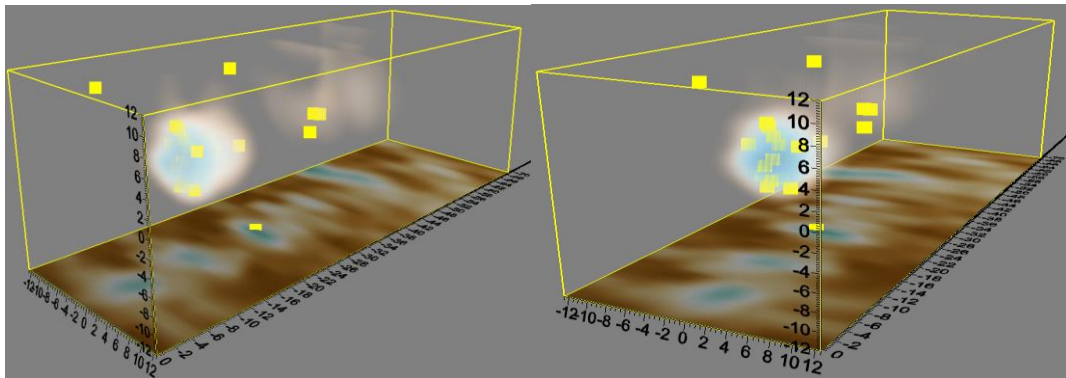


Рисунок 4.23 – Алгоритм *DBSCAN*. Признак *Water*. Значения параметров:
 $\text{eps}=0.24$, $\text{minPts}=8$

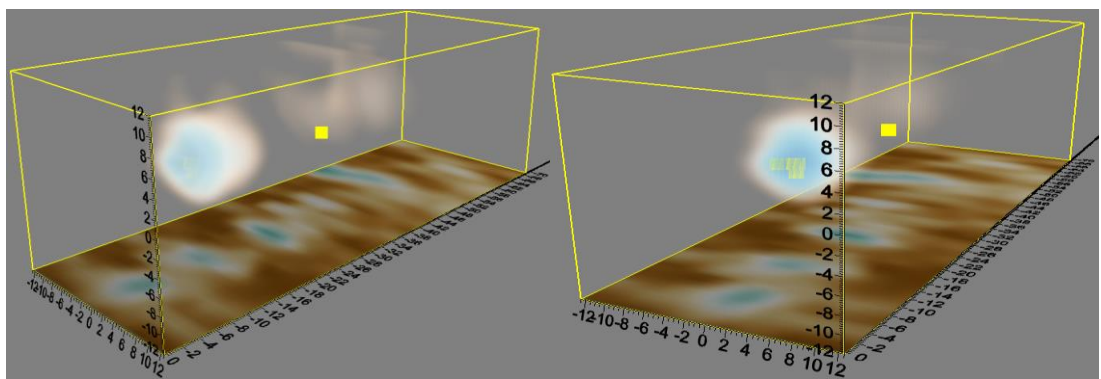


Рисунок 4.24 – Алгоритм *DBSCAN*. Признак *Water*. Значения параметров:
 $\text{eps}=0.29$, $\text{minPts}=7$

Ввиду того, что из анализируемых данных нельзя выборочно исключать объекты, а их количество в наборе составляет 89 250, при этом у каждого объекта имеется четыре признака, в анализ не попал ряд алгоритмов, таких как *Affinity Propagation*, *Spectral Clustering*, так как их сложность по памяти составляет $O(N^2)$ (объем памяти, который требуется для алгоритма, с ростом объема входных данных, в худшем случае растет по квадратичному закону (с точностью до константы)).

По полученным результатам можно сделать вывод, что наиболее результативным алгоритмом кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных в

системе «Микон-ГЕО» является *DBSCAN*. Центры кластеризации, получаемые с помощью него, в значительной своей массе ложатся либо в точки, отмеченных экспертом, либо рядом с ними на удалении 5–6 метров.

Использование рассмотренной в работе методологии позволяет применить алгоритмы кластеризации не только для задач получения и обработки сейсмических данных, но и для решения задач их визуализации и интерпретации образов, что в итоге позволит получить оперативные значения параметров горного массива, необходимые для решения задачи прогноза опасного состояния системы «градиент горного давления–газовый поток»

Блок «Ядро математической модели» и «Служба отчетов». Блок «Ядро математической модели» (Рисунок 4.25) выполняет расчет прогнозного значения величины метанообильности выработки по сейсмическим данным, полученным из системы «Микон-ГЕО», прошедших предварительную обработку в блоках АГК. Сбор данных», «ГЕО. Сбор данных» и «Обработка данных».

«Ядро математической модели» структурно можно разделить на три компонента:

- блок определения тренда CH_4 ;
- блок оценки состояния массива;
- блок прогноза метанообильности выработки.

«Блок определения тренда CH_4 » отвечает за анализ данных от системы «Микон-АГК» в части построения тренда текущей метанообильности выработки. На базе информации о текущем тренде и состоянии горного массива можно решать задачу прогноза и корректировать математическую модель, лежащую в ее основе.

«Блок оценки структуры и параметров НДС» строит график распределения зон дезинтеграции по направлению ведения горных работ. Эти данные являются опорными для определения величины прогнозного значения метанообильности.

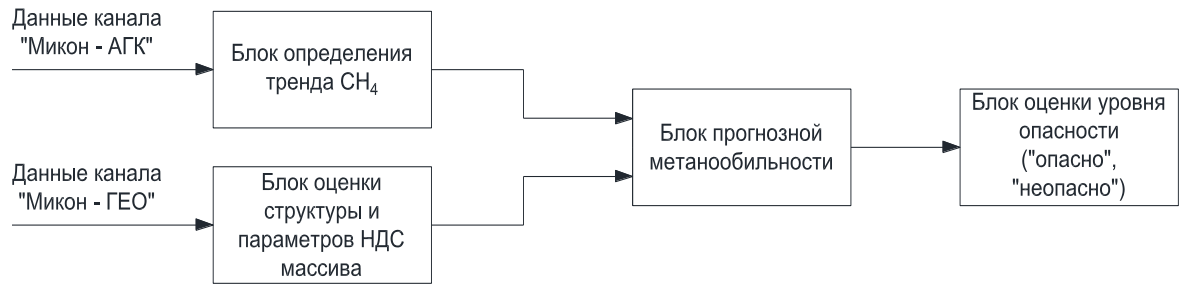


Рисунок 4.25 – Схема блока «Ядро математической модели»

«Блок прогнозной метанообильности» содержит в себе реализацию математической модели, описание которой представлено в Разделе 2. Эта модель описывает взаимосвязь текущей метанообильности и состояния массива. В результате получим прогнозируемую величину метанообильности, которую, с учетом текущей метанообильности лавы, можно использовать для определения уровня безопасности ведения горных работ.

Блок «Служба отчетов» предоставляет данные для подсистем визуализации данных и стыковки с другими системами автоматизации. Основное средство визуализации — это диспетчерский пункт, его внешний вид представлен на Рисунке 4.26.

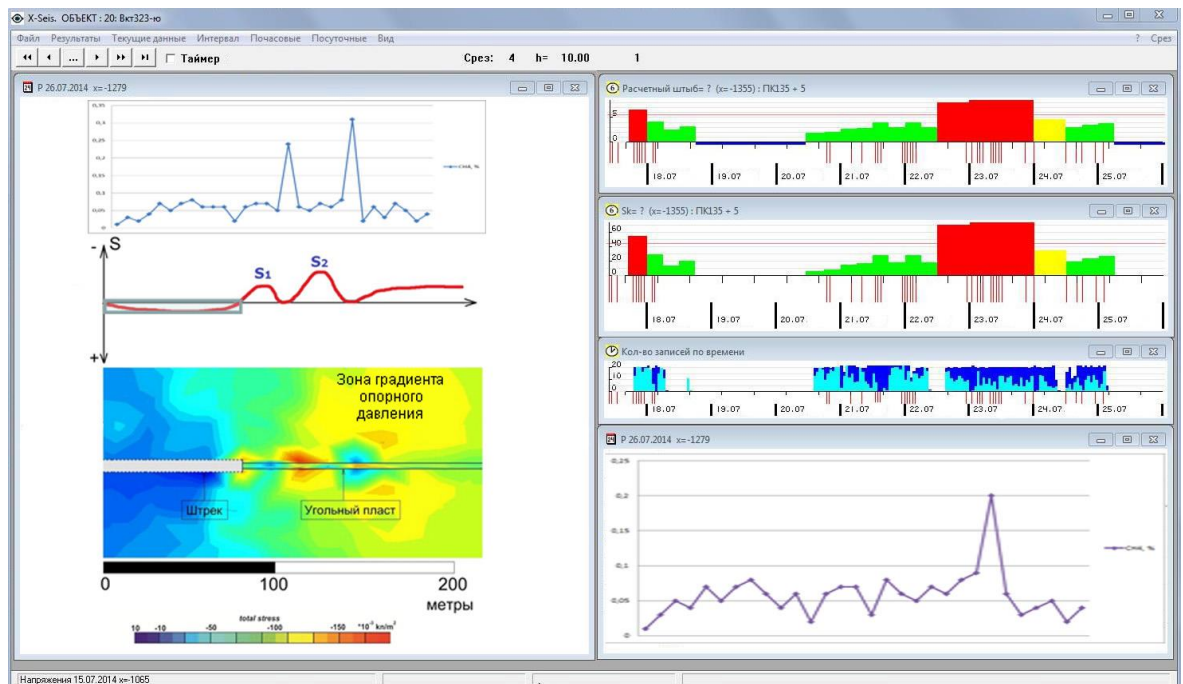


Рисунок 4.26 – Диспетчерский пункт блока «Служба отчетов»

Выводы

Обобщая содержание раздела 4, следует отметить, что в нем подробно рассмотрены все основные программно-технические принципы построения обоих функциональных каналов ГИС МИКОН (аэрологический и сейсмический). При этом выделены все три иерархических уровня структуры геоинформационной системы с оценкой места и роли каждого из них при решении основной ее задачи – оценки состояния безопасности горных выработок в процессе ведения горных работ, включая первичные источники информации, промежуточные узлы и, наконец, блок оценки уровня опасности горного массива в формате «опасно», «неопасно».

5 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИС МИКОН НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Введение

Методические и технологические элементы, положенные в основу разработки аппаратуры контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО», являющейся основной составляющей ГИС МИКОН, исследованы на статистически значимом уровне в период реализации геотехнического мониторинга строительства 9-ти автотранспортных тоннелей в г. Сочи (2010-2013 гг.) [73, 87]. Опыт и результаты, полученные в этот период, свидетельствуют о степени достоверности дистанционного обнаружения зон дезинтеграции горного массива на уровне 70-80 %. В последнее время (2018-2019 г.г.) система «Микон-ГЕО» в экспортном исполнении с названием TGS-360-Pro (Tunnel Geology Survey 360 Pro) функционирует в технологическом режиме в процессах геотехнического мониторинга строительства ряда тоннелей на территории КНР. По представленным китайской стороной материалам достоверность подтвержденного прогноза зон развития опасных инженерно-геологических процессов установлена на уровне 80-85%. При этом, дальность уверенного прогноза в условиях проходки тоннелей в карбонатных горных массивах карбонатного типа (карстовые полости с высокими водопритоками) составила 100 метров с ударным источником возбуждения (кувалда).

Последующие экспериментальные исследования в условиях рудников (СУБР, трубки «Мир» и «Интернационал») показали успешность прогноза зон нарушения сплошности горного массива тектонической, геодинамической и геомеханической (техногенной) природы в интервале глубин ведения горных работ 200-1000 метров.

Отметим особым образом, что условия применения ГИС МИКОН в условиях тоннелей и рудников существенно отличаются от условий угольных шахт. В тоннельных и рудничных условиях исследования горного массива выполняются в

периодическом режиме и за редким исключением не требуют аэрогазового контроля. Технологии проходки при строительстве тоннелей ориентированы на сравнительно невысокие темпы подвигания забоя по ново-австрийской технологии (2 - 4 метра в сутки), в темпы проходки штреков различного типа в угольных шахтах могут достигать 30 - 40 метров в сутки [16, 73, 76, 78]. Такие скорости проходки в короткое время переводят горный массив со слоистой структурой в чрезвычайно неустойчивое состояние с развитием динамических процессов по неочевидным сценариям, провоцируемых высокими градиентами напряжений на мало-значимых нарушениях сплошности структуры массива и неоднородностях литологического типа.

Соответственно, технические и программные средства обсуждаемой системы в условиях ведения горно-технических работ на угольных шахтах должны обеспечивать практически непрерывный прогноз устойчивости массива на дистанцию не менее 100 метров в реальном «on-line» технологическом режиме.

5.1 Функциональные испытания комплекса «Микон-ГЕО» на шахте «Северная» (ОАО «Воркутауголь»)

«В соответствии с утвержденной программой испытаний аппаратура «Микон-ГЕО» была установлена 16.08.13 на участке № 3 подготовительного штрека № 223-ю с целью обеспечения непрерывного сейсмического контроля структуры и напряженно-деформированного состояния горного массива в ближней зоне забоя выработки в процессе ведения проходческих работ. С момента установки, аппаратура функционировала в непрерывном режиме до 8.01.14 г. по трассе штрека, протяженностью около 600 м» [47, 53].

«Перед испытаниями поставлены следующие основные задачи:

- установить надежность функционирования в постоянном режиме регист-

рации сейсмического волнового поля подземных блоков системы (геофоны ИПСМ в количестве 6 шт. и сейсмический контроллер ИПКС);

- установить фактическую работоспособность и стабильность функционирования системы передачи информации (СПИН) от ИПКС к наземному компьютеру;

- оценить методический уровень реализации и обеспечения процесса сейсмического контроля структуры и параметров состояния устойчивости горного массива в технологическом режиме производства проходческих работ на шахте «Северная»» [47, 53].

В соответствии с поставленными задачами, далее приводятся результаты настоящих функциональных испытаний.

На Рисунке 5.1 показаны «элементы аппаратуры и размещение основных блоков системы на борту штрека. В состав аппаратных средств подземной части входят: искробезопасные полевые сейсмические модули ИПСМ (геофоны), искробезопасный полевой контроллер синхронизации ИПКС, шахтные источники питания ШИП с трансформаторными блоками БТ-1, система передачи информации СПИН, комплектные кабели питания и связи.

Блоки питания и контроллеры СПИН комплекса удалены от ближайшего геофона (ИПСМ № 1) на 80 метров. Общая длина линии связи от подземных блоков до диспетчерского компьютера составила 7500 метров. Геофоны располагались позади проходческого комбайна на правом борту штрека в одну линию, при этом ИПСМ № 6 в начальном положении находился в 20-ти метрах от забоя, остальные – через 10 метров друг от друга на одной горизонтальной линии до ИПСМ № 1. Установка ИПСМ осуществлялась в шпуров глубиной 50 см с диаметром бурения 43 мм» [47, 53].

«При интенсивном отжиме угля в борту штрека крепление ИПСМ осуществлялось стальными хомутами на анкер с заглублением в борт на глубину не менее 1-го метра (Рисунок 5.1). По мере подвигания забоя расстановка геофонов не меняла своего положения до 20-30 метров проходки (5 - 7 суток). Далее, расстановка смещалась до максимального сближения с проходческим комбайном. За

весь период испытаний с 16.08.13 по 8.01.14 (145 суток) забой штрека подвинулся с пикета 1300 до пикета 1900 (общий интервал проходки с сейсмическим контролем составил 600 метров)» [47, 53].

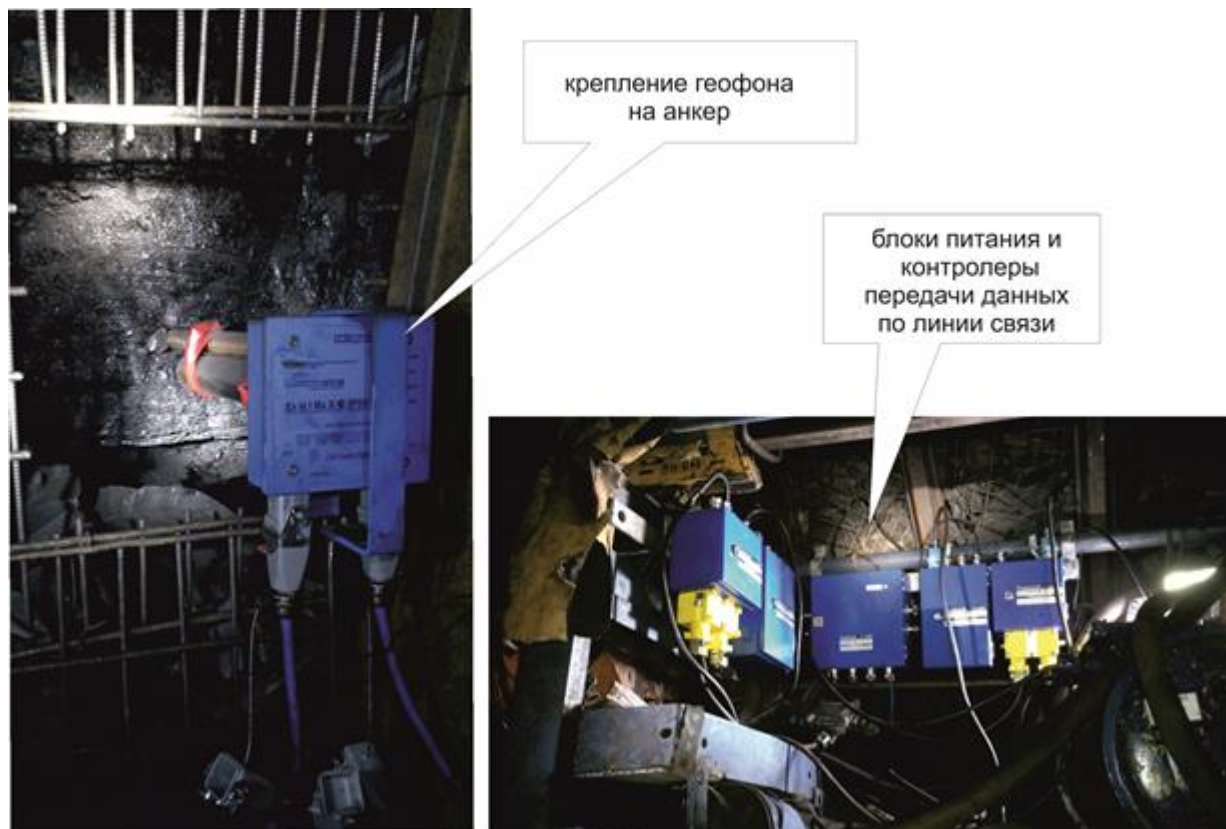


Рисунок 5.1 - Крепление геофонов ИПСМ (слева) и вспомогательных блоков на борту штрека [47, 53]

Алгоритм управления системой с наземного компьютера предусматривал полностью автоматизированный режим функционирования за исключением операции перестановки геофонов и перезапуска программы управления с новыми координатами геофонов. В период фиксированного положения геофонов система осуществляла непрерывный круглосуточный процесс записи сейсмических сигналов в базу данных диспетчерского компьютера (с интервалом 2-3 минуты) с последующей ручной передачей этих данных через электронную почту для обработки специалистами ООО «ИНГОРТЕХ».

В технологическом режиме применения системы процесс обработки и прогноза развития опасной ситуации производятся автоматически по установленным

в процессе функциональных испытаний сценариям с вариантами предупреждения диспетчера, который при появлении какого-либо предупреждения должен был вызвать специалиста для анализа ситуации и принятия организационных решений, предусмотренных регламентом на данной шахте.

С точки зрения достижения максимальной эффективности апертуры поляризованного приема сигналов отраженных волн в активном режиме и сигналов сейсмической эмиссии, принцип размещения геофонов в одну линию не самый желательный вариант по следующим причинам:

- наилучшее пространственное сейсмическое разрешение волнового поля достигается только в правой полусфере пространства массива;
- в левой полусфере возникает несколько «теневых» сегментов пространства с ухудшением разрешающей способности;
- конус сейсмического обзора впереди забоя сокращается по дальности разрешения за счет значимого удаления последнего ИПСМ от первого (50 метров для «слабых» сигналов достаточно критичное расстояние).

Названные недостатки устраняются в существенной степени при параллельном размещении 3-х ИПСМ на правом борту и 3-х на левом с перебросом соединительного кабеля через верхнюю зону арки крепи (пространственная апертура). Естественно, пространственная апертура приема с технологической точки зрения более сложна, чем линейная и проблематична по ограничениям к доступу левого борта, нагруженного оборудованием обеспечения проходки, что и повлияло на решение по применению линейной апертуры приема в рассматриваемых условиях испытаний.

На стадии обработки волнового поля отмеченные выше методические ограничения компенсируются за счет применения ряда процедур деконволюции сигналов в контуре 3D массива сейсмического обзора. Кроме того, принцип применения процедур прогноза параметров устойчивости горного массива основан на интегрировании всего сейсмического параметрического массива с трансформацией в 2D-графики целевых оценок по направлению оси штрека (график градиентов

давления в усл. ед, график давления в усл. ед, график удароопасности в литрах штыба и т. п.).

Одним из важных условий обеспечения качества регистрации волнового поля является своевременная перестановка геофонов по мере подвигания забоя штрека. Не допускается отставание ИПСМ (ближнего к забою) более чем на 30-40 метров от груди забоя. К сожалению, такие и более отставания геофонов в период испытаний неоднократно происходили по разным организационно-техническим причинам, что, соответственно, повлияло далее на качество регистрируемых параметров.

По существу, вышеназванные методические принципы исчерпывают требования к практической организации регистрации сейсмических сигналов по технологии применения системы непосредственно в условиях забоя подготовительного штрека.

Фактическая инструкция по обслуживанию подземных блоков системы (коррекция установки ИПСМ, последовательность и момент перемещения расстановки и т. п. методические элементы) прописываются в сценариях программного обеспечения ГИС МИКОН в период пуско-наладочных работ на конкретном объекте и, далее, по мере функционирования системы в рабочем режиме, на монитор диспетчера своевременно выводятся корректирующие сообщения и распечатываются в формате регламентного документа для исполнения персоналом на участке работ. При этом протокол функционирования системы в целом по согласованному с администрацией шахты формату ведется в непрерывном, защищенном от внешнего вмешательства режиме и по запросу выводится на печать.

В штатном круглосуточном режиме функциональных испытаний запись сейсмограмм производилась в базу данных компьютера диспетчера через каждые 2 - 3 минуты с фиксированием абсолютного времени регистрации. Всего в период испытаний записано около 30000 сейсмограмм. В технологическом режиме проходки участка № 3 ВШ 223ю комбайн воздействовал на массив в течение 30 - 50 мин в сутки с длительными перерывами на остальные виды работ, поэтому сейсмограммы активного режима локации массива составили около 10 % от все-

го объема зарегистрированной информации, что в среднем составляло 1 - 2 полноценных режима локации за одну смену.

В остальное время система с тем же интервалом 2 - 3 мин регистрировала все сейсмические события в пассивном режиме. На Рисунке 5.2 приведено текущее состояние монитора компьютера диспетчера в режиме управления системой и в вариантах режима специалиста.

Структура окна режима специалиста формируется средствами системы программного обеспечения в период пуско-наладочных работ на конкретном участке шахты в виде серии содержательных панелей с отображением результатов непрерывного анализа сейсмических данных в активном и пассивном режимах локации. Для рассматриваемого варианта применения системы предусмотрен вывод на экран следующих панелей (Рисунок 5.2):

- текущая сейсмограмма (панель «исходные сейсмограммы»);
- обобщенный спектр по сейсмограмме (панель «спектр»);
- статистика по всем сейсмограммам за установленный период (часы, сутки, недели) с автоматическим определением факта воздействия на забой (панель «кол-во записей по времени»);
- статистика сейсмических событий, зарегистрированных в отсутствие воздействия комбайна на забой (панель «кол-во событий по времени»);
- графики интегральных целевых параметров («напряжение», «события» или энергия сейсмической эмиссии, степень удароопасности приведенная к литрам штыба и т. п.);
- параметрическое сечение 3D массива сейсмического обзора в моменты функционирования комбайна (горизонтальное или вертикальное) с типовым размером 100x200 метров с отметками положения геофонов и забоя в маркшейдерских координатах (номера пикетов) [47, 53, 71].

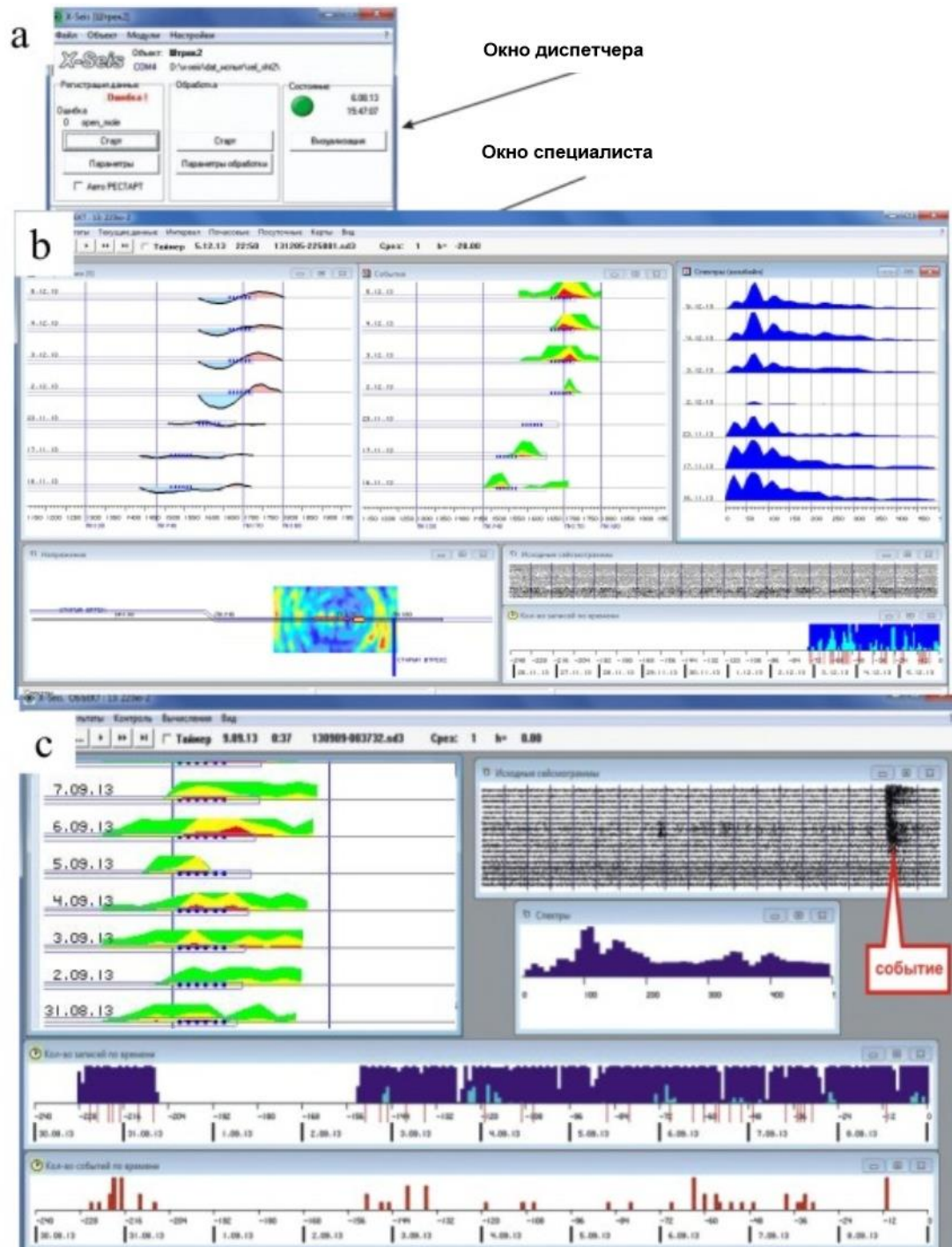


Рисунок 5.2 - Окно монитора диспетчера (а) и специалиста в вариантах активного (b) и пассивного (с) режимов

В период пуско-наладочных работ проводится обучение персонала шахты (диспетчера и специалиста-геофизика) всем необходимым функциям сопровождения процесса сейсмического контроля, распечатывается и утверждается адми-

нистрацией шахты методика и регламент всех видов работ с учетом согласованного сценария взаимодействия ответственного персонала на основе схемы: участок-диспетчер-специалист. Такой подход к управлению и эффективного применения обсуждаемой системы контроля представляется наиболее целесообразным, т. к. геологические, геодинамические и технологические ситуации в каждой конкретной выработке существенно различаются и, следовательно, автоматизированный процесс прогноза развития опасных ситуаций предусмотрен и возможен, но требует тщательной начальной «настройки» всей системы в целом. Процесс такой «настройки» целесообразно осуществлять с авторской поддержкой сервисной службы ООО «ИНГОРТЕХ».

Приведем основные результаты испытаний одного из двух каналов ГИС МИКОН – сейсмического канала «Микон-ГЕО», полученные за весь период ее непрерывного функционирования в процессе проходки штрека на участке № 3 ВШ 223ю пласта IV.

В окне «Спектры» Рисунка 5.2 отображаются интегральные амплитудно-частотные характеристики сейсмограмм, зарегистрированных в заданных программой интервалов времени (минуты, часы, сутки). В данном примере такой интервал установлен в одни сутки, что позволяет в целом оценивать устойчивость функционирования комплекса ежедневно (через 2 - 3 метра проходки). Вид спектров в данных условиях свидетельствует об устойчивой энергетической структуре интегрального волнового поля на всех значимых частотах (активного и пассивного режимов регистрации совместно) в диапазоне частот 10 - 300 Гц. Технические помехи от вспомогательного оборудования сосредоточены в диапазоне 10 – 100 Гц с максимумом на 60 - 70 Гц. Полезный частотный диапазон спектра сигналов отраженных волн, порожденных вибро-импульсным воздействием ротора комбайна, сосредоточен вблизи частотной гармоники 150 Гц (длина волны около 3 метров), что вполне можно считать удовлетворительным фактором по селекции сигналов отраженных волн и разрешающей способности режима активной локализации – 1 метр по пространству.

Энергетический уровень воздействия комбайна фиксируется в нижнем поле монитора «Кол-во записей по времени» светло-голубым цветом, а темно-синим цветом отображается общее количество сейсмограмм, занесенных в базу данных. Таким образом, представляется возможным анализировать полную статистику основных режимов проходки и контролировать с достаточно высокой точностью текущее состояние процесса ведения подземных работ. Пропуски записей фиксируются нулевыми значениями в момент потери связи между подземными и наземными блоками системы или выхода из рабочего режима какого-либо из подземных блоков, что отображается на экране диспетчерского монитора и требует вмешательства технического персонала.

На Рисунке 5.3 приведена «серия типичных сейсмограмм, регистрируемых в пассивном режиме проходки (отсутствие воздействия комбайна на забой). Отметим ряд следующих важных и регулярных особенностей поля сейсмической эмиссии горного массива:

- импульсы волнового пакета сейсмической эмиссии в пассивном режиме обладают устойчивой поляризацией SV и SH – типов (поперечные волны);
- амплитудно-частотный спектр импульсов эмиссии устойчив при любом уровне технических помех с максимумом полезной энергии на частоте 300 Гц, что позволяет безошибочно реализовать алгоритм селекции волн, порожденных сейсмическими эффектами реакции массива в зоне опорного давления;
- тип поляризации волнового пакета эмиссии и амплитудно-частотный спектр импульсов чрезвычайно стабилен для любой энергии или дальности источника эмиссии» [71].

«Таким образом, регистрация сейсмической эмиссии массива в рассматриваемых условиях шахты «Северная» обеспечивает принципиально независимый от активного режима локации способ оценки и контроля изменения сейсмоэнергетического состояния горного массива в ближней зоне забоя выработки. Заметим при этом, что данный вариант дискретного процесса регистрации волнового поля (2 сек запись, 2 - 3 минуты передача с обработкой) в полной мере не обеспечивает оценку сейсмоэнергетического состояния массива» [47, 53, 71]. С учетом полу-

ченного опыта, новая модификация ИПСМ и ИПКС с увеличенным буфером памяти реализует принцип «качелей», что обеспечивает непрерывный процесс регистрации волнового поля при скорости передачи информации по шахтному кабелю на уровне не менее 2 мб/сек.

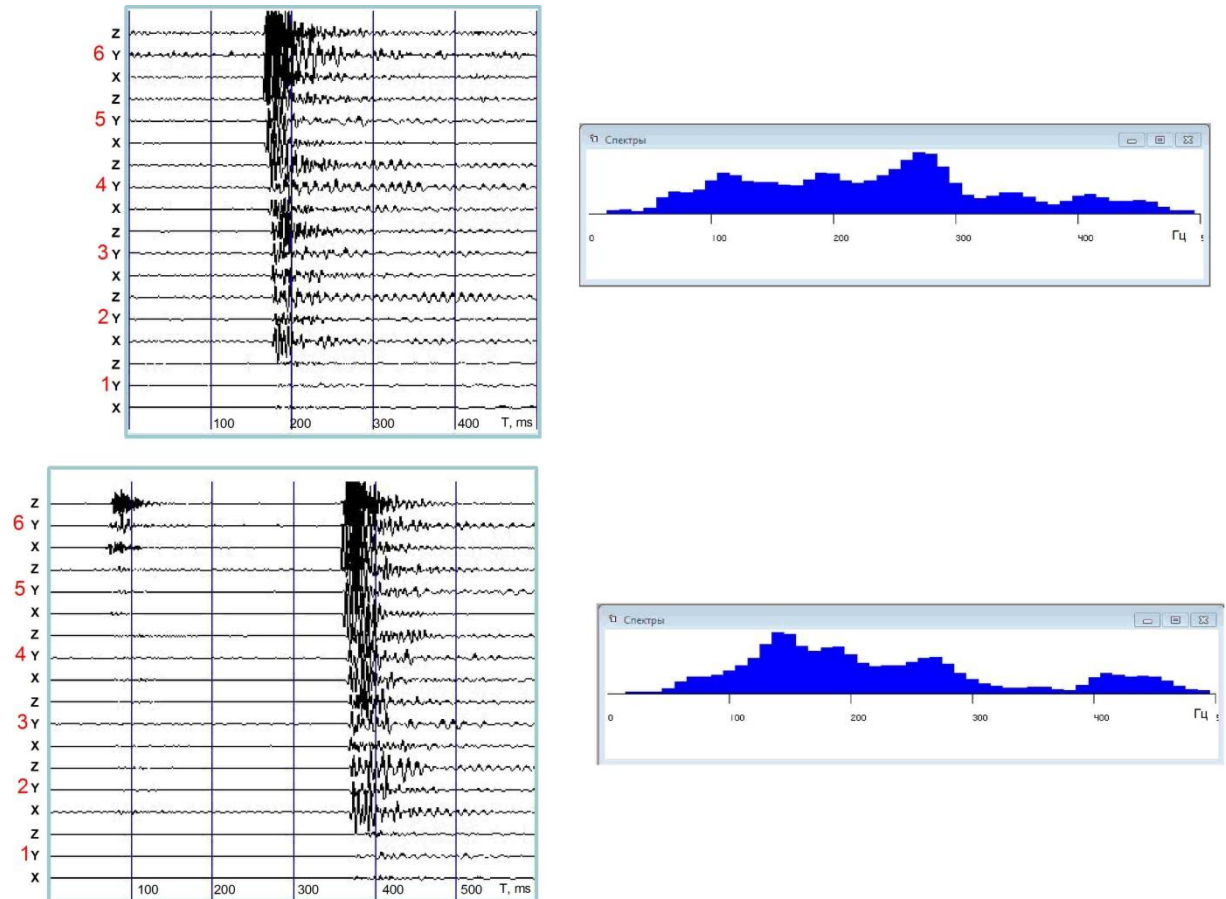


Рисунок 5.3 - Примеры регистрации сейсмических сигналов в пассивном режиме и их спектры

«В целом, вся подземная часть системы сейсмического контроля функционировала без технических сбоев за весь период испытаний, зарегистрировано более 30000 сейсмограмм (около 8000 сейсмограмм в активном режиме, остальные – в пассивном) и весь комплекс сохранил свою полную работоспособность после завершения программы испытаний» [47, 53, 71].

На Рисунке 5.4 показан фрагмент 3D горно-геологической модели (формат системы Micromain) по участку № 3 шахты «Северная», в пределах которого расположен штрек 223ю. В базу данных этой модели в процессе контроля загружаются блочные параметрические структуры (массивы сейсмических и геомеханических параметров), графики прогноза уровня удароопасности и данные на только системы «Микон-ГЕО», но и других систем (ГИТС, АГК и т. п. информация).

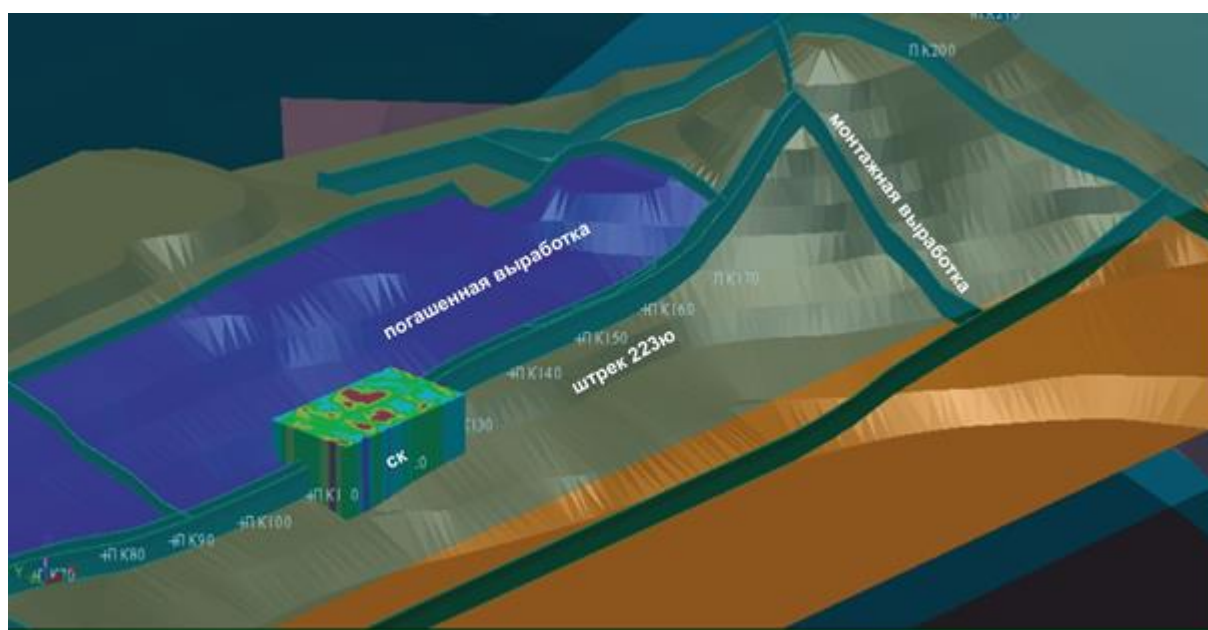


Рисунок 5.4 - Горно-геологическая модель участка № 3

Созданная модель позволяет на уровне численного моделирования по стандартизированной в мировой практики горного дела программной технологии Plaxis 9.3 или FIDESYS [13, 14, 47, 67, 69] представить различные аномальные геомеханические ситуации, которые могут теоретически возникать по трассе продвижения забоя контролируемого штрека в тех или иных условиях.

Классическая теоретическая ситуация формирования и развития зоны опорного давления в окрестности забоя подготовительного штрека в модели угольного пласта для варианта однородной среды показана на Рисунке 5.5.

В данной ситуации зона опорного давления формируется в области с диаметром порядка 50 метров (фрагмент «а», Рисунок 5.5). Если детализировать ситуацию вблизи забоя и получить дифференциальный параметр – градиент давле-

ния dS , то мы увидим, что область градиента давления имеет предсказуемый ритмичный характер нарастания и убывания в локализованных зонах, пропорциональных толщине пласта [12].

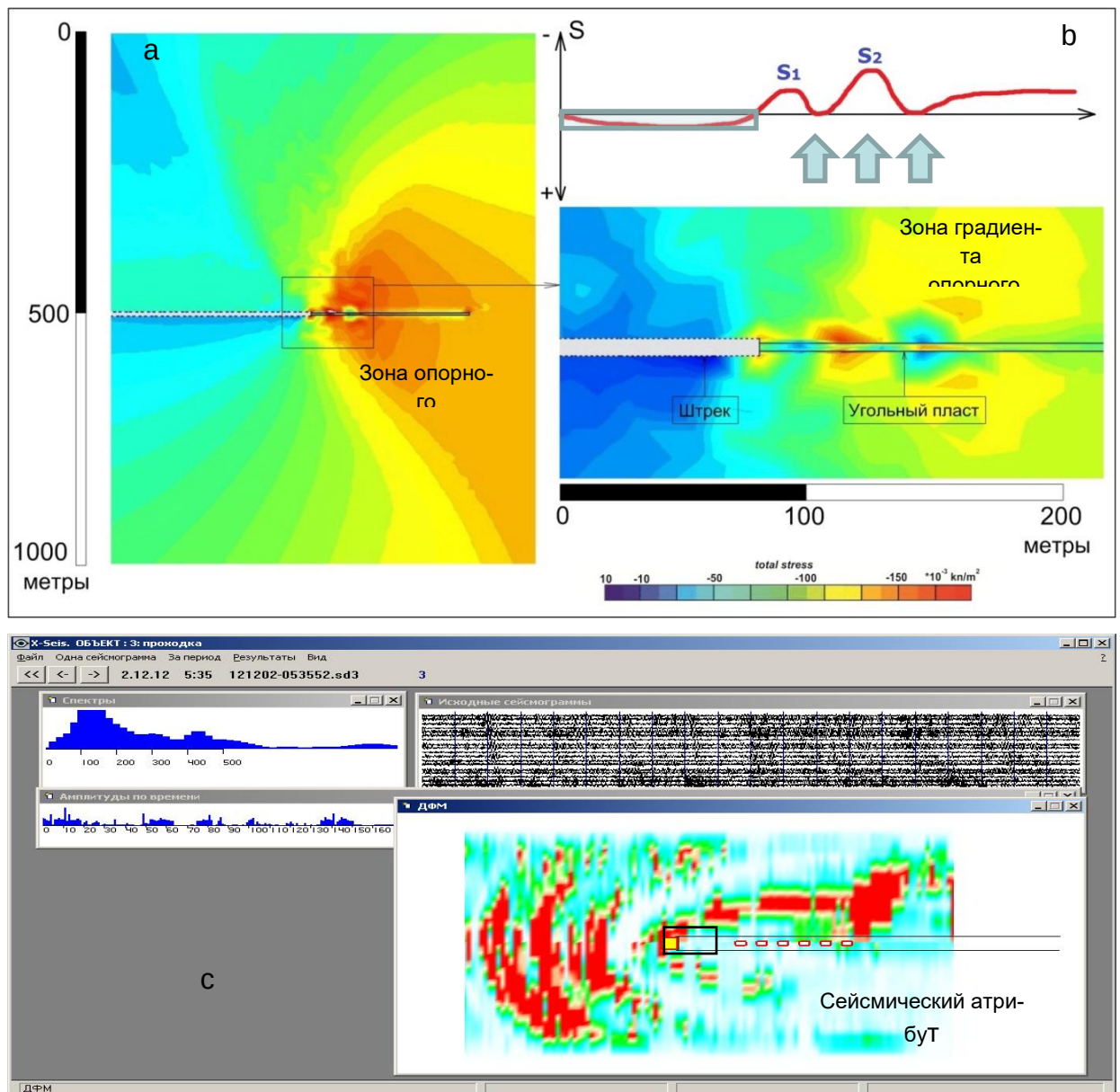


Рисунок 5.5 - Модель формирования зоны опорного давления в окрестности забоя штрека, пройденного по угольному пласту толщиной 4 метра в однородной среде (фрагмент «а»), градиента опорного давления (фрагмент «b») и типовое горизонтальное сечение параметрического куба сейсмического обзора по результатам локации на забое подготовительного штрека (фрагмент «с»)

Согласно приведенных в разделе 3 данных тензор «малых» напряжений, создаваемых сейсмической волной в среде, функционально связан с тензором «больших» напряжений и самый значимый фактор в этой связи – градиенты компонент напряжений. Иными словами, сейсмический атрибут S , найденный по амплитудно-частотной трансформации поля сигналов отраженных волн [47, 63]), соответствует относительным оценкам градиента горного давления. Именно это представление о природе сейсмического атрибута вполне подтверждается фрагментом «с» Рисунка 5.5 (три контрастные аномальные зоны сейсмического атрибута впереди забоя штрека соответствуют трем локальным зонам градиента опорного давления на фрагменте «b»).

Таким образом, далее будем полагать, что принятая технология трансформации поля сигналов отраженных волн позволяет получить оценку относительных значений градиента горного давления. Соответственно, интеграл, вычисленный по этим градиентам, позволяет получить относительные оценки горного давления. Естественно, все названные относительные оценки необходимо привести к некоторой шкале, регламентированной в практике разработки угольных месторождений для принятия решений по оценке степени риска развития опасных геодинамических явлений. Очевидно так же, что универсальной шкалы не существует в силу большого разнообразия геологических, геодинамических, техногенных и иных условий.

По существу, в основную задачу функциональных испытаний системы «Микон-ГЕО» на шахте «Северная» входило, прежде всего, количественное отождествление сейсмического атрибута S со шкалой удароопасности, измеряемых в объемных единицах (литрах) штыба. Для этой цели необходима репрезентативная выборка значений оценок по выходу штыба на забое штрека и соответствующая выборка сейсмического атрибута S . При этом необходимо учитывать, что атри-

бут S определяется на некоторой дистанции от забоя в зоне его влияния (зоне опорного давления), а штыб в непосредственной близости от груди забоя. Другими словами, в тот момент, когда массив уже неизвестным образом «сбросил в за-

бой» часть давления, которое в относительном виде должно быть более тесно связана с атрибутом S на удалении от забоя. Тем не менее, другого способа поиска связи атрибута S с объемом штыба не существует.

По трассе проходки штрека 223ю с сейсмическим контролем (около 600 метров) было выполнено порядка 175 определений удароопасности по методу выхода штыба. На Рисунке 5.6 приведен график усредненных значений объемов штыба – Q (среднее значение по серии шпуров на забое) по трассе проходки в маркшейдерских координатах, а на Рисунке 5.7 приведен график сейсмического атрибута S в тех же координатах. Приведенные графики не подвергались никаким трансформациям («чистке») и, тем не менее, вполне очевидно достаточно тесное сходство их структуры.

На Рисунках 5.8 и 5.9 показаны графики тех же параметров, но выстроенных по порядковым номерам измерений (все пропущенные интервалы измерений по атрибуту и штыбу удалены) и после применения медианной фильтрации. Как видим, корреляция сопоставляемых величин весьма тесная, что подтверждается Рисунками 5.10 и 5.11, на которых показано корреляционное поле $Q \div S$ и результат сопоставления измеренных значений Q и ее расчетных значений как функции атрибута S по установленному уравнению связи.

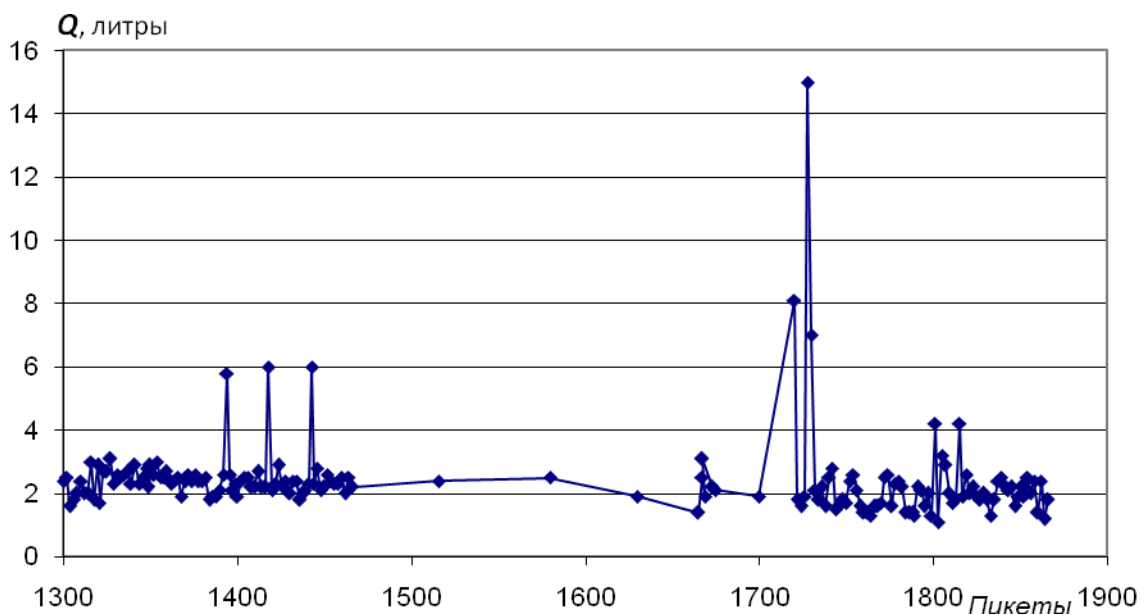
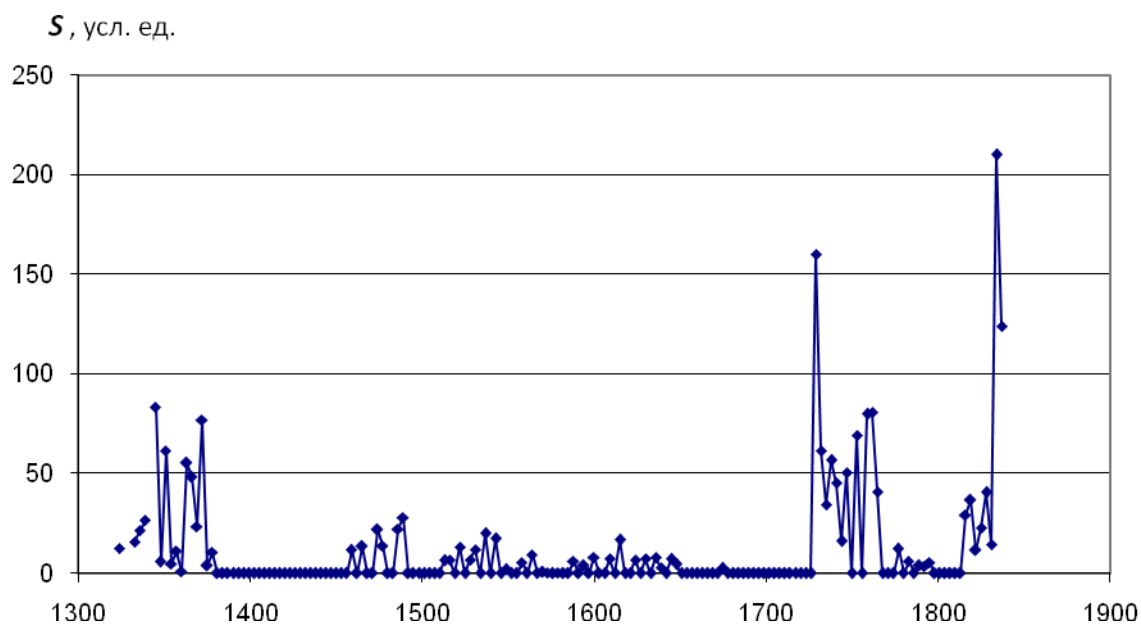
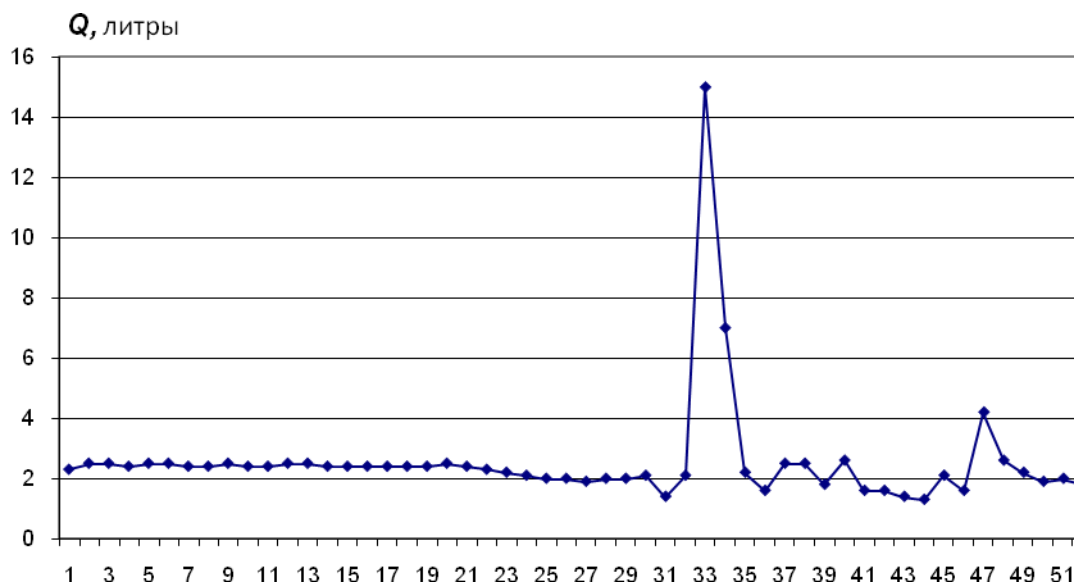


Рисунок 5.6 - Объем выхода штыба по трассе проходки штрека 223ю

Рисунок 5.7 - Сейсмический атрибут S по трассе проходки штрека 223юРисунок 5.8 - График объема выхода штыба Q по порядковым номерам измерений

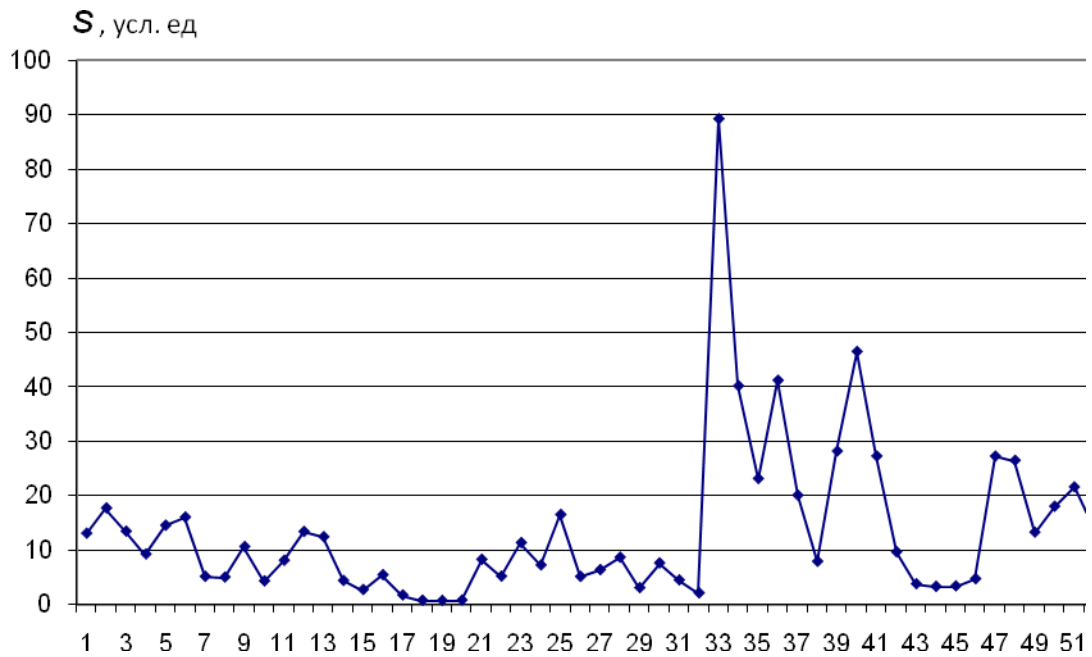


Рисунок 5.9 - График сейсмического атрибута S
по тем же порядковым номерам измерений выхода штыба

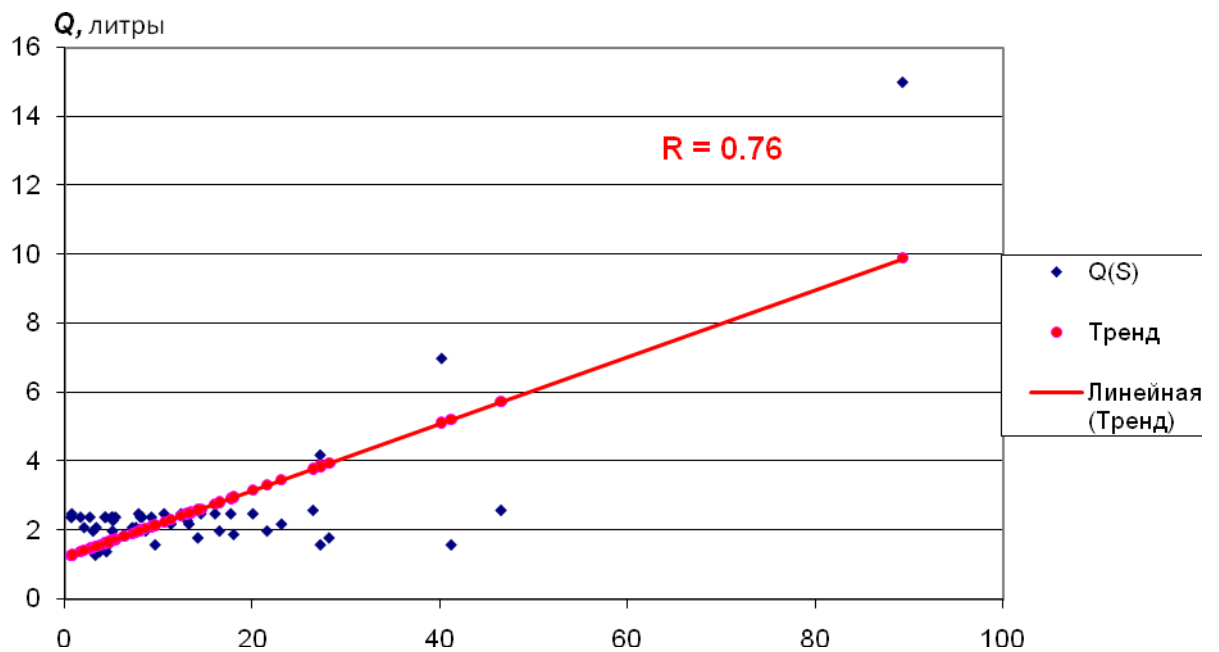


Рисунок 5.10 - Поле значений $(Q \div S)$ и тренд

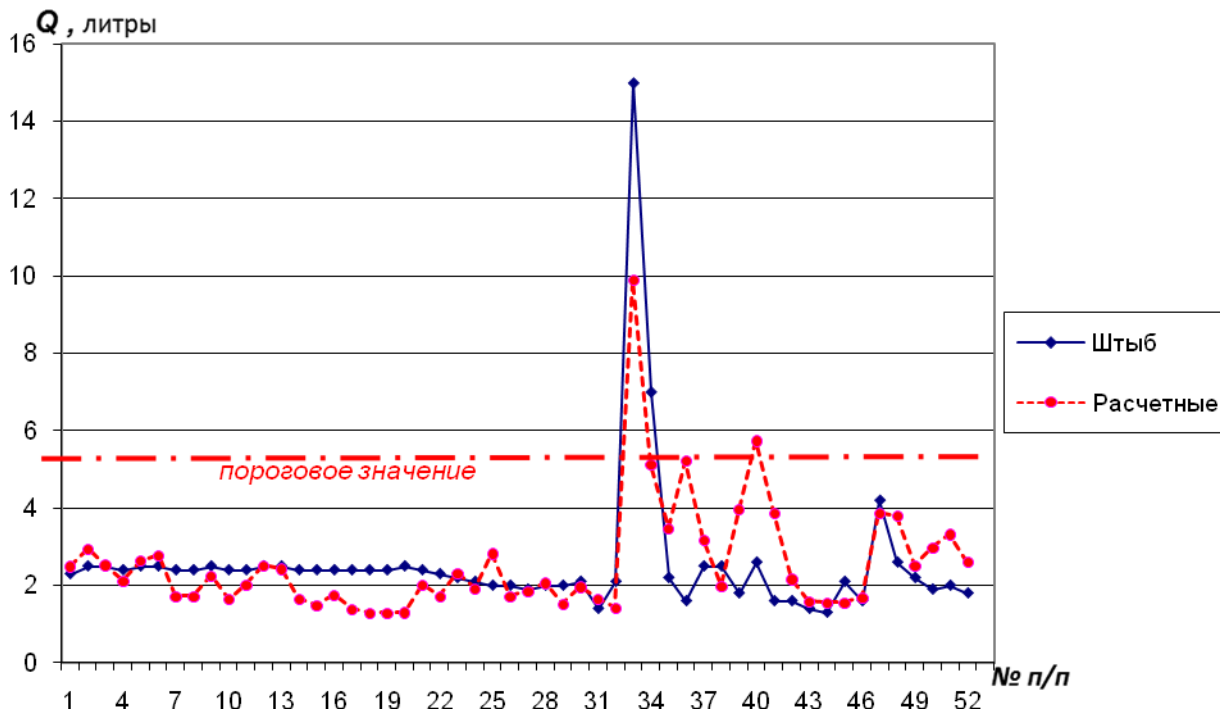


Рисунок 5.11 - Измеренные и расчетные значения объема штыба как функции сейсмического атрибута по порядковым номерам измерений

Таким образом, в результате проведенного анализа получена связь сейсмического атрибута S с объемом выхода штыба Q в виде:

$$Q_s = 0.1 S + 1.2m \quad (5.1)$$

При условии, что сейсмический атрибут нормирован к диапазону:

$$0 < S < 100 \text{ усл. ед.} \quad (5.2.)$$

Коэффициент m в данном соотношении равен единице, но далее может быть изменен с учетом новых условий применения.

Коэффициент корреляции в этом уравнении $r = 0.76$, соответственно, уровень детерминации составил около 70 %. Другими словами, на 70 % найденное уравнение связи объективно отражает реально существующую зависимость сейсмического атрибута и объема штыба от величины опорного давления. Остальные 30 % относим к влиянию неопределенных (неучтенных) факторов.

На Рисунке 5.12 приведены сечения 3D массива в исходных амплитудах и тех же сечений комплексного сейсмического атрибута S , по которому осуществлялся расчет прогнозного объема выхода штыба Q_s по соотношению (5.1). Прогноз выполнялся на дистанцию до 100 метров вперед. Здесь же показан график прогнозных значений Q_s на этот интервал. Данная ситуация соответствует положению забоя за 20 метров до его встречи с погашенной выработкой. Как видим, зона встречи отобразилась аномальным прогнозом с выходом за критический уровень в 5.5 литров, что дает основание показать этот дискрет графика прогноза красным цветом. Желтый цвет на данном графике соответствует близости значения к критическому уровню, зеленый – к фоновому уровню удароопасности (порядка 2 - 3 литра). Красная пунктирная линия на графике соответствует 5.5 литра сопоставления прогнозного графика удароопасности по комплексному сейсмическому атрибуту S и графика измеренных значений выход штыба. В целом представляется возможным утверждать, что сопоставляемые графики не противоречат друг другу и с определенной степенью вероятности можно принять испытываемую технологию сейсмического контроля на основе аппаратуры «Микон-ГЕО» как достоверную.

По результатам функциональных испытаний аппаратуры «Микон-ГЕО» с учетом всех выше сделанных замечаний и предложений можно сформулировать следующие основные выводы:

- подземные блоки ИПСМ и ИПКС функционируют устойчиво, без сбоев;
- качество регистрации волнового поля в активном и пассивном режимах обеспечивает решение проектных задач контроля структуры и параметров состояния устойчивости горного массива;
- в период монтажа системы необходимо предусмотреть этап ревизии линии связи (осмотр кабелей, монтажных шкафов и ящиков, недопущение использования «скруток», контроль намокания элементов кабельной сети, недопущение использования «сдвоенных» линий, уменьшение количества используемых отрезков кабелей) и оценки ее параметров;

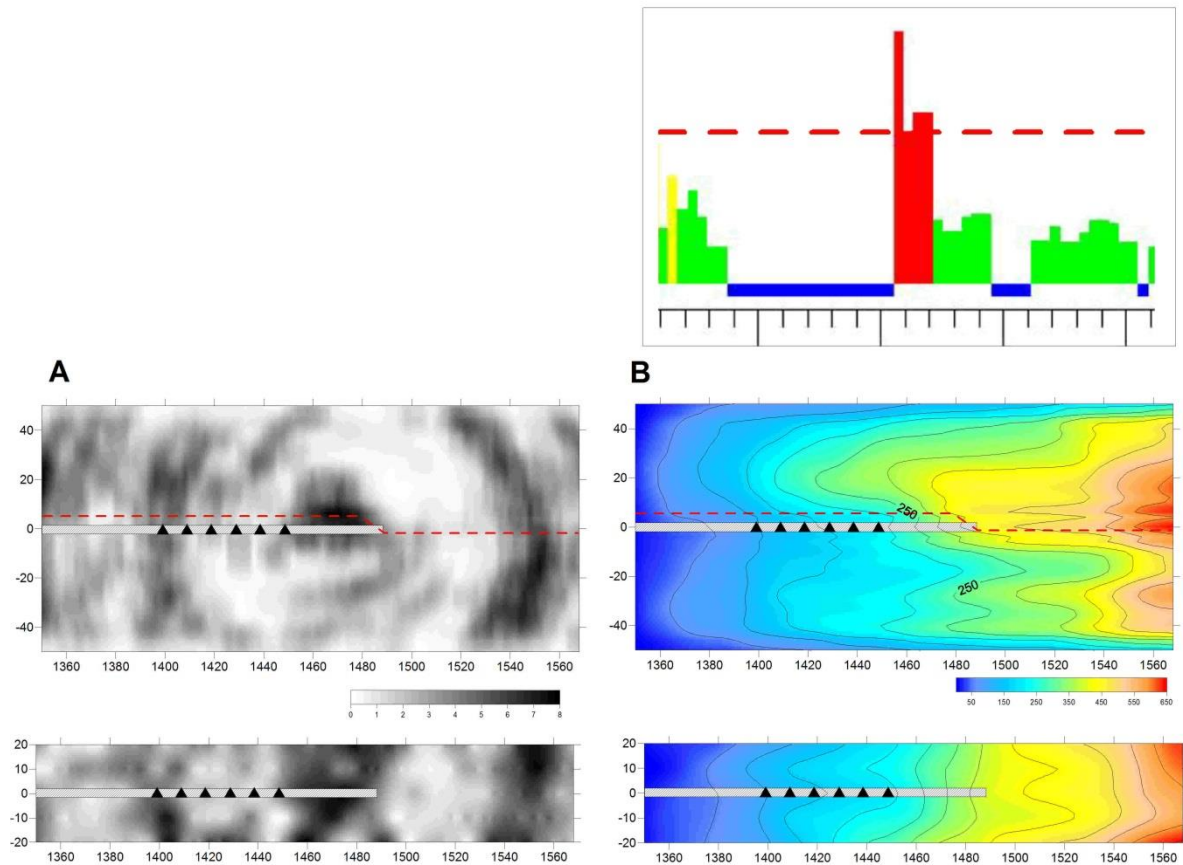


Рисунок 5.12 - Горизонтальные и вертикальные сечения 3D массива исходных амплитуд сейсмических сигналов (фрагмент А) и куба комплексного атрибута S (фрагмент В) при положении забоя на пикете 1470 с графиком расчетных значений Q в литрах

- комплексный сейсмический атрибут (результат свертки сейсмических атрибутов активной и пассивной локации массива) детерминирован в существенной степени по пространству массива с измеренными значениями объема выхода штыба;

- выведено количественное соотношение между комплексным сейсмическим атрибутом и объемом выхода штыба (Рисунок 5.13), что позволяет осуществлять прогноз удароопасности в регламентных единицах в условиях шахты «Северная» по данным текущего сейсмического контроля аппаратурой «Микон-ГЕО» на дистанцию до 100 метров от центра группы геофонов;

- функции системы реализуют оценку основного набора целевых параметров текущего сейсмического контроля, регламентированных в редакции проекта федеральных норм и правил «Инструкция по осуществлению мониторинга гео-, газодинамического состояния массива горных пород, прогноза горных ударов, внезапных выбросов угля (породы) и газа при отработке угольных месторождений, 5.11.2013».

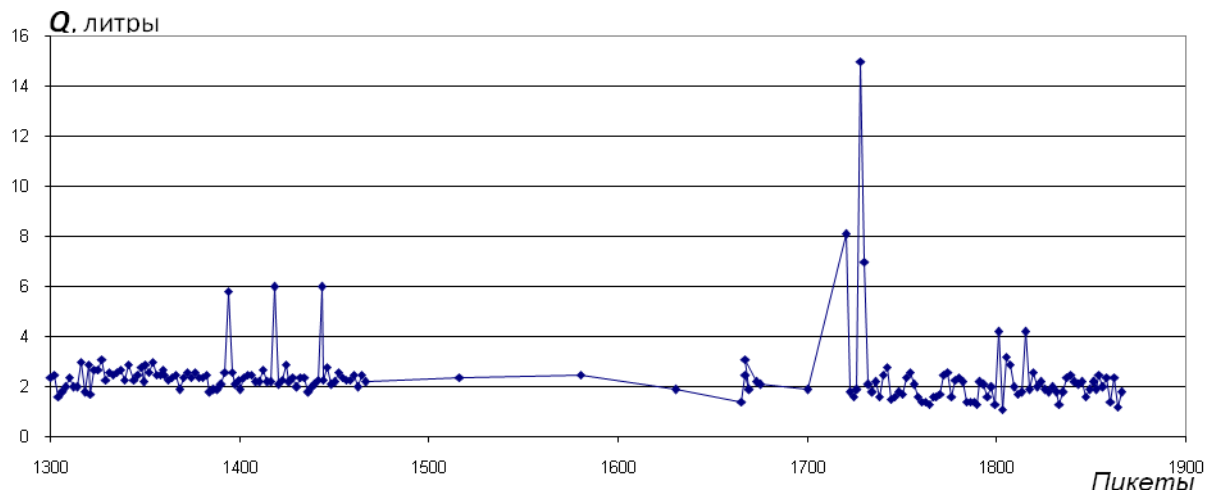
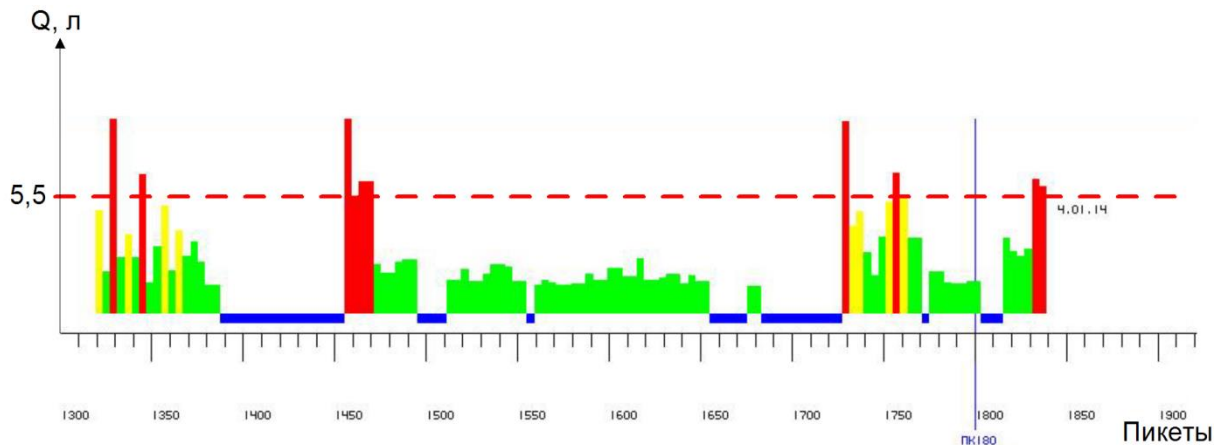


Рисунок 5.13 - График прогнозных оценок объема выхода штыба по трассе проходки с сейсмическим контролем, рассчитанного по комплексному сейсмическому атрибуту S (вверху) и график измеренных объемов выхода штыба (внизу)

5.2 Результаты технологической эксплуатации геоинформационной системы ГИС МИКОН в составе подсистем «Микон-ГЕО» и «Микон-АГК» на угольных шахтах Кузбасса

На сегодняшний день сейсмический комплекс «Микон-ГЕО» установлен и функционирует в технологическом режиме на 7-угольных шахтах Кузбасса. На всех этих предприятиях функционирует в различных вариантах и аэрогазовый комплекс «Микон-АГК».

В частности, система «Микон-АГК», предназначенная для обеспечения безопасности горных работ путем непрерывного автоматического измерения параметров, характеризующих газовый и пылевой режимы шахты, сбора, отображения, хранения и анализа информации, управления установками и оборудованием, поддерживающими безопасное аэрогазовое состояние в выработках, установлена на предприятии ООО «Шахта Байкаимская» [27, 84]. Система автоматически формирует и обеспечивает подачу управляющих команд на оборудование (устройства, агрегаты), осуществляющие нормализацию аэрогазового состояния, либо (в аварийной ситуации) блокировку производственной деятельности на контролируемом участке.

В соответствии с действующими нормативными материалами в одном из выемочных участков шахты «Байкаимская» установлено следующее оборудование:

- подземные вычислительные устройства ПВУ1#4, ПВУ1#5, ПВУ1#7;
- источники питания ШИП15#1, ШИП15#2, ШИП15#3;
- устройство сигнализирующее HLA15#1;
- устройство сигнализирующее HLA15#2;
- датчики контроля метана, оксида углерода, кислорода, скорости воздуха, запыленности, датчики контроля состояния оборудования и устройств.

На основании действующих норм и правил в одной из тупиковых выработок шахты применено следующее оборудование:

- подземное вычислительное устройство ПВУ2#9;
- источники питания ШИП29#1, ШИП29#2;
- устройство сигнализирующее HLA29#1;
- пост кнопочный КУ29#1, устанавливается в тупиковой выработке, на расстоянии 10-15 м от забоя;
- датчики контроля метана, оксида углерода, скорости воздуха, кислорода, запыленности, давления воды, датчики контроля состояния оборудования и устройств.

На всех остальных шахтах, где установлен сейсмический комплекс «Микон-ГЕО», функционирует и аэрогазовый комплекс «Микон-АГК» в рассмотренной выше комплектации лишь с незначительными изменениями, учитывающими некоторые горно-технологические особенности того или иного предприятия, что позволяет подвести некоторые первые итоги эффективности предложенной системы безопасности подземного производства, основанной на совмещенной схеме анализа дистанционного сейсмического прогноза структуры и параметров НДС горного массива и непрерывного контроля аэрогазовых параметров в атмосфере проходческих и очистных забоев.

На Рисунке 5.14 приведен 3D массив оценок градиента давления по данным системы «Микон-ГЕО» в текущем режиме проходки тупиковой выработки. В сейсмическом конусе обзора этого массива фиксируется две явные зоны дезинтеграции Z1 и Z2. Зона Z1 обнаружена на дистанции 20 метров от груди забоя, Z2 – на дистанции 60 метров.

На Рисунке 5.15 показаны несколько горизонтальных сечений этого 3D.

График метанообильности (левый фрагмент на Рисунке 5.15) подтверждает основную идею прогноза развития опасного газодинамического явления, принятую в настоящей работе:

- «предвестники» возможного выброса высокой концентрации метана в данном случае регистрируются за 10 метров до моментов фактических выбросов метана в точках Z1 и Z2;

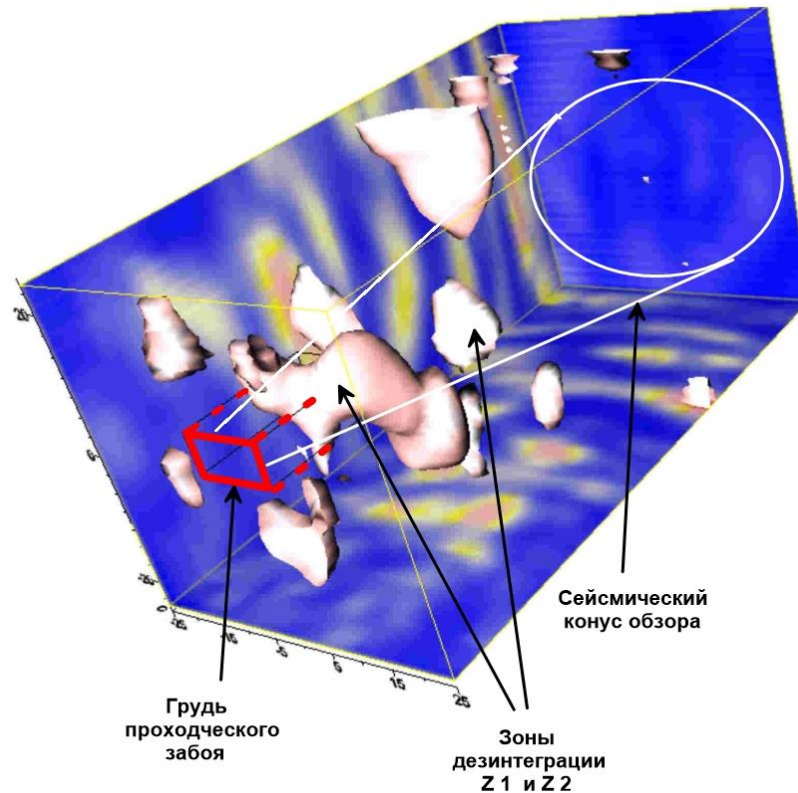


Рисунок 5.14 – Сейсмический 3D массив оценок градиента горного давления S впереди груды подготовительного штрека

- выбросы метана в точках $Z1$ и $Z2$ точно соответствуют аномалиям оценок градиента давления в сечениях 3D сейсмического обзора горного массива.

Отметим особым образом, что данный прогноз проверен бурением горизонтальной скважины от груды забоя, в которой на расстоянии 20 метров был зафиксирован первый аномальный выброс метана. Последующая проходка подтвердила в полной мере соответствие аномальных оценок градиента давления по сейсмическим данным газонасыщенным зонам дезинтеграции горного массива.

На Рисунке 5.16 показан пример 3D сейсмического массива оценок градиента давления, полученный ГИС МИКОН в текущем режиме очистных работ. Длина очистного забоя 160 метров. Геофоны установлены в вентиляционном штреке с интервалом 10 метров друг от друга.

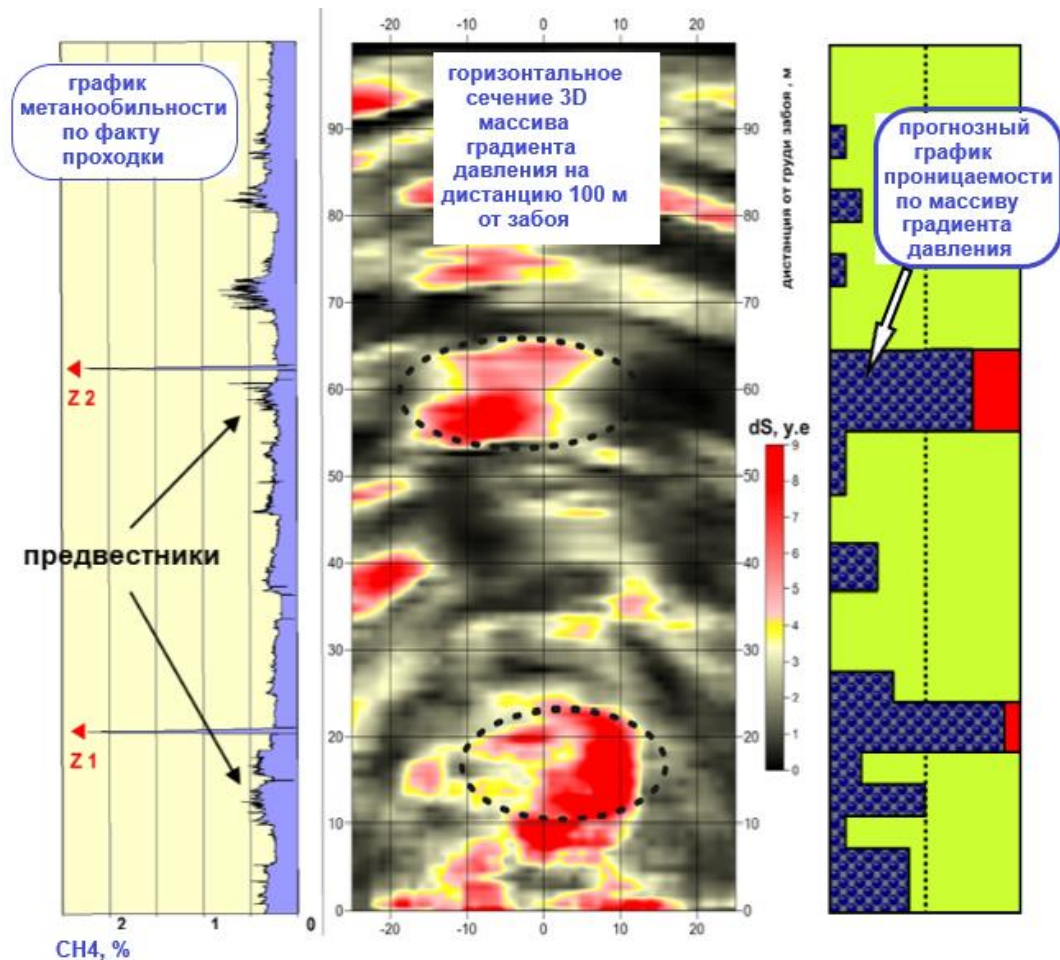


Рисунок 5.15 - Прогноз проницаемости массива в текущем режиме проходки подготовительного штрека (ш. Юбилейная, Кузбасс, 2019)

Типичный результат прогноза градиента давления при высоких скоростях проходки подготовительного штрека показан на Рисунке 5.16 (одна из угольных шахт Вьетнама). Здесь, как видим, фиксируется большой объем массива затронутый аномально высокими оценками градиента давления, что и следует ожидать для коротких промежутков времени при высокой скорости подвигания забоя.

г.Кам Фа
Компания Дионгхьи, шх.Дионгхьи, ш. 2

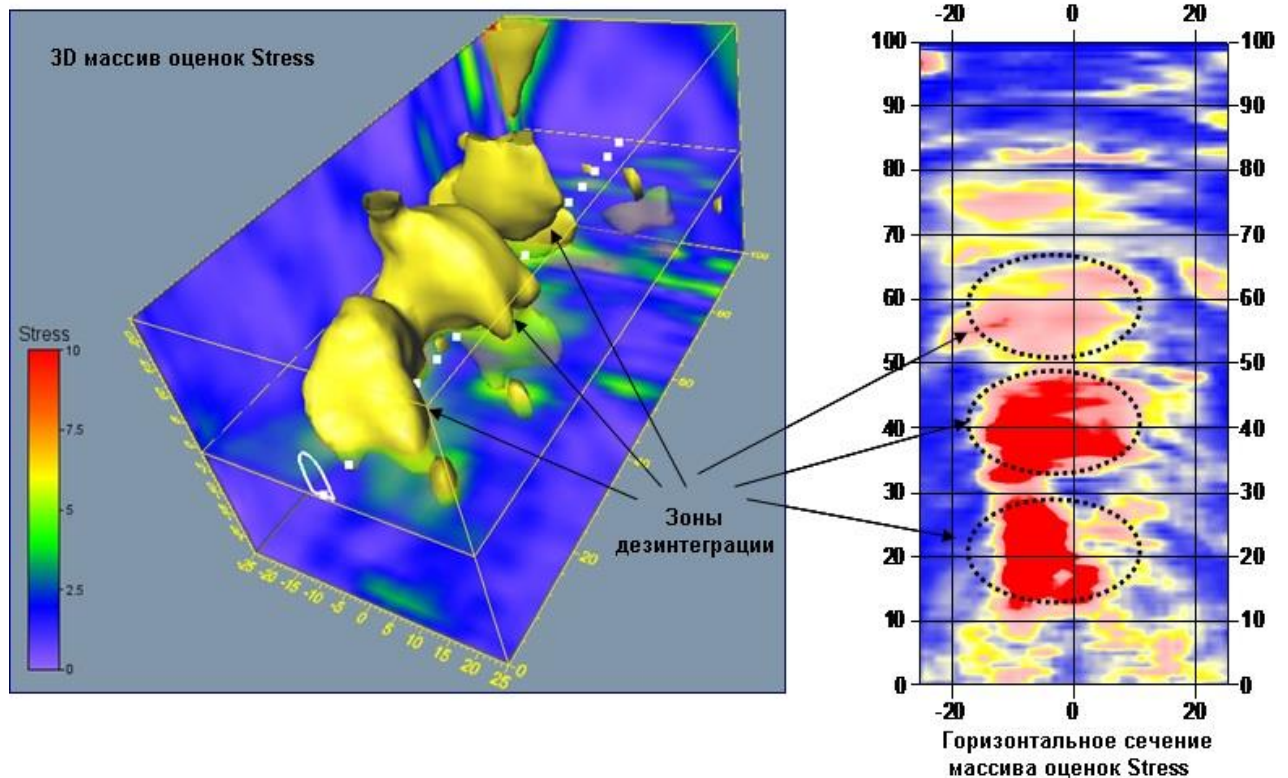


Рисунок 5.16 - Прогноз зон дезинтеграции массива в текущем режиме высокоскоростной проходки подготовительного штрека (угольная шахта Вьетнама, 2019)

Очевидно, что примерно в центре данного 3D сейсмического массива обнаруживается зона аномально высоких значений градиента давления (черный цвет растра). На Рисунке 5.17 эта зона хорошо видна на горизонтальных сечениях 3D массива сейсмического обзора. Пунктирный контур синего цвета соответствует контуру лавы: справа – очистной забой, вверху – конвеерный штрек, слева находится разрезная печь, внизу – вентиляционный штрек, в котором установлены геофоны (ИПСМ системы «Микон-ГЕО»).

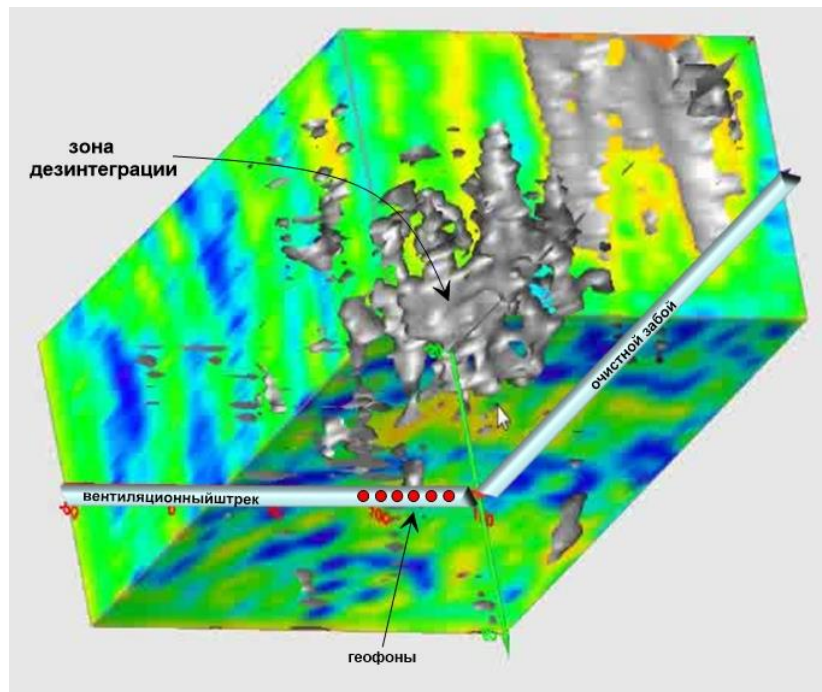


Рисунок 5.17 – Отображение текущего состояния 3D массива оценок градиента давления в контуре очистного забоя (шахта Байкаимская, Кузбасс, 2017 г.)

Данный пример хорошо иллюстрирует точность оценок градиента давления по сейсмическим параметрам отраженных волн по следующим важным признакам:

- аномалия оценок градиента давления точно «вписывается» в контур лавы;
- в соответствии с теоретическими представлениями весь массив в контуре лавы, ограниченной со всех сторон выработками, должен разделяться на два примерно равных фрагмента, в которых радиальные напряжения имеют противоположное направление (отжим угля в сторону всех штреков).

Объективность данного прогноза в последующем подтвердилась повышенным уровнем деформаций крепи в конвейерном штреке, к которому приурочена зона высоких значений градиента давления. Контролируемая шахта не относится к классу метаноопасных и реальные значения измеряемой метанообильности не выходили за пределы естественного фона.

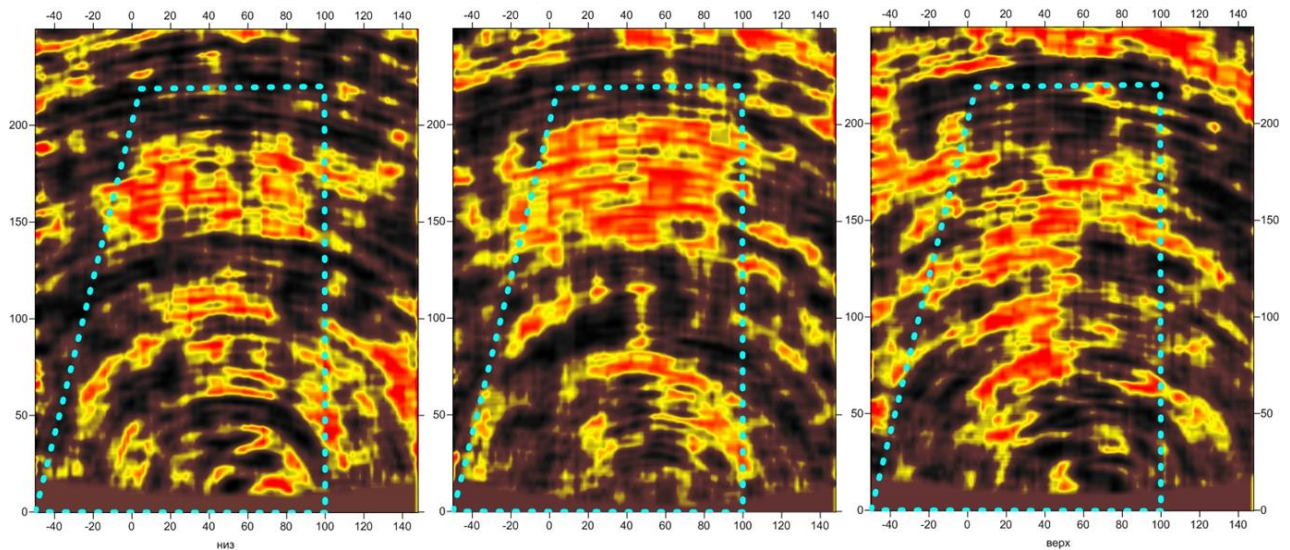


Рисунок 5.18 - Горизонтальные сечения 3D массива сейсмических оценок градиента давления, представленного на Рисунке 5.17

На Рисунке 5.19 приведены два горизонтальных сечения 3D массивов сейсмических оценок градиента давления в активном режиме локации очистного забоя и оценка сейсмознергетического состояния в пассивном режиме регистрации сейсмического «шума» в том же забое (шахта Байкаимская, Кузбасс, 2016). Отметим высокую степень соответствия структуры распределения оценок градиента давления и структуры оценок сейсмической эмиссии, анализ которых позволяет объективно представить процесс эволюции структуры и параметров НДС целика очистного забоя как закономерного деления этого целика на 2 основных фрагмента (блока). Разгрузка правого верхнего фрагмента целика приводит к плавному (пликативному) снижению горного давления, а концентрация энергии в левом нижнем фрагменте целика с высоким градиентом давления способно перевести правый нижний фрагмент целика в динамический режим с опасными последствиями [27, 84].

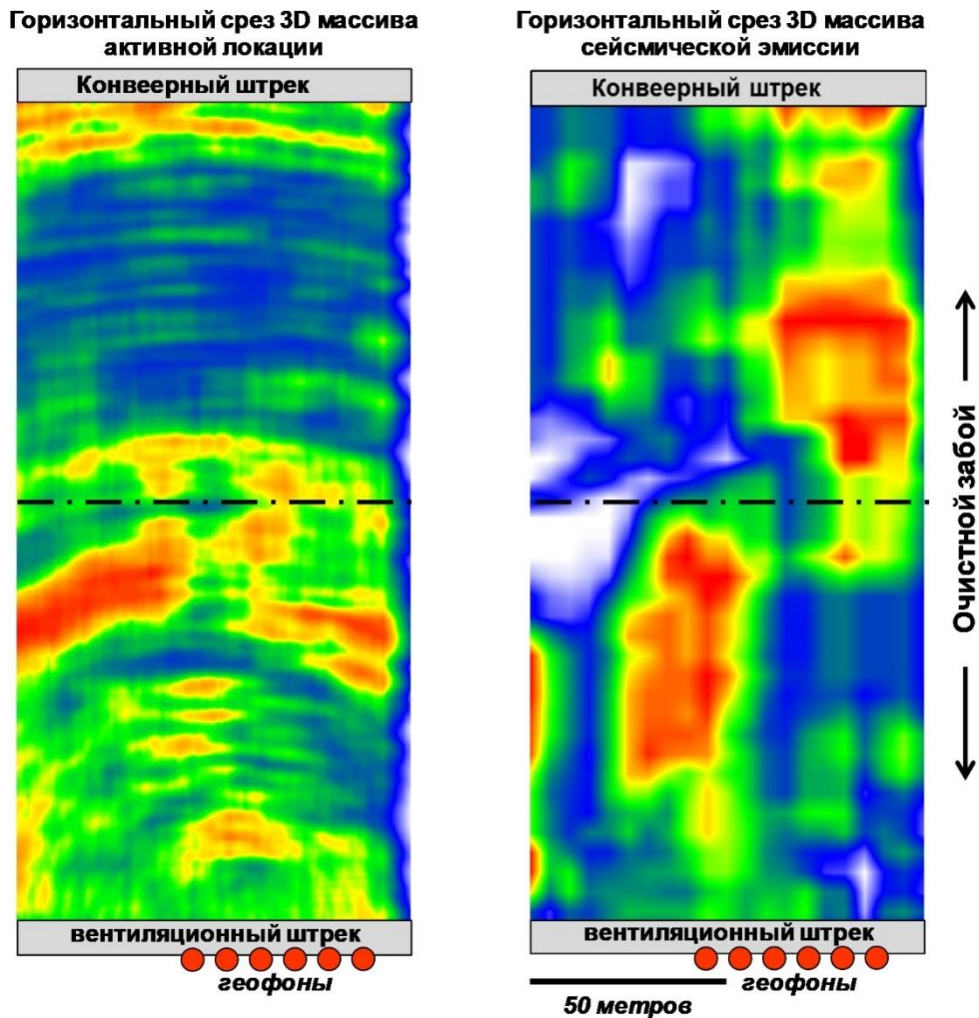


Рисунок 5.19 - Горизонтальные сечения 3D массивов сейсмических оценок градиента давления в активном режиме локации (слева) и оценка сейсмознергетического состояния в пассивном режиме регистрации сейсмического «шума» (справа)

Приведенные примеры контроля и прогноза развития опасных ГДЯ на основе обсуждаемой геоинформационной системы в текущих режимах ведения проходческих и очистных работ на угольных шахтах Кузбасса достаточно характерны для данного региона и свидетельствуют о значимом уровне детерминации прогноза, который по факту практического применения системы за прошедший период эксплуатации на ряде шахт (2016 - 2018 гг.) составил 70 % [27, 49, 71, 84].

Здесь же надо упомянуть, что современный геодинамический режим Кузбасса претерпевает существенные изменения за счет интенсивной угледобычи. Институтом Физики Земли РАН в последнее время установлено повышение уровня сейсмической активности Кузнецкого бассейна с глубин 10-15 км до глубины 5 км (южный Кузбасс). Очевидно, этот факт связан с большой массой перемещенных горных пород и плотной инфраструктурой ведения открытых и подземных работ.

Соответственно, в настоящее время ответственность за безопасность ведения подземных горно-технических работ в этом регионе непрерывно повышается и надежности систем прогноза развития опасных ГДЯ придается особое внимание, в том числе и социально значимое, поскольку районы добычных работ совпадают с плотной жилой застройкой территории Кузбасса и на которой неуклонно возрастает периодически обостряющаяся сейсмическая интенсивность.

5.3 Общие принципы проектирования и развертывания ГИС МИКОН при реализации контроля и прогноза развития ГДЯ на угольной шахте

С учетом всей обсуждаемой проблемы и опыта применения ГИС МИКОН в различных условиях представляется целесообразным сформулировать несколько основных принципов ее развертывания на угольной шахте.

Региональная схема развертывания пассивного режима регистрации

Проектирование системы стационарного непрерывного режима регистрации сейсмической эмиссии осуществляется исходя из следующих принципов:

- в точке стационарного приема устанавливается на одной линии 3 ИПСМ по борту штрека с интервалом 50 метров друг от друга, что обеспечивает уверенный прием сейсмических сигналов с энергией более 100 джоулей на дистанции не менее 300-500 метров и сечением конуса приема такого же диаметра;

- точное определение координат источника сейсмической эмиссии устанавливается с не менее 3-х стационарных пунктов приема;

- три стационарных пункта, установленных на расстояниях порядка 300 метров друг от друга на соответствующих горно-технических объектах обеспечивают пассивную локацию горного массива в объеме примерно 1 км³ с максимальной граничной частотой сигнала сейсмической эмиссии до 50 Гц и энергией свыше 100 джоулей (техническая схема из трех стационарных пунктов приема показана на Рисунке 5.20);

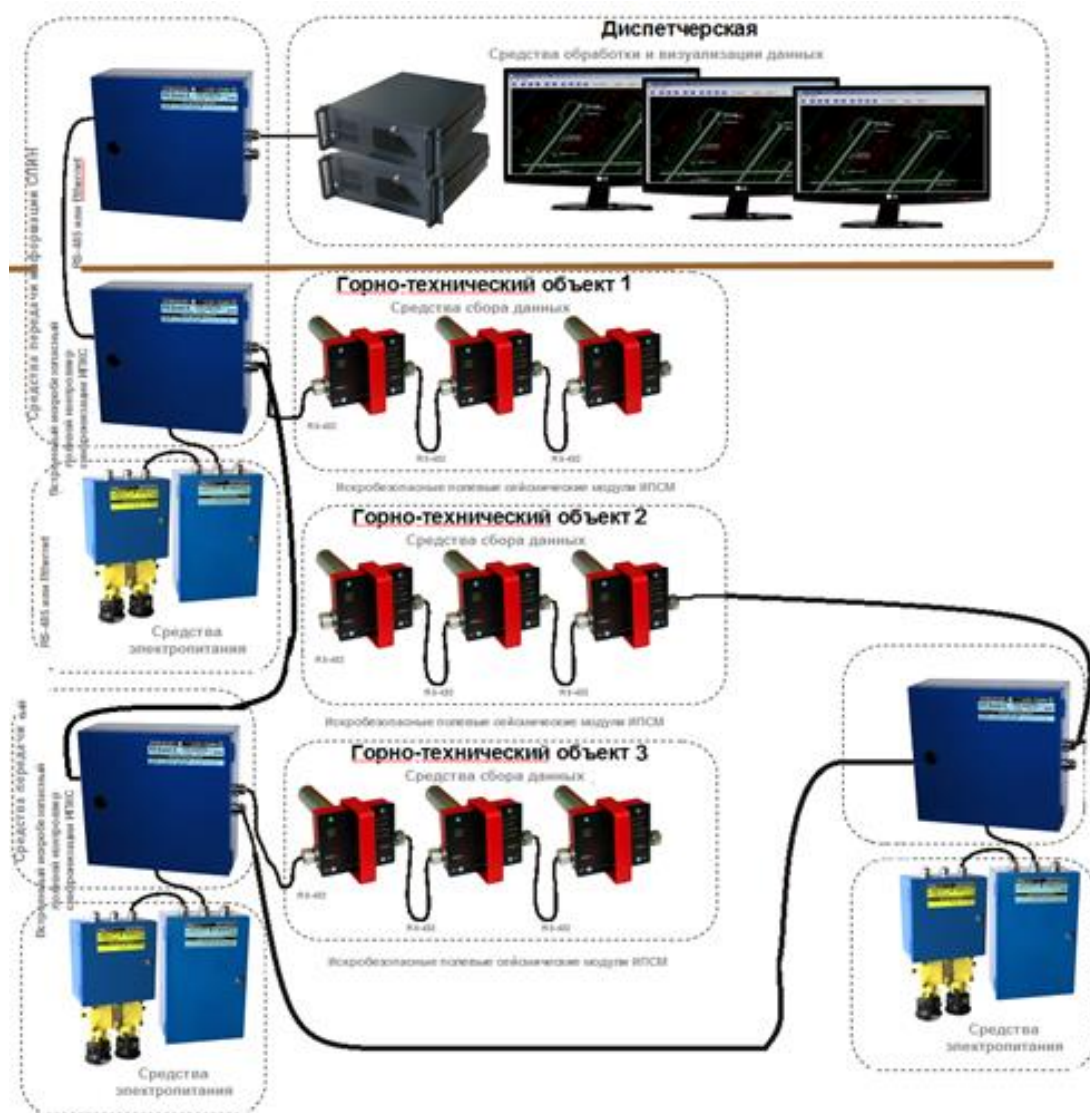


Рисунок 5.20 - Техническая схема региональной сети (одного из возможных ее узлов) из трех стационарных пунктов на основе системы «Микон-ГЕО» [27, 49, 71, 84]

- размещение сети стационарных пунктов сейсмического приема производится с учетом геодинамической ситуации района шахты, устанавливаемой специализированными научными организациями, имеющих опыт и необходимую фактографическую базу данных по территории разработки месторождения;

- в функции научной организации входят расчеты параметров сейсмических сигналов сценарных источников эмиссии с учетом официальной линеаментно-доменной модели ИФЗ РАН (пример расчета приведен на Рисунке 5.21);

- к проектированию системы регионального контроля целесообразно привлекать специализированную организацию как для научной поддержки разработки проекта, так и для дальнейшего сопровождения процессов разработки месторождения.

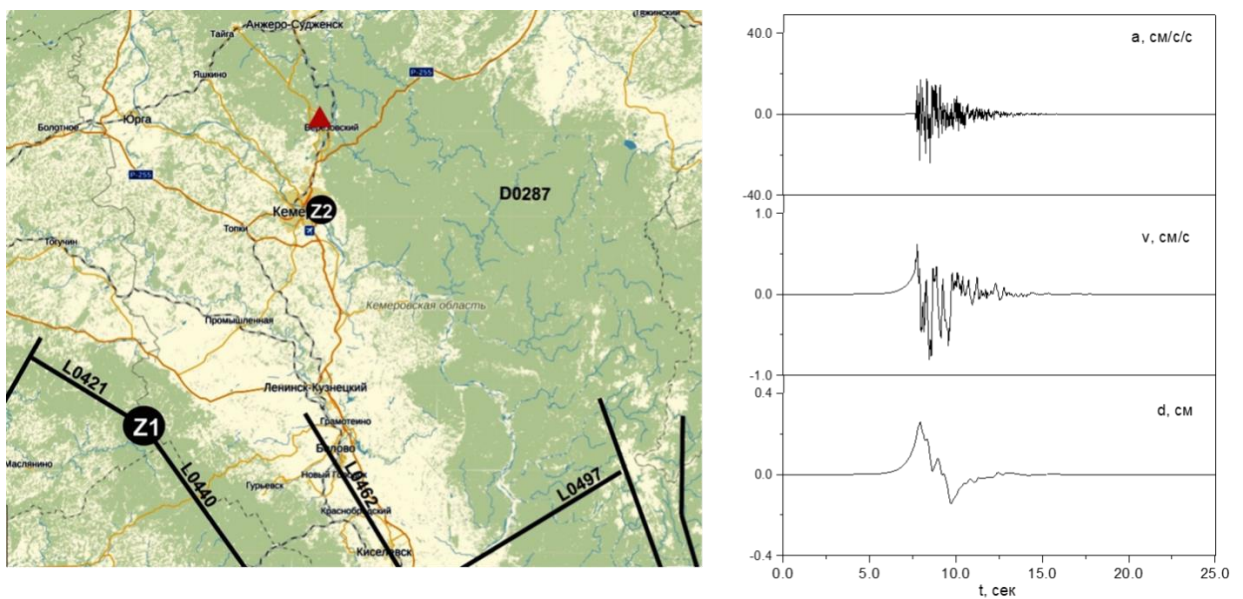


Рисунок 5.21 - Фрагмент линеаментно-доменной модели района месторождения (слева) и графики ускорения, скорости и смещения в точке стационарного приема сейсмических событий, рассчитанные на сценарий источника в точке Z1 (справа)

Размещение текущих систем контроля и прогноза развития ГДЯ

В состав одной системы текущего контроля и прогноза развития опасных ГДЯ для обеспечения проходки одного тупикового или одного очистного забоев входит не менее 6-ти ИПСМ. Схемы установки ИПСМ в процессах проходческих

или очистных работ показаны в предыдущем разделе, но при этом следует основываться на следующих принципах:

- размещение ИПСМ в проходческом забое оптимальным образом необходимо распределить по обоим бортам выработки (по три с каждой стороны);
- при невозможности задействовать оба борта выработки размещение ИПСМ следует установить по одной линии на одном из бортов (Рисунок 5.22);

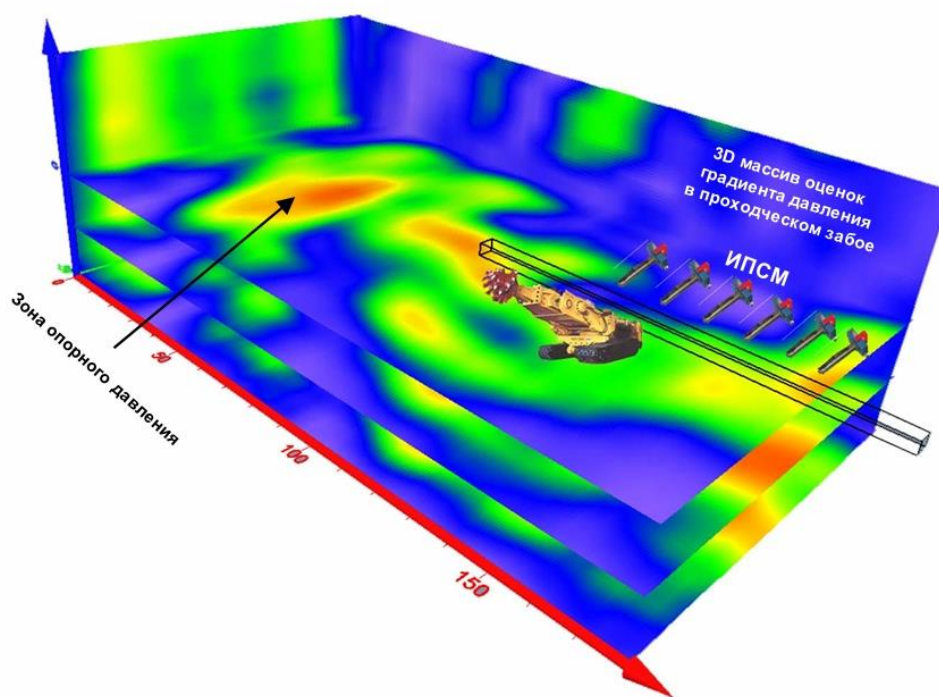


Рисунок 5.22 – 3D массив оценок градиента давления в процессе проходки подготовительного штрека (ш. Юбилейная, Кузбасс, 2018 г.)

- удаление ближнего ИПСМ от проходческого комбайна не должно составлять более 20-30 метров;
- оптимальный интервал установки ИПСМ в проходческом и очистном забоях не более 10 метров;
- при длине очистного забоя до 150 метров размещение 6-ти ИПСМ осуществляется по одной линии на ближнем к лаве борту вентиляционного штрека с удалением ближнего ИПСМ к забою не далее 20 метров;

- при большей длине очистного забоя (до 300 метров) необходимо предусматривать размещение 2-х систем ИПСМ по 6 единиц на бортах конвейерного и вентиляционного штреков (Рисунок 5.23).

Безусловно, начальный проект размещения ГИС МИКОН, включающей «Микон-АГК» и «Микон-ГЕО» в пределах горного отвода, разрабатывается единой организацией - компанией ООО «ИНГОРТЕХ», которая поставляет систему добывающей компании и далее осуществляет сервисное сопровождение процесса мониторинга разработки месторождения.

На Рисунке 5.24 приведен пример проектной схемы мониторинга процессов разработки угольного месторождения на региональном и текущем масштабных уровнях контроля и прогноза развития опасных ГДЯ.

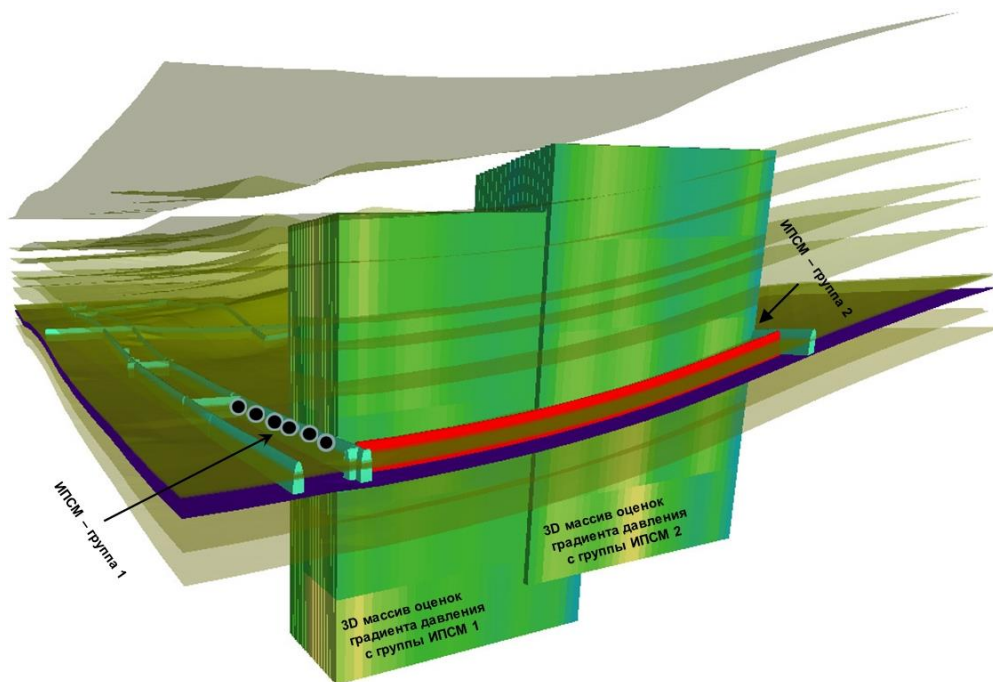


Рисунок 5.23 - Схема размещения ИПСМ в очистном забое длиной более 150 м

В данном конкретном варианте проекта принят за основу еще один принцип размещения всех необходимых компонент ГИС МИКОН – принцип зональности, который предполагает возможное разделение площади месторождения на зоны

последовательной или параллельной по времени схем ведения подготовительных и очистных работ.

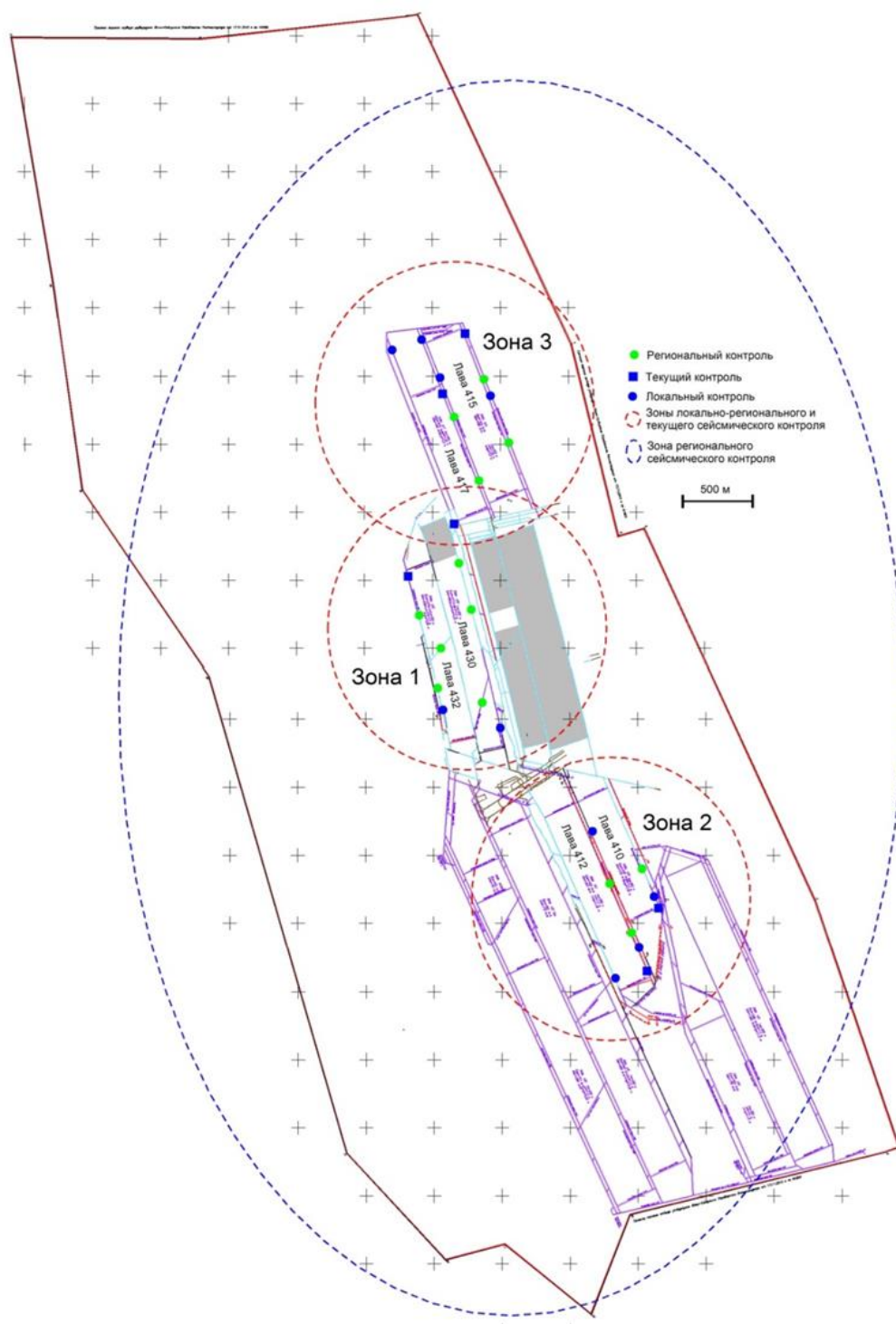


Рисунок 5.24 – Проектная схема размещения систем регионального, текущего и локального сейсмического контроля в границах шахтного поля на период 2014-2018 гг.

Выводы

В качестве главного вывода по разделу подчеркнем еще одну общую и, очевидно, главную особенность системы геотехнического мониторинга, которая свойственна любым подземным разработкам месторождений или подземного строительства тоннелей различного назначения. Эта особенность связана с поддержкой достоверности своевременного прогноза развития опасных ГДЯ, который по определению является научно-экспериментальным решением и не может в полной мере отождествлен с неким формализмом в отличие от режима непрерывного контроля, который, как выше показано, может быть полностью автоматизирован.

В этой связи, существенным дополнением к предложенному аппаратно-программному геоинформационному комплексу ГИС МИКОН является Центр горного мониторинга, который создан в структуре Уральского государственного горного университета и ООО «ИНГОРТЕХ» в рамках совместных проектов с рядом научных и федеральных организаций (НПО «СИБГЕОФИЗПРИБОР», МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, МЧС РФ и др.). Центр способен осуществлять непрерывную поддержку и сопровождение мониторинга всех необходимых процессов разработки в on-line режиме, в том числе через скоростные каналы связи МЧС РФ.

В целом, на основании приведенных материалов следует:

- непрерывный анализ относительных оценок градиента горного давления и приведенной величины объема газов в зоне взаимовлияния подземной выработки и горного массива с целью прогноза развития опасного геодинамического явления обеспечивается технологиями сейсмической локации в совмещенном режиме с системой аэрогазового контроля в соответствии с регламентом ведения горно-технических работ угольной шахты;
- предложенный и серийно выпускаемый комплекс автоматизированного мониторинга ГИС МИКОН удовлетворяет технологическим требованиям эффек-

тивного геоинформационного сопровождения процессов безопасного ведения подземных горных работ.

Таким образом, на основании обсуждаемых выше результатов экспериментальных и технологических процессов организации контроля и прогноза развития опасных ГДЯ можно утверждать, что:

- система непрерывного контроля и прогноза развития опасных геодинамических явлений реализуется специализированной геоинформационной панелью в составе многофункциональной системы безопасности шахты на основе методологической и программно-технической совместимости отдельных ее подструктур;

- функционал геоинформационной панели обеспечивает непрерывный контроль гео-газодинамического состояния горного массива на региональном и локальном масштабных уровнях шахтного поля в прогнозных оценках «опасно» и «неопасно» с учетом процессов управления технологиями ведения горных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении выполненной работы следует сформулировать несколько выводов, имеющих научное значение по рассматриваемой проблеме в целом и, в частности, представляющие законченные научные решения для дальнейшего развития и совершенствования отечественных технологий и систем обеспечения безопасного ведения подземных работ:

- теоретически обоснована модель динамической природно-технической системы «геологическая среда – подземная выработка»;

- обоснована взаимосвязь структуры и параметров НДС с приведенной величиной метаноносности в зоне взаимовлияния подземной выработки и горного массива;

- разработана технология сейсмической локации горного массива в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового анализа метанообильности шахтной атмосферы;

- обоснована система интегральных критериев прогноза опасных ГДЯ, формируемых по регламентным параметрам с учетом контролируемых сейсмических и аэрогазовых характеристик горного массива;

- разработана аппаратно-программная система и технология непрерывного контроля и прогноза опасного развития ГДЯ, управляемая специализированной геоинформационной панелью в составе многофункциональной системы безопасности шахты;

- обеспечена научная поддержка всех необходимых технологических процессов ведения подземных работ в режиме on-line на основе созданного для этих целей Центра горного мониторинга.

По результатам экспериментального и производственного применения ГИС МИКОН на угольных шахтах, рудниках и тоннелях следует ряд практически значимых выводов:

- электронные компоненты ГИС МИКОН в максимальной степени унифицированы и функционируют в подземных условиях устойчиво, без существенных недостатков;

- программный комплекс оперативной обработки обеспечивает в полной мере оценку структуры и параметров НДС в окрестности забоя выработки на дистанцию до 100 метров и более во все стороны от центра группы приема упругих колебаний в активном режиме проходки;

- система обеспечивает регистрацию сейсмических событий в пассивном режиме с последующей оценкой сейсмознергетического состояния массива на тех же удалениях от приемной группы;

- комплексный сейсмический атрибут на 70% детерминирован к объему выхода штыба (или иного регламентного параметра), что обеспечивает текущий прогноз развития опасных ГДЯ на дистанцию не менее 100 м;

- функциональные возможности системы в полной мере удовлетворяют позициям действующих федеральных нормативов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов, М. И. Применение алгоритмов кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных/ М. И. Абдрахманов, С. Э. Лапин, И. В. Шнайдер// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 6. – С. 27-44.
2. Абрамов, И. Л. Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах/ И. Л. Абрамов// Горнопромышленная и нефтегазовая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр. – 2014. - С.16-17.
3. Аллахвердиев, Рамиз Насиб Оглы. Особенности автоматизации технологического процесса на нефтегазовых предприятиях/ Р. Н. О. Аллахвердиев, А. М. Г. Мехтиева// Известия Нана. Серия: Наука и инновация. – Баку: изд-во Центр научных инноваций национальной академии наук Азербайджана, 2011. - № 1 (5). С. 41-45 .
4. Бабенко А. Г. Теоретическое обоснование и методология повышения уровня охраны труда в угольных шахтах на основе риск-ориентированного подхода и многофункциональных систем безопасности: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.26.01/ Бабенко Александр Григорьевич. – Спб, 2016. – 259 с.
5. Бабенко, А. Г. Многофункциональные системы безопасности угольных шахт/А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин// Доклад на республиканской конференции «Методы контроля и прогноза развития геодинамических явлений в процессах разработки месторождений твердого и углеводородного сырья». – Екатеринбург, УГГУ, 16-17 апреля 2015 г.
6. Бабенко, А. Г. Основы построения многофункциональных систем безопасности угольных шахт/ А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин // Сборник тезисов докладов III Междунар. научно-практич. конф. «ТЕХГОРМЕТ – 21 ВЕК» «Современные технологии управления процессами добычи и переработки полезных ископаемых». – Санкт-Петербург: изд-во Нац. минерально-сырьевого университета «Горный», 15-16 октября 2012 г. – С. 36-38.

7. Бабенко, А. Г. Системы комплексной безопасности горного производства/А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин// Технадзор. – 2008. - № 12. – С. 26-27.
8. Бабенко, А. Г. Новое поколение информационно-управляющих систем и средств обеспечения безопасности на угольных шахтах/А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин//Известия вузов. Горный журнал. – 2010. - № 1. - С. 73-84.
9. Бабенко, А. Г. Принципы построения многофункциональных систем безопасности угольных шахт, опыт и перспективы их использования в Кузбассе/А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин, А. В. Вильгельм и др.//Безопасность труда в промышленности. - 2011. - № 1. - С. 16-22.
10. Баренблатт, Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах/Г. И. Баренблатт, В. М. Рыжик. – М.: Недра, 1984.- 211с.
11. Большинский, М. И. Газодинамические явления в шахтах / М. И. Большинский, Б. А. Лысиков, А.А. Каплюхин. – Севастополь: Вебер, 2003. – 284 с.
12. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений/Н. С.Булычев. - М.: Недра, 1994. - С. 380.
13. Вершинин, А. В. Моделирование гидрогеомеханических пластовых процессов путем внешнего сопряжения специализированных вычислительных пакетов и универсальной САЕ FIDESYS/ А. В. Вершинин, Д. И. Сабитов, Ф. З. Ишбулатович, А. В. Мясников// Чебышевский сборник. – Тула: Изд-во Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2017. – Т. 18. - № 3 (63). – С. - 154-187.
14. Вершинин, А. В. Математические модели и пакет прочностного инженерного анализа: дисс. ...д-ра физ.-мат. наук: 05.13.18/ Вершинин Анатолий Викторович. – М., 2018. – 731 с.
15. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности Научно-технический журнал Кемерово 1-2016.
16. Власов, С. В. Методика и технология 3D-3С сейсмических исследований геологического строения и мониторинга состояния устойчивости горного массива в процессе проходки транспортных тоннелей: в условиях г. Боль-

- шой Сочи: дисс. ...канд. геол.- мин. наук: 25.00.10/ Власов Сергей Викторович. – Екатеринбург, 2012. – 132 с.
17. Гзовский, М. А. Основы тектонофизики/М. А. Гзовский. – М.: Наука, 1975. – 535 с.
 18. Глушук, П. С. Система сбора и представления информации о качестве изготовления кабельного изделия: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13/Глушук Павел Сергеевич. – Томск, 2008. – 157 с.
 19. Горное дело: Терминологический словарь. 4-е изд, перераб. и доп. / Г. Д. Лидин, Л. Д. Воронина, Д. Ф. Каплунов и др. — М.: Недра, 1990. – 694 с.
 20. ГОСТ Р 55154-2012. Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Общие технические требования. - М. : Стандартиформ, 2014. - 24 с.
 21. Гуревич, Г. И. К вопросу о механизме разделения пластов горных пород на блоки/Г. И. Гуревич// Известия РАН. Серия геофизическая. – М., 1954. – № 5. – С. 411-416.
 22. Дияшев, Р. Н., Костерин А.В., Скворцов Э.В., 1999. Фильтрация жидкости в деформируемых нефтяных пластах/ Р. Н. Дияшев, А. В. Костерин Э. В. Скворцов. – Казань: изд-во Казан. мат. об-ва, 1999. – 238 с.
 23. Журавлев, Е. И. Разработка геоинформационной системы прогнозирования динамических проявлений в углевмещающем массиве при подземной разработке угольных: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.35/ Журавлев Евгений Игоревич. – М., 2016. – 19 с.
 24. Захаров, В. Н. Геоинформационное обеспечение и комплексный мониторинг гео- и газодинамических процессов при высокоинтенсивной подземной добыче угля/ В. Н. Захаров// Рациональное освоение недр. – М.: Научно-информационный издательский центр «Недра-XXI», 2012. - № 3. – С. - 50-54.
 25. Золотарёв, В. Н. Новое поколение сейсмических станций для инженерных геофизических исследований - SGD-SEL96Â CMP, SGD- SEL488, SGD-SEL48Â CMP, SGD-SEL24ÂE, SGD-SET И SGD- SMT

- «TUNNEL» / В. Н. Золотарёв, А.Б. Ревунов, И. Л. Сорокин, Д. В. Сыроватин, В.П. Черепанов// Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: ИнформГеофизСервис, 2012. – Т. 41. - № 3. – С. - 10-25.
26. Зотеев, В. Г. Метод и программа расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов горных выработок в сплошном и трещиноватом массиве/ В. Г. Зотеев, О. В. Зотеев А. Ф. Ножин// Численные методы оценки устойчивости подземных сооружений: Сборник научных трудов. – Апатиты: ИГД КФАН, 1988. - С. 33 – 36.
 27. Зудилин, А. Э. Функционал системы оценки состояния горного массива/ А.Э. Зудилин, Ю. В. Патрушев, А. В. Александрова// Известия вузов. Горный журнал. – 2012. - № 5. - С. 102-105.
 28. Зыков, В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах/ В. С. Зыков. – Кемерово: НТЦ «Восточный», 2010. – 333 с.
 29. Зыков, В. С. Научные проблемы борьбы с газодинамическими проявлениями в угольных шахтах Кузбасса / В. С. Зыков // Маркшейдерия и недропользование. - 2011. – № 3. – С. 57-59.
 30. Зыков, В. С. Статистика динамических явлений в шахтах и уточнение их классификации/ В.С. Зыков, И. Л. Абрамов, Д. В. Торгунаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. - Отдельный выпуск № 6. - С. 297-319.
 31. Зыков, В. С. Уточнение классификации динамических явлений в угольных шахтах/ В. С. Зыков, И.Л. Абрамов / Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. - № 3. - С.74-83.
 32. Зыков, В.С., Динамические явления в угольных шахтах и их классификация / Зыков В.С., Абрамов И. Л.// Маркшейдерия и недропользование. - 2012. - № 4. - С. 56 - 60.
 33. Исаев, А. В., 1983. Разработка метода оценки напряженного состояния удароопасных пород по дискованию керна и выходу буровой мелочи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11/ Исаев Александр Васильевич. – Ленинград, 1983.

34. Карасевич, А. М. Сейсморазведка при изучении метаноугольного разреза/ А. М. Карасевич, Д. П. Земцова, А. А. Никитин. - М., 2008. – 168 с.
35. Каркашадзе, Г. Г., Результаты определения пластового давления, газопроницаемости и параметров сорбции угольного пласта по результатам шахтных измерений истечения метана из коротких скважин/ Г. Г. Каркашадзе, Е. В. Мазаник, П. Н. Пащенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - № 9. - С. 259-264.
36. Карякин, А. Л. Аппаратура шахтной автоматики, стволовой сигнализации и связи «ШАСС Микон»/А. Л. Карякин, С. Э. Лапин, М. Е. Садовников// Безопасность труда в промышленности. - 2007. - № 5. - С. 39-41.
37. Карякин, А. Л. Многофункциональный информационно-управляющий комплекс «Микон 1Р» /А. Л. Карякин, А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин и др. // Известия вузов. Горный журнал. - 1999. - № 11-12. - С. 83-91.
38. Клишин, В. И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В. И. Клишин, Л. В. Зворыгин, А. В. Лебедев и др. – Новосибирск: «Новосибирский писатель», 2011. – 524 с.
39. Корнилков, С. В. Концепция и результаты прогноза опасных геодинамических явлений в процессах ведения подземных горных работ/ С. В. Корнилков, В. Б. Писецкий, А. Д. Сашурин, Э. С. Лапин, С. Э. Лапин // В сб. трудов 13-й научно-практической международной конференции «Инженерная геофизика 2017», EAGE, г. Кисловодск. - Кисловодск, 2017.
40. Костерин, А. В. Напряженно-деформированное состояние горных пород и фильтрация в неоднородных пластах/ А. В. Костерин, Э. В. Скворцов, М. М. Торопова // Вычислительные технологии. – Новосибирск: Изд-во: Институт вычислительных технологий СО РАН, 1999. - Т.4. - №2. - С. 42-50.
41. Кубрин, С. С. Разработка геотехнологического кластера безопасного освоения опасных по гео и газодинамическим явлениям угольных пластов/ С. С. Кубрин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: «Горная книга», 2013. - № S5. - С. 68-84.

42. Кубрин, С. С. Автоматизированная система поддержки принятия технологических решений и комплексного синтезирующего мониторинга/ С. С. Кубрин, Е. В. Мазаник, Н. Н. Кигалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: «Горная книга», 2014. - № S1. - С. 267-278.
43. Кузьменко, С. О. Analysis and forecast safety threats at mining enterprises/С. О. Кузьменко, А. В. Вильгельм, С. Э. Лапин // Сборник трудов 21-о всемирного горного конгресса, г. Краков, Польша, 7-11 сентября 2008 г. – С.113-119.
44. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Теория упругости. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - 4-е изд., испр. –М.: Наука, 1987. – Т.7. - 248 с.
45. Лапин, С. Э. О структуре системы и модели прогноза горных ударов при подземных работах/ С. Э. Лапин, Р. Е. Леонов Э. С. Лапин//Материалы X Межотраслевого координационного совещания по проблемам геодинамической безопасности. - Екатеринбург, 6-9 октября 1997. – С. 108-112.
46. Лапин, С. Э. Разработка и исследование методов прогноза опасного состояния шахтной атмосферы в автоматизированной системе контроля: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06/Лапин Сергей Эдуардович. – Екатеринбург, 2002. – 220 с.
47. Лапин, С. Э. Результаты технологического применения сейсмического метода дистанционной оценки риска потери прочности горного массива в процессе ведения подземных горных работ/ С. Э. Лапин, В. Б. Писецкий, Ю. В. Патрушев, С.М. Чевдарь// Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2016» – Москва, Россия, 18-20 апреля 2016 г.
48. Лапин, С. Э. Структура системы прогноза опасных геодинамических явлений при подземных работах на основе статистической модели разрушения горного массива/ С. Э. Лапин, Э. С. Лапин, Р. Е. Леонов // Труды 13-й Международ. конф. «Автоматизация в горном деле» «ISAMC-98», 13-й Международной конференции по управлению производственным процессом и моделированию. Республика Словакия, 8-11 сентября 1998. - С. 121-125.

49. Лапин, С. Э. Экспериментальное исследование системы «Микон-Гео» на шахте «Алмазная»/С. Э. Лапин, А. В. Александрова, Ю. В. Патрушев// Безопасность труда в промышленности. - 2012. - № 6. - С. 44-47.
50. Лапин, С. Э. Выделение значимых факторов при моделировании горных объектов/С. Э. Лапин, Р. Е. Леонов// Известия вузов. Горный журнал. - 2019. - № 2. -С. 140 – 145.
51. Лапин, С. Э. Интервал квантования в компьютерных системах контроля газового состава атмосферы шахт/С. Э. Лапин, Р. Е. Леонов //Известия вузов. Горный журнал.- 2002. - № 4. - С.123-127.
52. Лапин, С. Э. К разработке геоинформационной панели безопасности подземных горных работ на основе связанных решений по прогнозу развития напряженного состояния массива горных пород и газовых потоков / С.Э.Лапин, В. Б. Писецкий // Чебышевский сборник. – Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2017. – Том 18, выпуск 3. - С. 350-362.
53. Лапин, С. Э. Особенности проектирования систем контроля и прогноза гео- и газодинамических явлений/С. Э. Лапин, А. В. Вильгельм, В. Б. Писецкий // Безопасность труда в промышленности. - 2014. - № 7. - С. 41-44.
54. Лапин, С. Э. Особенности экологического мониторинга вблизи угольных шахт (на примере ш. «Центральная» Копейского района Челябинского бу-роугольного бассейна) / С.Э.Лапин, О.М. Гуман, И. Г. Петрова И.Г. - Екатеринбург: Известия УГГГА, 2001. - Вып. 13. – С.223-227
55. Лапин, С. Э. Экономическое обоснование применения автоматизированных систем аэрогазового контроля угольных шахт/ С. Э. Лапин// Известия вузов. Горный журнал. - 2002. - № 1. - С. 154-158.
56. Лапин, С. Э. О проблеме прогноза газовой опасности в местах ведения гор-ных работ при подземной отработке угольных месторождений/ С. Э. Ла-пин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 10 (специальный выпуск 35). – С. 3-10.

57. Лапин, С. Э. Функциональная структура геоинформационной системы ГИС МИКОН разработки и производства ООО «ИНГОРТЕХ» / С. Э. Лапин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 10 (специальный выпуск 35). – С. 11-26.
58. Лапин, С. Э. Методология формирования сейсмического канала в геоинформационной системе ГИС МИКОН / С. Э. Лапин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 10 (специальный выпуск 35). – С. 27-42.
59. Лапин, С. Э. Методология и практика построения геоинформационной системы ГИС МИКОН прогноза динамики состояния горного массива в процессах подземной разработки угольного месторождения / С. Э. Лапин // Безопасность труда в промышленности. – 2019. - № 11. - С. 60-66.
60. Лапин, Э. С. «Микон-Гео» – система оперативного обнаружения и контроля состояния зон развития опасных геогазодинамических явлений при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом/ Э. С. Лапин, В. Б. Писецкий, А. Г. Бабенко, Ю. В. Патрушев// Безопасность труда в промышленности. - 2012. - № 4. - С. 18-22.
61. Лапин, Э. С. Перспективы развития автоматизированных систем управления/ Э. С. Лапин, Б. С. Рылеев, А. Ю. Шишкин, Ю. Б. Шлимович// Безопасность труда в промышленности. - 2000. - № 2. – С. 58-60.
62. Лапин, Э. С. Принципы развития систем контроля безопасности и автоматики на угольных шахтах России/Э. С. Лапин, А.Г. Бабенко, С. Э. Лапин //Изв. УГГГА, серия: Горная электромеханика, 2000. – Вып. 9. – С.20-31.
63. Лапин, Э. С. Опыт использования, тенденции и перспективы развития шахтных информационно-управляющих систем / Э. С. Лапин, Е. Я. Диколенко, С. Э. Лапин и др. //Уголь. - 2003. - № 3. - С. 49-51
64. Левин, В. А. Распространение упругих волн в нелинейно-упругих средах с начальными деформациями. Компьютерное моделирование с использованием программного комплекса прочностного инженерного анализа FIDESYS/ В. А. Левин, А. А. Вершинин, И. А. Мишин и др. // Технологии сейсмораз-

- ведки. – Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, 2012.- № 4.- С. 29-32.
65. Малышев, Ю. Н. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы угольных пластов / Ю. Н. Малышев, К. Н. Трубецкой, А. Т. Айруни. – М.: ИАГН, 2000 – 519 с.
 66. Методические указания по классификации газодинамических явлений на угольных шахтах / А. И. Бобров, Л. А. Вайнштейн, М. А. Ильяшов и др. - Донецк: ЦБНТИ Минуглепрома СССР, 1991. - 18 с.
 67. Мифтахов, Р. Ф., О построении гидрогеомеханических моделей сланцевых формаций/ Р. Ф. Мифтахов, А. В. Мясников, А. В. Вершинин и др.// Технологии сейсморазведки. – Новосибирск: изд-во ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука» СО РАН, 2015. - № 4. – С. 97-108.
 68. Молотков, Л. А., Бакулин, А.В.,1994. Эффективная модель трещиноватой среды с трещинами, описываемыми поверхностями разрывов смещений: Математические вопросы теории распространения волн/ Л. А. Молотков, А. В. Бакулин, А.В / /Геофизика. – М.: ЕАГО, 1994. 24. - С.118-137.
 69. Морозов, Е. М. Прочностной анализ. ФИДЕСИС в руках инженера/ Е. М. Морозов, В. А. Левин, А. В. Вершинин. – М.: ЛЕНАНД, 2015. - 408 с.
 70. Неймарк, А. А. Фрактальность геологической среды и проблема прогнозируемости сейсмогенного макроскалывания / А. А. Неймарк // Известия вузов. Геология и разведка. - 1997. - №2. – С.23-31.
 71. Обоснование общих принципов построения и практической реализации сейсмической системы опережающего контроля текущего состояния устойчивости горного массива, контроля и прогноза внезапных выбросов и горных ударов: Отчет о НИОКТР/УГГУ; Регистрационный номер НИОКТР 114070970015 – рук. работ Э. С.Лапин. – Екатеринбург, 2014.
 72. Патент на изобретение № 2672273. Коммуникационная система для подземных сооружений. Заявка № 2017139114/03(068195). Дата подачи заявки 10.11.2017. Дата начала отсчета срока действия патента 10.11.2017. Ав-

- тор(ы) Лапин Сергей Эдуардович, Бабенко Александр Григорьевич, Федосов Дмитрий Витальевич (RU). Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Информационные горные технологии» (RU).
73. Патрушев, Ю. В. Дистанционная оценка и прогноз развития опасных инженерно-геологических процессов при строительстве тоннелей: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.08/Патрушев Юрий Владимирович. – Екатеринбург, 2017. – 130 с.
 74. Писецкий, В. Б. Методы и технологии прогноза структуры и оценки параметров геодинамического состояния геологической среды по сейсмическим данным в приложениях нефтегазовой, горнодобывающей и строительной отраслях/ В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин, А.Э. Зудилин и др.// Материалы 13-го Всероссийского семинара «Геодинамика. Геомеханика и Геофизика». – Новосибирск, 15-19 июля, 2013. – С. 31.
 75. Писецкий, В. Б. Методика и результаты промышленного применения системы сейсмического контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО» в процессе подземной разработки рудных и угольных месторождений / В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин, А. Э. Зудилин и др. // Проблемы недропользования. – 2016. – № 2(9). – С. 58-64.
 76. Писецкий, В. Б. Методы и технологии оценки структуры и параметров напряженно-деформированного состояния горного массива по сейсмическим данным в процессах разработки месторождений полезных ископаемых и строительства подземных сооружений/ В. Б. Писецкий, Э. С. Лапин, Ю. В. Патрушев и др.//В сб. трудов конференции «Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. современное состояние и перспективы развития». – М.: Изд-во «Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество», 2015. – С. 81-85.
 77. Писецкий, В. Б. О коэффициенте Пуассона нефтяных коллекторов с дискретной структурой/ В. Б. Писецкий, С. М. Крылатков // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. - № 1. – С. 115-121.

78. Писецкий, В. Б. Оценка рисков развития опасных явлений при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений транспортного и горного назначения на основе сейсмометрических и сейсмологических средств контроля/ В. Б. Писецкий, Э. С. Лапин, И. В. Абатурова, С. Э. Лапин и др. //11-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика -2015», г. Геленджик, Россия, 20–24 апреля 2015 г. -
Режим доступа:
<http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=8005591>.
79. Писецкий, В. Б. Практический опыт применения сейсмических систем контроля и прогноза развития опасных геодинамических явлений в процессах подземных работ/В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин // Труды IV межд. форума «Эффективность и безопасность горнодобывающей промышленности-2018». – Челябинск, 2018.
80. Писецкий, В. Б. Прогноз устойчивости горного массива на основе метода сейсмической локации в процессах строительства подземных сооружений/ В. Б. Писецкий, В. В. Власов, В. П. Черепанов и др.// Инженерные изыскания. – М.: Изд-во Геомаркетинг, 2014. - № 9-10. - С. 46-51.
81. Писецкий, В. Б. Прогноз флюидодинамических параметров нефтегазоносных бассейнов по сейсмическим данным: дисс. ... д-ра геол.-мин. наук: 25.00.12 / Писецкий Владимир Борисович. – Екатеринбург, 2005. - 289 с.
82. Писецкий, В. Б. Сейсмическая система контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО» в процессе ведения проходческих и добычных работ/ В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин, А. Г. Бабенко // Труды IV Междунар. конференции. - Екатеринбург, 22-23 мая 2013 г./редколлегия: Корнилков М.В. (отв. за выпуск). - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. - С.178-179.
83. Писецкий, В. Б. Сейсмический мониторинг процессов строительства и эксплуатации подземных сооружений на основе системы МИКОН-ГЕО/ В. Б. Писецкий, И. В. Абатурова, В. В. Власов и др. // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломе-

- раций. Вып. 17. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (19-20 марта 2015 г.). – Москва: РУДН, 2015. – С. 190-194.
84. Писецкий, В. Б. К задаче формулирования общих требований и практической реализации сейсмической системы контроля и прогноза внезапных выбросов и горных ударов /В. Б. Писецкий, Э. С. Лапин, А. В. Александрова, С. Э. Лапин// Безопасность труда в промышленности. - 2013. - № 12. - С. 49-57.
 85. Писецкий, В. Б. Механизм разрушения осадочных отложений и эффекты трения в дискретных средах/ В. Б. Писецкий // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. - № 1. - С. 48-66 .
 86. Писецкий, В. Б. О выборе критерия оценки риска потери состояния устойчивости горного массива по сейсмическим, аэрогазовым и геомеханическим данным/ В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин, В. А. Левин, В. А. Горбунов, С. М. Чевдарь // Проблемы недропользования. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2016. - № 2 (9). - С.59-65.
 87. Писецкий, В. Б. О проблемах и результатах практического применения систем сейсмического контроля и оценки риска развития опасных процессов в подземных условиях/ В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин, В. В. Власов//12-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2016» – Анапа, Россия, 25-29 апреля 2016 г.
 88. Плаксин, М. С. Оперативная оценка уровня газодинамической активности угольного пласта при проведении подготовительных выработок / М. С. Плаксин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: «Горная книга», 2013. - Отдельный выпуск № 6. - С. 245 - 251.
 89. Плаксин, М. С. Развитие метода автоматизированного контроля газодинамической активности призабойной зоны угольного пласта при проведении подготовительных выработок/ М. С. Плаксин// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово, 2014. - № 1. - С.23-28.

90. Полевщиков, Г. Я. «Деформационно-волновые» процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах / Г. Я. Полевщиков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - Новосибирск: СО РАН, 2013. – № 5. – С. 50–60.
91. Полевщиков, Г. Я. Газодинамическая активность угольных пластов и зональная дезинтеграция массива горных пород при проведении подготовительных выработок / Г. Я. Полевщиков, М. С. Плаксин // Труды 2-й Российско-Китайской науч. конф.- Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 83-89.
92. Полевщиков, Г. Я. Динамические газопроявления при проведении подготовительных и вскрывающих выработок в угольных шахтах / Г. Я. Полевщиков. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2003. – 317 с.
93. Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах: утв. приказом Ростехнадзора от 01.12.2011 № 678; введено в действие 2012.04.13. - М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. - Серия 05. - Выпуск 23. - 110 с.
94. Приказ Ростехнадзора от 15.08.2016 № 339 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» (Зарегистрирован в Минюсте России 07.11.2016 № 44251).
95. Приказ Ростехнадзора от 19.11.2013 № 550 (ред. 02.04.2015) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (Зарегистрировано в Минюсте России 31.12.2013 № 30961).
96. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 01 декабря 2011 № 678 (ред. Приказа Ростехнадзора от 08.08.2017 № 303) «Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах».
97. Тыщук, Д. М. Краткое изложение принципов сопряжения контроллеров и SCADA систем [Электронный ресурс]

Реферат Орс-технологии Хоменко В. А

98. Российская угольная энциклопедия. – М.-СПб : ВСЕГЕИ, 2004. – 649 с.
99. Рубцова, Е. В. О создании геоинформационных систем сопровождения подземных горных работ/ Е. В. Рубцова // Итерэспо Гео-Сибирь. – Новосибирск: Сибирский гос. ун-т геосистем и технологий, 2005. – Т. 2. – С. 106-113.
100. Руководство по эксплуатации «Назначение и область применения шахтной газоаналитической многофункциональной системы «Микон 1Р».
101. Руководство по эксплуатации. Датчик метана стационарный (ДМС-03) // [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.ingortech.ru/uslugi/itemlist/category/196>.
102. Руководство по эксплуатации. Датчик СДСВ 01 Измеритель скорости воздушного потока // [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.ingortech.ru/uslugi/itemlist/category/196>.
103. Руководство по эксплуатации. Руководство. Геофон // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sibgeodevice.ru/downloads>
104. Руководство по эксплуатации. Руководство. Микон-ГЕО // [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.ingortech.ru/uslugi/itemlist/category/196>
105. Руководство по эксплуатации. Стационарный датчик скорости движения воздуха СДСВ // [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.ingortech.ru/uslugi/itemlist/category/196>
106. Руководящие документы Методические рекомендации о порядке проведения аэрогазового контроля в угольных шахтах
107. Садовский, М. А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс/ М. А. Садовский, Л. Г. Болховитинов, В. Ф Писаренко. – М.: Наука, 1987. – 210 с.
108. Сборник научных трудов, каталог продукции. - СПб. : ВНИМИ, 2012.

109. Светличный, А. В. Разработка автоматической системы контроля количества осевшей и суммарной концентрации взрывоопасной пыли: дисс. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Светличный Андрей Викторович. - М., 2004. – 173 с.
110. Свидетельство № 2014620302 Российская Федерация. База данных внезапных выбросов угля и газа на шахте «Северная» Кузнецкого угольного бассейна : свидетельство об официальной регистрации базы данных / В.С. Зыков, И. Л. Абрамов, А. А. Лихоузов, О. Ю.Балашов; заявитель и правообладатель ФГБУН ИУ СО РАН (RU). - № 2013621772 ; заявл. 24.12.13 ; зарегистрир. в Реестре баз данных 19.02.14. – [1] с.
111. Скопинцева, О. В. К вопросу оценки аэрологического риска при различных схемах вентиляции выемочных участков угольных шахт/ О. В. Скопинцева, С. В. Баловцев// Научный вестник Московского гос. горного университета. – М.: ФБГОУ ОВ «Московский гос. горный университет, 2013. - № 1. – С. 87-100.
112. Смирнов, О. В. Активная параметрическая идентификация упрощенной аэрогазодинамической модели горных выработок/ О. В. Смирнов, С. Э. Лапин, А. Г. Бабенко // 1-я Международная научно-техническая конференция «Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки»: сборник докладов; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016 г. - С. 1-8.
113. Степанов, Ю. А. Развитие теоретических основ геоинформационных систем для прогнозирования состояния углепородного массива при ведении очистных работ: автореф. дисс. ...д-ра техн. наук: 25.00.35/Степанов Юрий Александрович. - Екатеринбург, 2016. - 32 с.
114. Туренко, С. К. Компьютерная технология оптимизации полевых геофизических исследований на нефть и газ: На прим. сейсморазведки: дисс. ... д-ра

- техн. наук: 04.00.12/ Туренко Сергей Константинович. – Тюмень, 1995. – 360 с.
115. Тыщук, Д. М. Краткое изложение принципов сопряжения контроллеров и SCADA систем [Электронный ресурс] / Д. М. Тыщук, В. А. Хоменко// Орс-технологии. – 2007. – Режим доступа: <https://www.bestreferat.ru/referat-401294.html>.
 116. Фадеев, А. Б. Прочность и деформируемость горных пород / А. Б. Фадеев, Ю. М. Карташов, Б. В. Михеев – М.: Недра, 1979. – 269 с.
 117. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по контролю состава рудничного воздуха, определению газобильности и установлению категорий шахт по метану или диоксиду углерода» (утв. приказом Ростехнадзора от 02.12.2012 № 704). - М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. - Серия 05. - Выпуск 34. - 64 с.
 118. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (в ред. Приказа Ростехнадзора от 19 ноября 2013 г. № 550). - М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. - Серия 05. - Выпуск 40. - 200 с.
 119. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 августа 2016 г. № 339).
 120. Фокин, В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: учебное пособие. // Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. - 131 с.
 121. Харкевич, А. С. Прогноз положения зон геодинамической активности угольных пластов геофизическими методами на шахтах Кузбасса/А. С. Харкевич // В кн. «Геомеханические и геодинамические аспекты по-

- вышения добычи шахтного и угольного метана». - С.-Петербург: ВНИМИ, 2007 г. - С. 290-299.
122. Хиврин, М. В. Контроль параметров метано-воздушной смеси в дегазационном трубопроводе угольной шахты/ М. В.Хиврин, С. С. Кубрин, А. Г. Собеневский//Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, 2012. – С. 80-82.
 123. Хилтерман, Ф. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке/ Ф. Хилтерман. – М.: Изд-во ГЕРС, 2010. - 279 с.
 124. Хогоев, Ю. И. Е. А. Колесников. Применение сейсмоэмиссионной томографии для изучения геодинамически активных зон / Ю. И. Хогоев, Е. А. Колесников // Труды конференции «Триггерные эффекты в геосистемах, 22-24 июня 2010. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 294-300.
 125. Ходот, В. В. Внезапные выбросы угля и газа/ В. В. Ходот. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 363 с.
 126. Чеботарёва, И. Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях, методы и экспериментальные результаты: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.10 / Чеботарёва Ирина Яковлевна. – М., 2011. – 275 с.
 127. Чеботарева, И. Я., Рожков М.В., Тагизаде Т.Т. Устройство сейсмоакустического обнаружения и классификации движущихся объектов. Патент Росс. Федерации на полезную модель. №59842. 2006. Приоритет 2004.
 128. Черепов, А. А. Фрактальная особенность структуризации массива горных пород в изменениях давления на призабойную часть отрабатываемого длинным очистным забоем угольного пласта/ А. А. Черепов, Г. Я. Полевщиков, М. В. Шинкевич, А. В. Радченко, Е. В. Леонтьева // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово.– 2013. – № 1.1. – С. 16–23.
 129. Шинкарьук, В. А. Оценка параметров состояния устойчивости горного массива в процессе ведения подземных работ на основе сейсмических и инженерно-геологических данных: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук:

- 25.00.10/ Шинкарюк Владислав Александрович. – Екатеринбург, 2013. – 20 с.
130. Шинкевич, М. В. Связь геомеханики и метанообильности выработок при ведении подземных горных работ/М. В. Шинкевич, М. С. Плаксин//Вестник Кузбасского гос. технич. университета. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2017. - № 5 (123). – С. 15-24.
 131. Шубик, Б. М. Автоматическое определение координат и моментов возникновения сейсмических событий, основанное на принципах эмиссионной томографии/Б. М. Шубик, А. Б. Ермаков// Проблемы геотомографии. - М.: Наука, 1997. - С. 189–202.
 132. Яковлев Д.В. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт/ Д. В. Яковлев, Т. И. Лазаревич. - Санкт-Петербург, 2012 г. - 82 с.
 133. Ямщиков, В. С. Контроль процессов горного производства/ В. С. Ямщиков. – М.: Недра, 1989. - 440 с.
 134. Bieniawski, Z.T. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends/ Comprehensive Rock Engineering, Volume 3: Oxford ; New York, 1993, Pergamon Press, p. 553-573.
 135. Biot M.A. Mechanics of incremental deformations // New York: GU. - 1965. – p. 430.
 136. Biot M.A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range/ The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 28, No. 2, pp. 168-178, March, 1956.
 137. Byerlee, J. D. Friction of rocks. Pure Appl/Geophys, 1978.116, pp. 615-626.
 138. Byerlee, J. D. The mechanics of stick-slip. Tectophysics, 1970.- М.9. - № 5.
 139. Chang Xu, Liu Yike. Reverse time migration of tunnel seismic reflected data. Proceedings of the 9th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics, 2005. 116-119

140. Darcy, H., 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
141. Dvorkin, I., Mavko G. and Nur A., 1992. The dynamics of viscous compressible fluid in a fracture. *Geophysics* 57/5, May 1992, pp. 720-726.
142. Golf-Racht, T.D., *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam – Oxford – New York, 1982. - 608 pp.
143. Halihan, T. and Nyquist, J.E. « Detection of voids, tunnels and collapse features», Session No. 218-T65, 2006 Philadelphia Annual Meeting of the Geological Society of America, Philadelphia, PA, October, 2006.
144. Hanna, K & Haramy, K- 1999 RockVision applications to delineate hazardous geologic and stress conditions in coal mines Case histones SME Preprint 99 94.
145. Hanna, K. & Haramy, K- 1998 Ground control and geologic assessment in mining through the use of geophysical tomographic imaging Proc Geomechantcs/Ground Control m Mining and Underground Construction Conf Wollongong NSW Australia 543 pp.
146. Hickey, C.J., Schmitt, D.J., Sabatier, J.M, and Riddle, G. « Seismic Measurements for Detecting Underground High-contrast Voids», Proceedings of Symposium on Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, Fort Worth, TX, May 30-April 3, p. 929-936, 2009b.
147. Kneib, G., Kassel, A., Lorenz, K., 2000: Automatic seismic prediction ahead of the tunnel boring machine. *First Break* 18, pp. 295-302; DOI: 10.1046/j.1365-2397.2000.00079.x.
148. Kobayashi, T., Satou, J., Maeda, S., Yamamoto, T., Suguru, S., Honjou, T., Nishioka, K. (2003): New development of hard rock TBMs excavation monitoring tool and control system and true reflection tomography. (Re)Claiming the Underground Space, Proc, of the ITA World Tunnelling Congress 2003, Amsterdam, The Netherlands, 957-963.
149. McKenna, J.R. and Ketchum, S.A. «Tunnel detection, monitoring, and modeling,» Session NS21A, 2006 AGU, GS, MAS, MSA, SEG, UGM Joint Assembly, Baltimore, MD, May 2006.

150. Neib, G., Leykam, A. (2004): Finite-difference modelling for tunnel seismology. *Near Surface Geop.* 2(2), 71-93.
151. O'Connell, R.J., and Budiansky, B., 1977. Viscoelastic properties of fluid-saturated cracked solids. *J. Geophys. Res.*, 82, 5719-5735. P. 430.
152. Perrodon A., 1983. Dynamics of oil and gas accumulations. Aquitaine, Paris, 368 p.
153. Petronio, L., Poletto, F., and Schleifer, A., 2007: Interface prediction ahead of the excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling (TSWD) method. *Geophysics* 72, G39; DOI:10.1190/1.2740712.
154. Pisetski, V., Kormilcev V., Ratushnak A., 2002. Method for predicting dynamic parameters of fluids in a Subterranean reservoir. US Patent, № 6,498, 989 B1.
155. Qingquan Liu. Permeability distribution characteristics of protected coal seams during unloading of the coal body// *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 71. P. 105-116
156. Tchegotareva I. Emission tomography for crustal structure study and monitoring of geodynamic processes// *Plume- lithosphere interactions ILP-project II/6 workshop*. University Louis Pasteur. EOST Strasbourg. 9-11 April 2000. 104-107P.
157. Richard Otto, Edward Button. The Application of TRT –True Reflection Tomography – at the Unterwald Tunnel. *FELSBAU* 20, №2, 2002.
158. Rock, A.; Westman, E. ; Haramy, K.: Tomographic Imaging in Advance of the Tunnel Face. *Proceedings of Institute of Shaft Drilling Technology Annual Technical Conference*, 1996.
159. Sattel, G., Sander, B. K., Amberg, F., Kashiwa, T. (1996): Predicting ahead of the face-tunnel seismic prediction. *Tunnels and Tunnelling*, 24-30.
160. Schoenberg, M., Sayers, C.M., 1995/ Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 60, 204-211.
161. Swinnen, G. (2003): Acoustic Monitoring for Tunnel Boring in Soft Soils. Delft University of Technology, The Netherlands, PhD Thesis.

162. Whiteley, R.; Neil, D.M.: Seismic Imaging in Tunnels with True Reflection Tomography (TRT). Mining 2000, Australia, September, 2000.5. Schwab, P.: Vortriebsbegleitung mit Reflexionsseismik nach dem TRT-Verfahren im Blisadona-Tunnel. Proceedings «Österreichischer Tag 2000», October 2000, pp. 87-93. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2000.
163. Winnen, J. W. Thorbecke, and G. G. Drijkoningen, Seismic Imaging from a TBM. Rock Mech. Rock Engng., Springer-Verlag, 2006.
164. Zhao Yong Gui ,JiangHui, Heidi Zhao. Implement TST Geological Prediction Solution in TBM Environment. BeiJingTongDu Engineering Geophysics Corp., 2011.