

*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»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Научный консультант Писецкий Владимир Борисович,  
доктор геолого-минералогических наук, доцент,  
зав. кафедрой геоинформатики, ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный горный  
университет».

Официальные оппоненты: Кубрин Сергей Сергеевич,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. лабораторией геотехнологических  
рисков при освоении газоносных угольных и  
рудных месторождений, ФГБУН «Институт  
проблем комплексного освоения недр  
им. академика Н.В. Мельникова» РАН;

Степанов Юрий Александрович,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры ЮНЕСКО по  
информационным вычислительным  
технологиям института фундаментальных наук,  
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный  
университет».

Туренко Сергей Константинович,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой прикладной геофизики,  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет»;

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет им. Т.Ф. Горбачева».

Защита состоится 27 мая 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д  
004.010.02 ФГБУН ИГД УрО РАН по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-  
Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБУН ИГД УрО  
РАН: <http://diss.igduran.ru>

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Просьба направлять отзывы почтой в 2-х экземплярах, заверенных печатью организации, по  
указанному выше адресу и на электронный адрес: [panzhin@igduran.ru](mailto:panzhin@igduran.ru).

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

Панжин А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для современного периода развития угольных шахт характерны: существенно возросшая интенсивность отработки месторождений, десятки метров суточного продвижения лав и подготовительных выработок, что обусловило неэффективное использование известных зарубежных и отечественных технических средств оперативного своевременного прогноза возникновения и развития опасных геогазодинамических явлений (ГДЯ) в непрерывном (текущем) режиме подземной разработки угольных месторождений. При этом для обеспечения эффективного прогноза опасных ГДЯ в горном массиве необходимо, чтобы задачи контроля его состояния (решение их является основой содержания представленной диссертационной работы) осуществлялось не только на уровне призабойного пространства и в самой выработке, но и на таком расстоянии от места ведения горных работ, когда можно было бы вмешиваться в процесс их развития.

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, с помощью которых можно решать задачу прогноза на дистанциях первых десятков и сотен метров от мест ведения горных работ во всей зоне активного взаимовлияния горного массива и самих горных выработок. Данное требование, в свою очередь, предопределяет иные по сравнению с действующими системные подходы к теоретическому описанию, построению модели физико-геологических и связанных с ними информационных характеристик горного массива, способы и аппаратные решения контроля значимых физических параметров зон влияния горнотехнических работ.

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

**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 непрерывный 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 позволяет 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 состояния горного массива и в варианте «опасно» формировать 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, Печорского 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, включающий 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 подземной сейсмической локации горного массива в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового анализа метанообильности призабойного пространства в единой информационной среде.

- Предложена система формирования интегральных критериев прогноза развития опасных ГДЯ по контролируемым сейсмическим и аэрогазовым характеристикам горного массива с учетом установленного регламента.

- Разработаны 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 девяти автодорожных тоннелей в г. Сочи (2010-2018), строительстве железнодорожного тоннеля по Керченскому проекту (2018), строительстве пяти автодорожных тоннелей в Китае, на рудниках СУБРа и АЛРОСА (2016-2018). 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», разработке курсовых и дипломных проектов и работ, подготовке 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» «ICAMC-98», Республика Словакия, 8-11 сентября 1998 г.; 14-й Международной конференции по «Автоматизации в горном деле» «ICAMC-2001», Финляндия, г. Тампере, сентябрь 2001 г.;

19-м Горном конгрессе «Mining in the 21<sup>st</sup> century», г. Нью-Дели, 2003 г.; 21-м Всемирном горном конгрессе, г. Краков, Польша, 2008 г.; 22-м Всемирном горном конгрессе (ICAMC), г. Стамбул, Турция, 2011 г.; III-й Международной научно-практич. конференции «ТЕХГОРМЕТ – 21 ВЕК» «Современные технологии управления процессами добычи и переработки полезных ископаемых», 15-16 октября 2012 г., г. С-Петербург; 13-м Всероссийском семинаре «Геодинамика. Геомеханика и Геофизика», г. Новосибирск, 2013 г.; республиканской конференции «Методы контроля и прогноза развития геодинамических явлений в процессах разработки месторождений твердого и углеводородного сырья, г. Екатеринбург, 2015 г.; 11-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная геофизика -2015», г. Геленджик, Россия, 2015 г.; VI-м Уральском горнопромышленном форуме III-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в горном деле», 2015 г.; I-й 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 локации 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 масштабных уровнях в реальных условиях угольных шахт.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Начало диссертационной работы посвящено рассмотрению проблем обеспечения безопасности процессов подземной разработки угольных месторождений и задач прогноза развития опасных явлений; обсуждается состояние проблемы безопасности ведения горных работ в условиях подземной отработки угольных пластов в отечественной и зарубежной практике.

Технологическое оборудование и работники, находящиеся в подземных выработках, опасных по газу, защищены системами автоматического газового контроля (АГК), реализующими функции автоматической газовой защиты (АГЗ). Но система АГК-АГЗ является технологической и предназначена для работы в проектных нормальных и предаварийных режимах и не способна реагировать и прогнозировать выбросы угля и газа, образование пылеметановоздушной смеси, неизбежно приводящих к взрыву. Основные причины этого объективно обусловлены неразрывностью геомеханических и газодинамических процессов, развивающихся в зоне влияния горнотехнических работ, и субъективно усугубляются отсутствием системного изучения тектонофизических процессов с учетом современных научных представлений, методических и инструментальных средств оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива в зоне влияния выработки на горный массив.



Известное утверждение: «Газ, горное давление и физико-механические свойства – таковы три фактора, совокупно обуславливающие склонность пластов угля к внезапным выбросам» (А. А. Скочинский, 1952) - можно конкретизировать следующим образом: для контроля уровня газо- и геодинамической опасностей необходим непрерывный мониторинг и учет этих трех взаимосвязанных в механизме формирования ГДЯ факторов.

Техногенное воздействие на горный массив формируют зоны аномальных напряжений с развитием в них деформаций различной интенсивности в окрестности от десятков до полутора сотен метров от подземной выработки, а в развивающейся системе выработок в пределах шахтного поля формируется сложный геодинамический режим с неочевидным сценарием перехода в неустойчивое состояние. Контуры зоны влияния определяются областью возрастающих напряжений и деформаций пластического и упругого типов, приводящих к перестройке структуры газовой проницаемости массива горных пород. В зоне влияния граница перехода упругих деформаций в пластические и импульсные неустойчива, что является причиной динамических явлений (выбросов газа, угля и породы в забой, горных ударов и т. д.). Эти и другие процессы в зоне влияния обусловлены изменением структуры и параметров НДС. Термин «структура НДС» связан с представлениями о дискретном (блоковом) строении горного массива, определяющем распределение и перераспределение компонент напряжений и, следовательно, газовой проницаемости толщи породного массива в зоне влияния.

Используемые в настоящее время шахтные системы и методики контроля состояния устойчивости горного массива не предполагают прогноза метановыделения с учетом динамики газовой проницаемости в дальней области зоны влияния на основе развития деформационных процессов. Такой прогноз осуществим геофизическими методами, например, на основе методов пассивного шумового сейсмического мониторинга – сейсмической эмиссионной томографии (Николаев и др., 1983; Шубик и др., 1991; Александров, Узунов, 1992; Рыкунов, 1992; Мирзоев, 1997; Arnason, Flovenz, 1992; Furumoto, 1992; Шубик, Ермаков, 1997; Chouet et al., 1999; Кугаенко и др. 2004; Александров, 2008; Чеботарева и др., 2008). В этом направлении для подземных условий наиболее развиты сейсмические системы регистрации сейсмоэнергетического состояния массива горных пород (пассивные методы регистрации сейсмоакустической эмиссии в контуре шахтных полей) и реализующие их системы: ARAMIS (EMAG, Польша); GITS (ВНИМИ, Россия) и др. Эти и аналогичные им системы используют распределенную сеть сейсмоприемников, а их функционал ориентирован на обработку сейсмических сигналов и определение зон повышенной сейсмической активности в пространстве шахтного поля.

Опыт применения пассивных сейсмических методик контроля состояния устойчивости массива горных пород подтвердил возможность контроля некоторых косвенных параметров состояния устойчивости массива горных пород, но показал низкую эффективность

объективного прогноза уровня риска развития опасных ситуаций в определенной области пространства, что обусловлено принципиальной неопределенностью процесса подготовки и развития динамических явлений (Добровольский, 2009 и др.). Неопределенность природы превышения предела устойчивости горного массива может быть вызвана как увеличением значений компонент НДС в локальной области (модель консолидации), так и их снижением (модель деструкции). Это объясняется свойством двухмодульности реальных сред с дискретной структурой, в которых наборы упругих модулей в процессах сжатия и разгрузки существенного объема массива горных пород принципиально не совпадают (Петухов, 1996; Byerlee, 1978; Golf-Racht, 1982; Zobac, 1985; Nur, 1989; Писецкий, 1997 и др.). Соответственно, осуществить на основе пассивных методов прогноз координат области и времени наступления опасного сейсмического события на уровне детерминации выше 50 % представляется по определению некорректной задачей. Например, история сейсмологических наблюдений в Калифорнии на сети с более 1500 сейсмостанциями за последние 12 лет свидетельствует об уровне детерминации прогноза землетрясений не более 52-53 %. Подобный уровень прогноза развития ГДЯ получен за многие десятилетия и на отечественных рудных и угольных предприятиях.

В меньшей степени применяются методы сейсмической локации массива горных пород – регистрация сигналов отраженных волн в режиме активного механического воздействия на забой горных механизмов или импульсных воздействий ударно-взрывных типов. Такие методы активного прогноза разработаны и применяются при строительстве тоннелей, но не используются при эксплуатации горных предприятий с подземным способом добычи полезного ископаемого. Наиболее известны методы активного прогноза геологического строения горного массива впереди забоя выработки, которые реализованы в системах сейсмической томографии TRT 6000 (NSA Engineering, США) и TSP 303 (Amberg Measuring Technique Ltd., Швейцария). Эти методы основаны на регистрации сигналов отраженных волн от источников импульсного типа (удары и взрывы) и давно применяются в практике тоннельного и шахтного строительства (в Китае с 2000 года). Однако системы TSP и TRT неприменимы в угольных шахтах, поскольку не обеспечивают непрерывный контроль и прогнозирование развития опасных газогеодинамических явлений в зоне влияния, что остаётся актуальной и сложной задачей.

В заключении обзора сформулированы цели и задачи создания системы контроля и прогноза развития ГДЯ, в которой предлагается совместить пассивный и активный режимы регистрации сейсмических сигналов в синхронизированном режиме с регистрацией параметров аэрологического состояния горной выработки.

На защиту выносятся следующие научные положения.

**Первое защищаемое положение:** *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.*

Защищаемое положение предопределяет рассматриваемый в работе функционал геоинформационной системы шахты ГИС МИКОН в виде структурной схемы, изображенной на Рисунке 1, и который 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);

г) организацию синхронного с геотехническим мониторингом контроля нормативных характеристик аэрогазового состояния горных выработок.

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.

Аппаратно-программный комплекс «Микон-АГК» (далее - аэрогазовый канал) в составе ГИС МИКОН представляет собой комплекс, предназначенный для непрерывного измерения параметров состояния промышленных и горнотехнологических объектов, в том числе параметров рудничной атмосферы и микроклимата, состояния основного и вспомогательного технологического оборудования, передачи информации на диспетчерский пункт, ее обработки и отображения.

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

- концентрация метана;
- скорость воздушного потока (расхода воздуха).

Особое место в общей структуре занимают каналы связи комплекса «Микон-АГК», в которые входят:

- подземные и наземные приемники и передатчики информации;
- барьеры искробезопасности, устанавливаемые вне взрывоопасной зоны;
- линии связи.

Основные параметры, которые используются в математической модели на сервере «Микон-АГК», – концентрация метана и скорость воздуха, которая потом пересчитывается в расход.

Функционал аппаратно-программного комплекса «Микон-ГЕО» (далее – сейсмический канал) основан на доказанном положении (М. Biot, 1965), что для любой точки, лежащей на границе раздела двух сред с различной дискретной структурой, с различными упругими свойствами твердого материала, и заполненные флюидом (газ, вода), атрибуты сейсмического сигнала отраженной волны (тензор «малых напряжений во фронте волны») непосредственно связаны с компонентами тензора «больших напряжений», действующих в точке отражения.

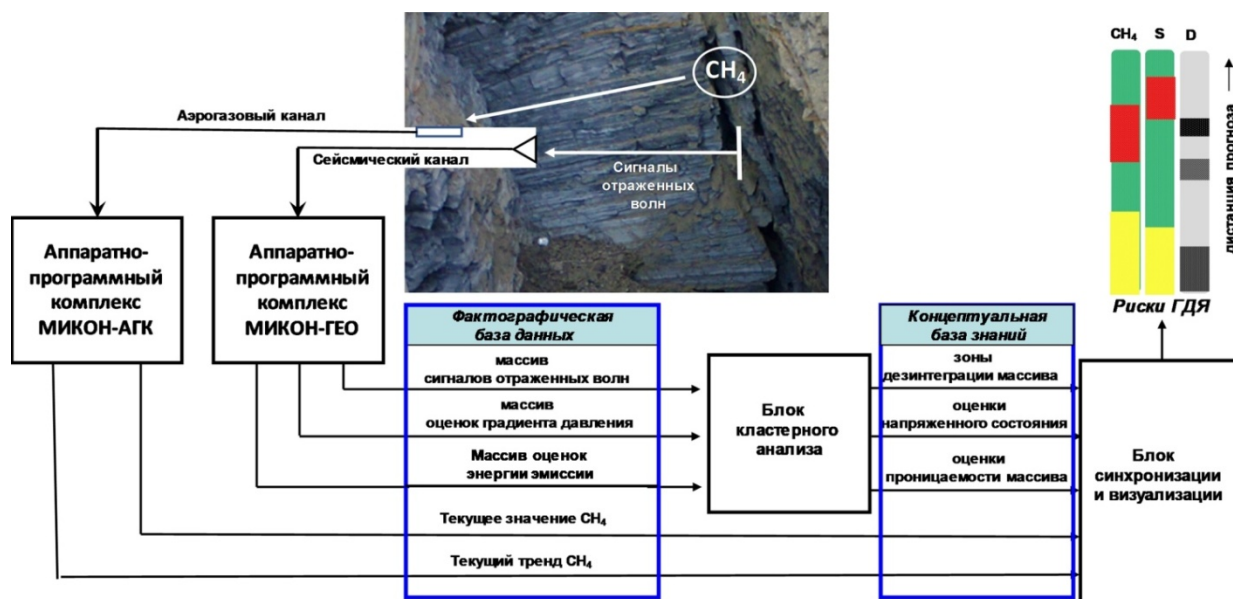


Рисунок 1 - Функционал геоинформационной системы ГИС МИКОН

Алгоритм перехода от динамических атрибутов сигналов отраженных волн различной поляризации (мгновенные амплитуды и частоты) к относительным оценкам компонент напряжений строится на основе следующей приближенной зависимости (V. Pisetski, patent US, 1997):

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

где  $G_s(t)$  – функция относительного приращения градиента общего давления  $P$  в точке отражения;

$A_s(t)$  и  $F_s(t_i)$  – мгновенные значения амплитуд и частот сигнала отраженной волны (по Гилберт-преобразованию) в этой же точке;

$\bar{A}(t)$  и  $\bar{F}(t)$  – амплитуда и частота сигнала отраженной волны, значения которых рассчитаны в высокочастотном приближении.

Показатели степени  $n$  и  $m$  устанавливаются с учетом геологических особенностей в конкретном осадочном бассейне и глубины ведения работ.

На Рисунке 2 показана модель основных сейсмических отражателей в горном массиве. Когда в 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 массива. Если в зоне источника упругих волн расположены приемники сейсмических колебаний, то каждый из них регистрирует функцию  $G(t)$ , в которой будут присутствовать сигналы отраженных волн, соответствующие положению «сильных» и «слабых» сейсмических отражателей каждой зоны дезинтеграции горного массива, которая может быть представлена одной трещиной или их множеством в средах с дискретной структурой.

В то же время непрерывная динамика аномальных напряжений в ближней зоне подземной выработки поддерживает неравномерный геодинамический и сейсмический режимы горного массива с дискретной структурой в отсутствии источников упругих волн (сейсмическая эмиссия массива в формах «стреляния», микроударов и т. п. импульсных явлений).

В 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 3D параметрическим массивом, например так, как это показано на нижнем фрагменте Рисунка 2. 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 или системы выработок в пределах шахтного поля.

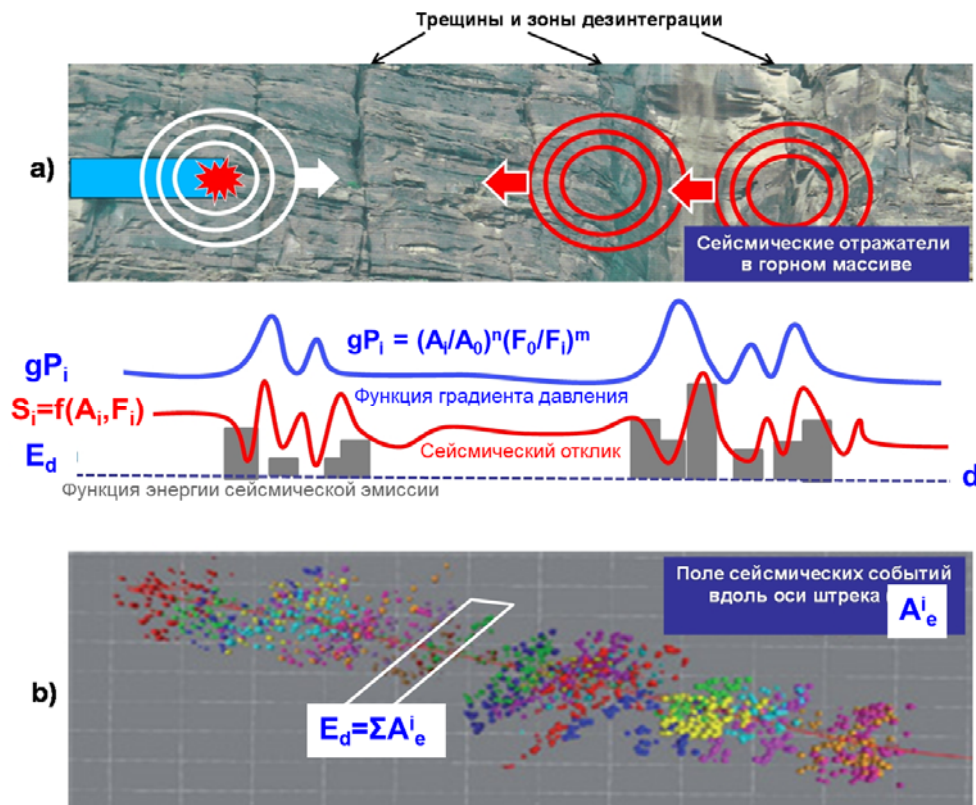


Рисунок 2 - Сейсмические отражатели и источники упругих волн в горном массиве с блоковой структурой

На Рисунке 3 приведен пример 3D-массива сейсмического волнового поля (слева), на котором обозначен конус отображения сейсмических сигналов отраженных волн. Такой же 3D массив сейсмических сигналов эмиссионных волн регистрируется в непрерывном режиме в отсутствии механических помех (режим тишины). По этим информационным массивам далее рассчитываются массивы относительных значений модуля градиента горного давления, параметрические массивы упругих модулей (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), необходимые для аналитических расчетов геомеханических моделей, и оцениваются энергетические параметры по сигналам сейсмической эмиссии.

Сопоставление матриц относительных оценок градиента давления  $gP$  и энергии сейсмической эмиссии  $E_d$ , приведенных на этом же рисунке, свидетельствует о принципиальном соответствии распределения независимых сейсмических оценок структуре геомеханического состояния массива угольного пласта в контуре лавы. Пунктирная линия черного цвета, показанная на этих матрицах, соответствует положению зоны дезинтеграции пласта, которая и должна была сформироваться на этом месте с момента выделения массива пласта замкнутой системой штреков, что привело к инверсионному распределению горизонтальных компонент напряжений и разделению пласта на две равные части.

Система оперативной обработки результатов регистрации полного набора векторных компонент волнового поля, при многократном или непрерывном возбуждении из различных положений источника колебаний, обеспечивает получение устойчивого суммарного трехмерного сейсмического изображения горного массива в сигналах отраженных волн и сигналах сейсмической эмиссии.

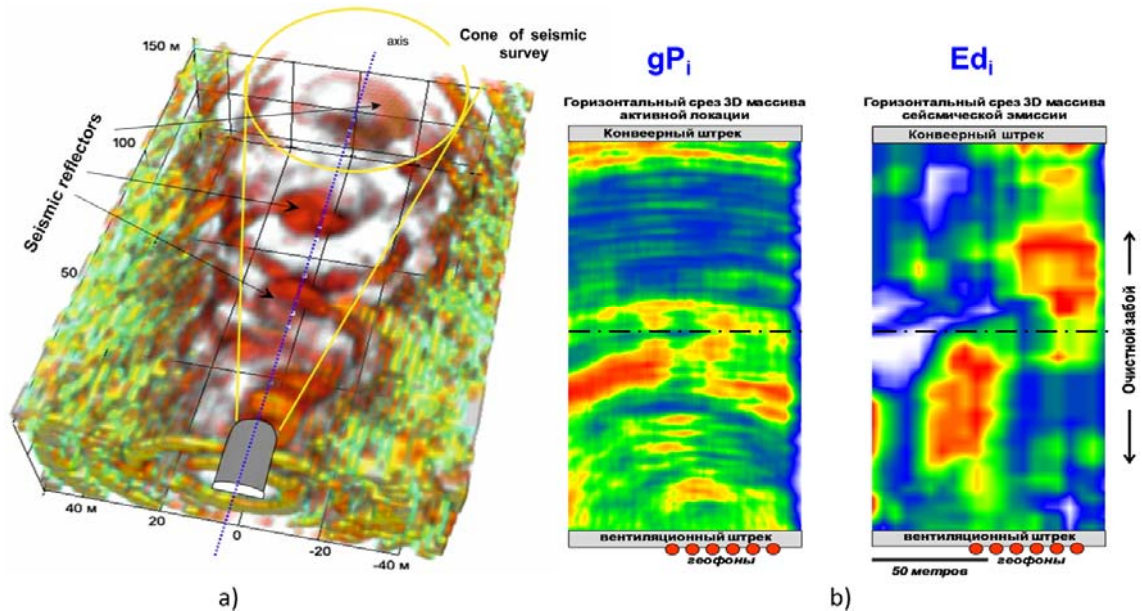


Рисунок 3 - Пример 3D-массива сейсмического изображения сигналов отраженных волн впереди забоя подготовительной выработки (а) и горизонтальные срезы 3D активной локализации и сейсмической эмиссии в очистном забое (б)

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 м) в заданных системой наблюдения и обработки направлениях вперед от забоя, вверх, в стороны, назад.

Размер 3D сейсмического изображения может составлять 100x100x200 метров. Такой размер изображения примерно соответствует размеру ближней и дальней зон влияния проходческого или очистного забоев на горный массив.

Основными функциями системы «Микон-ГЕО» являются:

а) контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива посредством регистрации:

- сейсмических и акустических сигналов естественного происхождения, источником которых является собственная сейсмоакустическая активность горного массива;

- сейсмических и акустических сигналов искусственного происхождения, источником которых является сейсмоакустическая активность горного массива, обусловленная

специальными тестовыми воздействиями на горный массив или работой технологического оборудования;

б) передача данных контроля НДС горного массива на наземный компьютерный комплекс через систему передачи информации;

в) прием, хранение, обработка данных контроля НДС горного массива на поверхности на автоматизированном рабочем месте (АРМ) в реальном масштабе времени или на месте выполнения контроля при использовании «ручного» пульта управления;

г) визуализация результатов обработки данных контроля НДС горного массива на поверхности на автоматизированном рабочем месте (АРМ) в реальном масштабе времени или на месте выполнения контроля при использовании ПУ в виде:

- структуры горного массива;
- зон развития геогазодинамических явлений;
- прогноза геогазодинамических явлений.

Уровни функционирования сейсмического канала «Микон-ГЕО» обеспечивают выполнение следующих видов контроля НДС горного массива и дистанционного прогноза зоны вероятного развития ГДЯ:

а) непрерывный контроль собственной сейсмической активности горного массива в пределах шахтного поля с выполнением регионального прогноза по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям (применяются стационарно смонтированные комплекты оборудования);

б) периодический контроль собственной сейсмической активности горного массива в пределах участка шахтного поля с выполнением локального прогноза по сейсмоакустической активности (контроль и прогноз выполняются в местах ведения горных работ в забоях очистных и подготовительных выработок; горные работы на данном участке прекращаются на время выполнения контроля и прогноза; применяются стационарно смонтированные или переносные комплекты оборудования);

в) непрерывный или периодический контроль собственной сейсмической активности горного массива в пределах участка шахтного поля с выполнением локального прогноза по сейсмоакустической активности (контроль и прогноз выполняются в поддерживаемых выработках; применяются стационарно смонтированные или переносные комплекты оборудования);

г) непрерывный контроль сейсмической активности горного массива в пределах участка шахтного поля с выполнением текущего (локального) прогноза по параметрам искусственного акустического сигнала (контроль и прогноз выполняются в местах ведения горных работ в забоях очистных и подготовительных выработок, во время ведения горных работ; применяются стационарно смонтированные комплекты оборудования).



Сейсмический канал «Микон-ГЕО» обеспечивает работу в следующих режимах функционирования:

а) автоматический активный режим, который обеспечивает регистрацию сейсмических сигналов на полевом уровне и их передачу на уровень обработки, визуализации и хранения данных (автоматический активный режим является основным режимом работы ГИС МИКОН);

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) автоматизированный инициативный режим, при котором в качестве источника сейсмического сигнала используется ручное воздействие на горный массив с помощью ударно-тестового инструмента.

Инициативный режим позволяет построить фоновую сейсмогеологическую модель угольного пласта до начала ведения добычных работ, независимым образом проконтролировать положение опасной зоны, выявленной в непрерывном режиме работы комбайна, исследовать состояние целиков и выполнять другие актуальные задачи.

ГИС МИКОН строится по иерархическому принципу и включает в каждом из каналов (аэрогазовом и сейсмическом) следующие устройства (Рисунок 4):

- устройства подземного 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 (датчики аэрогазового канала Микон-АГК и геофоны сейсмического канала Микон-ГЕО), предварительной обработки информации, обмена информацией с техническими средствами верхнего уровня, состоящие из контроллеров (ИПКС) и использующие общешахтную высокоскоростную информационную магистраль (СПИН);

- устройства наземного 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;

- устройства и линии связи, обеспечивающие обмен информацией и командами между различными устройствами системы;

- устройства электропитания;

- системное программное обеспечение и прикладное программное обеспечение ГИС МИКОН.

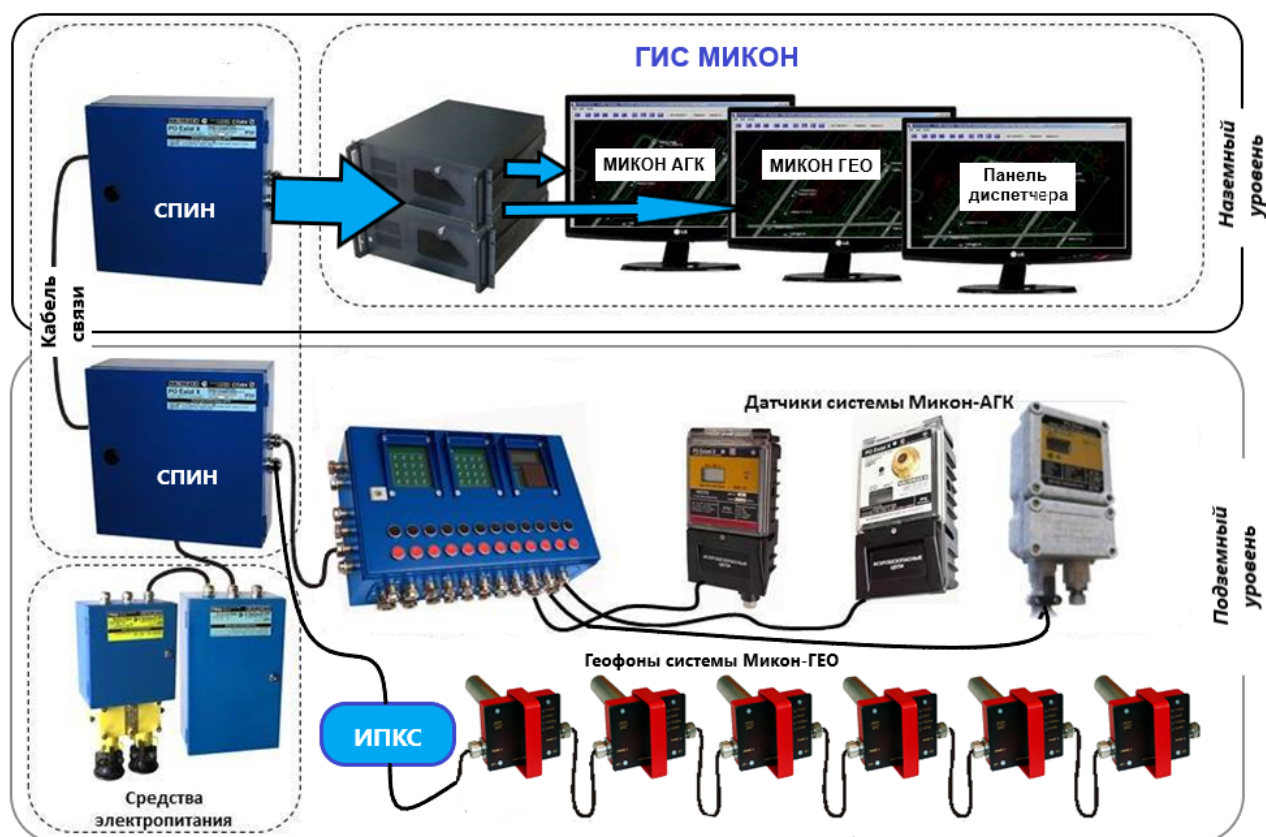


Рисунок 4 – Технические компоненты ГИС МИКОН

Выходными параметрами системы приняты следующие индикаторы уровня опасности на установленную дистанцию прогноза (см. Рисунок 1):

- зоны дезинтеграции массива  $D$  (данные канала Микон-ГЕО);
- зоны концентрации компонент напряжений  $S$  (данные канала Микон -ГЕО);
- зоны концентрации метана  $CH_4$  (данные канала Микон -АГК).

Индикатор  $D$  представлен линейкой черно-белого растра, интенсивность черного цвета которого соответствует амплитуде сигнала отраженной волны в предположении, что каждый сигнал отраженной волны порожден зоной дезинтеграции горного массива. Индикаторы  $S$  и  $CH_4$  отображаются в «светофорном» формате на соответствующих дистанционных (метрических) линейках. Красный цвет каждого из индикаторов означает сигнал «опасно» по критериям уровня опасности, которые назначаются специалистами шахты с привлечением сотрудников научных организаций по результатам целенаправленных исследований в конкретных горно-геологических условиях. Совпадение или сближение всех трех индикаторов на одной дистанции автоматически инициирует появление на мониторе сигнала «опасно» и в том числе позволяет диспетчеру принять декларативное решение о положении зоны с вероятным развитием опасного ГДЯ.

Подчеркнем важную особенность конструктивных элементов аэрогазового и сейсмического каналов - унификация по блокам связи, питания и т. п., что значительно оптимизирует стоимостные и эксплуатационные параметры системы в целом. Все вышеназванные модули «Микон-ГЕО» выполнены в искробезопасном исполнении для применения в подземных условиях, опасных по газу.

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 учетом данных аэрогазового контроля в синхронизированном режиме функционирования всех компонент системы.

**Второе защищаемое положение:** *Двухстадийный теоретический и экспериментальный подходы в развитие 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.*

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

Общее горное давление в любой точке осадочной толщи представляется следующим образом:

$$\tilde{P} = P_g \pm P_d, \quad (1)$$

где  $P_g$  - нормальное (литостатическое) давление;

$P_d$  - добавочное (динамическое, или сверхлитостатическое) давление, зависящее от времени.

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 на I этапе

рассматриваемой нами задачи использовать уравнение Дарси. В этом случае скорость и направление течения флюидного потока:

$$\vec{V} = -\frac{k}{f} \nabla P_d, \quad (2)$$

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

В модели горного массива с дискретной структурой общая проницаемость  $k$  для выбранного объема среды определяется тремя типами проницаемости:

- матричной проницаемостью материала дискретов  $k_I$ ;
- проницаемостью междискретного пустотного пространства  $k_{II}$ ;
- контактной проницаемостью на границах ансамблей дискретов  $k_{III}$

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  $k_{III}$ , 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 в 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

$$\nabla^2 P_d = -\frac{f}{k} \nabla \frac{k}{f} \nabla P_d + \frac{f}{k} q, \quad (3)$$

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

Решением на модели дифференциального уравнения (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.

На 2-й стадии рассматриваемого подхода предлагаются методика и процедура определения связи между напряжениями и деформациями в горном массиве. Математическая постановка рассматриваемой задачи геомеханического анализа угольного пласта включает в себя систему уравнений, описывающих динамическое изменение напряженно-деформированного состояния пороупругого тела, насыщенного газом:

$$\operatorname{div}(\sigma(u(x,t)) - \alpha p(x,t)I) + f(x,t) = \rho \ddot{u}(x,t), \quad (4)$$

где  $u$  – вектор перемещений точек пороупругого тела;

$\rho$  – давление насыщающего газа, полученное из решения уравнений фильтрации, рассмотренных на 1-ом этапе ( $\rho = P_d$ );

$p$  – поровое давление;

$\alpha$  - коэффициент Био;

$f(x,t)$ - массовые силы, действующие на массив (например, гравитационное давление  $P_g$ );

$\sigma$  – тензор напряжения;

$I$  – единичный тензор;

$\ddot{u}(x,t)$  – ускорение точек пороупругого тела.

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

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – первый параметр Ламе;  $\theta$  - первый инвариант тензора деформации/

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_j u_i + \nabla_i u_j), \quad (6)$$

$$\theta(\varepsilon) = \sum_{i=1}^d \varepsilon_{ij}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{ij}$  и  $\varepsilon_{ij}$  — компоненты тензора напряжений и тензора деформаций соответственно;

$\delta$  - символ Кронеккера;  $d(= 2,3)$  – размерность задачи.

Параметры Ламэ:

$$\lambda = \lambda(x) = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \mu(x) = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (8)$$

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

Наибольшее значение проницаемости достигается при максимальном раскрытии трещин, т.е. при минимальном уровне сжимающих напряжений по нормали к поверхности блоков. При этом в субгоризонтальной слоистой среде этот эффект максимально проявляется на боковых гранях блоков (дискретов).

Новая проницаемость материала блоков вычисляется согласно уравнению Козени-Кармана [Costa, 2006] как функция пористости материала массива и геометрических характеристик каналов в пористой среде:

$$k = \frac{\phi}{f_c \tau \Sigma_p^2}, \quad (9)$$

где  $\phi$  – 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;

$\Sigma_p^2$  – площадь удельной поверхности порового пространства.

Измененная пористость материала блоков  $\phi_m$  пересчитывается на основе полученных значений объемной деформации блока и пористости  $\phi_i$  на предыдущем шаге:

$$\phi_m = \phi_i(1 + \varepsilon_v). \quad (10)$$

Объемная деформация  $\varepsilon_v$  определяется на основе значений главных деформаций  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) - 1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \{\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\}, \quad (11)$$

где  $\Delta V/V$  – соотношение изменения контролируемого объема массива к его значению до деформации.

Соотношение (11) позволяет однозначно определить модуль вектора распространения газового потока в массиве в любом из возможных направлений.

Определив величину и направление газового потока из зон дезинтеграции (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:

$$R(d) = m \cdot gP_d \cdot E_d \cdot F_i \cdot b \cdot I_T \cdot I_P \cdot d, \quad (12)$$

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.

В диссертационной работе в процессе моделирования газового потока сделан акцент на внешнее сопряжение двух коммерческих пакетов CAE Fidesys (расчет компонент НДС) и Eclipse 300 (расчет параметров газового потока). Одним из главных результатов использования геомеханической модели является прямое моделирование динамической проницаемости, вызванной деформированием угольного пласта с дискретной структурой в процессе фильтрации газа. При этом моделирование и расчет параметров НДС в рамках данной модели осуществляются в два этапа.

На первой стадии 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. Далее на основе найденных эффективных механических параметров в подобластях решается геомеханическая задача о нахождении компонент НДС во всей области. После этого - 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 значения проницаемости (матрицы и межблочных трещин) передаются в газодинамический симулятор на основе модели двойной проницаемости, который определяет поле давлений метана во всей модели. В случае итерационного сопряжения цикл повторяется в рамках одного шага по времени до тех пор, пока не будет достигнута сходимость между геомеханическим решателем и газодинамическим симулятором.

В работе выполнено моделирование, основная цель которого - подтверждение рассмотренных положений теории формирования зон концентрации и деконцентрации компонент НДС в горном массиве. На Рисунке 5 приведен пример оценки проницаемости пласта после приложения нормальной гравитационной нагрузки в модели очистного забоя. Важным элементом в рассматриваемой модели проницаемости пласта в контуре очистного забоя является локальная зона разгрузки в центре забоя, которая способна выполнить роль аккумулятора газа и далее представлять значимую угрозу развития ГДЯ. Именно эта зона и должна приниматься как наиболее вероятная область риска скопления газа, в которую следует своевременно планировать бурение разгрузочных скважин.

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 дезинтеграции горного массива с насыщением газа в них и в периферийной области, что может являться пространственными и временными предвестниками развития опасных явлений.

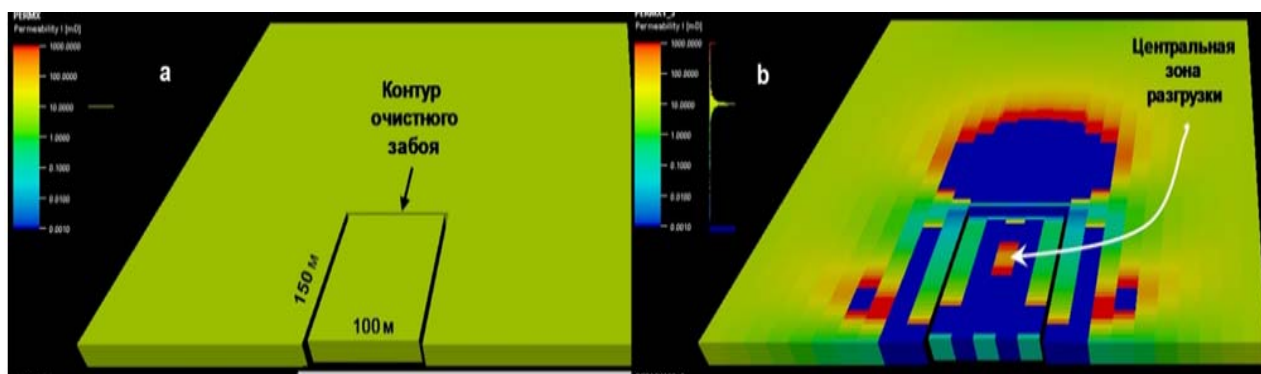


Рисунок 5- Модель проницаемости угольного пласта в поле действия нормальной гравитационной нагрузки

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 предстоящего развития опасных газодинамических явлений.

**Третье защищаемое положение:** *Непрерывный контроль относительных оценок градиента горного давления и приведенной величины объема газа в зоне взаимовлияния подземной выработки и горного массива обеспечивается технологиями сейсмической локации в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового анализа.*

На Рисунке 6 показаны возможные варианты организации текущего и регионального контроля горного массива в процессе добычных работ на основе сейсмических комплексов «Микон-ГЕО» - ТК и РК с комплектами каналов аэрогазового контроля «Микон-АГК» – комплект А. Данная схема расширяется и на мониторинг проходки подготовительных штреков за счет подключения дополнительных сейсмических и аэрогазовых каналов. В локальных исследованиях горного массива «Микон-ГЕО» в комплекте ЛК реализуется



контроль структуры целиков, кровли и других участков подземного пространства, требующих оперативного изучения в мобильном варианте.

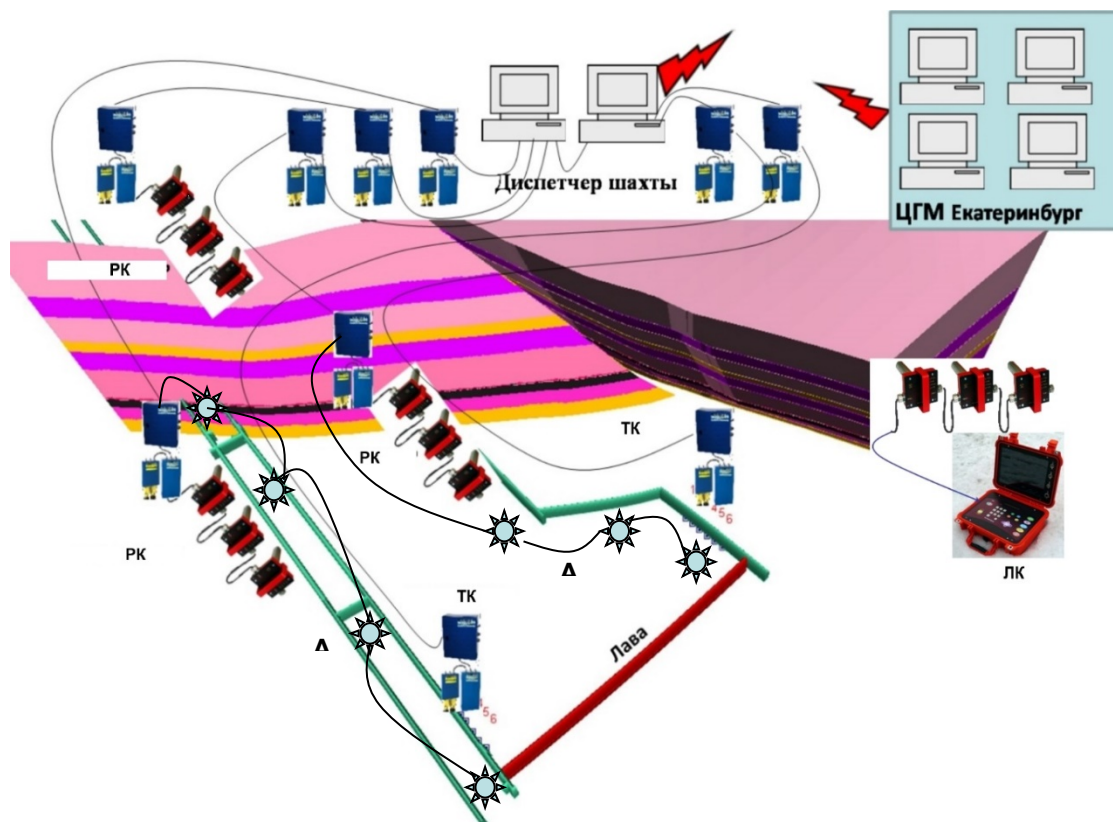


Рисунок 6 - Схема размещения модулей ГИС МИКОН в пределах шахтного поля в процессе ведения добычных работ

Одним из основных элементов панели геоинформационного мониторинга является Сервер интеграции и анализа данных (СИАД), на котором запущено программное обеспечение для сбора данных от каналов «Микон-АГК» и «Микон-ГЕО» и 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 7.

ГИС МИКОН оперирует с каналами «Микон-АГК» и «Микон-ГЕО» через OPC интерфейс либо от клиента 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. На этом же 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, отвечающий за корректировку математической модели, связи метанообильности и состояния горного массива и за 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).

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, сейсмологов, геофизиков). Необходимо также иметь в виду, что в соответствии с Правилами промышленной безопасности, как и АГК, геомониторинг по сейсмическому каналу 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.

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 характерных точек, в сравнении с потоком сейсмоданных, имеют существенно 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. В работе показано, что можно 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».

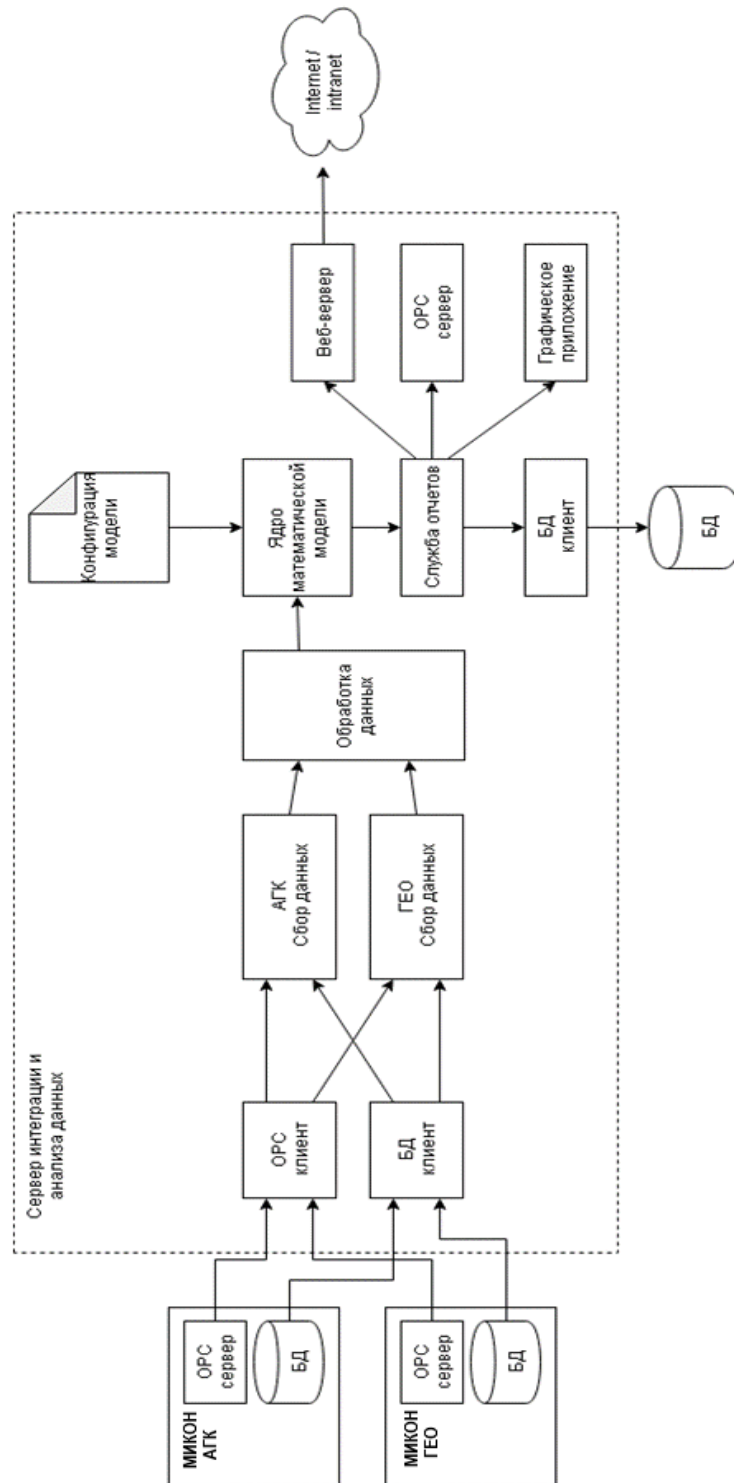


Рисунок 7 – Структура сервера интеграции и анализа данных ГИС МИКОН

Блок «Ядро математической модели», показанный на схеме Рисунка 8, выполняет расчет прогнозного значения величины метанообильности выработки по сейсмическим данным, полученным из системы «Микон-ГЕО», прошедшим 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  $\text{CH}_4$ » 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 состояния массива» строит график распределения зон дезинтеграции по направлению ведения горных работ. Эти данные являются опорными для определения величины прогнозного значения метанообильности.

«Блок прогноза метанообильности выработки» содержит в себе реализацию математической модели, описание которой представлено в предыдущем разделе в виде взаимосвязи текущей метанообильности и состояния устойчивости массива по компонентам НДС (градиента давления). В результате получим прогнозируемую величину метанообильности, которую, с учетом текущей метанообильности очистного забоя, можно использовать для определения уровня безопасности ведения горных работ. Блок «Служба отчетов» предоставляет данные для подсистем визуализации данных и стыковки с другими системами автоматизации.

Подобная схема реализуется и в варианте ведения проходческих работ в подготовительных штреках. При этом оперативный режим мониторинга состояния горного массива впереди забоя штрека обеспечивается алгоритмом обработки данных «Микон-ГЕО» и «Микон-АГК», в общем виде показанном на Рисунке 8. В диспетчерскую службу непрерывно поступают изображения массивов ключевых параметров – градиента давления (Stress) и метанообильности (Gas) с обозначением категорий «опасно» индикаторами (характерными точками) красного цвета на шкалах  $\text{CH}_4$ , S и D (см. Рисунок 1) или на 3D изображениях (см. Рисунок 8).

Таким образом, основная задача ГИС МИКОН в обсуждаемой схеме предопределяет принятие формализованного решения по определению координат зоны дезинтеграции горного массива на достаточно большом расстоянии от рабочего забоя выработки и относительной оценке градиента горного давления, что означает степень дезинтеграции массива в этой зоне, и, в конечном счете, прогнозную величину проницаемости в ней. С учетом предвестника газового насыщения, который появится при приближении забоя к этой зоне, принимается формализованное или декларативное решение о вероятности развития опасного ГДЯ.

**Четвертое защищаемое положение:** *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 масштабных уровнях в реальных условиях угольных шахт.

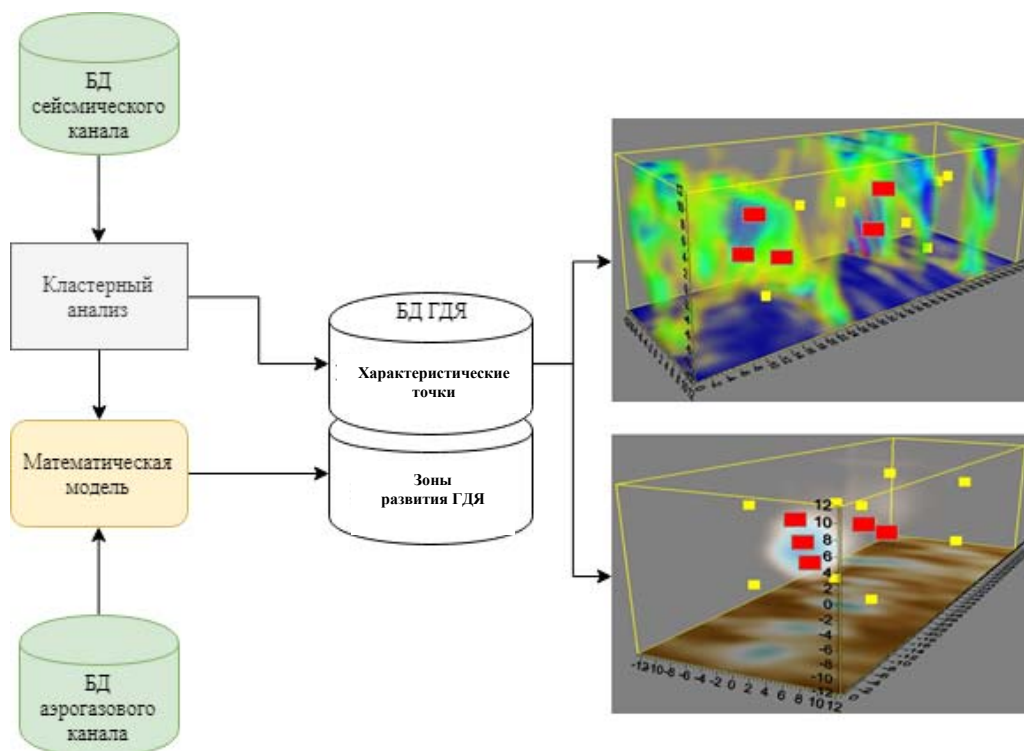


Рисунок 8 – Схема информационных потоков и формат прогноза зон возможного развития опасных ГДЯ

На сегодняшний день сейсмический комплекс «Микон-ГЕО» установлен и функционирует в технологическом режиме на ряде угольных шахт Кузбасса, в которых уже действует в различных вариантах и азрогазовый комплекс «Микон-АГК», что позволило в полном объеме реализовать на этих предприятиях функционал ГИС МИКОН.

На Рисунке 9 показан параметрический массив оценок градиента давления в контуре лавы «Байкаимская». Регистрация сейсмического поля осуществлялась на борту вентиляционного штрека шестью сейсмическими модулями (ИПСМ) с интервалом 10 метров. По мере продвижения забоя лавы все ИПСМ смещались на интервал проходки. Очевидно, что примерно в центре данного 3D сейсмического массива обнаруживается зона аномально высоких значений градиента давления (черный цвет растра). 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.

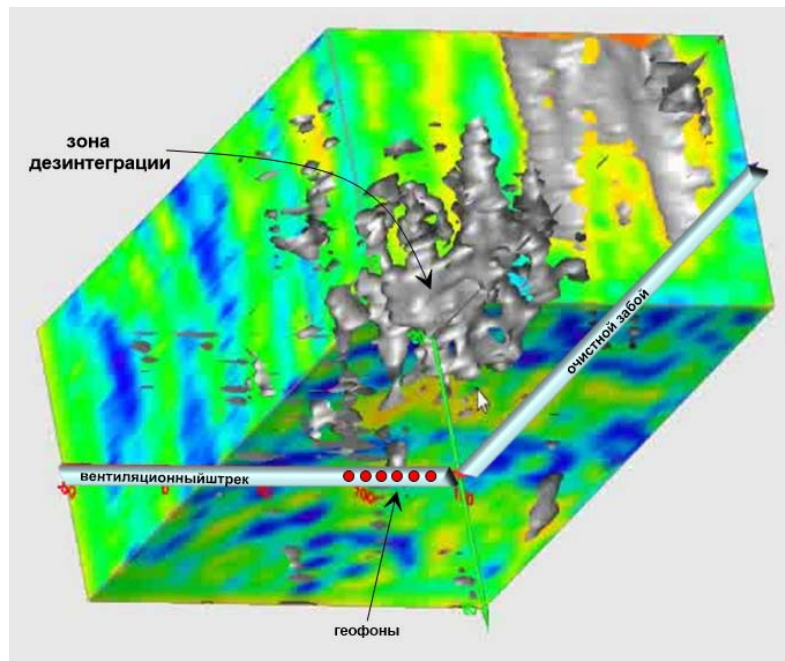


Рисунок 9 – Отображение текущего состояния 3D массива оценок градиента давления в контуре очистного забоя (ш. Байкаимская, Кузбасс, 2017)

На Рисунке 10 приведен вариант отображения структуры и напряженного состояния горного массива в оценках градиента горного давления в процессе проходки подготовительного штрека. Здесь вполне очевидно точное соответствие четко фиксируемой зоны концентрации напряжений впереди забоя штрека теоретическому положению о формировании зоны опорного давления.

Обсуждаемые относительные оценки горного давления, кроме задач оперативного самостоятельного анализа в неочевидных условиях, при определенных условиях целесообразно привести к понятной шкале, регламентированной в практике разработки угольных месторождений для принятия решений по оценке степени риска развития опасных геодинамических явлений. Очевидно также, что универсальной шкалы не существует в силу большого разнообразия геологических, геодинамических, техногенных и иных условий.

По существу, в основную задачу «калибровки» функционала канала «Микон-ГЕО» на конкретной шахте входит прежде всего количественное отождествление сейсмического атрибута со шкалой динамических явлений, например, измеряемых в объемных единицах (литрах) в технологиях извлечения «штыба». Для этой цели необходима репрезентативная

выборка значений оценок по выходу штобы на забое штолка и соответствующая выборка сейсмического атрибута в виде относительной оценки градиента горного давления  $G_s$ . При этом необходимо учитывать, что атрибут  $G_s$  определяется на большой дистанции от забоя в зоне его влияния (зоне опорного давления), а штобы - в непосредственной близости от груди забоя. Другими словами, в тот момент, когда массив уже неизвестным образом «сбросил в забой» часть давления без учета релаксации, она должна быть более тесно связана с атрибутом  $G_s$  на удалении от забоя. Тем не менее другого способа поиска связи этого атрибута с объемом штобы не существует.

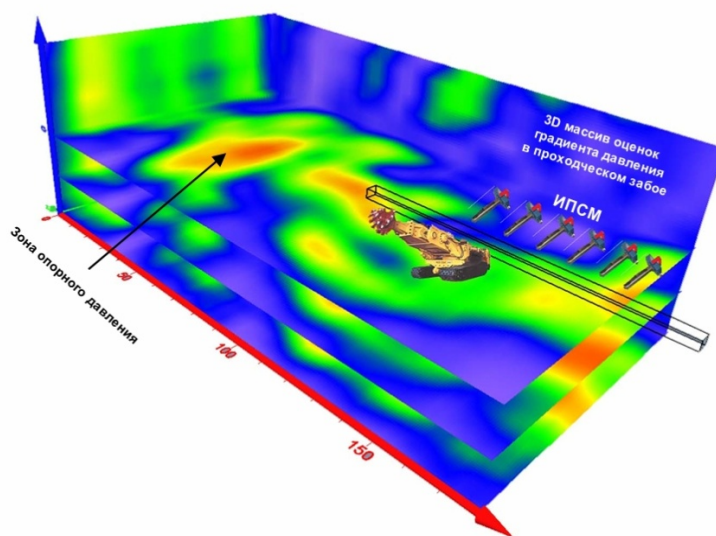


Рисунок 10 – 3D массив оценок градиента давления в процессе проходки подготовительного штолка (ш. Юбилейная, Кузбасс, 2018)

На Рисунке 11 приведен график усредненных значений объемов штобы –  $Q$  (среднее значение по серии шпуров на забое) по трассе проходки подготовительного штолка в маркшейдерских координатах и график прогнозных значений объема штобы, рассчитанных на основе ранее полученной корреляционной зависимости. Данная иллюстрация свидетельствует о достаточно высоком уровне детерминации прогноза (75 %).

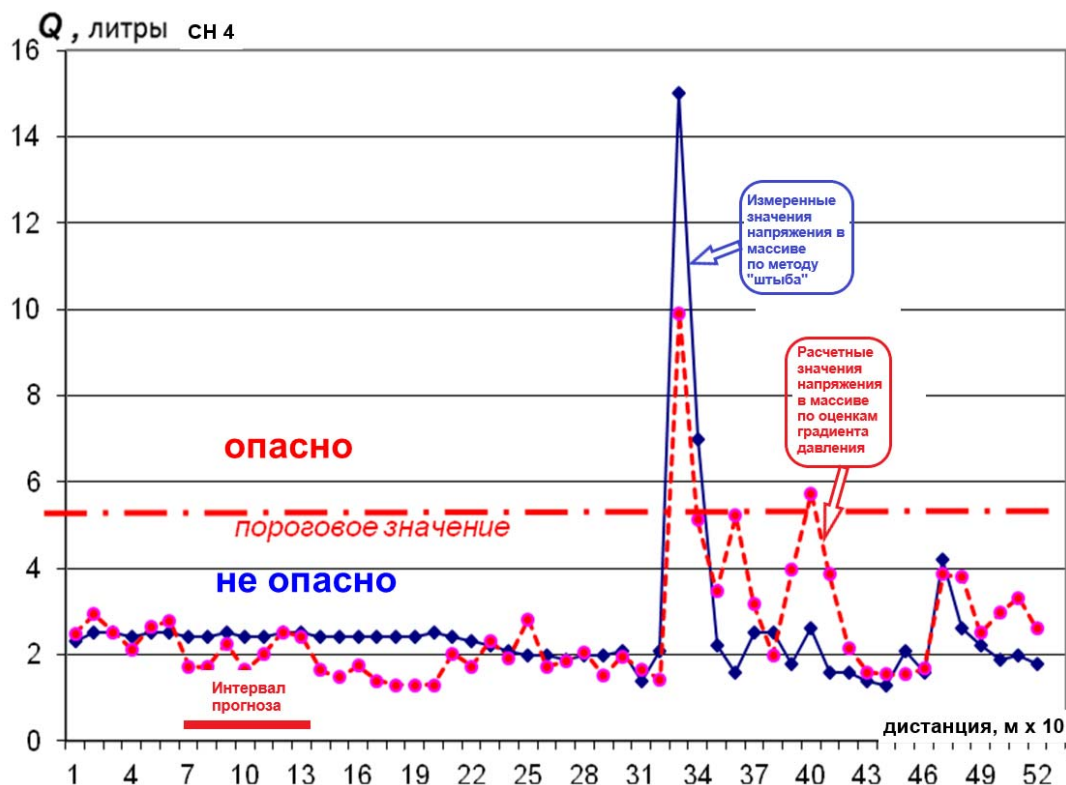


Рисунок 11 - Измеренные и расчетные значения объема штыба по сейсмической функции градиента давления (ш. Северная, Воркута, 2016)

На Рисунке 12 приведенный прогнозный график проницаемости и изображения оценок градиента давления подтверждают 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;
- 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 груди 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.



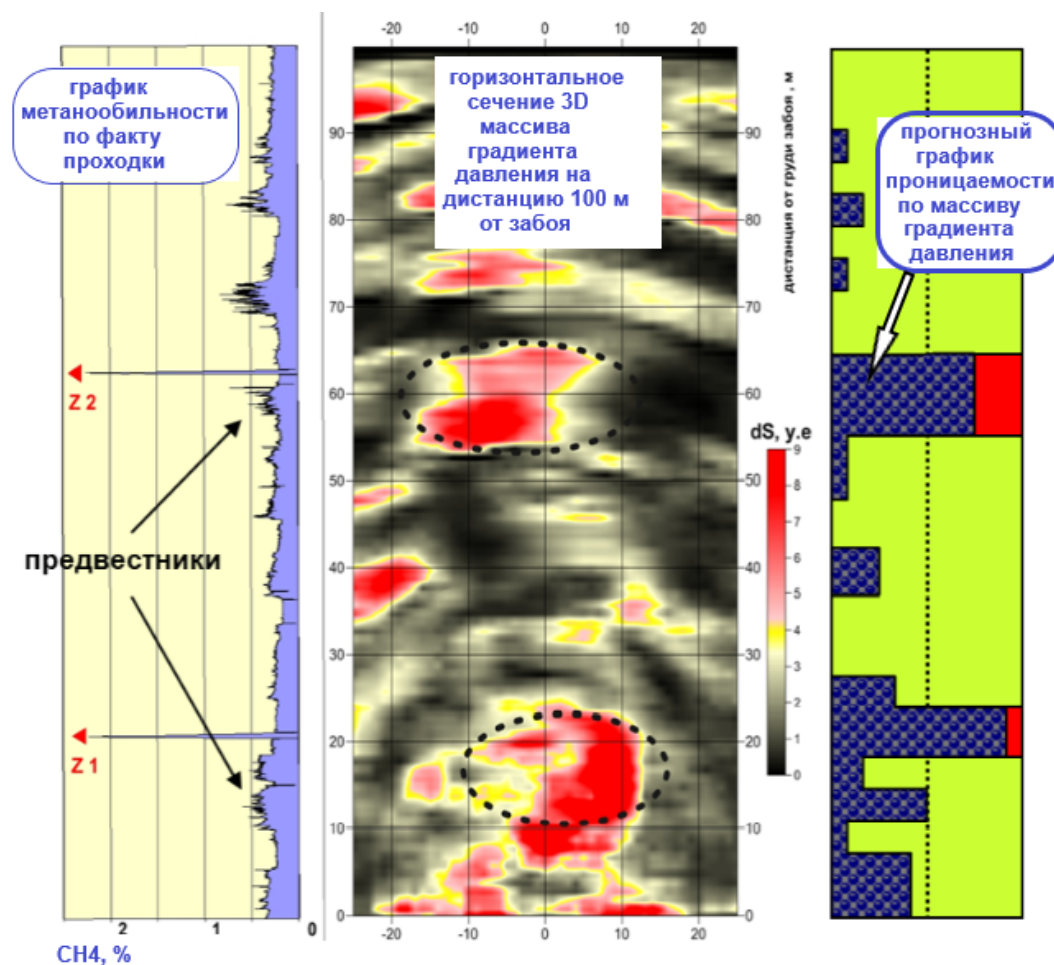


Рисунок 12 – Прогноз проницаемости массива в текущем режиме проходки подготовительного штрека (ш. Юбилейная, Кузбасс, 2019)

Типичный результат прогноза градиента давления при высоких скоростях проходки подготовительного штрека показан на Рисунке 13 (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.

Таким образом, на основании обсуждаемых выше результатов экспериментальных и технологических процессов организации контроля и прогноза развития опасных ГДЯ в функционале ГИС МИКОН можно утверждать:

- 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 сейсмического и аэрогазового контроля горного массива;

- функционал геоинформационной панели обеспечивает непрерывный объективный контроль 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.

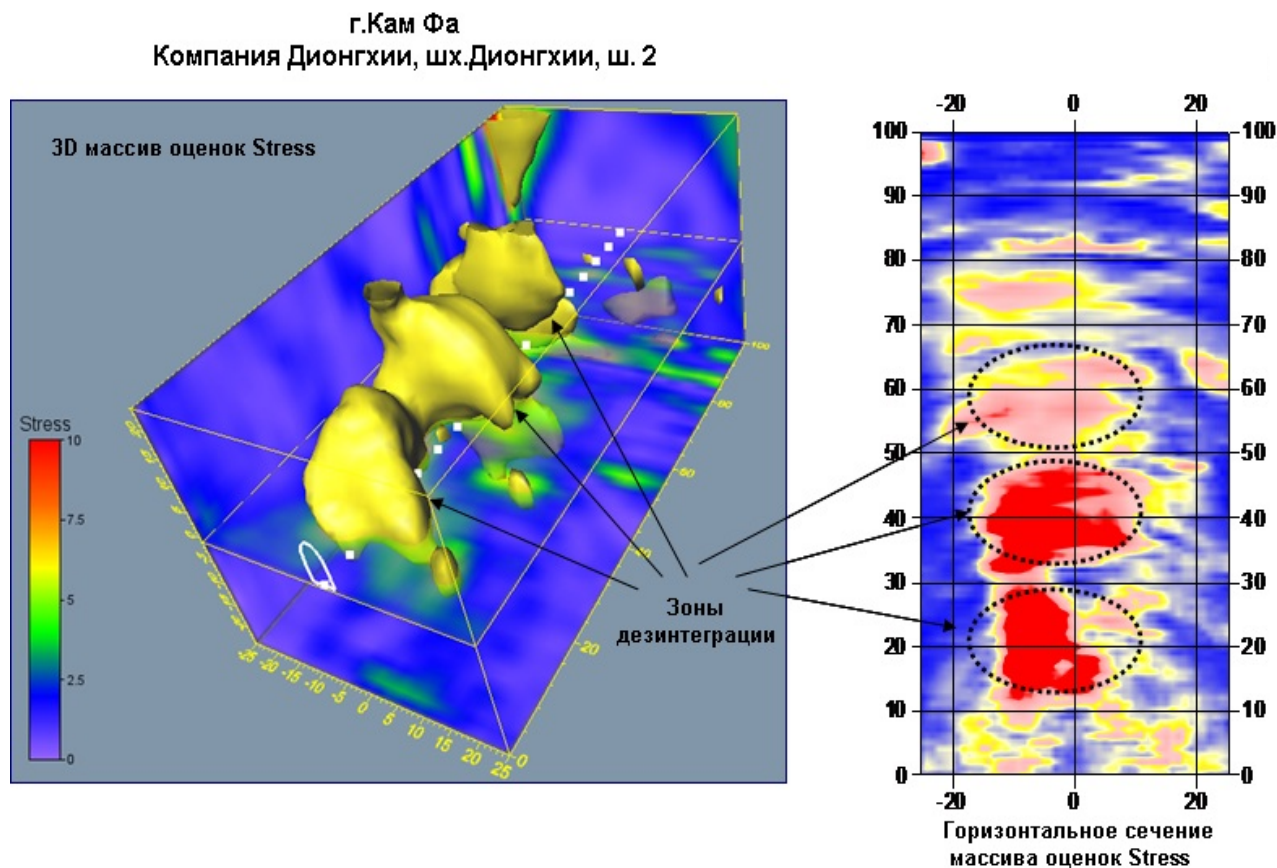


Рисунок 13 - Прогноз зон дезинтеграции массива в текущем режиме высокоскоростной проходки подготовительного штрека (угольная шахта Вьетнама, 2019)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении 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 в условиях опасных по газу угольных шахт:

- теоретически обоснована модель динамической природно-технической системы «геологическая среда – подземная выработка» с дискретной структурой;
- обоснована взаимосвязь структуры и параметров НДС с приведенной величиной метаноносности в зоне взаимовлияния подземной выработки и горного массива;
- разработана технология активной и пассивной сейсмической локации горного массива в совмещенном режиме с системой штатного аэрогазового анализа метанообильности шахтной атмосферы;
- обоснована система интегральных критериев прогноза опасных ГДЯ, впервые

формируемых по регламентным параметрам с учетом независимых по физической природе контролируемых сейсмических и аэрогазовых характеристик горного массива;

- разработаны 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 системы на угольных шахтах, рудниках и тоннелях следует ряд практически значимых выводов:

- электронные компоненты геоинформационной системы 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 с учетом согласованных параметров аэрогазовой атмосферы;

- 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.

Таким образом, на основании обсуждаемых выше результатов экспериментальных и технологических процессов организации контроля и прогноза развития опасных ГДЯ можно утверждать:

- 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 геодинамического 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.

**Научные результаты работы отражены в следующих публикациях:**

**Публикации в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки России:**

1. 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.
2. 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. – Вып. 9. – Екатеринбург, 2000. – С. 20-31.
3. Лапин, С. Э. Особенности экологического мониторинга вблизи угольных шахт (на примере ш. «Центральная» Копейского района Челябинского бурогоугольного бассейна) / С. Э. Лапин, О. М. Гуман, И. Г. Петрова // Известия УГГГА. - Вып. 13. – Екатеринбург, 2001. – С.223-227.
  4. Лапин, С. Э. Экономическое обоснование применения автоматизированных систем аэрогазового контроля угольных шахт/ С. Э. Лапин// Известия вузов. Горный журнал. - 2002. - № 1. - С. 154-158.
  5. 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.
  6. 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 (индексирована в Scopus).
  7. 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.
  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. 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.
  11. 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.
  12. 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.
  13. Лапин, С. Э. Дистанционная оценка динамического состояния устойчивости угленосного горного массива в зоне его влияния на аэрогазовый режим подземной выработки /С. Э. Лапин // Безопасность труда в промышленности. – 2018. - № 6. – С. 29-33.
  14. 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.

15. 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 (индексирована в Scopus).
16. Лапин, С. Э. О проблеме прогноза газовой опасности в местах ведения горных работ при подземной отработке угольных месторождений/ С. Э.Лапин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 10 (специальный выпуск 35). – С. 3-10. (индексирована в Scopus).
17. 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. (индексирована в Scopus).
18. 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. (индексирована в Scopus).
19. 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.

**Патент:**

20. 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/ Автор(ы) Лапин Сергей Эдуардович, Бабенко Александр Григорьевич, Федосов Дмитрий Витальевич (RU). Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Информационные горные технологии» (RU).

**Статьи в других рецензируемых научных изданиях и сборниках трудов:**

21. 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.
22. 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 Междунар. конф. «Автоматизация в горном деле» «ICAMC-98», 13-й Международной конференции по управлению производственным процессом и моделированию. Республика Словакия, 8-11 сентября 1998. - С. 121-125.
23. Лапин, С. Э. Forecast of Ecological Hazards in Settlement Sinuated Nearbe Collieries Using an Automated System of the Undeground Environment Monitoring / С. Э. Лапин // Труды 14-й Междунар. конф. по автоматизации в горном деле «ICAMC`2001», Финляндия, г. Тампере, сентябрь, 2001.

24. Лапин, С. Э. Choice of Interval of Sensors Checking in Control Systems of Parameters of Mine Atmosphere/ С. Э. Лапин, Р. Е. Леонов // Труды 19-го Горного конгресса Mining in the 21<sup>st</sup> century/Vol 2, Oxford & ШИР Publishing Co Pvt ltd. New Delhi, 2003. – P.1707-1711.
25. Кузьменко, С. О. Analysis and forecast safety threats at mining enterprises/С. О. Кузьменко, А. В. Вильгельм, С. Э. Лапин // Сборник трудов 21-го всемирного горного конгресса, г. Краков, Польша, 7-11 сентября 2008. – С.113-119.
26. Бабенко, А. Г. Mining safety increase by means of integrated implementation of requirements for gas control and personal equipment of miners/А. Г. Бабенко, С. М. Оржеховский, С. Э. Лапин, Л. Кулин// Сборник трудов 21-го Всемирного горного конгресса, г. Краков, Польша, 7-11 сентября 2008. - С. 119-125.
27. Бабенко, А. Г. Системы комплексной безопасности горного производства /А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин // Технадзор. – 2008. - № 12. – С. 26-27.
28. Lapin, S. E. New generation mine communication infrastructure/ S. E. Lapin, A. V. Wilgelm // Сборник трудов 22-го Всемирного горного конгресса (ICAMC), 11-16 сентября 2011, г. Стамбул, Турция. – С. 449-452.
29. Бабенко, А. Г. Основы построения многофункциональных систем безопасности угольных шахт/ А. Г. Бабенко, С. Э. Лапин // Сборник тезисов докладов III Междунар. научно-практич. конференции «ТЕХГОРМЕТ – 21-й ВЕК» «Современные технологии управления процессами добычи и переработки полезных ископаемых». – СПб: Изд-во Нац. минерально-сырьевого университета «Горный», 15-16 октября 2012. – С. 36-38.
30. 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: Корнилов М. В. (отв. за выпуск) и др. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. - С.178-179.
31. Писецкий, В. Б. Методы и технологии прогноза структуры и оценки параметров геодинамического состояния геологической среды по сейсмическим данным в приложениях нефтегазовой, горнодобывающей и строительной отраслей /В. Б. Писецкий, С. Э. Лапин, А. Г. Бабенко и др.// Материалы 13 Всероссийского семинара «Геодинамика. Геомеханика и Геофизика», г. Новосибирск, 15-19 июля, 2013. - С. 31.
32. 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, Ю. В. Патрушев, И. В. Шнайдер // Проблемы недропользования. - 2016. - № 2 (9). - С. 58-64.
33. Смирнов, О. В. Активная параметрическая идентификация упрощенной аэрогазодинамической модели горных выработок / О. В. Смирнов, С. Э. Лапин, А. Г. Бабенко // Сборник докладов 1-й Междунар. научно-технич. конф. «Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки».– Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2016. - С. 1-8.

34. 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// Сборник докладов 1-й Международ. научно-технич. конф. «Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки».– Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2016.– С.57-63.
35. 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. - 2018. - Том 18, № 3. - С. 350-362. (индексирована в Scopus).
- Результаты диссертационных исследований докладывались на научных конференциях:**
36. 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», М., Россия, 18-20 апреля 2016 г.
37. 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.
38. 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, С. Э. 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. (индексирована в Scopus). Режим доступа: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80055>
39. 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», г. Анапа, Россия, 25-29 апреля 2016 г. (индексирована в Scopus).
40. 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 // Доклад на 13-ой научно-практической международной конференции «Инженерная геофизика 2017», EAGE, г. Кисловодск, 2017. – Кисловодск, 2017. (индексирована в Scopus).