ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

На правах рукописи

ШНАЙДЕР ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ГОРНОГО МАССИВА В ПРОЦЕССЕ ВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РАБОТ

Специальность 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – Валиев Нияз Гадым оглы,
доктор технических наук

Екатеринбург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….. 4
ГЛАВА 1. Методы и технологии оценки устойчивости горного массива в процессах ведения подземных работ…….. 10
1.1 Оценка структуры и параметров горного массива при строительстве подземных сооружений……. 10
1.2 Особенности оценки устойчивости горного массива в процессах ведения горных работ на шахтах и рудниках…….. 18
1.3. Выводы и постановка задач…… 24
ГЛАВА 2. Текущий прогноз местоположения опасных по геодинамическим явлениям зон с учетом системы «массив пород – горная выработка – крепь»…… 25
2.1 Факторы, влияющие на характеристики устойчивости горного массива вблизи подземной горной выработки…… 26
2.2 Методы оценки устойчивости массива горных пород……. 37
2.3 Опасные геодинамические явления, возникающие в процессе ведения подземных горных работ……. 44
2.3.1 Геодинамические явления, возникающие под действием горного давления…….. 47
2.3.2 Геодинамические явления, возникающие под совместным действием горного давления и газа…….. 54
2.4 Применение системы сейсмической локации для непрерывной оценки параметров угольного массива в очистном забое при механизированном способе ведения работ……... 58
Выводы по главе 2…… 72
ГЛАВА 3. Периодическая оценка структуры и параметров горного массива методом сейсмической локации…….. 73
3.1 Совершенствование специализированной методики применения системы сейсмической локации для периодического прогноза структуры и свойств горного массива…….. 74
3.2 Программные средства агрегации, обработки и визуализации данных……... 95
3.3 Оценка экономической эффективности применения метода сейсмического зондирования в задаче прогноза структуры горного массива…… 111
Выводы по главе 3…….. 116

ГЛАВА 4. Результаты применения системы сейсмической локации в задачах оценки структуры горного массива в шахтах и рудниках……. 117
4.1 Прогноз структуры угольного пласта для поиска оптимальных зон расположения скважин заблаговременной дегазации с поверхности…… 117
4.2 Прогноз зон риска возникновения газодинамических явлений в проходческом забое угольной шахты…… 124
4.3 Прогноз зон потери устойчивости горного массива в области влияния тектонических нарушений в условиях алмазодобывающего рудника…….. 128
4.4 Мониторинг состояния углепородного массива в призабойной зоне выемочного столба лавы……. 145
4.5 Контроль эффективности гидрорыхления угольного пласта по параметрам сейсмоакустического сигнала…… 137
4.6 Исследование возможности применения сейсмического зондирования для оценки трещиноватости горного массива…….. 143
Выводы по главе 4…… 156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 158
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…… 159
ПРИЛОЖЕНИЕ 1…… 169
ПРИЛОЖЕНИЕ 2…… 170
ПРИЛОЖЕНИЕ 3…… 172
ПРИЛОЖЕНИЕ 4…… 173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Разработка месторождений и добыча полезных ископаемых подземным способом неразрывно связаны с риском неконтролируемого разрушения подготовительных и очистных выработок, что приводит к значительным экономическим и социальным потерям. Техногенное воздействие в процессе извлечения больших объёмов горных масс приводит к активизации геогазодинамических явлений различного типа и масштаба. Соответственно, в районах интенсивной подземной разработки нарушается и естественный геодинамический режим земной коры в целом. Так, согласно данным сейсмологических служб, за последние несколько десятков лет очаги сейсмической активности в Кузбасском регионе поднялись с глубины 20 до 5–7 км. Следовательно, в процессах производства подземных работ и поддержания инфраструктуры необходимо уделять все большее внимание непрерывному контролю устойчивости массива горных пород.

Устойчивость горного массива и местоположение зон потенциального проявления геодинамических явлений в процессах ведения горных работ определяются структурой и параметрами напряженного состояния системы, включающей массив горных пород и контролируемую подземную выработку в контуре горного отвода. При этом известно, что проблема прогноза наступления геодинамического явления в подземном строительстве тождественна проблеме прогноза землетрясений, которая решается до сих пор с невысоким уровнем детерминации. Широко применяемые в настоящее время регламентные методы прогноза основаны на системах оценки устойчивости горного массива по рейтинговым показателям с применением инструментальных и органолептических способов получения данных.

С учётом существенного повышения производительности горных работ и как следствие возрастания рисков развития геодинамических явлений, необходимо искать более эффективные технологии дистанционной оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива локального и регионального

масштабных уровней в контуре горного отвода с развитой подземной инфраструктурой.

Объект исследований – структура и параметры напряженного состояния горного массива в ближней зоне влияния объектов подземной инфраструктуры.

Предмет исследований – мониторинг структуры и параметров напряженного состояния горного массива в процессе ведения подземных горных работ.

Цель работы – совершенствование системы дистанционной оценки структуры и параметров горного массива, применяемой во взрывоопасной атмосфере угольных шахт и рудников.

Идея работы состоит в автоматизации процедуры обработки информации, регистрируемой системами сейсмической локации, в задачах оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива, с целью прогноза местоположения зон риска возникновения геодинамических явлений в процессе ведения подземных горных работ.

Основные задачи исследования:

1. Анализ применяемых в настоящее время методов, технологий и средств оценки структуры горного массива и параметров устойчивости в ближней зоне влияния горных работ.
2. Анализ критериев оценки устойчивости системы «массив пород – горная выработка – крепь».
3. Исследование возможностей совершенствования методик и программных средств оценки структуры и параметров напряженного состояния горного массива с целью определения устойчивости и прогноза зон риска возникновения геодинамических явлений.
4. Анализ результатов применения системы дистанционной оценки структуры и параметров горного массива в условиях рудников и угольных шахт, опасных по газу и пыли.

Методы исследований. Анализ существующих способов оценки состояния горного массива; анализ и обобщение опыта применения систем оценки

устойчивости горного массива в условиях шахт и рудников; системный анализ проблем оценки устойчивости, осложняемой динамическими проявлениями горного давления; методы экспертных оценок цифровых моделей; междисциплинарный подход к проблеме оценки устойчивости горного массива как многофакторного явления.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Релевантная оценка устойчивости горного массива, с учётом рисков возникновения геодинамических явлений, в системе «массив пород – горная выработка – крепь» реализуема системой автоматического непрерывного мониторинга распределения напряжений в горном массиве на основе технологии сейсмолокации, при использовании воздействия рабочего органа комбайна в качестве источника сейсмических волн.

2. Автоматизированное определение скорости распространения упругих волн численными методами по сейсмограммам, в рамках специализированной методики сейсмозондирования, позволяет сократить время камеральной обработки данных на 8%.

3. Технология мониторинга состояния горного массива сейсмическим методом, прошедшая апробацию на угольных шахтах Кузнецкого бассейна и ряде рудных месторождений, позволяет решать ряд технологических задач, связанных с дистанционной оценкой структуры и параметров горного массива, а при наработке критериев, может применяться в качестве системы прогноза геодинамических явлений, согласно действующим регламентам в области промышленной безопасности.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается значительным объемом экспериментальных данных, дублированием проведенных экспериментальных работ, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна:

1. Разработан подход, позволяющий в автоматическом режиме выполнять прогноз местоположения зон риска опасных геодинамических явлений в горном массиве в зоне влияния выработок очистного участка методом сейсмолокации, при использовании комбайна в качестве источника сейсмических волн.

2. Разработан подход к автоматизированному расчету скорости распространения продольной волны по сейсмограммам для применения в методике сейсмического зондирования горного массива, специализированной для подземных условий шахт и рудников.

3. Адаптирована методика контроля эффективности гидрорыхления участка угольного пласта, регламентированная действующими Федеральными нормами и правилами, для реализации существующими техническими средствами системы сейсмической локации.

Практическая значимость работы заключается в разработанном, внедренном в действующую систему сейсмического контроля и апробированном в условиях действующих угольных шахт подходе к оперативной оценке состояния устойчивости горного массива и определения местоположения зон возможного проявления опасных геодинамических явлений; воплощенном в виде программного обеспечения подходе к автоматическому расчету скорости распространения продольной волны для применения в задачах сейсмозондирования, а также в адаптированной методике, реализованной в виде программного обеспечения, для контроля эффективности гидрорыхления участка угольного пласта существующими техническими средствами системы сейсмической локации.

Реализация на производстве. Методические и программные разработки автора и группы специалистов реализованы в аппаратно-программном комплексе, применяющемся на угольных шахтах Кузбасса и рудниках Норильска.

Апробация работы. Основные выводы и теоретические материалы данного исследования были презентованы на пяти ведущих международных конференциях, включая XIII Международную конференцию по инженерной геологии и геофизике.

Публикации. По существу данной диссертации опубликованы десять научных трудов, включая пять статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад соискателя. Все положения настоящей диссертационной работы, рассматриваемые автором, разработаны при его непосредственном участии на основании проведенных исследований. Результаты, полученные в ходе выполненных автором исследований, внедрены в действующий вариант системы сейсмической локации, применяющийся в подземных условиях рудников и шахт. Автором сформулирован способ интерпретации модели исследуемой области выемочного столба лавы и реализован в программном обеспечении системы сейсмической локации.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 64 наименования. Текст диссертации изложен на 173 страницах, содержит 83 рисунка, 16 таблиц.

Исходные материалы были собраны автором данного исследования в сотрудничестве с коллективом лаборатории геофизических систем, трудящимся при кафедре геоинформатики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» в период с 2014 по 2023 годы. Сотрудничество с лабораторией геофизических систем, опыт исследований которой включает сопровождение строительства тоннелей в г. Сочи (подготовка к Олимпиаде-2014), мониторинг в шахтах Печерского, Донецкого и Кузнецкого угольных бассейнов в подземной разработке рудных месторождений позволили автору иметь доступ к специализированным ресурсам и оборудованию для проведения исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю настоящей работы, доктору технических наук Валиеву Ниязу Гадым оглы; научному консультанту доктору геолого-минералогических наук, профессору Писецкому Владимиру Борисовичу; научному консультанту доктору технических наук, профессору Лапину Эдуарду Самуиловичу; консультанту по вопросам построения

систем автоматического контроля доктору технических наук Лапину Сергею Эдуардовичу; доценту кафедры автоматики и компьютерных технологий кандидату технических наук Абдрахманову Марату Ильдусовичу, а также преподавательскому составу кафедры геоинформатики Уральского государственного горного университета.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОГО МАССИВА В ПРОЦЕССАХ ВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РАБОТ

Обеспечение безопасности горнотехнических работ является одной из основных задач при отработке месторождений полезных ископаемых. Риск возникновения аварийных ситуаций в процессе подземного строительства порождает массу проблем, связанных с обеспечением безопасности персонала при необходимости увеличения или поддержания производительности на определённом уровне, гарантирующем рентабельность проекта.

1.1. Оценка структуры и параметров горного массива при строительстве подземных сооружений

Объекты производства подземных горных работ (железнодорожный и автотранспортный тоннели, угольная шахта, рудник) относятся к классу опасных производственных объектов, согласно действующему Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», на которых в обязательном порядке предусматриваются специальные меры и подходы к обеспечению безопасности как в процессе строительства, так и при последующей эксплуатации.

Контроль структуры и параметров массива горных пород в процессе подземной разработки, другими словами – мониторинг горного массива, является обязательным условием, обеспечивающим безопасность производства. Во взрывоопасной атмосфере рудников и угольных шахт применение систем контроля и прогноза динамических явлений, а также системы геофизического мониторинга регламентирует Приказ № 507 от 08.12.2020 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» [61]. Более подробно способы контроля и прогноза динамических явлений описаны в Приказе № 515 от 10.12.2020 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических

явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» [62].

Основными задачами геотехнического мониторинга являются:

– контроль устойчивости горного массива и элементов креплений строящихся тоннелей и прилегающих к нему объектов на всех этапах жизненного цикла сооружения;

– мониторинг и прогноз развития напряжений и деформаций массива горных пород и прилегающих объектов;

– создание, поддержание и эволюция модели системы «массив пород – горная выработка – крепь».

Мониторинг при строительстве тоннелей включает в себя:

– уточнение инженерной и гидрогеологической ситуации в массиве за грудью забоя;

– определение устойчивости объекта «сооружение – горный массив»;

– оценка напряженно-деформированного состояния отделочных материалов и крепей;

– исследование деформационно-прочностных характеристик грунтового массива по факту проходческих работ;

– корректирующие расчёты крепей и обделок на основании фактически полученных данных.

Мониторинг транспортных тоннелей в процессе строительства и объектов наземной инфраструктуры в зоне влияния производимых работ реализуется инструментальными, геологическими и геофизическими методами.

Исследования геологии проводят на всех стадиях строительства сооружения, начиная с предпроектных обследований, с целью определения типов горных пород, свойств горного массива и обнаружения объектов риска (разломных нарушений, обводнённых зон и т. д.). После установления литологического строения массива горных пород, слоистости, его физико-механических свойств и т. д., разрабатывается проект, предусматривающий специальный тип крепления, подходящий для

каждого конкретного участка тоннеля или шахты, а также способы периодической оценки состояния горного массива, выполняемые инструментальными или геофизическими методами.

Инструментальный мониторинг подразумевает:

1) описание керна, взятого по различным направлениям, для составления более полной геологической картины и оценки сплошности массива;

2) оценку напряжений и деформаций крепи методом измерения смещений контура выработки и при помощи экстензометров;

3) контроль деформаций горного массива при помощи датчиков, регистрирующих величину линейной деформации;

4) контроль оползневых процессов в районе портальных зон (инклинометры, репера);

5) наблюдение за сводом и кровлей сооружения (геодезические маркеры).

На основании инструментальных методов и органолептических данных осуществляют прогноз устойчивости горного массива. Устойчивостью называют способность горного массива сохранять равновесие при обнажении.

Оценку устойчивости груди забоя, бортов и кровли осуществляют по классификации Н. С. Булычева [1] (см. таблицу 1.1), где значимыми признаками считают:

- длительность обнажения пород без проявлений обрушений и/или вывалов;
- интенсивность разрушения горных пород;
- величина и скорость смещения пород в направлении выработки.

Таблица 1.1 – Классификация пород по устойчивости (Булычев Н. С.)

Категория устойчивости пород	Степень устойчивости пород	Длительность обнажения пород	Интенсивность разрушения пород
I	Весьма устойчивые	Неограниченная	Отсутствует
II	Устойчивые	До 6 мес.	Обрушение отдельных кусков породы
III	Средней устойчивости	До 0,5 мес.	Локальные разрушения и отдельные вывалы на глубину до 1 м
IV	Неустойчивые	До 1 сут.	Разрушение охватывает большую часть контура сечения выработки и распространяется на глубину более 1 м
V	Весьма неустойчивые	Обрушение вслед за обнажением	Переходят в движение значительные массы пород

Исследования геофизическими методами в составе мониторинга производят в целях:

– периодической оценки структуры и параметров горного массива за грудью забоя тоннеля, а также в интересующих направлениях (например, в борт для уточнения зоны водонасыщения);

– прогноза зон риска на проектном пути тоннеля (уточнение границ геологического нарушения, зон дезинтеграции массива и др.);

– оценки вероятности развития процессов деформаций и границ влияния на существующую инфраструктуру.

Результатами геофизических наблюдений являются физико-механические свойства горного массива на всех доступных уровнях исследования: на груди забоя, в ближней и средней зонах влияния тоннеля, а также прогноз категорий устойчивости, принимаемый в расчёт для корректирования крепления и корректировки темпов ведения проходческих работ.

В настоящее время широкое применение нашли следующие виды геофизических наблюдений:

– сейсмоакустические (сейсмопрофилирование из подземных горных выработок или поверхности, многоточечное просвечивание оставленных между выработками целиков и между скважинами, каротаж);

– ультразвуковые и акустические исследования на груди забоя и в пробах грунтов в диапазоне частот 0,5–30 кГц;

– сейсмические наблюдения трёхкомпонентными сейсмоприемниками, с учетом поляризации волнового поля, в основе которых лежит метод отраженных волн;

– зондирование электромагнитными импульсами и сверхширокополосное радиолокационное исследование;

– вертикальное электрическое зондирование подземное и наземное, электропрофилирование, регистрация естественного электромагнитного поля и исследования георадаром;

– каротаж.

При строительстве транспортных тоннелей наиболее эффективными являются геофизические методы оценки структуры и параметров горного массива, так как при меньших затратах обеспечивают значительную дистанцию прогноза. Согласно международной практике, наиболее эффективным среди геофизических методов является метод сейсмической локации, как наиболее точно описывающий не только параметры горного массива, но и его структуру. Влияние электромагнитных помех и повышенной влажности на результаты измерений методом сейсмолокации отсутствуют, что является значительным преимуществом перед электромагнитными методами мониторинга.

Геофизические методы и системы для оценки устойчивости горного массива применяются в строительстве подземных сооружений около 50 лет. В настоящий момент наиболее распространены системы регистрации собственной сейсмоакустической эмиссии горного массива, основными задачами которых являются регистрация местоположения сейсмических событий, расчёт энергии в эпицентре и оценка акустического спектра сигнала. Последние применяются на шахтах и рудниках для оценки опасности горного массива с точки зрения рисков возникновения газодинамических явлений. Менее распространены системы сейсмической локации, позволяющие не только определить наличие ослабленных зон, но и указать

местоположение зон риска с точностью до нескольких метров. Системы сейсмической локации применяют в РФ с 2009 г., в США, Германии и КНР – на протяжении последних 20 лет, демонстрируя высокую эффективность метода [52, 53].

Уникальные в своём роде сравнительные испытания систем сейсмического мониторинга были проведены в транспортном тоннеле г. Гулин (КНР) в 2017 г. при участии сотрудников кафедры геоинформатики УГГУ и личном участии соискателя, о чём сделан доклад на XIII Международной конференции инженерной геологии и геофизики, 2017 г. [2].

В испытаниях принимали участие три системы: «Микон-ГЕО» (Россия), TSP-303 (Швейцария) и TRT-6000 (США). Оппонентам предстояло определить структуру и свойства горного массива на дистанции до 200 метров по направлению проектного пути транспортного тоннеля за грудью забоя.

Следует отметить, что каждая система является высокотехнологичной авторской разработкой и применяет специальные методики проведения полевых работ, обработки [35] и интерпретации сейсмоданных. Невзирая на значительные различия в аппаратном, методическом и программном обеспечении, результаты были сопоставимы и в той или иной степени совпали с действительностью – с фактическим состоянием горного массива, обнаруженным в ходе проходческих работ.

Были рассмотрены модели зон разуплотнения горного массива в трёхмерном виде, а также другие параметры, рассчитываемые системами. Наибольшее совпадение с реальностью и чувствительность продемонстрировала отечественная система «Микон-ГЕО». Следующей по корректности прогноза была швейцарская система TSP-303, в то время как TRT-6000 (США) корректно отобразила только две самые крупные проблемные зоны.

Для примера на рисунке 1.1 представлено сопоставление моделей горного массива в изображении прогнозных параметров, рассчитываемых системами «Микон-ГЕО» (РФ) и TRT-6000 (США).

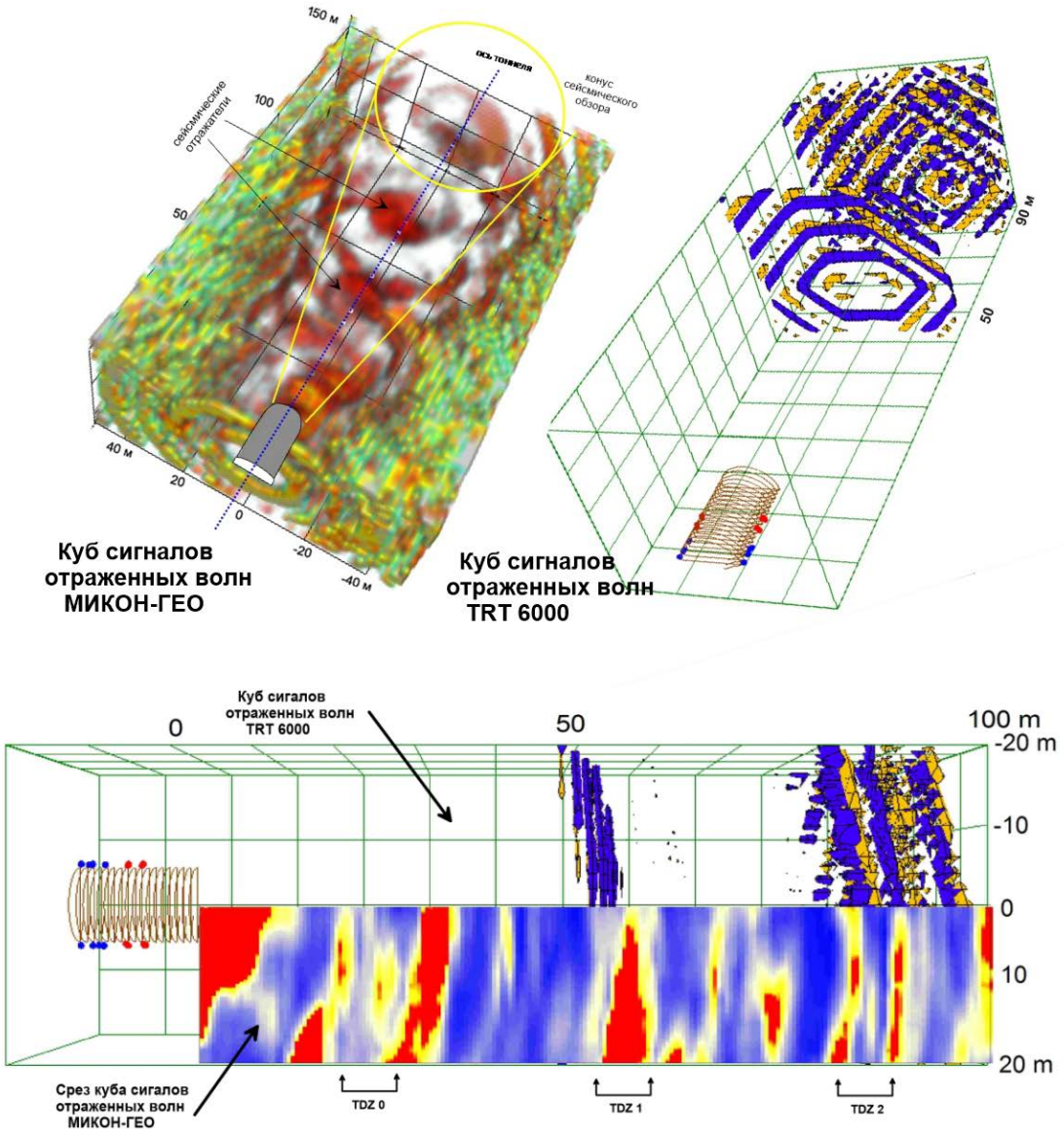

Рисунок 1.1 – Сопоставление моделей горного массива в изображениях прогнозных параметров «Микон-ГЕО» (РФ) и TRT-6000 (США)

Сопоставление моделей горного массива в изображениях прогнозных параметров систем «Микон-ГЕО» (РФ) и TSP-303 (Швейцария) для примера представлено на рисунке 1.2.

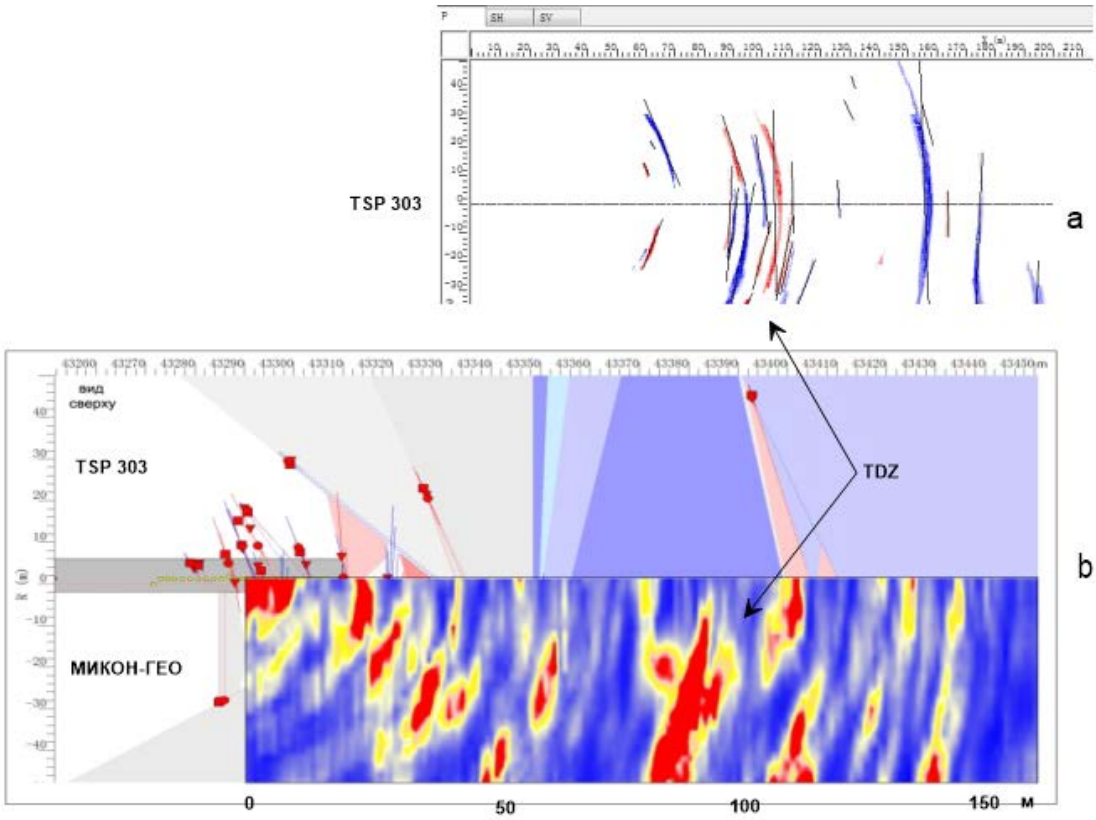

Рисунок 1.2 – Сопоставление моделей горного массива в изображениях прогнозных параметров «Микон-ГЕО» (РФ) и TSP-303 (Швейцария)

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать вывод об удовлетворительном соответствии прогностических моделей реальному состоянию исследуемого горного массива. Подтверждается эффективность применения системы сейсмической локации в процессе строительства транспортных тоннелей, а также при создании подземных выработок в шахтах и рудниках при необходимой адаптации аппаратной и программной частей данной системы. Это подтверждает релевантность и практическую применимость сейсмической локации в данных областях.

Особенностью применения названных выше систем является периодичность выполнения исследований, что позволяет оценить структуру массива без учета динамики в процессе ведения работ. Непрерывное сопровождение процессов строительства подземного сооружения с упомянутыми системами невозможно.

Применение сейсмической локации в строительстве транспортных тоннелей позволяет осуществлять более точное и надежное определение геологических

условий, выявлять потенциальные опасности и риски, связанные с различными геологическими формациями. Это способствует повышению безопасности и эффективности строительства тоннелей.

Адаптация аппаратной и программной частей системы сейсмической локации при создании подземных выработок в шахтах и рудниках позволяет контролировать динамику горных работ, обнаруживать и предотвращать возможные опасности, связанные с горными процессами. Это способствует обеспечению безопасности работников, предотвращению аварийных ситуаций и повышению эффективности горных работ.

1.2. Особенности оценки устойчивости горного массива в процессах ведения горных работ на шахтах и рудниках

Применение систем мониторинга состояния горного массива в условиях шахт и рудников имеет свою специфику, связанную с ограничениями, накладываемыми взрывоопасной средой и значительными глубинами отработки месторождений полезных ископаемых. В опасных по газу и пыли шахтах и рудниках обязательным является условие применения оборудования во взрывобезопасном исполнении, а способы оценки устойчивости приходится адаптировать для применения в условиях значительных глубин (высокий уровень литостатического давления) и зон дезинтеграции горных пород, не выявленных на стадиях разведки методами наземных и скважинных геолого-геофизических исследований.

С увеличением глубины производства горных работ резко повышается вероятность возникновения явлений, связанных с резким переходом потенциальной энергии массы вышележащих слоёв горных пород в кинетическую энергию хрупкого разрушения горного массива с возможным выделением взрывоопасных газов и пыли. Такие явления, согласно ГОСТ Р 57717–2017 [64], называются газодинамическими (геодинамическими) и представляют собой разрушения массива пород под воздействием горного давления, обычно сопровождающиеся кратковременным

газовыделением. Наиболее интенсивным явлением такого рода считается внезапный выброс угля, газа и породы.

Рассмотрев классификацию техногенных геодинамических явлений, предложенную В. С. Зыковым [3] (рисунок 1.3), можно выделить два подкласса динамических явлений, чаще всего приводящих к несчастным случаям в процессе ведения подготовительных и очистных горных работ: горный удар и внезапный выброс. Динамические явления и их подклассы приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Подклассы динамических явлений

Подкласс	Горные удары	Выбросы	
	вес разрушенного угля, т	вес разрушенного угля (породы), т	объем выброшенного газа, $м^3$
Слабые	< 5	< 10	< 100
Средние	5 – 100	10 – 200	100–1000
Сильные	100–1000	200–2000	1000 – 10000
Катастрофические	> 1000	> 2000	> 10000

Рисунок 1.3 – Классификация техногенных геодинамических явлений

В 30-х годах А. А. Скочинским была предложена классификация газодинамических явлений, которая позже была уточнена В. В. Ходотом и специалистами ВостНИИ, МакНИИ, ВНИМИ, НИИ ИГД им. А. А. Скочинского, Госгортехнадзора и Министерства угольной промышленности, приведенная в монографии В. С. Зыкова [3]. На сегодняшний день она является наиболее полной и актуальной.

Горный мониторинг в условиях шахт и рудников сводится к следующим основным задачам:

– обнаружение и контроль зон активизации сейсмических событий в масштабах всего горного отвода;

– оценка устойчивости, структуры и параметров массива горных пород в зоне влияния сооружений подземной инфраструктуры;

– прогноз зон риска возникновения геодинамических явлений в контуре ведения подготовительных и очистных работ.

Наибольшую сложность с точки зрения обеспечения безопасности ведения работ представляют угольные шахты, поэтому нормативно-правовая документация в этой области получила большее развитие [51]. В [62] оценка склонности горного массива к опасным проявлениям горного давления и прогноз развития геодинамических явлений в масштабах шахтного поля (горного отвода) выполняется методом Регионального прогноза, имеющего различные способы реализации. Региональный прогноз состоит из прогноза на основе информации, полученной в результате геологоразведочных работ, а также прогноза, основанного на данных непрерывных сейсмоакустических наблюдений.

Системы непрерывного Регионального прогноза основаны на тех же принципах, что и сейсмологические станции, применяющиеся на поверхности для контроля сейсмической активности земной коры: регистрация сейсмических событий и вычисление энергии в эпицентре. Основными параметрами прогноза в этом подходе приняты частота и энергия сейсмических событий в одной и той зоне горного отвода. Такие критерии, как следует из многолетнего опыта сейсмологической службы, не являются в полной мере надежными свидетельствами опасного

развития геодинамического (сейсмического) режима. Уровень детерминации в этих методах не превышает 60%. Такая ситуация обусловлена реализацией двух равновероятных сценариев формирования зон концентрации напряжений – сжатия и растяжения (модели консолидации и деструкции), причем оба варианта сопровождаются сейсмическими событиями. Для условий изначально напряженного состояния горного массива, находящегося под влиянием горных выработок, модель деструкции является более применимой в соответствии текущим пониманием сути геодинамических явлений.

В условиях шахт и рудников в настоящее время широко применяются системы Регионального прогноза следующих производителей:

– ООО «ИНГОРТЕХ», г. Екатеринбург (аппаратно-программный комплекс «Микон-ГЕО»);

– ОАО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург (система сейсмического мониторинга «GITS»);

– ООО «НТЦ Автоматика», г. Красноярск (автоматизированная система «Релос»).

Результатами работы систем Регионального прогноза за выбранный временной период являются:

– карта плотности сейсмических событий, отображающая их местоположение;

– карта плотности энергий сейсмических событий;

– отчёт о происшедших сейсмических событиях.

Прибегая к современным средствам и способам проведения аналитических расчётов, некоторые производители дополняют отчёты вспомогательными данными, например, аналитической информацией по значениям энергий и количеству событий в виде текста и графиков, позволяющих выявить наиболее активные зоны с прогнозом потенциальной сейсмической активности (геодинамической опасности) выбранных участков контролируемой области.

Оценку устойчивости, структуры и параметров массива горных пород в зоне влияния сооружений подземной инфраструктуры, а также прогноз зон риска возникновения геодинамических явлений возможно выполнить инструментальными способами, такими, как оценка состояния керна, измерение скорости газоистечения из угольного массива или оценка горного давления по количеству буровой мелочи, но непрерывный прогноз на протяжении всего цикла ведения подготовительных или очистных работ осуществим только геофизическими методами. Наибольшее применение в угольных шахтах и рудниках с механизированным способом ведения работ нашёл сейсмоакустический метод.

Прогноз, по данным сейсмоакустических наблюдений, можно разделить на два основных вида:

– оценка состояния горного массива по спектру искусственной или естественной акустической эмиссии;

– оценка структуры и параметров горного массива методом сейсмолокации.

Прогноз состояния горного массива по акустическому спектру [37] разработан институтами МакНИИ, ВНИМИ и реализован в системах АПСС-1 (МакНИИ), GITS (АО «НЦ ВНИМИ») и САКСМ (ООО МНТЛ, г. Москва).

Для оценки структуры и параметров горного массива метод сейсмолокации разработан и реализован в системе сравнительно недавно, но, несмотря на это, активно используется на ведущих угледобывающих предприятиях Кузбасса. Разработчиком данного метода является д. г.-м. н., профессор Писецкий Владимир Борисович.

Существующие методы геофизического мониторинга позволяют производить непрерывную оценку состояния горного массива. Однако, с учётом различия геологического строения объектов, глубины залегания полезного ископаемого и способов отработки месторождений, существующие методы нуждаются в наработке критериев оценки состояния массива и создания цифровой модели для эффективного управления технологией ведения работ и обеспечения безопасности персонала.

1.3 Выводы и постановка задач

Приведённый обзор современных методов и технологий оценки состояния массива горных пород в зоне влияния подземной инфраструктуры позволяет сформулировать следующие выводы:

– технология дистанционной оценки параметров и структуры горного массива методом сейсмолокации в процессах ведения горных работ является основным и эффективным способом прогноза зон риска на дистанции до 200 метров;

– применение сейсмической технологии для решения задач прогноза устойчивости горного массива и зон риска проявления геодинамических явлений требует создания модели системы «массив пород – горная выработка – крепь» и наработки критериев оценки;

– необходимо исследовать условия применения системы сейсмолокации для мониторинга горного массива в непрерывном режиме с целью своевременной оценки и предотвращения предпосылок возникновения геодинамических явлений.

ГЛАВА 2. Текущий прогноз местоположения опасных по геодинамическим явлениям зон с учетом системы «массив пород – горная выработка – крепь»

Ведение горных работ как техногенное воздействие на среду формирует новую систему, исследование которой имеет прикладной характер и может быть использовано для обеспечения безопасности и прогнозируемости горных работ с точки зрения технологии. Система образуется при взаимодействии трёх составляющих:

– массив горных пород (физико-механические и химические свойства, структура, гидрогеологические условия, тектоника, геодинамика и др.);

– горная выработка (изменение естественных напряжений в горном массиве, а также взаимовлияние соседствующих выработок и объектов подземной инфраструктуры);

– крепь (особенности технологии ведения проходческих работ, типы и схемы крепления массива).

Совокупность вышеописанных компонентов образует природно-техническую систему, модель которой позволяет не только оценить текущее состояние, но и прогнозировать развитие неблагоприятных процессов, приводящих к потере устойчивости системы и/или возникновению геодинамических явлений в ближней зоне влияния данной системы [45, 46].

Напряженно-деформированное состояние (далее по тексту – НДС) горного массива [50], формируемое системой «массив пород – горная выработка – крепь», приводит к формированию структурных неоднородностей и необратимых деформационных процессов [4, 49], существенно изменяющих фильтрационные свойства массива, что представляет особый интерес при прогнозировании опасности внезапных выбросов газа и угля при разработке угольных месторождений.

Дистанционная оценка структуры и параметров горного массива в системе «массив пород – горная выработка – крепь», позволяет построить цифровую прогнозную модель устойчивости всей системы, непрерывно дополняемой геологической информацией при неизменном типе крепления.

2.1. Факторы, влияющие на характеристики устойчивости горного массива вблизи подземной горной выработки

Горный массив представляет собой неоднородную анизотропную слоистую среду, где структурные субвертикальные нарушения сплошности слагающих слоёв на контактах блоков являют собой объекты высокого риска развития геодинамических явлений и зоны потери устойчивости системы в целом.

На практике создание и рассмотрение моделей горного массива «идеализируют», упрощая среду до сплошной, изотропной и однородной. Согласно [5], характерной чертой любых массивов горных пород является блочное строение, которое обусловлено различными неоднородностями структуры, представленными в виде контакта слоёв пород, разломов, тектонических нарушений зонами трещиноватости [39] и контактом отдельных минеральных зёрен. При классификации неоднородностей структуры основным признаком является размер блока. Доктор физико-математических наук Рац М. В. предложил классификацию, где выделил нижеследующие порядки неоднородностей структуры:

– **нулевой порядок**: крупные тектонические разрывы, разделяющие массивы пород на структурные блоки размерами в десятки километров;

– **первый порядок** неоднородностей обусловлен присутствием в массиве отличающихся по составу и структуре пород, наличием значимых геологических нарушений и тектонических разрывов. Этот тип неоднородностей делит массив на блоки размерами от 100 метров до нескольких километров;

– ко **второму порядку** неоднородностей отнесены неоднородности структуры и состава пород в пределах пачки или слоя, а также естественная трещиноватость массива пород. Среди данного типа неоднородностей выделяют крупноблоковую (десятки – сотни метров) трещиноватость и мелкоблоковую (дециметры – метры);

– неоднородности **третьего порядка** включают в себя микротрещины, контакты между отдельными зёрнами, минеральными образованиями и кристаллами.

Размеры блоков в данном масштабном уровне могут находиться в диапазоне от единиц до десятков сантиметров;

– к **четвёртому порядку** неоднородностей относят дефекты решёток структур минералов и межкристаллических связей. Размеры структурных элементов находятся в интервале от долей миллиметра до нескольких сантиметров.

Вышеизложенное позволяет судить об общих структурных закономерностях, обусловливающих горный массив и проявляющихся в блочной структуре единого иерархичного устройства. Это важное положение позволяет рассматривать горный массив различных масштабных уровней, применяя единые принципы. Также отмечено [5], что чёткая пространственная ориентация блоковых структур обычно наблюдается у всех порядков неоднородностей, указанных выше.

Отмечено существенно неравнозначное влияние неоднородностей структуры различных порядков на рассматриваемый объект, что позволяет сделать главный вывод об особенностях иерархично-блочных сред – горный массив может проявлять свойства как дискретной, так и сплошной среды, в зависимости от соотношения размеров рассматриваемого объекта и структурного блока.

Неоднородности второго порядка оказывают существенное влияние на устойчивость горных выработок, являясь причиной вывалов пород из бортов и кровли. Неоднородности нулевого и первого порядка практически не влияют на устойчивость подземной инфраструктуры ввиду превосходства размеров структурных блоков, образованных ими, над размерами выработанного пространства в несколько раз. Авторами выделено понятие эффективной структурной неоднородности (неоднородность, оказывающая влияние на устойчивость рассматриваемого объекта).

То есть массив горных пород можно представить, как совокупность блоков сходных геометрических форм (дискретов), и первым из рассматриваемых параметров, влияющих на устойчивость системы, можно выделить дискретность среды (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 – Фотография провала, иллюстрирующая блочную структуру горного массива

Горный массив как объект исследования, рассматриваемый в геомеханике, имеет определённую особенность, а именно ещё в своём изначальном положении находится в напряжённом состоянии, которое называют естественным. По текущим представлениям, напряжения в массиве горных пород обусловлены действием двух независимых сил:

– гравитационное поле Земли;

– поле тектонических напряжений, обусловленное движением тектонических плит и деформацией блоков земной коры.

Действующее повсеместно гравитационное поле описывается ускорением свободного падения и является функцией расстояния до центра земного шара. Главное напряжение гравитационного поля в конкретной точке горного массива определяется весом вышележащих пород и действует вертикально. Горизонтальные напряжения составляют некоторую часть вертикальной нагрузки и связаны через коэффициент бокового давления (бокового отпора).

Рассмотрев напряжения, действующие в элементарном объёме горного массива в поле действия гравитационно-тектонических сил (рисунок 2.2), можно допустить, что одно из главных горизонтальных напряжений σ_1, направленных нормально к грани, равно тектоническому напряжению *Тн*.

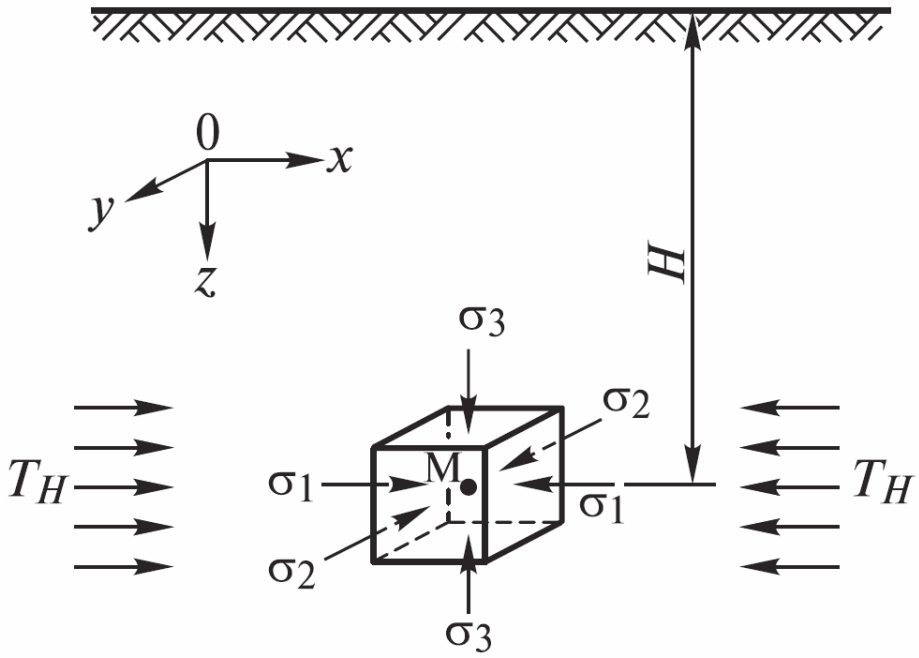

Рисунок 2.2 – Схема элементарного объема в поле собственных и тектонических напряжений:

σ_1 и σ_2 – горизонтальные напряжения, σ_3 – вертикальные напряжения, *H* – глубина, *M* – элементарный объем, *T*н – тектонические напряжения

Известно, что горный массив, состоящий из пород различного генезиса, находящийся в изменяющемся поле напряжений, стремится к максимально эффективной диссипации энергии, накапливаемой в процессе упругого деформирования горных пород. По результатам экспериментов Дж. Байерли [6] для глубин порядка до 10 км (до значений давления вышележащей горной массы 200 МПа) был предложен метод оценки соотношения горизонтальной (τ) и вертикальной (σ) компонент напряжений, действующей на плоскость сформировавшегося разрыва между блоками породы перед разрушением: $\tau = 0{,}85\sigma$. То есть превышение предела хрупкой прочности горных пород или нарушение стационарного состояния дискретного массива (эффекты трения, проскальзывания) происходит тогда, когда горизонтальная компонента напряжений превышает 85% величины вертикальной компоненты.

Будем считать естественные напряжения, действующие в горном массиве, вторым параметром, оказывающим влияние на устойчивость системы «массив пород – горная выработка - крепь».

Рассмотрение модели нетронутого горного массива с учётом увеличивающихся с глубиной значений горизонтальных компонент напряжений позволяет сделать вывод об исходной изменчивости и неустойчивости горного массива, что подтверждают зеркала скольжений разведочных кернов и пликативные нарушения, видимые в процессах ведения подземных работ. Собственное НДС массива горных пород претерпевает существенные изменения в зоне влияния подземной инфраструктуры, что зачастую приводит к опасным явлениям: от потери устойчивости борта выработки до внезапных выбросов породы и газа.

С точки зрения ведения горнопроходческих или очистных работ наибольшую угрозу в рассматриваемых дискретных структурах представляют субвертикальные плоскости нарушения сплошности массива как в виде границ контакта блоков различного масштабного уровня, так и в виде геологических нарушений, карстовых полостей и зон контакта литологических разностей при крутом падении. Отмечено, что соотношение горизонтального и вертикального размеров блоков горного массива любого генезиса соответствует выражению (2÷3)/1, что способствует идентификации субвертикальных плоскостей нарушения сплошности среды.

Массив горных пород, состоящий из дискретов на всех масштабных уровнях и находящийся в нестационарном поле естественных напряжений, при производстве горных работ подвергается техногенному воздействию, оказывающему существенное влияние на НДС массива. Примем техногенное воздействие на горный массив в качестве третьего фактора, влияющего на устойчивость системы «массив пород – горная выработка - крепь».

Одним из параметров, позволяющих косвенно судить о распределении напряжений в исследуемом участке, является трещиноватость. Согласно [7], трещина, рассматриваемая с позиции механики, представляет собой поверхность раздела или нарушение сплошности горного массива, где поле деформаций претерпевает разрыв. Наличие сетей трещин обусловливает прочностные характеристики,

деформационные и фильтрационные свойства массива горных пород. Представление об ориентации трещин, их механических и физических свойствах, а также заполнителе особенно важно для моделирования взаимодействия объектов подземной инфраструктуры и самого скального массива. Поиск и определение пространственной ориентации трещиноватых зон в исследуемой области горного массива является одной из первостепенных задач исследования, решение которой позволит установить истинные размеры блоков, образующих скальный массив на рассматриваемом масштабном уровне [8].

Трещина рассматривается в виде плоскости, положение которой в пространстве описывается углом наклона относительно горизонта (угол падения) и азимутом (направление).

При изучении трещин рассматривают их деформационные свойства, а именно: нормальную (усилие направлено перпендикулярно к плоскости трещины) и сдвиговую деформацию (усилие направлено по касательной к плоскости трещины). Процесс нормальной деформации стенок трещин характеризуется двумя факторами: максимально возможное для данного образца смыкание стенок трещины, не превышающее расстояние между наиболее удаленными точками её стенок, ограничивается предельным сжатием; практически полное отсутствие прочности при приложении к стенкам растягивающих усилий [8]. Результатом испытаний трещины для выявления реакций на сдвиговые деформации при смещении стенок друг относительно друга является связь между сдвиговыми деформациями и касательными напряжениями. Характеристикой, описывающей прочностные характеристики в этом случае, служит максимальное касательное напряжение вдоль плоскости трещины, не приводящее к разрушению образца.

С точки зрения технологических нужд, изучение трещин самих по себе не имеет практического смысла, поэтому рассматривают совокупность трещин (зоны трещиноватости или системы трещин), принимая во внимание свойства этой совокупности в процессе проектирования и ведения строительных работ.

Основным способом оценки трещиноватости горного массива является отбор и описание керна, выполненного до производства работ. Свойства и параметры

керна, описываемого по данным лабораторных исследований, приписываются горному массиву в месте взятия данного керна. Таким образом, производится оценка состава исследуемого массива, его структуры, а также поля напряжений, действующих в нём. Количественная оценка трещиноватости при ведении подземных работ производится по общепринятому показателю качества RQD [9].

Метод оценки горного массива, названный RQD, был разработан в 1964 г. профессором университета гражданского строительства D. U. Deere. Суть метода заключается в измерении процентного выхода цельных кусков керна, длина которых превышает 10 см. Куски керна, не обладающие достаточной прочностью или крепостью, не рассматриваются, даже если их длина составляет 10 см. Метод RQD применим для описания массива по керну диаметром 5,47 см. В настоящий момент данный метод является приоритетным для описания скальных пород низкого качества. Геологические службы горнодобывающих предприятий РФ и других стран используют RQD в качестве стандартного параметра при описании керна и оценки характеристик породной толщи согласно методике RMR [15]. Поскольку в процессе бурения тонкослоистые среды осадочного генезиса разрушаются и не учитываются согласно методике подсчёта RQD так же, как и зоны раздробленных пород, зоны контактов блоков, то данный метод необходимо применять с учётом известных оговорок.

Установлена следующая взаимосвязь между индексом RQD и качеством горного массива, приведённая в различных источниках:

– сильно раздробленный и трещиноватый массив – RQD <25 % (0-25 % – расценивается как очень слабая, неустойчивая порода);

– сильнотрещиноватый массив – RQD в диапазоне 25-50 % (слабая порода);

– трещиноватый массив – RQD в диапазоне 50-75 % (удовлетворительная порода);

– слаботрещиноватый массив – RQD >75 % (75-90 % – хорошая порода, 90-100 % – отличная, с точки зрения устойчивости, порода).

Индекс RQD на добывающих предприятиях РФ применяется, как одна из составляющих частей комплексных параметров оценки устойчивости горного массива по рейтинговым шкалам.

Трещиноватость горного массива при детальном изучении классифицируется по геометрическим, морфологическим, генетическим признакам, а также возрасту и механизму образования.

Согласно [10], с точки зрения геомеханики, оправдана классификация трещиноватых областей (систем трещин) по слоистости, ориентированности в пространстве, углам падения и простирания и т. п. По характеру распространения в пространстве выделяют три основных типа сетей трещин:

– полигональные – совокупности трещин, образующие замкнутые многоугольники, располагающиеся в одной плоскости;

– хаотические – невозможно выделить систему, или их число слишком велико;

– системные – образованы системами ориентированных трещин, подлежащих систематизации и описанию.

При изучении проницаемости горного массива важным аспектом сети трещин является их классификация по прерывистости (непрерывные, промежуточные и прерывистые). Для сетей системных трещин применима классификация по углу или азимуту падения (простирания).

Описание сетей трещин, их морфология, включает ряд признаков и характеристик, таких, как форма трещин, особенности поверхностей стенок, тип заполнителя, пересечение одних сетей другими, изменение типа пристеночного слоя, окончание видимых следов трещин. Представления о морфологии изучаемой области трещиноватости исключительно важно в решении прикладных задач (оценка проницаемости, устойчивости и т. п.).

Генезис трещин не воспринимается непосредственно, а выводится из комплекса морфологических и геометрических особенностей трещин и анализа соотношения трещин с геологической структурой массива в целом. При этом в общем случае нет строго определённых правил, формально определяющих процедуру

этого вывода. В практике тот или иной генетический ярлык придаётся трещинам зачастую без достаточной аргументации, а иногда даже без чёткого выделения морфолого-геометрических особенностей данной группы трещин. С другой стороны, понятие о генезисе трещин является сложным и включает сведения о геологических причинах, времени и условиях растрескивания, о физических (или физико-химических) причинах и условиях протекания этого процесса. Несмотря на сложность определения, понимание генезиса трещин оказывается весьма полезным при изучении их распределения в пространстве и оценки сейсмичности, а также возможности подвижек по трещинам.

Трещины являются прямым проявлением граничных напряжений в горном массиве. Таким образом, информация об изменениях в параметрах трещин (размер, глубина, угол наклона) и их местоположении позволяет представить текущие деформационные напряжения в горном массиве.

Заметим, что понятие трещиноватости и дискретности массива принципиально различны, т.к. в первом варианте оперируют системами трещин, а во втором плотностью дискретов в исследуемом объеме. Очевидно, что второй вариант поддается количественным оценкам с точки зрения характеристик устойчивости, например, с учетом эффектов трения и соотношения Байерли. Параметрическое описание систем трещин непригодно для каких-либо корректных аналитических расчетов и приемлемо лишь для предварительных оценок структуры массива.

Говоря о параметрах горного массива, влияющих на устойчивость системы, нельзя не отметить уровень энергонасыщения, представляющий собой запас потенциальной энергии упругой деформации массива, возникающий под действием полей естественных и техногенных напряжений. С увеличением глубины разработки месторождения ископаемых (повышением горного давления) растёт и уровень энергонасыщения, что при определённых условиях приводит к внезапной потере устойчивости разрабатываемого массива в ближней зоне влияния выработок. Внезапную потерю устойчивости, обусловленную запасённой в горном массиве энергии, классифицируют как динамическое явление по причине высокой скорости его протекания.

Согласно [11], баланс энергии при динамическом явлении представляется следующим равенством:

$$W_Г + W_М + W_П = W_Р + W_К + W_Б + W_С .$$

Левая его часть характеризует выделяющуюся энергию, а правая – её поглощение. Выделяющаяся энергия складывается из энергии расширения газа $W_Г$, энергии упругих деформаций разрушаемого материала $W_М$, энергии окружающих его пород $W_П$. Она частично расходуется на разрушение $W_Р$ и придание кинетической энергии $W_К$ кускам разрушенного материала. Оставшаяся её часть поглощается вблизи от места разрушения $W_Б$, и сравнительно небольшое количество энергии $W_С$ (менее 10 %) уходит из ближней зоны в форме сейсмических колебаний.

Обладая возможностью оценивать уровень энергии, порождающей динамическое явление – левой части равенства, можно осуществлять и прогноз рисков возникновения опасных динамических явлений в процессе ведения подземных работ.

Формула для определения энергии газа $W_Г$ хорошо известна [12], а в случае отсутствия газа в горном массиве может быть опущена. Выражения для величин $W_М$ и $W_П$ для общих условий приведены в статье [11]. Рассмотрим выражение расчета энергии упругих деформаций разрушаемого материала $W_П$ для условий плоской деформации при малом влиянии касательных напряжений в расчете на единицу периметра изолированной выработки:

$$W_п = \frac{1-\nu_1^2}{E_1}\kappa_1^2 \Delta l ,$$

где ν_1, E_1 – коэффициент Пуассона и модуль упругости (модуль Юнга, ГПа) вмещающих пород, соответственно; k_1 – коэффициент интенсивности напряжений; l – глубина распространения разрушения, м.

Энергия $W_М$ для плоской задачи на единицу длины выработки имеет оценку:

$$W_м \approx \frac{0{,}9(1-2\nu_2)\kappa_I^2 h}{E_2} ,$$

где ν_2, E_2 – коэффициент Пуассона и модуль упругости (модуль Юнга, ГПа) разрушаемого материала; k_1 – характеристика темпа нарастания напряжения; h – мощность пласта, м.

Ключевыми параметрами, характеризующими горный массив в выражениях для расчета энергий $W_М$ и $W_П$, являются коэффициент Пуассона, модуль Юнга и коэффициенты, описывающие напряжения. Функциональная связь коэффициента Пуассона с количеством дискретов объема среды, коэффициентом терния между дискретами и напряжением, приложенным к кромке этого объема также исследована профессором Писецким В. Б. [60]

С учетом обозначенных выше параметров, задачу оценки состояния устойчивости системы «массив пород – горная выработка - крепь» необходимо решать для представительного объема массива с дискретной структурой, соизмеримого с геометрией выработки, на основе определения действующих напряжений, упругих свойств и структуры горного массива.

2.2. Методы оценки устойчивости массива горных пород

В процессе подземной разработки месторождений неизменно возникают области потери устойчивости горного массива, обусловленные строением горного массива или перераспределением напряжений в нём. Горные породы, расположенные в зоне влияния подземных выработок, перманентно перемещаются в сторону выработанного пространства под воздействием горного давления, стремясь занять предоставленный объём [1]. Чем ближе к поверхности обнажения расположена исследуемая область, тем выше величина перемещений, то есть массив, окружающий горную выработку, деформируется в радиальном направлении (в направлении выработки). Наглядно это явление представлено на эпюрах смещений горного массива на примере очистного забоя, приближающегося к подготовительной выработке (рисунок 2.3) [13].

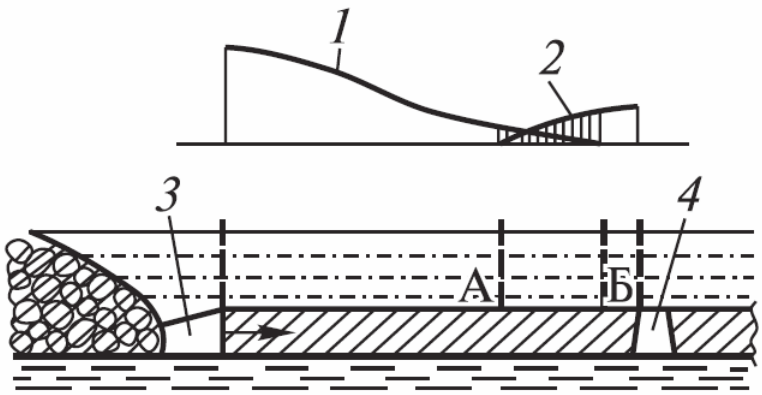

Рисунок 2.3 – Влияние приближающегося очистного забоя на деформации целика возле подготовительной выработки (по С. Г. Авершину):

1 – эпюра смещений в целике, направленных в сторону очистного забоя; *2* – эпюра смещений, направленных в сторону подготовительной выработки; *3* – очистная выработка; *4* – подготовительная выработка. АБ – зона деформаций растяжения – область вероятных разрывов в целике

Изучая схему состояния краевой части массива, И. М. Петухов выделяет [11] несколько зон с плавными переходами от одной к другой, как представлено на рисунке 2.4 [5].

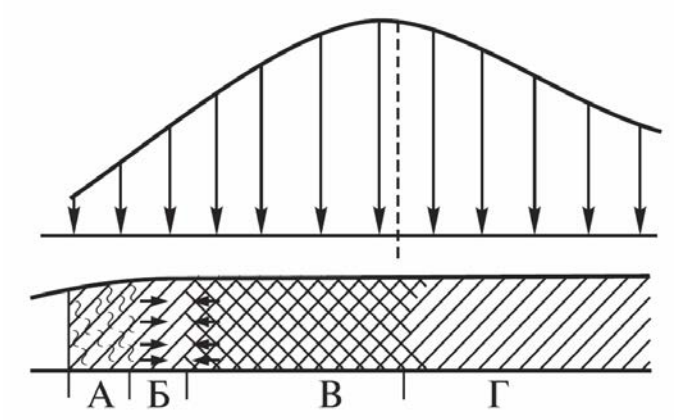

Рисунок 2.4 – Схема состояния краевой части массива (по И. М. Петухову):
А – призабойная зона нарушенных пород с разрывом сплошности, Б и Г – зоны преобладающих упругих деформаций, В – зона преобладающих пластических деформаций

На определенной дистанции от места обнажения горного массива выработками находится ядро пород в поле напряжений, обусловливающих пластические (или псевдопластические) деформации пликативного типа (рис. 2.4., зона В). Внутренние давления, характеризующие эту область, уравновешиваются сопротивлением соприкасающихся с ней зон Б и Г (рис. 2.4). В то же время область Б массива, примыкающая к ядру (зона В), сопротивляется внутреннему давлению благодаря трению в области контакта с боковыми породами, которые заключают ценные ископаемые. Превышение максимальных значений сопротивления в области Б внутреннему давлению зоны В приводит к перемещению пород в зонах А и Б (см. рисунок 2.4) в направлении выработанного пространства, пока системы не достигнут состояния равновесия.

Вышеописанные особенности механики горного массива, как и свойства слагающих пород, подлежат тщательной проработке на этапе проектирования подземных сооружений.

Разнообразие свойств массивов горных пород и необходимость их описания для решения инженерных задач привели к систематизации всех имеющихся эмпирических данных и выражению качественных характеристик горных массивов в численном виде. Инженеры различных областей знаний, так или иначе связанные

с проектированием и строительством подземных сооружений, нуждались в единой унифицированной системе рейтинговой оценки устойчивости горного массива.

В мировой практике подземного строительства применяются несколько рейтинговых систем для оценки устойчивости горного массива. Анализируя оценку устойчивости горного массива при проведении подземных горных работ в шахтах и рудниках, можно выделить несколько систем, таких, как RMR [15, 16, 17, 18], MRMR [19] и индекс Q [20, 21]. Система RMR широко применяется для оценки устойчивости горного массива при строительстве тоннелей, в то время как система MRMR наиболее подходит для шахт и рудников и применяется в США и Южной Африке. Q-система в свою очередь нашла применение в Канаде, Австралии и рудниках России с адаптированным подходом. Более подробно рассмотрим системы MRMR и Q, которые являются наиболее подходящими для определения устойчивости горных пород при проведении подземных горных работ в шахтах и рудниках. Обе системы основаны на схожих показателях, характеризующих состояние горного массива, однако имеют различия в коэффициентах, учете деформаций и напряжений массива.

Адаптация системы классификационного рейтинга массива RMR [17] для ситуаций подземной разработки, предложенная профессором Д. Лобширом [19], получила наименование MRMR и представляет собой набор индивидуальных оценок (IRMR). Индивидуальные рейтинговые оценки учитывают гидрогеологические особенности, параметры напряженно-деформационного состояния горного массива, характеристики прочности и трещиноватости, с применением весовых коэффициентов, учитывающих пространственную ориентацию трещин в исследуемой области, а также степень выветрелости составляющих пород.

Определение рейтинга горного массива, согласно MRMR, изображено в виде блок-схемы (рисунок 2.5).

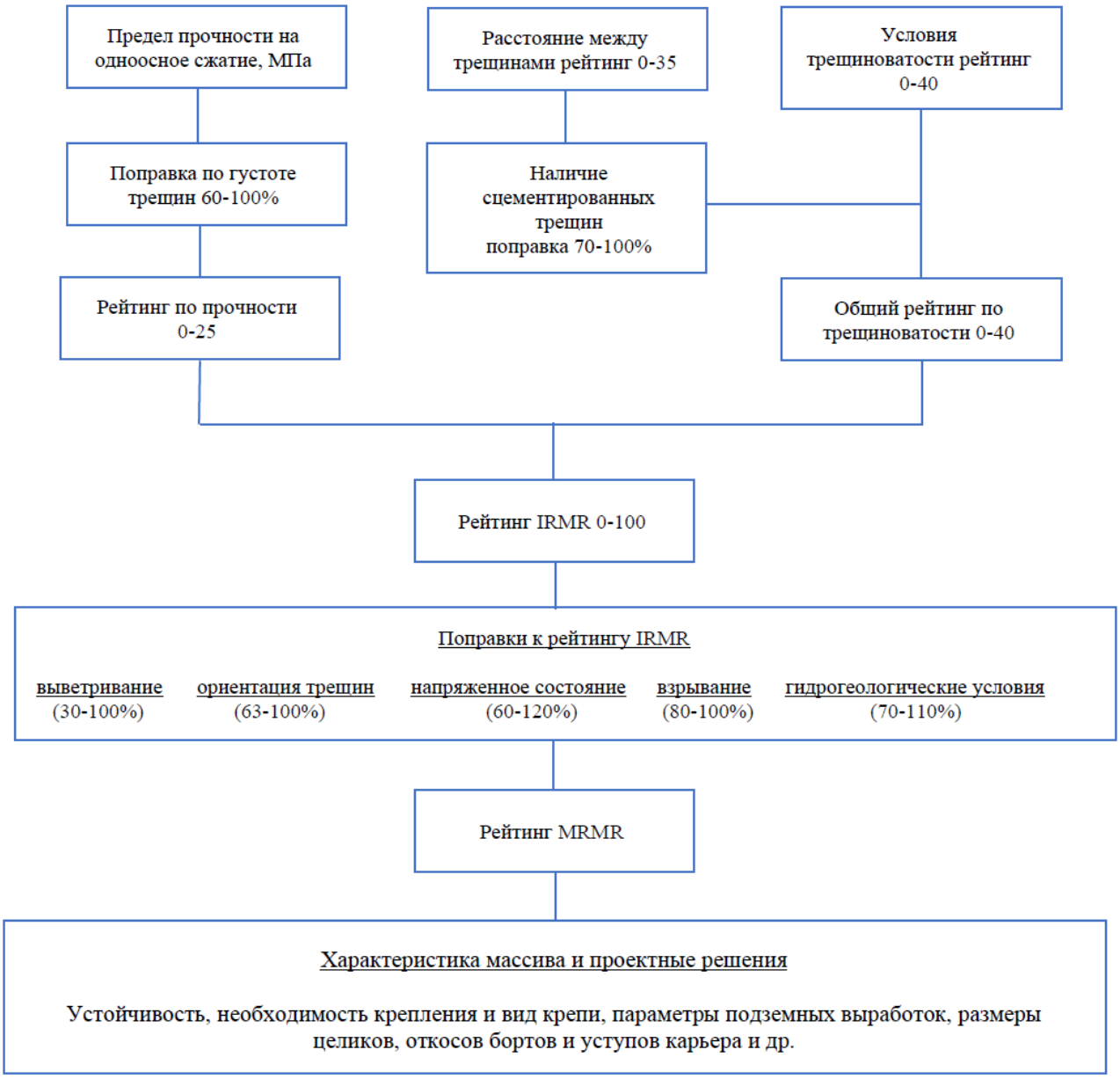

Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритма расчета рейтинговой оценки MRMR по классификации проф. Д. Лобшира

В отечественной практике подземного строительства с начала XX в. широко применяется классификация крепости пород профессора М. М. Протодьяконова [48]. При ее разработке было использовано определение ***крепость*** породы, что в отличие от ***прочности*** (реакции породы на приложение скручивающих, сжимающих, растягивающих усилий и т. д.), позволило сравнить горные породы по затратам труда на их добычу (разрушение). Коэффициент крепости ориентировочно равен 0,1 доли от предела прочности горной породы при воздействии сжимающих

напряжений вдоль одной оси и выражается в кгс/см^2, что хорошо коррелируется для пород угольного типа сложения и пород средней крепости и ограничивается коэффициентом 20, что недостаточно для крепких пород, имеющих предел прочности более 200 кгс/см^2 (например, базальт и др.) при осуществлении сжатия вдоль одной оси. Коэффициент крепости, по М. М. Протодьяконову, определяют по формуле:

$$f = 0{,}1\sigma_{сж} ,$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на одноосное сжатие, МПа.

Классификация горных пород по крепости, предложенная М. М. Протодьяконовым, представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация пород по крепости проф. М. М. Протодьяконова

Категория породы	Степень крепости	Породы	Коэффициент крепости, f
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы	20
II	Очень крепкие	Очень крепкие гранитные породы. Кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец. Менее крепкие, нежели указанные выше кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки	15
III	Крепкие	Гранит (плотный) и гранитные породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды	10
IIIa	Крепкие	Известняки (крепкие). Некрепкий гранит. Крепкие песчаники. Крепкий мрамор. Доломит. Колчеданы	8
IV	Довольно крепкие	Обыкновенный песчаник. Железные руды	6
IVa	Довольно крепкие	Песчанистые сланцы. Сланцеватые песчаники	5
V	Средней крепости	Крепкий глинистый сланец. Некрепкий песчаник и известняк, мягкий конгломерат	4
Va	Средней крепости	Разнообразные сланцы (некрепкие). Плотный мергель	3
VI	Довольно мягкие	Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс. Мерзлый грунт, антрацит. Обыкновенный мергель. Разрушенный песчаник, сцементированная галька, каменистый грунт	2

Продолжение таблицы 2.1

Категория породы	Степень крепости	Породы	Коэффициент крепости, f
VIa	Довольно мягкие	Щебенистый грунт. Разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень. Крепкий каменный уголь. Отвердевшая глина	1,5
VII	Мягкие	Глина (плотная). Мягкий каменный уголь. Крепкий нанос, глинистый грунт	1
VIIa	Мягкие	Легкая песчанистая глина, лесс, гравий	0,8
VIII	Землистые	Растительная земля. Торф. Легкий суглинок, сырой песок	0,6
IX	Сыпучие	Песок, осыпи, мелкий гравий, насыпная земля, добытый уголь	0,5
X	Плывучие	Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лесс и другие разжиженные грунты	0,3

В соответствии с действующими строительными правилами [63], где за основу классификации устойчивости была принята классификация Н. С. Булычева (см. таблицу 1.1), горный массив разделен всего на четыре состояния (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Обобщенные характеристики состояний горного массива по СП 91.13330.2012

Категория устойчивости	**Оценка состояния устойчивости**	**Характеристика состояния устойчивости**
I	Устойчивое	Отсутствуют заметные смещения и разрушения пород или имеются мелкие локальные их разрушения
II	Среднеустойчивое	Незначительное распространение нарушений пород в глубь массива, соответствующее начальной стадии общего развития зоны неупругих деформаций в окружающих выработку породах; возможно нарушение целостности пород в структурно ослабленных зонах с образованием небольших сводов обрушения. Деформации пород носят затухающий характер
III	Неустойчивое	Дальнейшее развитие зон деформаций и нарушений пород со значительными смещениями свободного контура выработки. Постепенный подход к слабозатухающим во времени деформациям пород
IV	Очень неустойчивое	Вокруг выработки развиваются большие зоны не упруго деформирующихся пород с их разрушением. Смещения свободного (или при малом отпоре крепи) контура выработки носят слабозатухающий и незатухающий характер

В качестве критерия устойчивости пород при проектировании горизонтальных и наклонных горных выработок и выемочных камер, согласно СП

91.13330.2012, следует принимать значения их смещений *U* на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее эксплуатации без крепи в соответствии с таблицей 2.3.

Таблица 2.3 – Классификация устойчивости пород по величине смещения *U*

Категория устойчивости пород	**Оценка состояния устойчивости**	**Смещение *U*, мм**		
		Осадочные породы (песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, уголь и др.)	Изверженные породы (граниты, диориты, порфириты и др.)	Соляные породы (каменная соль, сильвинит, карналлит и др.)
I	Устойчивое	до 50	до 20	до 200
II	Среднеустойчивое	св. 50 до 200	св. 20 до 100	св. 200 до 300
III	Неустойчивое	св. 200 до 500	св. 100 до 200	св. 300 до 500
IV	Очень неустойчивое	св. 500	св. 200	св. 500

Отнесение выработки к той или иной категории устойчивости следует проводить по абсолютному значению максимальных смещений пород на контуре поперечного сечения, которые определяют дифференцированно в кровле, почве и боках выработки.

Определение категорий устойчивости массива горных пород по СП 91.13330.2012 [63], кроме типа слагающих пород и глубины залегания, учитывает также эффект взаимного влияния выработок друг на друга, что является значимым в процессах проектирования протяженной инфраструктуры горнодобывающего предприятия.

Представленные системы оценки устойчивости горных пород, применяемые при проектировании и эксплуатации шахт и рудников, во многом сходны и оперируют данными, полученными инструментальным способом (отбор и описание керна, испытание образцов разрушением, описание видимой и предполагаемой трещиноватости и т. д.). Разумеется, по понятным техническим и экономическим ограничениям невозможно на этапе проектирования и построения инженерно-геологической модели достичь высокой точности и детальности. Так, геологические разрезы, полученные по редкой сети разведочных скважин, не позволяют учесть истинное положение геологических разломов или вообще обнаружить их ввиду

непредвиденного угла падения и короткой протяженности. Упущенные детали этой «мозаики» предстоит обнаружить в процессе производства работ, что может оказать негативное влияние на экономику проекта.

Кроме того, ни одна из представленных рейтинговых систем оценки устойчивости горного массива не принимает во внимание геодинамические процессы. Горное давление на глубинах в несколько сотен метров оказывает существенное влияние на устойчивость горных выработок всех видов угольных шахт и рудников. Для борьбы с динамическими явлениями на предприятиях создаются специальные подразделения, так как потеря устойчивости, вызванная внезапной реализацией запасенной потенциальной энергией упругих деформаций, приводит к катастрофическим последствиям.

Изученность вопроса природы возникновения и протекания геодинамических явлений находится на достаточно высоком уровне, однако своевременное обнаружение подобных зон риска и непрерывный мониторинг горного массива в процессе ведения подготовительных и очистных работ требует применения современных методов дистанционной оценки структуры и состояния массива пород в зоне влияния горных работ.

2.3. Опасные геодинамические явления, возникающие в процессе ведения подземных горных работ

При эксплуатации угольных месторождений и других месторождений полезных ископаемых, содержащих органические отложения, образуется метан, который формирует взрывоопасную газовоздушную смесь и заполняет горные выработки настолько, что содержание кислорода в атмосфере шахты или рудника снижается до опасных уровней для человека. Характер газовыделений из различных источников в шахтах и рудниках разнится в значительной степени. В некоторых случаях выделение взрывоопасных газов происходит интенсивно, а в других случаях происходит без проявления динамики [22].

Согласно исследованиям [2], международная классификация геодинамических явлений техногенной природы в настоящее время основывается на энергетической теории горных ударов и энергетико-силовой теории внезапных выбросов угля (породы) и газа. Эта классификация была разработана на основе обобщения знаний о динамических явлениях, происходящих на угольных шахтах. Ее разработкой занималась специальная комиссия, созданная Рабочей группой по углю Европейской Экономической Комиссии ООН.

Эта классификация имеет особое значение, поскольку она предоставляет систематический подход к пониманию и классификации геодинамических явлений, связанных с человеческой деятельностью. Основываясь на энергетической теории горных ударов, она позволяет анализировать и оценивать энергетические аспекты, связанные с воздействием на горные породы. Энергетико-силовая теория, в свою очередь, помогает понять и изучить внезапные выбросы угля (породы) и газа. Объединение этих двух теорий в классификации дает возможность более точно определить и описать различные типы геодинамических явлений, которые возникают в результате деятельности в угольных шахтах.

Выделяют четыре основных класса геодинамических явлений (см. рис. 1.3): горные удары, выбросы газа, выбросы угля (породы) и газа, горно-тектонические явления.

К первому классу («горные удары») относят такие явления, в которых преобладает энергия упругих деформаций разрушающегося элемента горного массива, а также энергия окружающих его пород. Горные удары могут проявляться в предельно напряженных участках массива, когда скорость увеличения напряжений превышает скорость их рассеяния.

Ко второму классу («выбросы газа») относят геодинамические явления, характеризующиеся внезапным выделением значительных объемов газа из пустот, сетей трещин, полостей, зон тектонических нарушений в горные выработки или скважины.

«Выбросы угля (породы) и газа» подразумевают явления, энергетический баланс которых состоит из суммы энергии упругой деформации массива пород (угля)

и сжатого газа. В этом случае имеет место послойный отрыв (разрушение) породы (угля) под действием горного давления и расширяющегося газа, поддерживающими ход протекания процесса, с выносом значительного объема разрушенного материала в пространство выработки.

Класс «горно-тектонические явления» составляют явления, причиной которых являются все вышеуказанные виды энергий, а также толчкообразное деформирование горного массива под влиянием техногенного фактора.

Наиболее часто в шахтах и рудниках регистрируют геодинамические явления, относящиеся к классам «горный удар» и «выброс угля (породы) и газа». Рассмотрим эти два класса более подробно.

2.3.1. Геодинамические явления, возникающие под действием горного давления

Устойчивость системы «массив пород – горная выработка – крепь», как было описано выше, зависит от множества факторов. С увеличением глубины ведения подземных работ одним из основных и наиболее опасных факторов становится горное давление, под действием которого в горном массиве в ближней зоне влияния выработки протекают процессы упругих и пластических деформаций. Породы, способные накапливать упругие деформации, составляющие до 70% от полных деформаций, склонные к хрупкому разрушению, относят к классу склонных к горным ударам (динамическим явлениям).

В своей природе геодинамические события представляют собой феномены, связанные с разрушением горных пород с возможным высвобождением газа в определенной области. Такие признаки, как трески, увеличение давления на целики и крепь, предшествуют динамическим проявлениям горного давления, а увеличение напряженности смежных участков массива горных пород является результатом их реализации [5]. Если потенциальной энергии для реализации горного удара или внезапного выброса не хватило, то горное давление может проявляться внезапным выдавливанием породы или пучением почвы.

Динамические явления отмечены в горных выработках, пройденных по телу ископаемого, пустым породам, в кровле, в почве, в целиках, в том числе на значительном удалении от места ведения работ. Это позволяет сделать вывод о взаимосвязи напряжений в рамках всего горного отвода шахты и рассматривать совокупность влияния всех подземных выработок как единую систему, что может оказаться полезным в задачах цифровизации и моделирования горного массива.

Классификация проявлений горного давления динамического характера по особенностям развития геомеханических процессов подразумевает деление на два основных класса – локального и регионального происхождения.

К локальному классу относят микро- и горные удары, предвестниками которых являются шелушение пород на бортах выработок, стреляние и динамическое образование заколов. К причинам возникновения явлений этого класса относится

повышенная концентрация напряжений в горном массиве пород вокруг выработок и очистных пространств, обусловленных полем естественных напряжений, неоднородностями структуры и, кроме того, импульсными динамическими воздействиями (например, ударная волна при буровзрывных работах, горно-тектонический удар) [5].

К категории геодинамических явлений регионального происхождения, связанных с горными ударами, относятся разнообразные события высокой энергии. Это включает в себя сильные толчки землетрясений, возникающих в результате техногенного воздействия, а также горно-тектонические удары. Предвестниками таких явлений является нарастающая сейсмическая активность в массиве горных пород, которая наблюдается в течение значительного периода времени после событий.

Важно отметить, что геодинамические явления регионального происхождения, связанные с горными ударами, имеют свои характерные особенности и последствия. Их высокая энергетическая природа может приводить к значительным разрушениям и нарушениям в окружающей среде. Поэтому изучение этих явлений и разработка соответствующих мер предосторожности и адаптации являются важными задачами современной науки и инженерии.

Геодинамические явления регионального происхождения, связанные с горными ударами, представляют сложную и многогранную проблему, требующую глубокого исследования и применения новых подходов в изучении и понимании их механизмов и последствий.

Значительные объемы выемки горных масс в совокупности с другими техногенными воздействиями энергетического характера, например, разработка месторождения буровзрывным способом, приводят к изменению напряженно-деформированного состояния в горном массиве, что, в свою очередь, способствует потере сцепления границ блоков, лавинообразному прорастанию сетей трещин в них и горному удару регионального класса. Следствием является потеря равновесия крупных блоков, составляющих массив, или их разрушение прорастающими трещинами [5].

Динамическое проявление давления вышележащих слоев горных масс протекает при совокупном взаимовлиянии геологических и горнотехнических условий, определяющих силу, характер и сам факт проявления этих явлений.

Рассмотрим геологические факторы, обусловливающие саму возможность возникновения динамических явлений [5]:

– тектоническая нарушенность в области ведения работ или месторождения в целом, обусловленная наличием дизъюнктивных нарушений, локальных зон дробления, замков складок;

– склонное к хрупкому разрушению полезное ископаемое, имеющее высокую прочность;

– значительная глубина производства работ, при которой массы вышележащих пород достаточно для создания критических напряжений в горном массиве;

– основная и непосредственная кровля, а также почва представлены мощными слоями вмещающих пород высокой прочности.

К вышеназванному набору факторов необходимо добавить и фактор дискретности, что существенным образом может повлиять на процессы развития геодинамических явлений.

В случае газодинамических явлений перечисленные выше факторы следует дополнить условием насыщенности полезного ископаемого или вмещающих пород флюидом (газ, вода, нефть), что особенно критично для массива с дискретной структурой.

Горнотехнические факторы, создающие условия для возникновения динамических явлений, согласно [5]:

– камерно-столбовая система отработки месторождения с оставлением целиков полезного ископаемого;

– отработка целиков, находящихся в зоне повышенного горного давления, в том числе обусловленного взаимовлиянием соседних выработок;

– горные работы в зоне влияния целиков, оставленных на смежных вышележащих участках;

– сложное поле напряжений, обусловленное большим количеством подготовительных горных выработок, расположенных в непосредственной близости от добывающего участка;

– ведение проходческих работ встречными и догоняющими забоями;

– высокоэнергетическое воздействие на горный массив буровзрывных работ или применение механизированной отработки ископаемого комплексами с высокой производительностью.

Эпицентрами геодинамических событий являются области повышенных напряжений сжатия или растяжения, где массив накапливает потенциальную энергию упругих деформаций до момента ее реализации в виде динамического явления. Такими зонами могут являться охранные целики, грудь и стенки проходческих забоев. При этом наибольшее значение имеет величина градиента напряжений, что наиболее критично в массиве с дискретной структурой и зонами дезинтеграции на контактах блоков.

Основу динамических явлений составляет предельное напряженное состояние, формирующееся в отдельных участках массива под воздействием гравитационных, геодинамических сил, а также давления напорных вод и газов. Это является главным фактором, вызывающим динамические процессы [5]. Важную роль в активации динамического разрушения пород играют импульсные нагрузки, возникающие в предельно напряженных участках массива вследствие разнообразных факторов. Динамические явления могут быть вызваны различными факторами, которые дополняют и уточняют понимание процессов разрушения массива. Одним из таких факторов является влияние упругой волны при взрывах, которая может привести к генерации значительных динамических нагрузок, или внедрение рабочего органа добычной машины в полезное ископаемое, которое может вызвать нарушение целостности массива.

Помимо этого, процессы динамического разрушения пород могут быть связаны с возникновением крупных разломов в слое зависшей кровли, резким усилением неравномерностей напряженного состояния призабойной части массива, а также приближением к дизъюнктивному нарушению или замку складки. Все эти

события способны вызвать мгновенное хрупкое разрушение участка массива, находящегося в предельном напряженном состоянии.

Под воздействием возникающих импульсных нагрузок происходит цепная реакция, при которой накопленная потенциальная энергия преобразуется в работу смещения части массива, с его последующим разрушением и дроблением. Этот процесс является важным элементом в понимании механизмов динамического разрушения пород и его последствий.

Существующая теория по динамическим явлениям позволяет определить следующие основные контролируемые показатели, свидетельствующие о готовности исследуемой области массива к динамическому проявлению горного давления (рассмотрим на примере очистного участка угольной шахты):

– неравномерное распределение напряжений в приконтурном участке выемочного столба;

– отсутствие зон повышенной трещиноватости по контуру столба (грудь забоя, вентиляционный и конвейерный штрек);

– приближение максимума опорного горного давления к груди забоя;

– наличие структурных неоднородностей в теле выемочного столба лавы (геологические нарушения, зоны контакта блоков более высокого порядка, горная выработка и др.).

На рисунке 2.6 схематично представлен участок выемочного столба лавы размером 200х200 метров, где красным цветом обозначено местоположение зоны растягивающих напряжений, синим – зона сжимающих напряжений (зона повышенного горного давления), желтым – переходная зона.

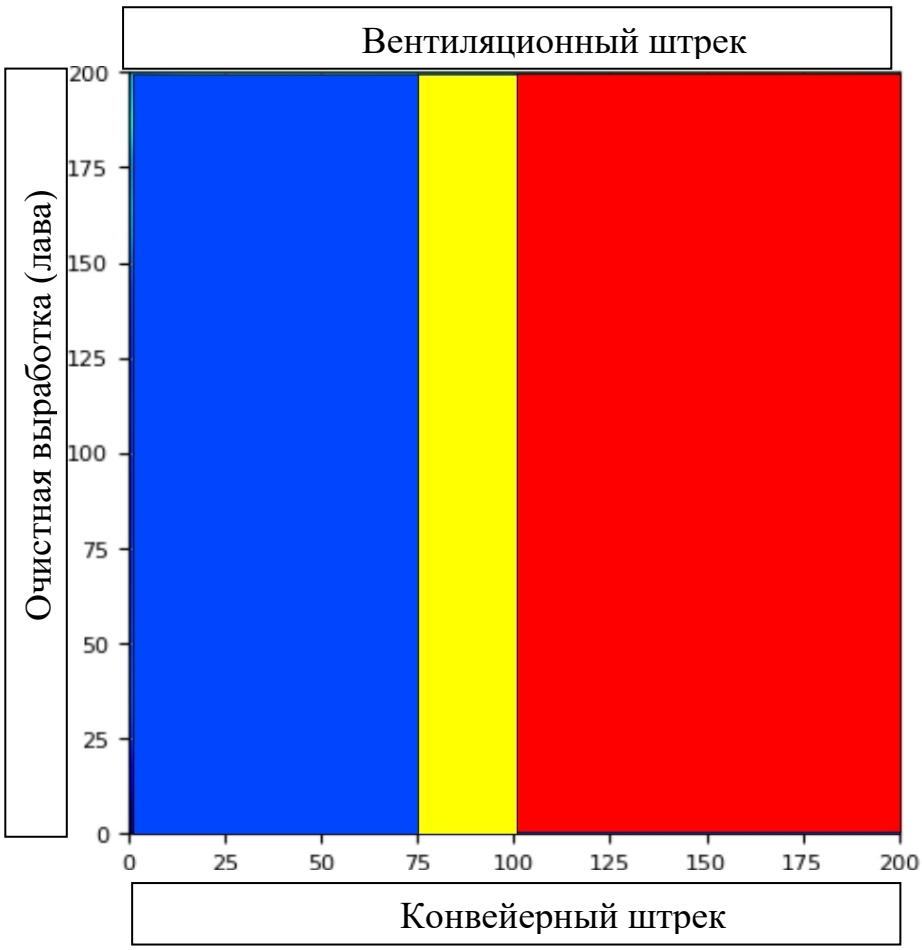

Рисунок 2.6 – Схема распределения напряжений в исследуемой зоне угольного пласта при готовности массива к горному удару

Приближение зоны повышенного горного давления к оконтуривающим выработкам (наибольшую опасность представляет очистная выработка) приводит к закрытию сети трещин и значительному снижению области пластических деформаций. Запас потенциальной энергии упругих деформаций продолжает расти, пока не достигнет критических значений, приводящих к хрупкому разрушению стенок выработок и его реализации в виде динамического явления – горного удара.

Неравномерное распределение напряжений в исследуемом участке выемочного столба присутствует всегда в той или иной мере в силу неоднородности и анизотропии массива горных пород. Однако значительный градиент напряжений может свидетельствовать о запасенной потенциальной энергии упругих деформаций, которая может реализоваться в виде кинетической энергии отбрасываемых частиц и газа в процессе динамического явления.

Отсутствие оконтуривающих зон трещиноватости и приближение максимума опорного горного давления, то есть значительное отличие структуры сплошности от представленной И. М. Петуховым [11] (см. рисунок 2.4), в некоторых случаях возможно определить инструментальными методами прогноза, например, способ прогноза удароопасности по количеству литров выхода мелочи при бурении шпура. Для достижения положительного результата необходимо, чтобы совпало множество факторов, как-то: достаточная глубина бурения шпура (зачастую превышающая ширину защитной зоны), выполнение серии шпуров (точечные измерения методом разрушающего контроля, к которому относится бурение шпуров, нуждаются в значительном количестве попыток для увеличения объективности), исключение человеческого фактора. Кроме того, согласно действующей инструкции [62], в случае зажатия бурового инструмента предписывается прекратить прогнозные мероприятия, присвоить горному массиву категорию «ОПАСНО» и приступить к выполнению мер по предотвращению возникновения горного удара (динамического проявления горного давления).

Горный массив как дискретная неоднородная среда обладает структурными неоднородностями, которые являются неотъемлемым его атрибутом. Однако их влияние на подземные работы может проявиться только в том случае, если их размеры сопоставимы с размерами горных выработок. В частности, локальные зоны трещиноватости, имеющие размер около 3 м в сечении, могут содержать опасные объемы взрывоопасного газа или вызывать внезапную потерю устойчивости и обвал участка выработки. Недостаточный уровень исследованности отрабатываемого горного массива не исключает геологические нарушения , которые зачастую приводят к кардинальному перераспределению напряжений и подготовке стадий развития динамических явлений.

Для предотвращения возникновения опасных ситуаций на ранних стадиях их развития необходим мониторинг параметров горного массива и распознавание его состояний, которые свидетельствуют о подготовке исследуемой области к динамическому явлению. Такой подход позволяет оперативно реагировать на изменения в

горном массиве и принимать соответствующие меры для обеспечения безопасности при подземных работах.

2.3.2. Геодинамические явления, возникающие под совместным действием горного давления и газа

Самопроизвольный выброс газа, твердого полезного ископаемого (уголь, соль) или вмещающей породы в подземную горную выработку из забоя или призабойной зоны массива называют внезапным выбросом [64].

Согласно энергетической теории внезапных выбросов угля и газа, разработанной проф. В. В. Ходотом и ИГД им. А. А. Скочинского, для возбуждения и развития внезапного выброса должны соблюдаться следующие условия [22]:

– освобождение вблизи горной выработки таких количеств потенциальной энергии угля, кинетической энергии горных пород и внутренней энергии свободного газа в угле, которых было бы достаточно для работы смещения угля в сторону горной выработки и разрушения угля;

– скорость разрушения угля должна превышать скорость падения давления газа в трещинах угля;

– сохранение давления газа к моменту завершения разрушения угля на уровне, более высоком, чем сопротивление разрушенного угля отбросу.

Возникающая вблизи горных выработок в массиве горных пород концентрация напряжений может привести к внезапному разрушению, растрескиванию и выталкиванию призабойной части угольного пласта внутрь выработки. Когда зона разрушающегося угля связана с атмосферой выработки, из измельченного угля происходит быстрая десорбция содержащегося там газа, который, двигаясь в сторону области с нижним давлением, выносит с собой угольную пыль. При наличии достаточно большой зоны раздавленного угля десорбирующийся и расширяющийся газ способен выбросить разрушенный уголь на значительное расстояние. Энергетические факторы, приводящие к разрушению угля, представляют собой комплексное взаимодействие различных источников энергии. Одним из основных

источников является энергия упругой деформации самого угольного пласта, которая возникает в результате его сжатия или растяжения. Кроме того, значительное влияние оказывают потенциальная и кинетическая энергия вмещающих горных пород, которые окружают угольный пласт. При наличии тектонических напряжений в угольном пласте и вмещающих породах эти источники энергии могут быть усилены. В процессе внезапного выброса угля, когда уголь переносится из пласта в горную выработку, главными источниками энергии становятся свободный и десорбирующийся метан, а также масса угля на крутопадающих пластах. Однако для возникновения и развития внезапного выброса угля и газа необходимо не только наличие указанных источников энергии, но и определенное напряженное состояние, давление и количество газа. Кроме того, разрушение угля требует специфических условий, которые способствуют изменению напряженного состояния и разрушению угольного массива.

Разнообразные факторы энергии и напряжения взаимодействуют, создавая сложные условия для процессов разрушения угля. Понимание этих факторов и их взаимосвязи является важным аспектом для эффективного контроля и предотвращения негативных последствий при отработке запасов. Для использования энергии расширяющегося газа в процессе внезапного выброса необходима минимальная скорость выделения газа, а следовательно, и минимальная скорость разрушения и смещения угля. Для возникновения внезапного выброса требуется не только определенное напряженное состояние, свойства пласта и их изменение, сопровождающиеся разрушением угля и выделением газа, но и определенная скорость изменения напряженного состояния и разрушения пласта угля, которая обеспечивает реализацию сил при выбросе разрушенного угля в горную выработку.

Структурные неоднородности и трещины в горном массиве могут играть значительную роль в процессе выброса. Локальные зоны трещиноватости, имеющие размеры около 3 м в сечении, могут содержать значительные объемы газа или представлять угрозу внезапной потери устойчивости и обвала участка груди забоя. Непрогнозируемые геологические нарушения также могут приводить к перераспределению напряжений и созданию условий для возникновения динамических

явлений. Важно отметить, что для возникновения внезапного выброса газа, твердого полезного ископаемого или вмещающей породы в подземную горную выработку необходимо сочетание нескольких факторов, таких, как наличие концентрации напряжений, наличие источников энергии (упругой деформации угольного пласта, потенциальной и кинетической энергии горных пород), наличие газа и его скорость выделения, а также изменение напряженного состояния и разрушение пласта угля [22].

Согласно существующей теории внезапных выбросов [22], основным отличием внезапных выбросов от горных ударов является именно нарушение равновесного состояния газонасыщенного массива техногенным воздействием.

Отмечено [22], что выбросоопасные угольные пласты представлены углями различной степени тектонической нарушенности и имеют изменчивую структуру.

Определим основные контролируемые параметры, позволяющие судить о подготовке горного массива к внезапному выбросу угля и газа, исходя из имеющихся представлений (рассмотрим на примере очистного участка угольной шахты):

– газоносность угольного пласта;

– существенно неравномерное распределение напряжений в исследуемом участке выемочного столба;

– зона разуплотнения (деконцентрации напряжений), расположенная у груди забоя, оконтуренная областью повышенного горного давления, снижающей вероятность фильтрации газа в угольный пласт;

– зона повышенного горного давления, расположенная вблизи оконтуривающих выработок, совпадающая с местоположением структурных нарушенностей и неоднородностей;

– наличие структурных неоднородностей в теле выемочного столба лавы (геологические нарушения, зоны контакта блоков более высокого порядка, пачки угля различной тектонической нарушенности, горная выработка и др.).

На рисунке 2.7 схематично представлен исследуемый участок выемочного столба лавы размером 200х200 м, где красным цветом обозначено местоположение зоны растягивающих напряжений, синим – зона сжимающих напряжений (зона повышенного горного давления), желтым – переходная зона.

Приближение зоны растягивающих напряжений к груди забоя, оконтуренной областью повышенного горного давления, способствует десорбции метана и его скоплению в зоне растягивающих напряжений (зона повышенной трещиноватости). Зона повышенного горного давления сводит проницаемость угля к минимуму, запирает газ и создает условия для его внезапного выделения при вскрытии области рабочим органом добычного комбайна. Подобное напряженное состояние в горном массиве может возникать, например, при зависании основной кровли в отработанном пространстве.

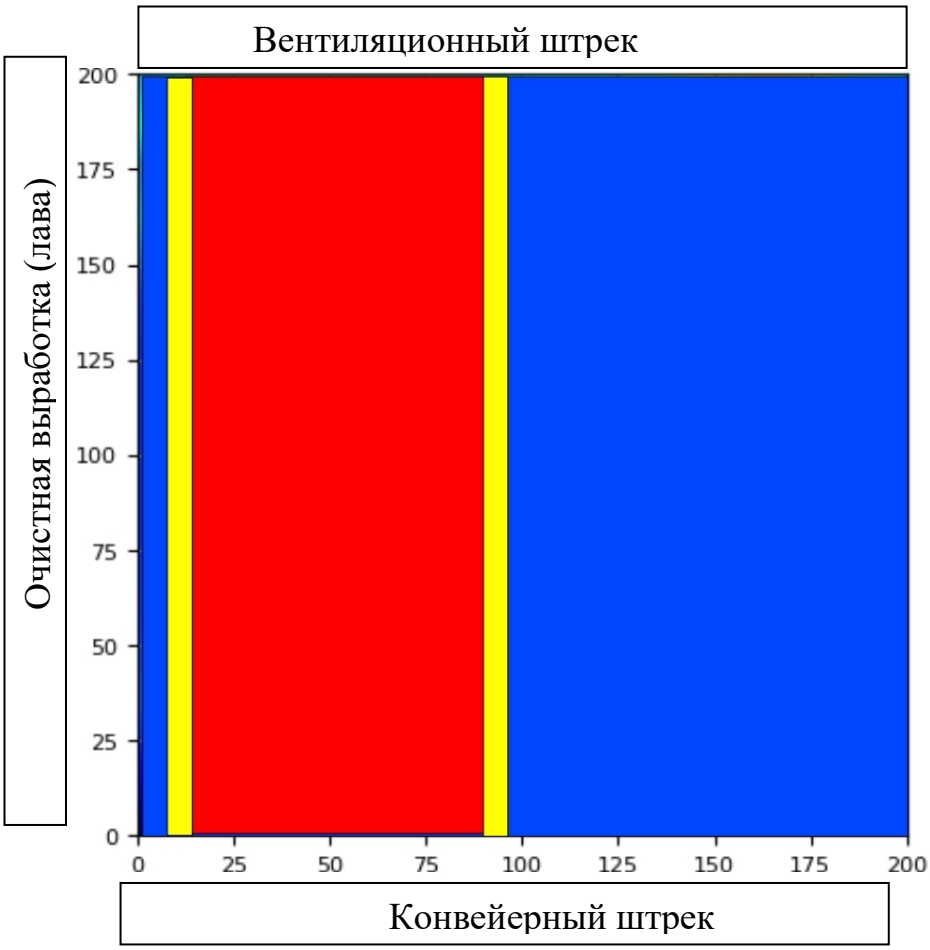

Рисунок 2.7. Схема распределения напряжений в исследуемой области угольного пласта при готовности массива к внезапному выбросу

Классический внезапный выброс угля и газа возможен в призабойной части угольного пласта, сложенного пачками высокой степени нарушенности, с высоким содержанием сорбированного метана и находящийся под повышенным горным давлением, то есть распределением напряжений, аналогичным представленным на рисунке 2.7.

2.4 Применение системы сейсмической локации для непрерывной оценки параметров угольного массива в очистном забое при механизированном способе ведения работ

Механизированный способ отработки угольного пласта длинными столбами по простиранию предполагает тщательное планирование и подготовку производства работ с учетом зон влияния существующих горных выработок, предохранительных целиков, развития систем аэрологии, безопасности и технического обеспечения энергоресурсами (электропитание, сжатый воздух, технологическое водоснабжение). Этапы планирования и проектирования могут предусмотреть только имеющуюся в наличии информацию о структуре горного массива и принять во внимание расчетные значения напряжений. В процессе отработки запасов напряжения в угольном пласте могут кардинально меняться несколько раз в неделю, в зависимости от темпов ведения очистных работ. Значительная глубина отработки большинства месторождений каменного угля в Кузбасском бассейне способствует увеличению случаев внезапной потери устойчивости по причине возникновения геодинамического явления.

Согласно [37], угольный пласт представляет собой акустический волновод, ограниченный вмещающими породами кровли и почвы с существенно отличающимися физическими свойствами. Упругая волна, инициированная рабочим органом комбайна, распространяется по волноводу-пласту, отражаясь от неоднородностей, изменяя свои атрибуты, по причине возникновения резонансных явлений на границах трещин (неоднородностей). Атрибуты поля отраженных волн имеют корреляционную связь с параметрами неоднородностей, которые встречает прямая волна на своем пути. В обосновании этого утверждения, упростив рассмотрение пласта-

волновода до линии, рассмотрев энергию, высвобождаемую при образовании трещины, в [37] выведена формула связи граничного напряжения одноосного растяжения с частотой акустического сигнала, возникающего при образовании этой трещины:

$$\sigma_e = N \times \sqrt{\frac{G \times h \times \nu \times \tau}{2a^3 \times (1-\mu)}} \quad , (2.1)$$

где σ_e – граничное напряжение одноосного растяжения, эквивалентное сложному напряженному состоянию, Па;

N – количество трещин (излучателей), ед.;

G – модуль сдвига, Па;

h – постоянная Планка = $6{,}62607015 \cdot 10^{-34}$ кг·м^2·с$^{-1}$;

ν – частота излучения, Гц;

τ – длительность импульса, с;

a – характерный размер трещин, м;

μ – коэффициент Пуассона безразмерный.

Проследив, обоснованную в 2.1 связь в формате «горное давление – трещиноватость – атрибуты волны», также описанную в научной работе профессора Писецкого В. Б. [60] с помощью технических систем, выполняющих анализ параметров упругих волн, возможно решить задачу оценки напряжений в горном массиве, а следовательно, и прогноза рисков динамического проявления горного давления.

Большинство эксплуатируемых на угольных предприятиях систем для оценки готовности горного массива к динамическому явлению, использует метод оценки параметров акустического сигнала (амплитудно-частотные характеристики, количество тресков в единицу времени) [62] без определения местоположения его источника (пассивный режим). Согласно имеющимся данным [37], прогноз рисков возникновения динамических явлений единственно по параметрам акустического сигнала в пассивном режиме не подтверждается более чем в 30-40% случаев. Заметим, что для варианта подобного прогноза землетрясений, по независимым данным Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта и Стенфордского университета, такой способ прогноза имеет уровень детерминации не выше 60% даже

при покрытии территории прогноза сейсмологическими станциями с высокой плотностью размещения (одна станция на 10-15 км^2).

Именно локация зон дезинтеграции позволяет в каждый момент времени осуществлять относительную оценку распределения напряженности в горном массиве и заблаговременно реагировать, вплоть до изменения темпов очистных работ, то есть корректируя ситуацию на уровне технологии.

В задачах геомониторинга в ряде угольных шахт Кузбасса применяется система контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО» [31, 32], обеспечивающая локацию источников отражения сейсмических волн в режиме сейсмозондирования и регистрацию сейсмоакустических событий в пассивном режиме.

Аппаратная часть системы «Микон-ГЕО» для реализации предлагаемого метода непрерывного (текущего) прогноза состояния горного массива, выполняющая регистрацию волнового пакета, состоит из тех же технических средств, что и в исполнении для периодического прогноза состояния горного массива, рассмотренного в п 3.1. Существенные изменения касаются методического и программного обеспечение верхнего уровня. Ключевое отличие системы текущего прогноза заключается в источнике сейсмических волн, представленном рабочим органом комбайна.

В отличие от системы вибросейсмического воздействия, широко применяющегося в нефтяной сейсморазведке, в качестве опорного кодоимпульсного сигнала (свип-сигнала) в нашем случае принимается сигнал от ближайшего к комбайну сейсмоприемника. Процесс регистрации сейсмических сигналов представляет собой их накопление в буфере контроллера синхронизации ИПКС2Х с последующей передачей на поверхность через стационарные штатные системы передачи информации. Программное обеспечение, установленное на персональном компьютере оператора, выполняет автоматическую обработку сейсмограмм с визуализацией горизонтального среза модели горного массива на уровне почвы выработки в изображении параметра «Уровень разуплотнения» (рис. 2.8).

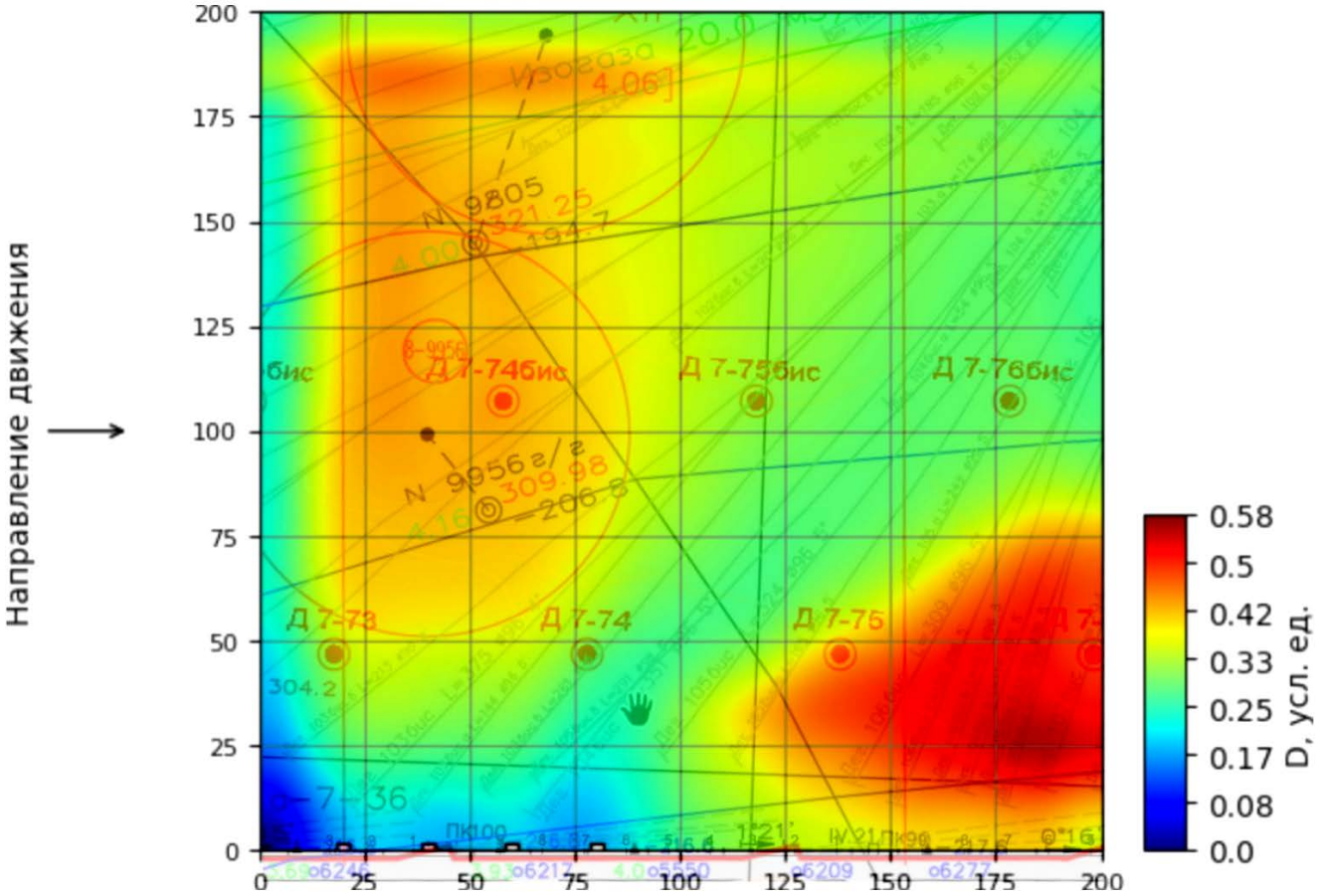

Рисунок 2.8 – Горизонтальный срез трехмерной модели выемочного столба лавы в изображении параметра «Уровень разуплотнения» (*D*, усл. ед.)

В данном случае (см. рисунок 2.8) грудь забоя расположена слева, а направление движения лавы указано стрелкой с одноименной надписью. Сейсмоприемники в количестве четырех штук установлены в угольный пласт, в борт конвейерного штрека и на рисунке выше изображены в виде прямоугольников белого цвета. Методика предусматривает использование от 4 до 10 сейсмоприемников. Размеры зоны контроля приведены в метрах у оси абсцисс и ординат. Актуальный на дату выполнения прогноза план горных работ выполнен в виде подложки и приведен в масштабе 1:1 по отношению к срезу модели горного массива. Цветом изображены области разуплотнения массива: красным – наибольшего, синим – наименьшего. Промежуточные значения раскрашены в соответствии с гаммой шкалы.

Рассмотрение рабочего органа комбайна в качестве кодоимпульсного источника сканирующих волн представляет более сложную задачу при обработке

сейсмоданных, чем в случае с источником импульсного типа (например, кувалда), так как зондирование предполагает, что момент возбуждения исходной волны в массиве должен быть четко зафиксирован сейсмостанцией, ведь он является сигналом для начала регистрации отраженных волн, а воздействие на горный массив должно иметь характерную форму затухающего импульса. Метод отраженных волн предполагает возбуждение сканирующей волны и последующую запись пакета отраженных волн в отсутствие новых источников возбуждения. В случае с рабочим органом комбайна излучение сканирующих волн в массив происходит непрерывно (относительно длины записи) от множества источников одновременно и с различной энергией. Кроме того, с учетом работы оборудования, обеспечивающего ход технологического процесса добычи (например, маслостанции механизированной крепи), в массив привносится множество помех, которые могут быть идентифицированы как отраженные волны, что требует тщательной фильтрации волнового поля по типу поляризации трехкомпонентного приема сигналов и применения определенного набора амплитудно-частотных фильтров.

В то же время, как показывает опыт апробации системы «Микон-ГЕО» в предложенном режиме, количество записанных сейсмоданных, с учетом работы комбайна до 18 часов в сутки, позволяет уверенно фиксировать зоны дезинтеграции, соизмеримые с размерами горных выработок, на удалении до 200 м от места установки приемной аппаратуры.

Предлагаемая методика и технология сейсмических наблюдений дает возможность определять местоположение зон дезинтеграции, ориентированных субвертикально, что позволяет обнаруживать наиболее опасные участки с точки зрения устойчивости при ведении добычных работ. Параметр «Уровень разуплотнения» с учетом дополнительных исходных данных позволяет судить не только о зонах повышенного разуплотнения и других нарушениях сплошности массива, но и о распределении наиболее значимых напряжений, действующих на угольный пласт. Так, имея на руках план горных работ и исключив наличие в зонах максимального разуплотнения горные выработки, плоскости геологических нарушений и другие известные структурные неоднородности, можно говорить о наличии

растягивающих усилий в областях красного цвета и о сжимающих – в областях синего цвета.

Сейсмоприемники в количестве 4–10 штук устанавливаются в угольный пласт в одну линию на борту вентиляционного или конвейерного штрека не далее 30 м от груди забоя (рисунки 2.9, 2.10). По мере продвижения забоя ближний сейсмоприемник переносится и становится последним в линии последовательно подключенных сейсмоприемников.

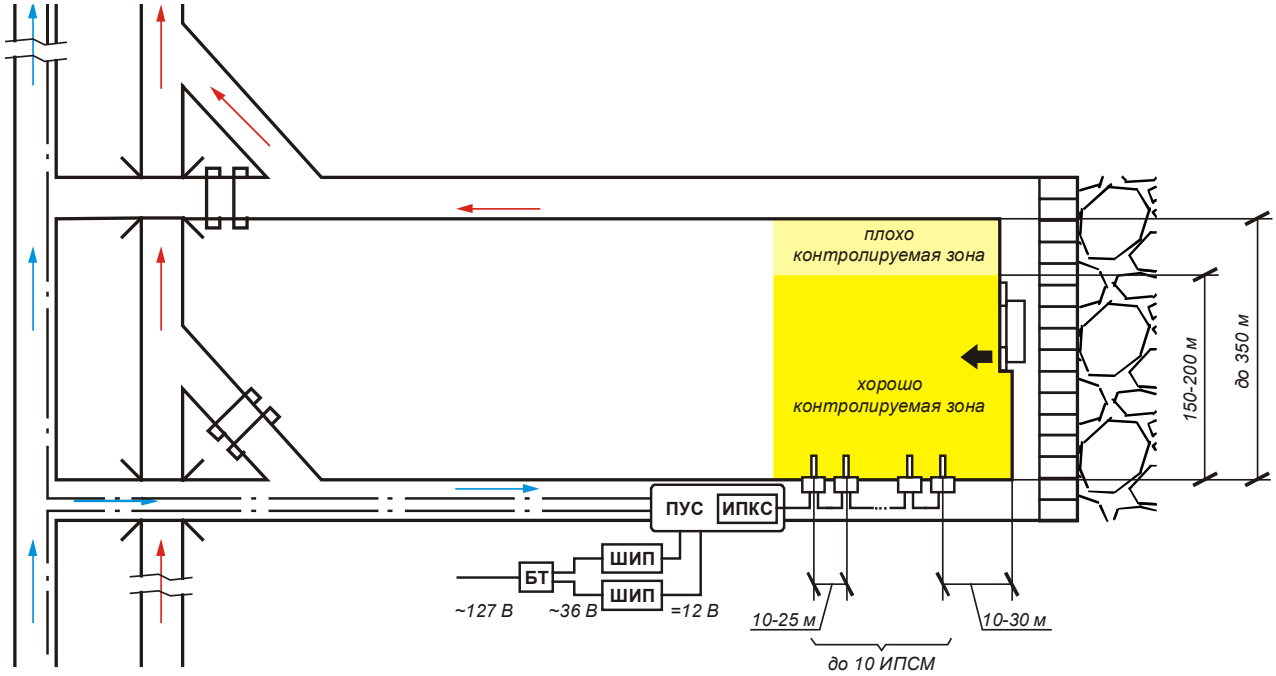

Рисунок 2.9 – Размещение системы «Микон-ГЕО» в очистном забое с длиной лавы 200-250 м

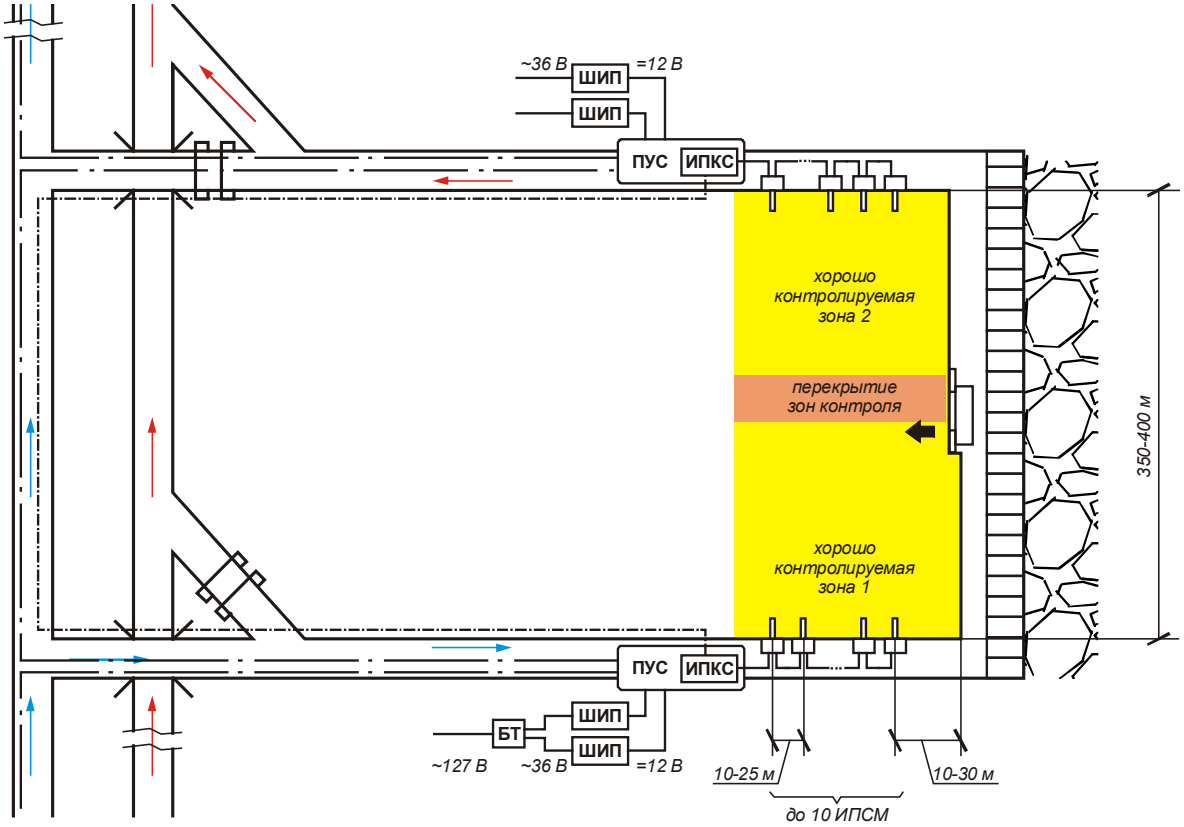

Рисунок 2.10 – Размещение ссистемы «Микон-ГЕО» в очистном забое с длиной лавы до 350 м

Зарегистрированные таким образом сейсмоданные автоматически обрабатываются на поверхности, и далее в отсутствие квалифицированных кадров в сфере геофизики, встает вопрос об автоматизации процесса интерпретации данных для определения состояния горного массива с целью оценки устойчивости, в том числе и с точки зрения рисков возникновения геодинамических явлений.

Энергией, реализующей и поддерживающей динамическое явление (или потерю устойчивости кровли / борта выработки), является поле напряжений, неоднородность распределения компонент которого порождено текущими работами и всей подземной инфраструктурой в целом. Как было сказано выше, различают несколько типов динамических явлений, но наиболее опасные и часто встречающиеся в угольных шахтах – это горный удар и внезапный выброс газа с углем (породой). Если внезапный выброс формируется в ближней зоне влияния забоя контролируемой выработки и с высокой вероятностью будет спрогнозирован по сейсмическому обзору, то очаг горного удара может быть удален от выработки на неопределенное

расстояние, в зависимости от инфраструктуры подземного пространства и не попасть в сектор сейсмического обора.

Действующими федеральными нормами и правилами [61] предусмотрены инструментальные и геофизические методы прогноза ударо- и выбросоопасности. Методика применения геофизических методов не приводится, и/или она устарела и не дает необходимой оперативности, и/или на рынке отсутствуют технические средства, имеющие сертификаты для применения во взрывоопасной атмосфере шахт и рудников. Методика оценки состояния массива, в настоящий момент реализованная в системе «Микон-ГЕО», относится к категории геофизических методов, которая, при наработке критериев, позволит выполнять текущий прогноз ударо- и выбросоопасности по искусственному сейсмоакустическому сигналу.

Инструментальные методы прогноза были разработаны отраслевыми научными институтами (МакНИИ, ВостНИИ, ВНИМИ и ИГД им. А. А. Скочинского) и применяются в настоящее время, но не обеспечивают достаточной оперативности.

Суть инструментального метода прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи заключается в косвенном определении величины горного давления, связанного с размером и количеством выбуриваемой мелочи с каждого метра шпура буровой штанги, внедряемой в угольный пласт на ширину защитной зоны. Но, как уже отмечено, очаг удароопасности может находиться за пределами досягаемости шпуров, поэтому такой регламент не обеспечивает в полной мере безопасность работ.

Регламент инструментального метода прогноза выбросоопасности состоит в поиске в теле угольного пласта нарушенных (ослабленных) пачек определенных размеров и измерения начальной скорости газовыделения. Как было обозначено выше, согласно исследованиям ИГД им. А. А. Скочинского, энергией, поддерживающей реализации внезапного выброса, является повышенное горное давление.

Понимание сути явлений позволяет производить оценку рисков возникновения динамических явлений (потери устойчивости горного массива) средствами системы сейсмической локации. Зоны повышенного горного давления (сжатия) представляют собой области, где трещиноватые зоны выражены в существенно

меньшей степени, чем в зонах пониженного горного давления и преобладающих растягивающих усилий.

Интерпретация среза модели [54] исследуемой области выемочного столба лавы позволяет определить ключевые состояния горного массива и при необходимости принять соответствующие меры.

Рассмотрим выделенные эмпирически ключевые состояния исследуемой области выемочного столба лавы, соответствующие сейсмическому обзору, где красным цветом изображены зоны повышенного разуплотнения (повышенных растягивающих напряжений), синим – зоны низкого уровня разуплотнения (повышенных сжимающих напряжений), желтым – переходные зоны от одного состояния к другому:

1) Удовлетворительное состояние (рисунок 2.11) – характеризуется расположением зоны повышенного горного давления (сжимающие напряжения) в центральной части пласта, наличием переходных зон у оконтуривающих выработок и зоны максимального разуплотнения на дистанции более 100 м от груди забоя.

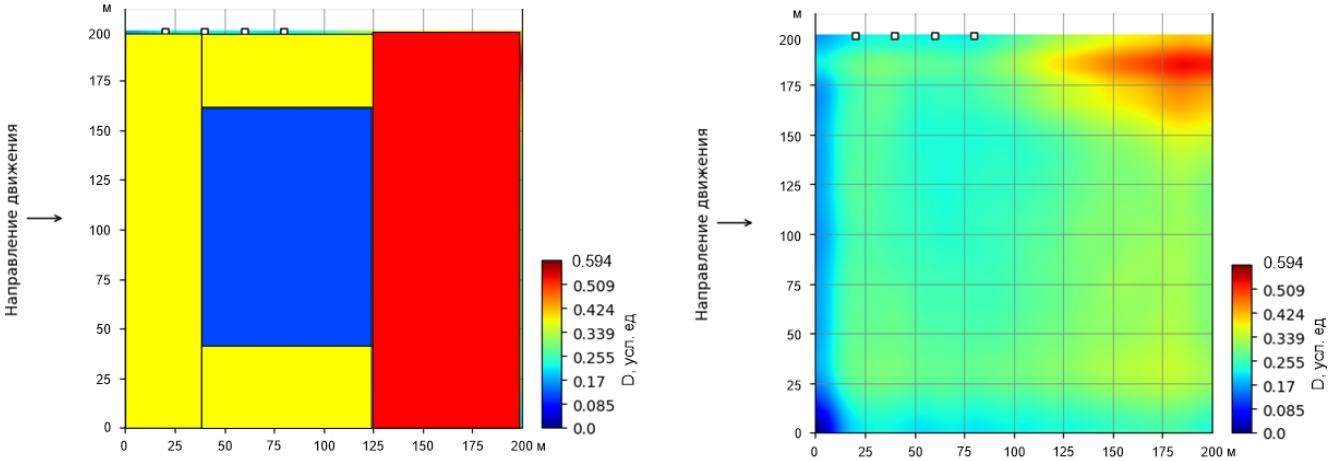

Рисунок 2.11 – Удовлетворительное состояние исследуемой области пласта (слева – схема расположения зон, справа – срез модели в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», *D*, усл. ед.)

2) Массив равномерно разуплотнён (рисунок 2.12) – характеризуется повышенным метановыделением, присутствует риск внезапной потери устойчивости.

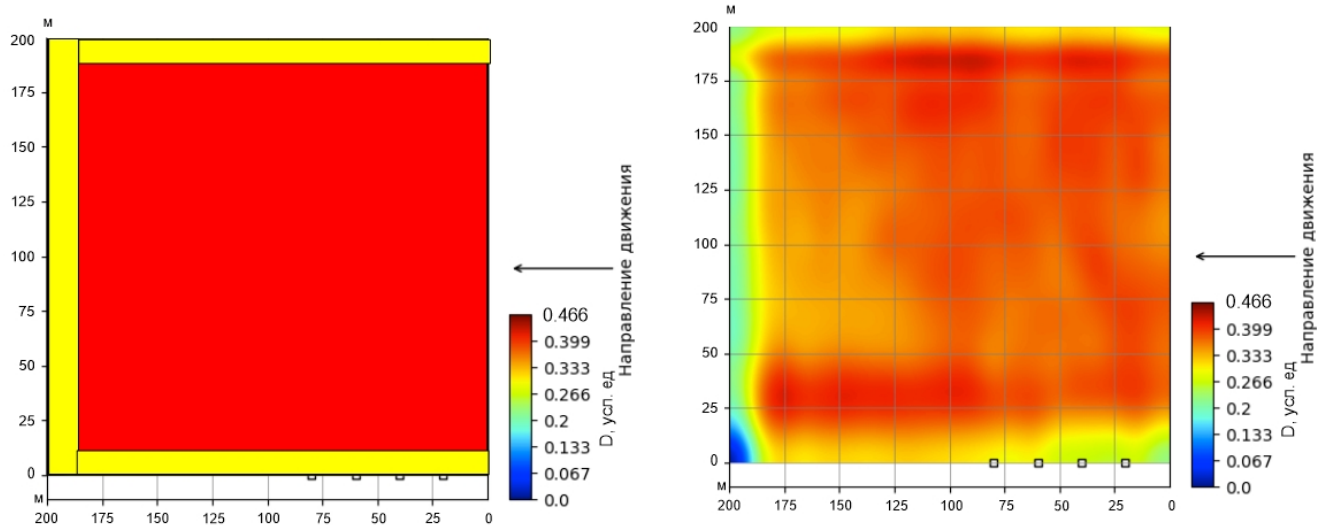

Рисунок 2.12 – Массив равномерно разуплотнен (слева – схема расположения зон, справа – срез модели в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», *D*, усл. ед.)

3) <u>Локальное разуплотнение у груди забоя</u> (рисунок 2.13) – состояние характеризуется повышенным газовыделением и высоким риском внезапной потери устойчивости борта выработки в районе зоны повышенного разуплотнения. Такое явление может наблюдаться при зависании основной кровли в выработанном пространстве лавы.

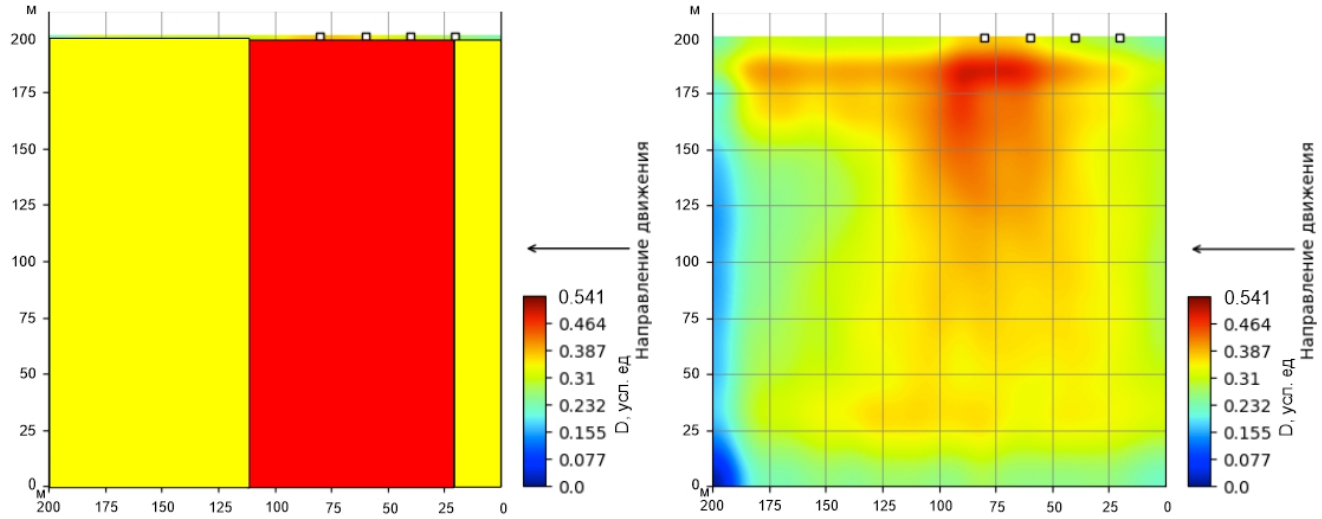

Рисунок 2.13 – Локальное разуплотнение у груди забоя (слева – схема расположения зон, справа – срез модели в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», *D*, усл. ед)

4) Локальная зона повышенного горного давления (рисунок 2.14) – массив характеризуется высоким риском динамического разрушения борта и кровли в районе зоны повышенных сжимающих напряжений (локальная зона синего цвета).

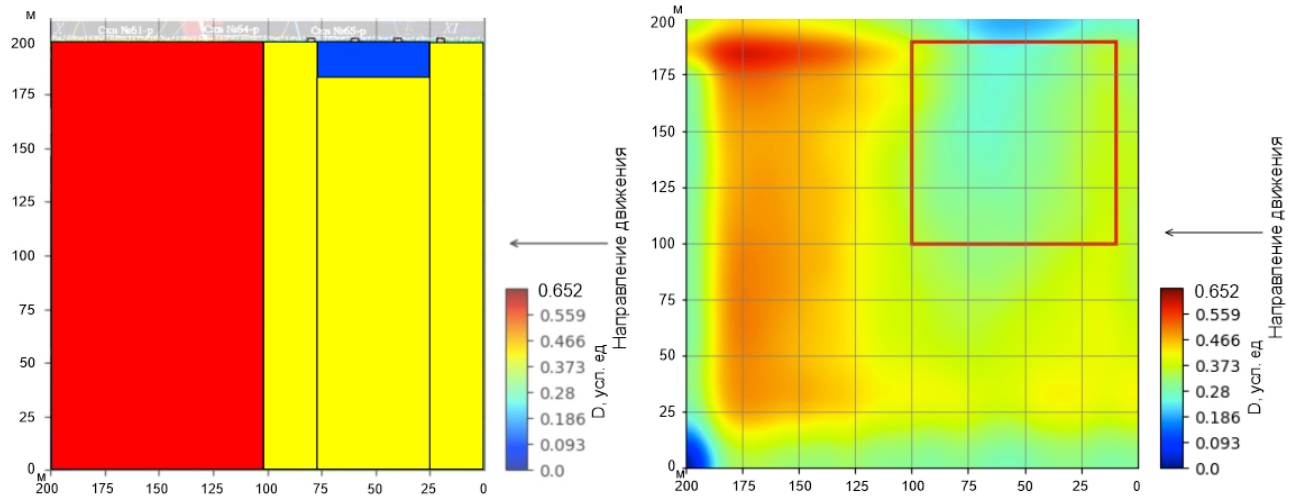

Рисунок 2.14 – Локальная зона повышенного горного давления (слева – схема расположения зон, справа – срез модели в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», *D*, усл. ед.)

5) Зона максимальной трещиноватости у груди забоя (рисунок 2.15) – массив характеризуется проявлением признаков динамических явлений, повышенным давлением на стойки механизированной крепи. Такое явление может наблюдаться при зависании значительного участка основной кровли в выработанном пространстве лавы.

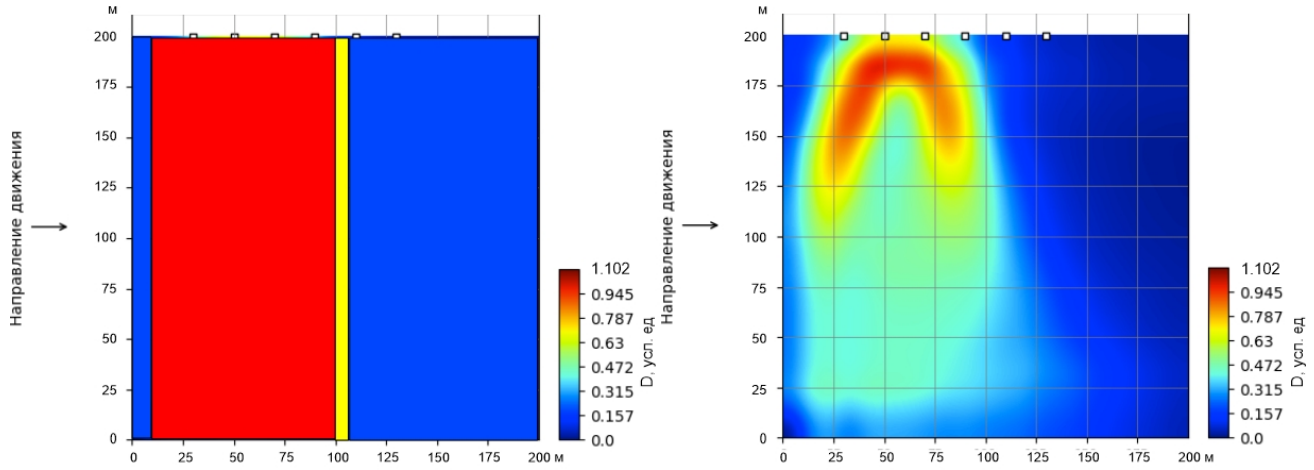

Рисунок 2.15 – Зона максимальной трещиноватости у груди забоя (слева – схема расположения зон, справа – срез модели в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», *D*, усл. ед.)

6) Зона повышенного горного давления у груди забоя (рисунок 2.16) – массив характеризуется проявлением признаков динамических явлений, свойственных удароопасному участку (трески, повышенное давление на крепь, зажатие бурового инструмента и т. д.). Инструментальный метод определения удароопасности показывает повышенные значения прогнозного параметра (повышенный выход буровой мелочи).

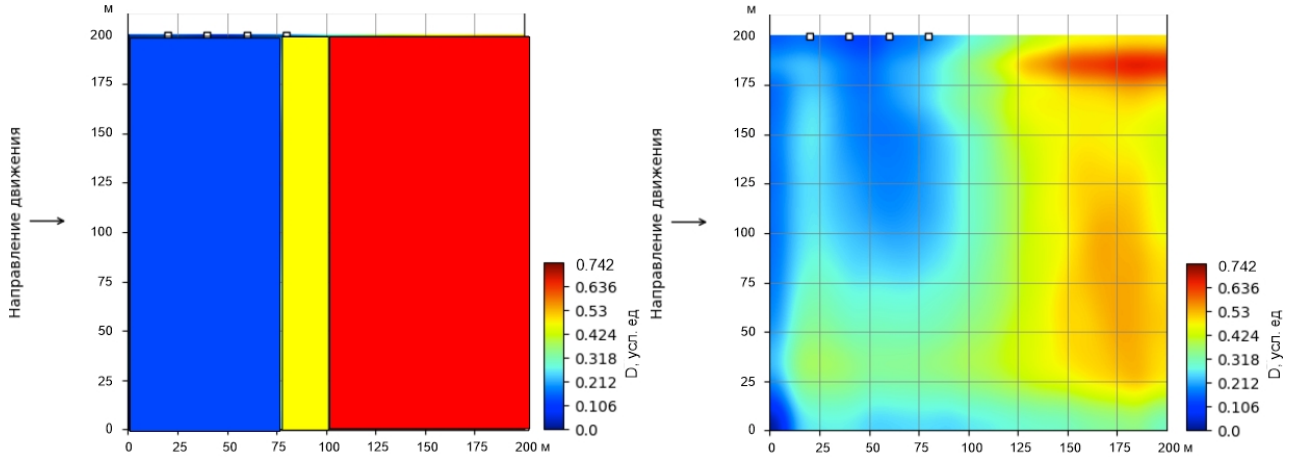

Рисунок 2.16 – Зона повышенного горного давления у груди забоя (слева – схема расположения зон, справа – срез модели в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», *D*, усл. ед.)

Дистанционная оценка структуры исследуемой области угольного пласта сейсмическим методом, учитывая известные неоднородности техногенного происхождения, позволяет перейти к косвенной оценке напряжений в нем, а значит, и к качественной оценке устойчивости.

Представленные выше срезы модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения» и предложенные схемы для упрощения интерпретации являются личными наработками автора работы и получены в процессе оценки состояния горного массива на действующих угольных шахтах Кузбасса.

На угольных шахтах действующими нормативно-правовыми актами [61, 62], как уже было отмечено ранее, установлено обязательное требование о применении систем текущего прогноза удароопасности и выбросоопасности горного массива по параметрам искусственного сейсмоакустического сигнала в ближней зоне влияния очистных и подготовительных работ. В части прогноза удароопасности, а точнее

оценки текущего состояния горного массива на предмет риска возникновения горного удара, система «Микон-ГЕО» в тестовом режиме осуществляет непрерывный мониторинг [47] участка углепородного массива и пересчитывает «Уровень разуплотнения» в параметр «Расчетный выход буровой мелочи», который является семантическим аналогом инструментального прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи при условии выполнения периодической калибровки и подстройки коэффициентов формулы корреляционной связи, используемой для расчета данного параметра в «Микон-ГЕО». Снимок экрана диспетчера шахты с результатом оценки удароопасности приведен на рисунке 2.17.

Текущий прогноз

Объект: 5а-7-36_ВШ

Печать Архив

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ

Дата подготовки данных: 08.02.2022 11:00

Мощность пласта (м): 4

Достоверность (%): 100

Оценка состояния: НЕ ОПРЕДЕЛЕНО

Расстояние	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м	6 м	7 м	8 м	9 м	10 м	11 м	12 м	13 м	14 м	15 м	16 м	17 м	18 м
Аварийные значения	3,7	3,99	4,28	4,59	4,92	5,25	5,61	5,98	6,36	6,77	7,2	7,65	8,12	8,62	9,15	9,71	10,3	10,93
Расчетные значения	1,23	1,51	1,78	2,06	2,34	2,62	2,89	3,17	3,45	3,73	4,03	4,34	4,64	4,95	5,25	5,55	5,86	6,16

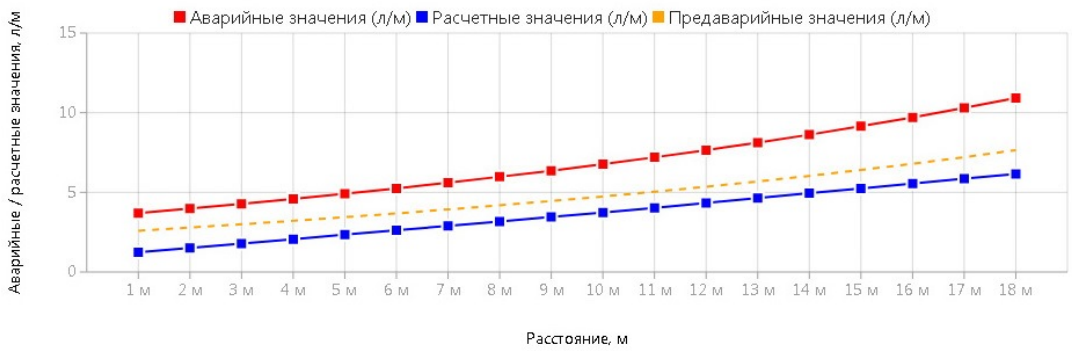

Рисунок 2.17 – Снимок экрана диспетчера шахты с результатом оценки удароопасности по параметру «Расчетный выход буровой мелочи»

В части оценки рисков возникновения внезапного выброса или текущего прогноза выбросоопасности ведутся научно-исследовательские работы по

определению однозначного критерия оценки. Согласно [22], выбросоопасный угольный пласт характеризуется наличием угольных пачек различной степени нарушенности, значительными объемами сорбированного метана, а также повышенным горным давлением. Наиболее мягкие нарушенные угольные пачки можно учитывать, обладая данными о местоположении комбайна и тока, потребляемого рабочим органом. Информация об объемах выделившегося метана доступна из систем аэрогазовой защиты, а о распределении основных напряжений позволяют судить данные о давлении в гидроцилиндрах механизированных стоек крепи и системы «Микон-ГЕО». Кроме того, зоны структурной нарушенности разного генезиса возможно предварительно обнаружить с помощью системы сейсмической локации для периодического прогноза структуры и совместить их с данными от системы непрерывного контроля. При фиксации факта совмещения областей повышенного горного давления с зонами разуплотнения вблизи оконтуривающих горных выработок считать эти области потенциально выбросоопасными зонами и принять меры по обеспечению безопасности ведения работ заблаговременно. Испытания применимости описанной технологии в условиях проходческих работ в 2014 году были проведены на ш. Северная г. Воркуты [41].

Дистанционная автоматическая оценка структуры горного массива средствами системы «Микон-ГЕО», при наработке критериев, позволит существенно сократить затраты на проведение инструментальных методов прогноза устойчивости горного массива, а также заблаговременно принять необходимые меры для предотвращения возникновения опасных ситуаций.

Выводы по главе 2

Анализ системы «массив пород – горная выработка – крепь» позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Разработанные и применяемые в условиях подземного строительства рейтинговые оценки учитывают качественные характеристики горного массива, но требуют существенных трудозатрат и не являются оперативным средством оценки устойчивости горного массива. Однако они могут успешно применяться для проектирования конструкций крепления горных выработок.
2. Учитывая блоковую структуру горного массива, необходимо на достаточном удалении от проводимой выработки обнаруживать зоны дезинтеграции, в том числе приуроченные к зонам контактов блоковых структур.
3. Совершенствование системы сейсмической локации для периодической оценки структуры и параметров горного массива позволит улучшить качество прогноза местоположения зон риска возникновения геодинамических явлений.
4. Требуется апробация предложенного подхода и критериев непрерывной оценки приконтурной области горного массива очистного участка в условиях действующих горнодобывающих предприятий.

Рассмотренные выше особенности системы «массив пород – горная выработка – крепь» позволяют сформулировать первое защищаемое положение в виде:

«*Релевантная оценка устойчивости горного массива, с учётом рисков возникновения геодинамических явлений, в системе «массив пород – горная выработка – крепь» реализуема системой автоматического непрерывного мониторинга распределения напряжений в горном массиве на основе технологии сейсмолокации, при использовании воздействия рабочего органа комбайна в качестве источника сейсмических волн».*

ГЛАВА 3. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

Оценка состояния горного массива на предмет риска возникновения геодинамических явлений как аспекта оценки устойчивости среды при отработке месторождения на значительных глубинах является сложной задачей, требующей учета следующих факторов:

– сложный рельеф поверхности и значительные глубины производства работ делают инженерные изыскания с дневной поверхности малоэффективными или невозможными для применения;

– развитие опасных геодинамических явлений происходит в зоне активного влияния подземных работ, то есть на дистанциях от единиц до десятков метров, что определяет дальность и разрешающую способность методов контроля;

– процесс оценки показателей устойчивости горного массива должен быть непрерывным и отслеживать факт формирования опасного явления на ранней стадии, что позволяет предотвратить развитие явления корректировкой технологии производства работ (например, снижением темпов добычи) или посредством применения специальных мероприятий, регламентированных действующими нормативно-правовыми актами в сфере промышленной безопасности.

Принимая во внимание вышеописанные факторы, необходимым является решение следующих задач:

– оценка структуры и параметров исследуемого горного массива на дистанции до 200 метров с возможностью представления модели исследованного участка в изображении различных параметров в трехмерном виде;

– оценка напряженного состояния исследуемой области горного массива в процессе ведения горнотехнических работ в ближней зоне влияния подготовительных и очистных выработок в непрерывном режиме;

– регистрация и отслеживание местоположения зон активизации сейсмических тресков в масштабах горного отвода добывающего предприятия.

Неразрушающий непрерывный контроль состояния горного массива как в ближней зоне влияния подземных горных выработок, так и на расстоянии сотен метров возможен на основе геофизического метода сейсмической локации, применение которого основано на установленной функциональной взаимосвязи тензора напряжений среды и атрибутов отраженных упругих волн [23, 24, 25, 43].

Опыт, полученный при сравнении отечественных и зарубежных сейсмических систем (см. раздел 1 настоящей работы), доказывает высокую эффективность применения метода сейсмолокации в задачах опережающей оценки структуры и параметров горного массива в процессах ведения горнопроходческих работ. Метод позволяет с высокой точностью определять зоны нарушения сплошности среды тектонического, геодинамического и литологического типов, обнаруживать зоны флюидонасыщения и области с контрастными упругими свойствами среды.

Однако прогноз устойчивости [44], как и риска возникновения геодинамических явлений, представляется более сложной задачей, которая может быть решена с применением комплексного подхода к оценке параметров горного массива.

3.1 Совершенствование специализированной методики применения системы сейсмической локации для периодического прогноза структуры и свойств горного массива

Ведение проходческих работ – достаточно сложная и затратная процедура, зачастую выполняемая в отсутствии актуальной информации о состоянии горного массива вдоль проектного направления трассы выработки. Данные разведочного бурения и геологические разрезы, полученные при разведке месторождения геологическими партиями, устарели и не дают представления о напряжениях, действующих до и во время внедрения в массив пород горной выработки. Применение высокопроизводительных проходческих машин требует непрерывной актуализации данных на дистанции до нескольких десятков метров в области влияния строящейся подземной инфраструктуры.

Рассмотрим объекты риска, являющиеся значимыми сейсмическими отражателями, встречающимися при ведении горных работ подземным способом (см. рисунок 3.1):

- карстовые полости и полости с флюидом (газ, вода);
- зона нарушения сплошности массива пород (где упругие деформации переходят в пластические);
- зоны повышенной трещиноватости, простирающиеся под углами, близкими к вертикальным;
- зоны контактов блоков, слагающих земную кору;
- дизъюнктивные и пликативные тектонические нарушения;
- существующие горные выработки.

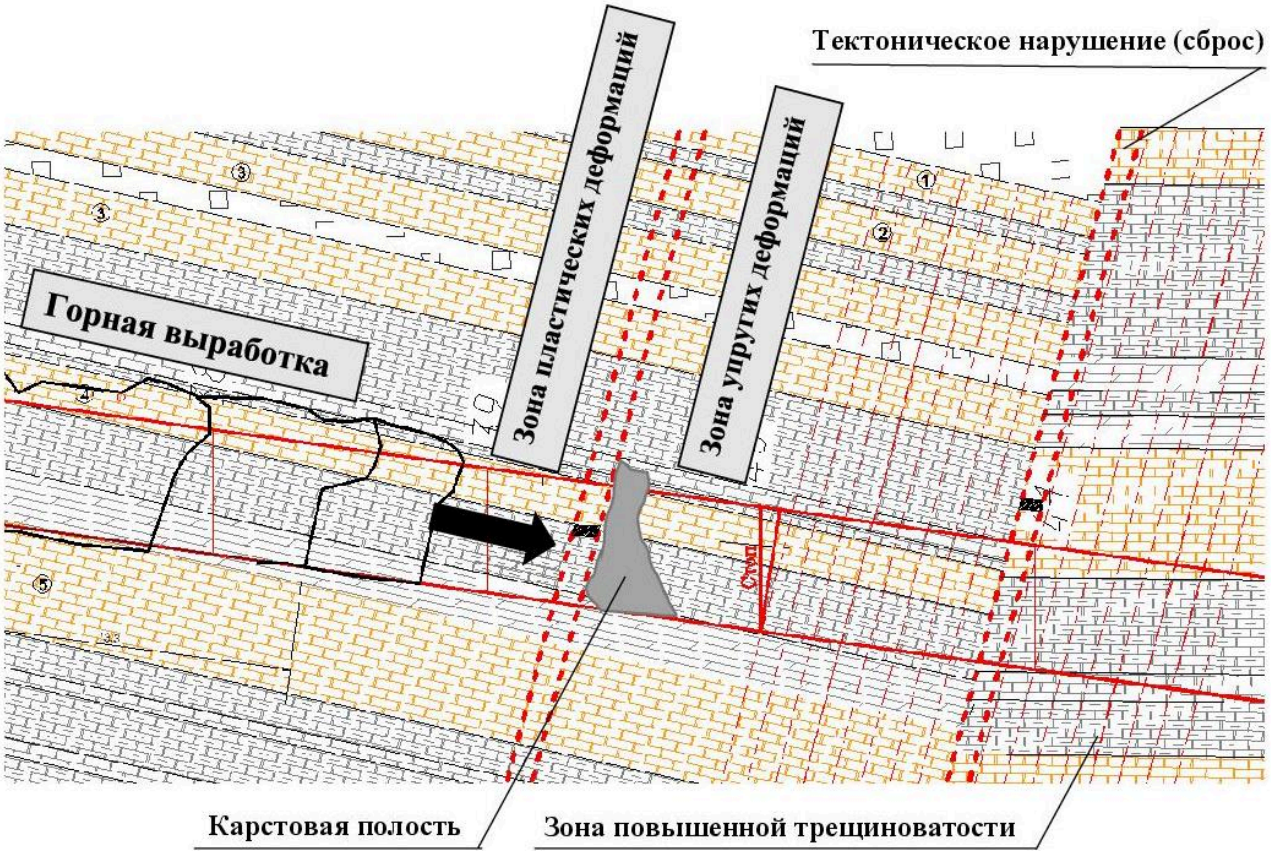

Рисунок 3.1 – Значимые сейсмические отражатели – зоны риска

Зона нарушения сплошности горного массива в данном случае означает область перехода упругих деформаций в пластические, то есть разрыв непрерывного поля напряжений (деформаций), что соответствует потенциально опасным зонам различного происхождения (зоны повышенной трещиноватости, линзы с флюидом, тектонические нарушения и др.), приводящие к потере устойчивости массива и как следствие усложняющие ведение подземных строительных работ.

Преимущество сейсмического метода как способа неразрушающего дистанционного контроля состояния горного массива, позволяющего осуществлять прогноз местоположения зон риска, а при наработке опыта – корректно идентифицировать их, является очевидным. Высокая оперативность и меньшие затраты, по сравнению с разведочным керновым бурением, также способствуют распространению этого геофизического метода в условиях подземных выработок шахт и рудников, в том числе в условиях взрывоопасной атмосферы. Именно метод сейсмического зондирования является наиболее подходящим вариантом, учитывая особенности ведения подземных работ: возможность одностороннего доступа к исследуемой части массива, стеснённые пространства горных выработок, взрывоопасная атмосфера, зачастую полное отсутствие средств сетевого электропитания и доступность в большей степени ручных ударных источников волны (молот, кувалда).

В случае сейсмозондирования приемники размещаются на плоскости площадью около 12 кв. м, а сканирующая волна возбуждается в этой же плоскости воздействием фиксированной длительности – ударным, взрывным или вибрационным источником. Энергия поля волн, возбужденного источником (упрощенно «прямая волна»), отражается, рассеивается и проходит сквозь элементы неоднородности, встреченные на пути фронта распространения. Поле отраженных волн фиксируется сейсмоприемниками, размещенными в скважинах (шпурах), пробуренных в определенных точках плоскости борта выработки. Применение геофонов, имеющих специальный конструктив (всенаправленных), позволяет ориентировать сейсмоприемники в направлении искомого объекта под нужным углом, ограничиваемым техническими особенностями буровых агрегатов и располагаемым пространством выработки.

Благодаря сотрудничеству производственных и научных коллективов, с учетом известной проблематики и имеющегося опыта, была разработана и запущена в серийное производство система «Микон-ГЕО». Компания ООО НПК «Сибгеофизприбор» (г. Новосибирск), имеющая опыт разработки систем для инженерной сейсморазведки с 1994 года, при участии специалистов ООО НПП «ИНГОРТЕХ», с 1998 года специализирующихся на создании взрывозащищенных систем для шахт и рудников с опасной атмосферой, создали аппаратную базу. Разработка методической и программной части была выполнена сотрудниками кафедры геоинформатики Уральского государственного горного университета [26, 27] под руководством доктора геолого-минералогических наук, заслуженного геолога РФ, профессора Писецкого Владимира Борисовича. Изображение серийно выпускаемого взрывобезопасного исполнения мобильного (носимого) варианта системы «Микон-ГЕО» приведено на рисунке 3.2.

Аппаратная часть системы представлена восемью цифровыми трехкомпонентными искробезопасными сейсмоприемниками (искробезопасный полевой сейсмический модуль – ИПСМ2), устанавливаемыми на груди забоя (борту выработки), переносным бортовым модулем регистрации и синхронизации данных (модуль ALMAZ на базе искробезопасного полевого контроллера синхронизации ИПКС2Х), датчиком синхронизации (искробезопасный датчик удара – ИДУ), искробезопасным аккумуляторным источником питания (шахтный источник питания – ШИП-А) и комплектом соединительных кабелей. Применяемая аппаратура выпускается серийно с 2012 г., имеет сертификат соответствия требованиям ТР ТС 012/2011 и может применяться во взрывоопасной атмосфере шахт и рудников.

Рисунок 3.2 – Изображения аппаратной части системы «Микон-ГЕО»

Основные технические характеристики приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики АПК «Микон-ГЕО»

Основные технические характеристики	
Количество каналов регистрации	24
Динамический диапазон регистрируемого сигнала, dB	> 144
Частота, Гц	12,5 до 1652
Разрядность АЦП	32
Уровень взрывозащиты (по запросу)	РО Ex ia I Ma
Степень защиты согласно МЭК 529-89	IP66

Технические характеристики сейсмоприемников приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики сейсмоприемников ИПСМ2

Сейсмоприемник ИПСМ2	
Количество каналов	3
Тип геофонов для P- и S-волн	GMT-12 V и GMT-12 H
Коэффициент предусиления, dB	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64
Частотный диапазон регистрации, Гц	от 0 до 1652
Динамический диапазон регистрации, дБ	> 130
Напряжение питания, В	12
Потребляемая мощность, Вт	<0,45
Степень защиты	IP 66
Габаритные размеры, мм	130*88*380
Масса, кг	2,2

Фотография сейсмоприемников, установленных на груди забоя при проходке тоннеля (КНР), представлена на рисунке 3.3.

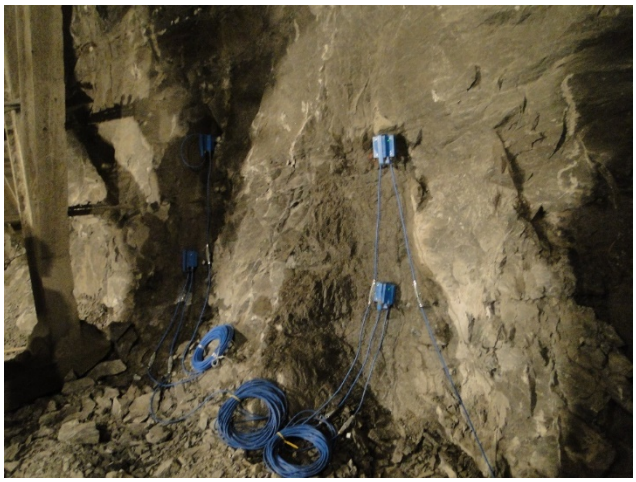

Рисунок 3.3 – Фотография сейсмоприемников ИПСМ2, размещенных на груди забоя

Применение источников импульсного типа (кувалда, взрывчатое вещество) обеспечивает дистанцию обнаружения объектов до 200 м. Каждая неоднородность, встреченная на пути фронта поля прямой волны, снижает её энергоемкость. Этим обусловливается резкое затухание поля волн в породах низкой плотности, существенно неоднородных горных массивах (развитые системы трещин, карстовые полости, переслаивания горных пород и др.), а также отсутствие значимых отражений за границами высокоамплитудных тектонических нарушений. Так, скальный горный массив малой степени нарушенности, состоящий из прочных горных пород, имеет лучшую проводимость упругих волн в высокочастотной области спектра,

что позволяет достичь более высокой разрешающей способности (то есть обнаруживать объекты меньших геометрических размеров).

В задаче опережающего прогноза зон риска в процессе ведения проходческих работ сейсмоприемники в количестве восьми штук располагаются в шпурах двумя рядами по четыре датчика на плоскости груди забоя или на левом и правом бортах выработки в один ряд, если доступ к забою исключен.

Схемы размещения на груди забоя и на бортах приведены на рисунках 3.4 и 3.5, соответственно.

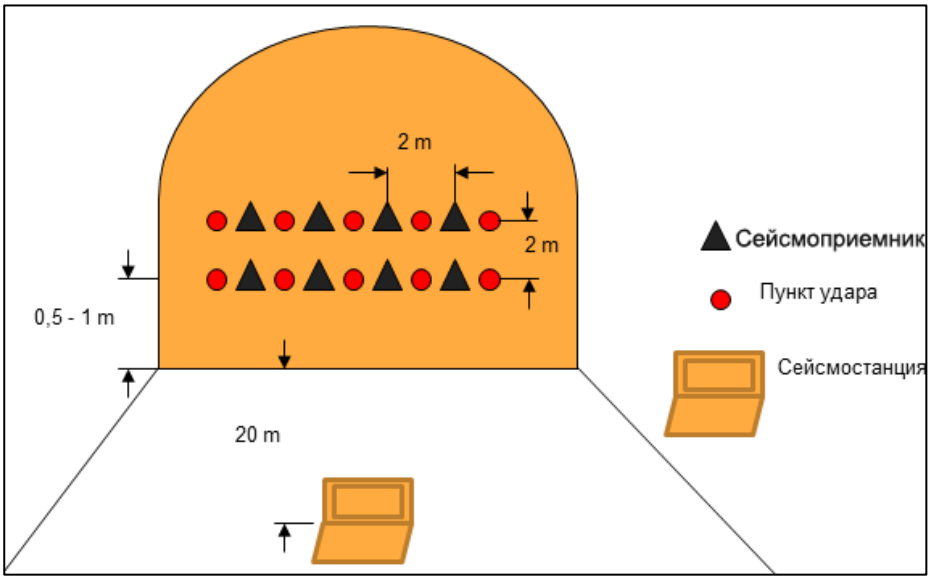

Рисунок 3.4 – Схема расположения сейсмоприемников на груди забоя

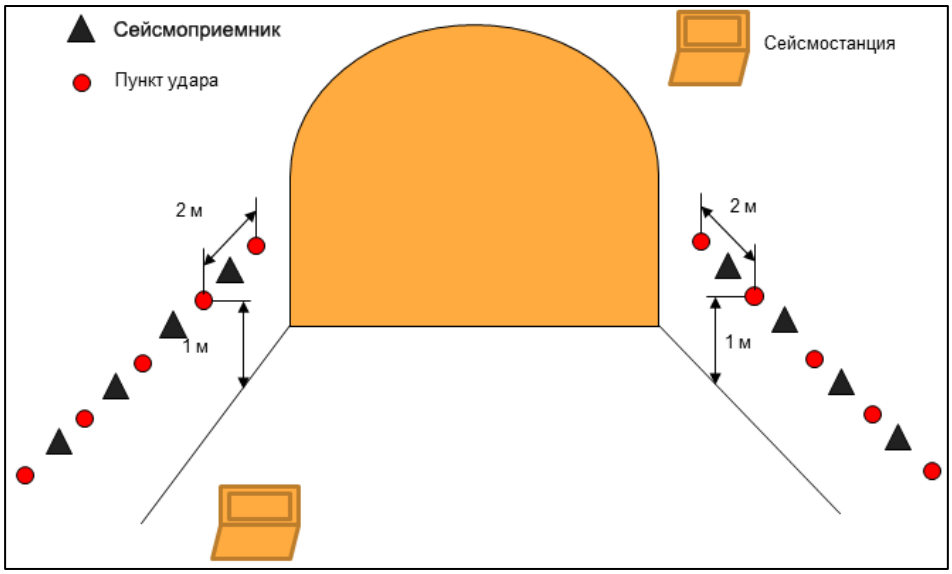

Рисунок 3.5 – Схема расположения сейсмоприемников на бортах выработки

Благодаря всенаправленным геофонам в конструкции сейсмоприемников, доступен выбор любого направления зондирования, включая вертикальное. Допустимое размещение сейсмоприёмников друг относительно друга, расположенных в одной линии, может варьироваться от 1 до 5 метров, в зависимости от располагаемого пространства и характеристик горного массива [40].

Процесс регистрации сигналов отраженных волн длится не более двух секунд, что предполагает запись только отраженных волн на исследуемом интервале с селекцией по определенному направлению их прихода. Таким образом, отраженные волны, приходящие с других направлений, помимо исследуемой области, отсеиваются. Определение направления прихода фронта волны возможно благодаря трехкомпонентным сейсмоприемникам: в каждом ИПСМ2 установлены три ортогонально направленных геофона.

В основу программного обеспечения обработки сейсмических данных положен адаптированный флюидодинамический метод оценки структуры и компонент напряжений массива горных пород по атрибутам сигналов отраженных волн, разработанный и запатентованный [55, 56] профессором Уральского государственного горного университета, доктором геолого-минералогических наук Писецким Владимиром Борисовичем. Изначально метод разрабатывался и использовался для прогноза местонахождения скоплений нефти, где сейсмические данные были получены методом сейсмопрофилирования. Позже Владимир Борисович, ознакомившись с проблематикой месторождений твердых полезных ископаемых, адаптировал метод для работы в подземных условиях, преимущественно с горизонтальной расстановкой приемной аппаратуры, что позволило с высокой достоверностью обнаруживать на дистанции до 200 м зоны риска, приведенные выше, являющиеся с сейсмической точки зрения отражателями упругой волны.

Дискретная блоковая структура земной коры под влиянием изменяющегося геодинамического поля Земли, а также подвергающаяся техногенному воздействию, пребывает в состоянии непрерывной структурной рекомпозиции дискретов – при концентрации сжимающих напряжений дискреты смыкаются, при разгрузке происходит разрыхление упаковки дискретов. Соответственно, в первом случае

дискретная среда проявляет свойства сплошной среды, а во втором – свойства дискретности усиливаются. Отсюда важно подчеркнуть следующие выводы:

- в зоне концентрации сжимающих напряжений среда приобретает свойства сплошной упругой среды и коэффициенты отражений удовлетворяют акустическому волновому уравнению (акустической жесткости);

- в зоне концентрации растягивающих напряжений коэффициенты отражений зависят от плотности упаковки дискретов (“жесткость” контактной составляющей).

Если в варианте акустической жесткости атрибуты сигналов отраженных волн формируются модулями линейной упругости, то в варианте плотности упаковки дискретов атрибуты зависят в основном от величины градиента растягивающих напряжений. Сказанному в полной мере соответствует фундаментальное волновое уравнение M. A. Biot [24], описывающее функциональную связь тензора “малых” напряжений фронта упругой волны с тензором “больших” напряжений геодинамической природы (градиент компонент тензора “больших” напряжений).

На основе уравнения M. A. Biot и экспериментальных исследований [42, 45, 46, 55, 56], установлено следующее соотношение:

$$R_d(P) = \left(\frac{A_r}{A_0}\right)^n \left(\frac{F_0}{F_r}\right)^m \qquad 3.1$$

где: $R_d(P)$ – функция отклика точки среды от давления P;

A_0 и F_0 –мгновенная амплитуда и мгновенная частота сигнала падающей волны;

A_r и F_r – мгновенная амплитуда и мгновенная частота сигнала отраженной волны;

n и m – показатели степени зависимости функции отклика от дискретности и материала пород по обе стороны от отражающей границы.

Данное соотношение в нормированном формате условных единиц в максимальной степени соответствует величине модуля градиента нормального напряжения к плоскости сейсмического отражателя: чем больше величина $R_d(P)$, тем выше уровень растягивающих напряжений, что было подтверждено опытом

многолетнего применения этого подхода в нефтяной сейсморазведке [23] и мониторинга строительства подземных сооружений [2, 26, 27].

Программное обеспечение обработки сейсмоданных, представляющих собой пакет отраженных волн, зарегистрированный при многократном возбуждении упругой волны импульсным источником колебаний, возвращает пользователю трехмерные модели исследуемой области горного массива. Процесс обработки выполняется в автоматическом режиме после ввода данных о расстановке пунктов приема и возбуждения друг относительно друга в трехмерном пространстве, а также ввода средней скорости продольной волны в исследуемой области [58, 59].

Одним из исключительно важных факторов, влияющих на корректность результатов обработки, является средняя скорость прохождения продольной волны в исследуемом объеме горного массива, принимаемая для проведения расчетов при обработке сейсмограмм. Скорость прохождения упругой волны можно определить при исследовании кусков породы в лаборатории или путем проведения измерений непосредственно в выработке, что более объективно, т. к. необходимо учитывать дискретность и неоднородность поля компонент напряженного состояния горного массива.

Рассмотрим пример определения скорости распространения сейсмических волн с помощью стандартного сейсмического каротажа [28]. В скважину на кабеле опускается сейсмоприемник и регистрирует время, затраченное волной на путь от пункта возбуждения волны (далее – ПВ), расположенного у устья скважины, до сейсмоприемника. Перемещая сейсмоприемник далее по стволу скважины и периодически возбуждая колебания у устья скважины, получают график интервальных скоростей и вычисляют среднюю скорость распространения упругой волны в массиве (рисунок 3.6).

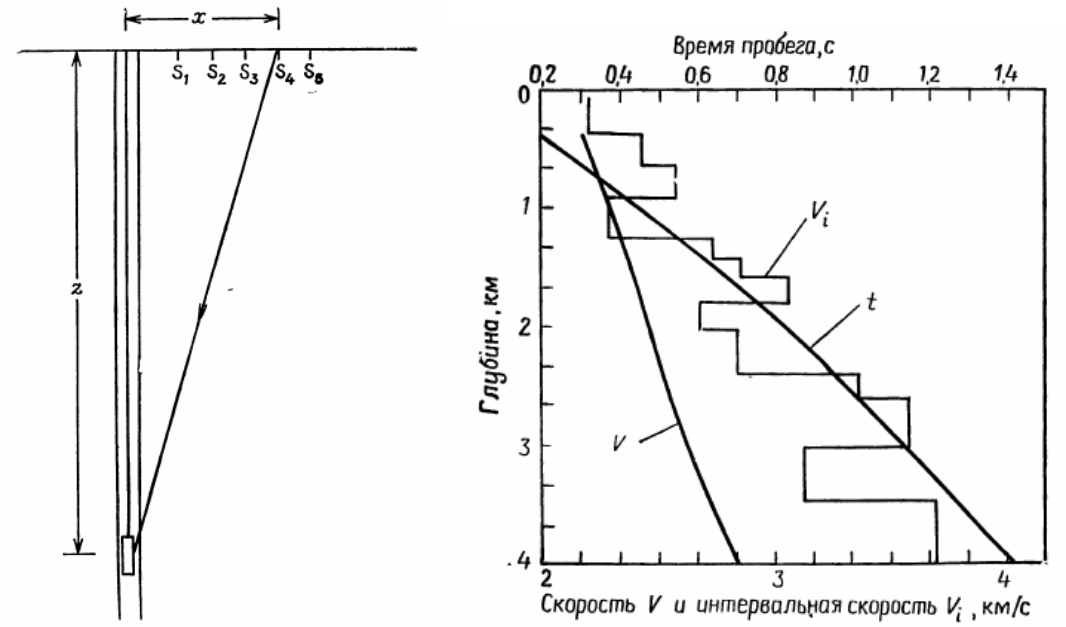

Рисунок 3.6 – Схема сейсмокаротажа скважины и графики годографа прямой волны t, интервальных V_i и средних скоростей V распространения упругих волн

Наиболее распространенный метод определения скорости прохождения прямой волны заключается в определении времени первого вступления фронта данной волны к каждому сейсмоприемнику в расстановке. Зная расстояние расстановки сейсмоприемников и момент времени воздействия на массив, по времени прихода фронта рассчитывают скорость волны.

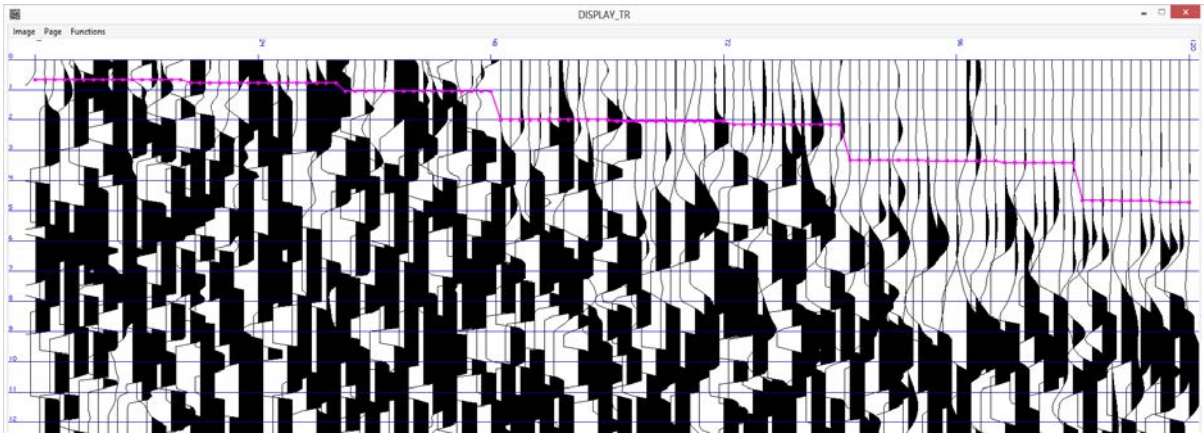

Рисунок 3.7 – Пример поиска первого вступления для определения скорости распространения прямой волны

Фиксация времени первого вступления является достаточно сложной задачей, требующей специальной квалификации и навыков. В существующей практике

на шахтах и рудниках обработкой сейсмоданных занимается служба главного геолога, т. е. зачастую инженерный персонал без геофизического образования, что существенно увеличивает шанс некорректного определения средней скорости прохождения волны и как следствие – получение прогноза, не соответствующего действительности. Заметим, что сейчас за рубежом и в раньше в СССР функционировали сейсмические службы с квалифицированным персоналом. Поэтому автоматизация расчета скорости распространения продольной волны сейсмограммам является важной и актуальной задачей.

Рассмотрим два подхода к автоматическому расчету скорости продольной волны по волновому полю скоростей.

В первом подходе для каждой записанной трассы определяется первый значимый экстремум, величина которого по модулю существенно выше уровня шума. Зная на каком расстоянии находятся датчики, и разницу во времени между экстремумами соседних трасс, можно получить годограф, представляющий собой график расстояний между точками приема (в метрах) и разницу во времени появления экстремумов от момента возбуждения волн (в миллисекундах). Отношение разницы расстояния между точками приема и разницы времени прихода волны в этих точках и будет являться значением скорости продольной волны. Пример представлен на рисунке 3.8.

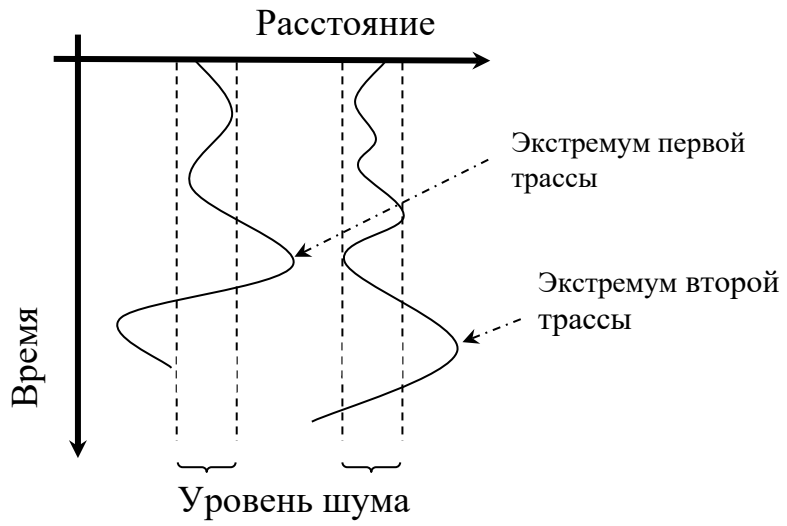

Рисунок 3.8 – Определение экстремумов на сейсмограммах

После подготовки набора данных, содержащих момент времени первого экстремума и расстояний до места удара, необходимо сделать операцию «сжатие». Идея заключается в том, что изначально сейсмограммы располагаются группами, в которых расстояние от места удара до сейсмоприемника одинаковое. То есть следует получить набор сейсмограмм, для которых расстояние между датчиком и местом удара – 1 м и количество датчиков – 8 шт.; в следующем наборе расстояние – 1,5 м, количество – 10 шт. и т. д. Для каждой такой группы определяется величина агрегированного экстремума как арифметическое среднее всех экстремумов сейсмограмм, входящих в нее. Из полученных значений формируется новый набор, содержащий значения экстремумов, усредненных для каждой группы, и расстояния до места удара.

Следующий шаг – это вычисление разницы во времени между найденными экстремумами (рисунок 3.9).

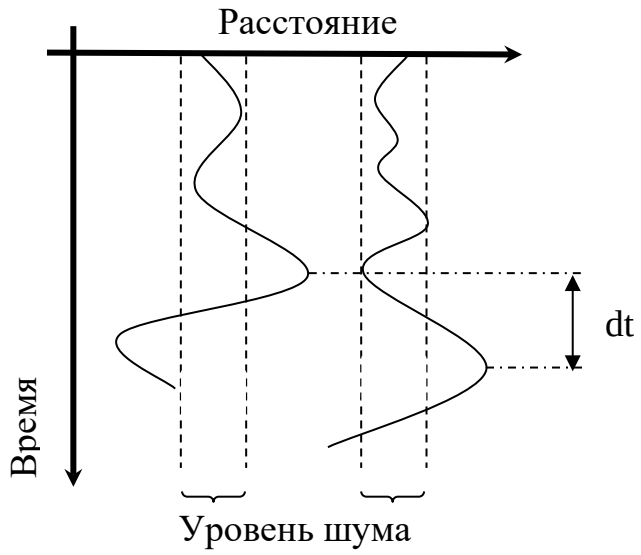

Рисунок 3.9 – Вычисление разницы времени экстремумами на двух соседних сейсмограммах

Далее по полю точек экстремума строится линейная модель - годограф прямой волны (рисунок 3.10).

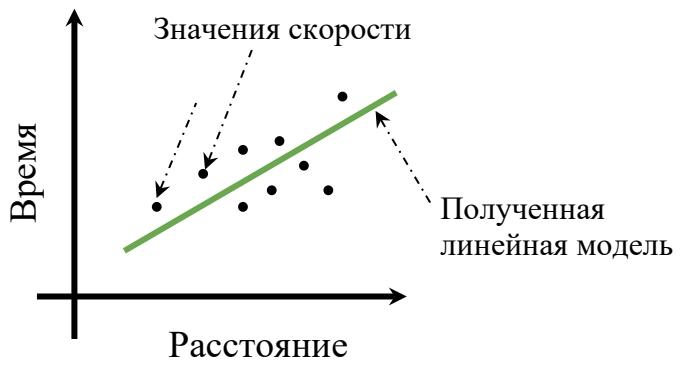

Рисунок 3.10 – Построение годографа прямой волны

Идея второго подхода основана на удалении точек приема от места возбуждения. Здесь основной выигрыш – поиск «первого вступления», неискаженного перегрузкой интенсивных смещений из-за близости точки возбуждения.

В настоящее время момент первого вступления определяется специалистом вручную при анализе волнового поля (рисунок 3.11).

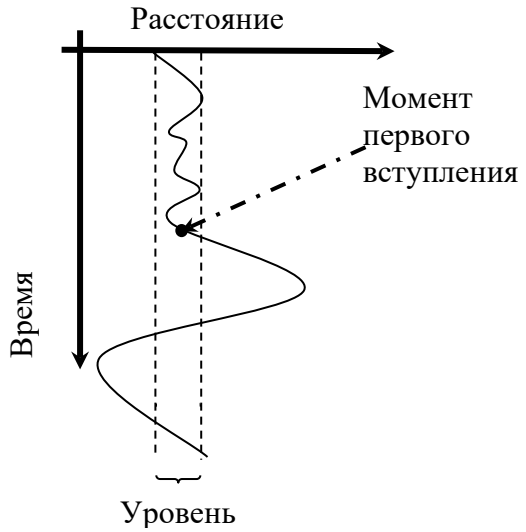

Рисунок 3.11 – Определенное момента первого вступления сигнала отраженной волны

Как можно видеть из рисунка 3.11, первое вступление находится на интервале перегиба трассы сигналов от уровня шума до первого экстремума, превышающего этот уровень по модулю. Для исключения возможной неточности скорость продольной волны определяется по пяти наиболее удаленным точкам приема. Для оценки окончательного значения используется медианное значение скорости для полученного набора.

Важным является вопрос автоматического определения момента первого вступления сигнала отраженной волны без участия специалиста.

Возможны следующие пять видов трасс:

1. Амплитуда сигнала отраженной волны не превышают уровень шума (рисунок 3.12, А).

2. Отсутствуют сигналы на уровне шума (рисунок 3.12, Б).

3. На уровне шума присутствует только один экстремум сигнала отраженной волны (рисунок 3.12, В).

4. В сигнале присутствуют шум, искажающий сигнал прямой волны (рисунок 3.12, Г).

5. Амплитуда полезного сигнала превышают уровень шума (рисунок 3.12, Д).

Предлагается следующий подход к расчету значения скорости продольной волны в зависимости от вида сейсмограммы:

Вид 1. Трасса пропускается.

Вид 2. Сначала определяется первый экстремум от воздействия, после этого определяется место пересечения линии уровня шума и линии подъема до найденного экстремума – это и будет первое вступление (рисунок 3.13).

Вид 3. Первое вступление определяется так же, как и в случае с видом 2.

Вид 4. Определяется первый экстремум от воздействия, далее выполняется поиск двух ближайших к нему экстремумов в области шума. Среднее значение принимается за первое вступление сигнала отраженной волны (рисунок 3.14).

Вид 5. Трасса пропускается.

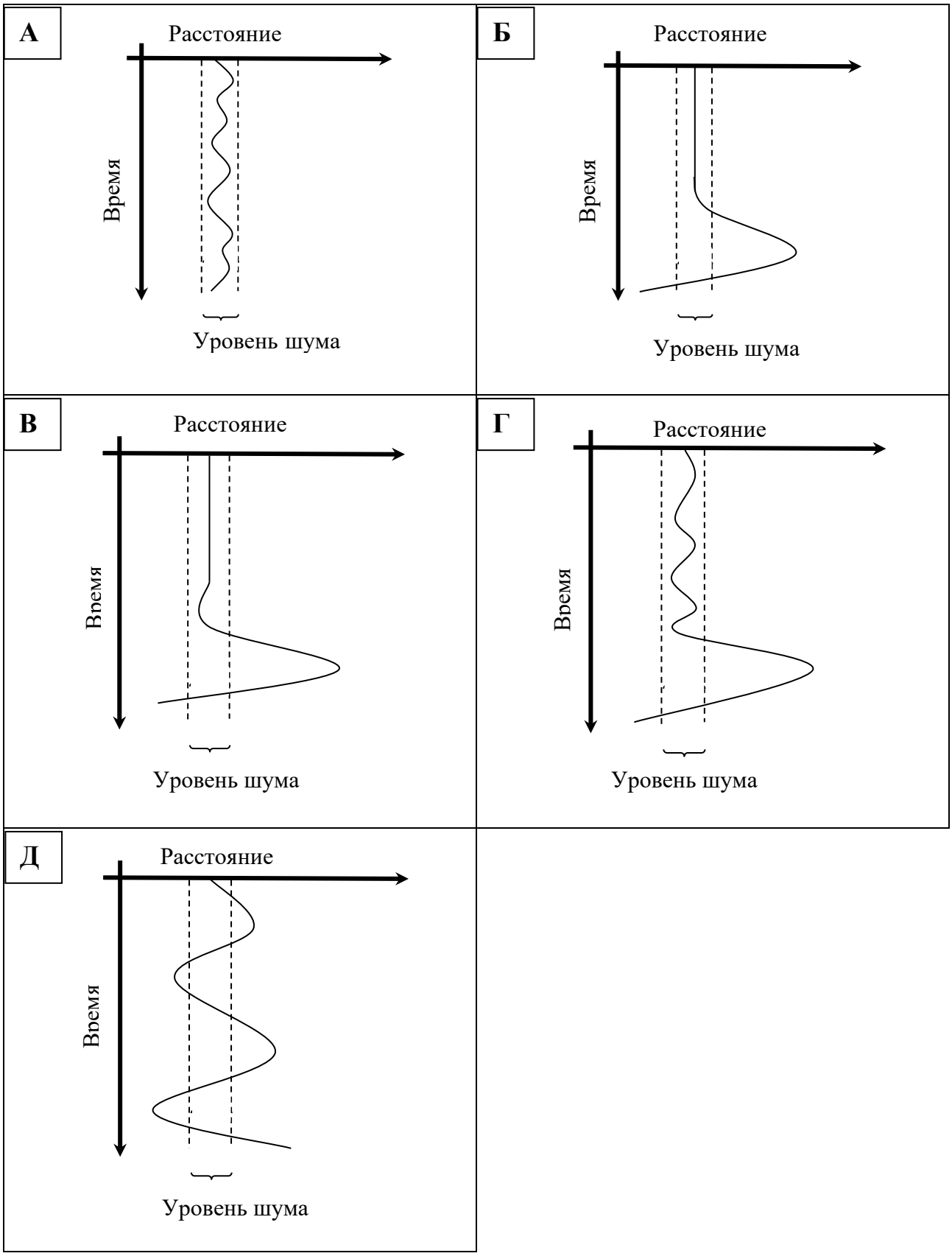

Рисунок 3.12 – Схематизированные виды трасс в точке приема

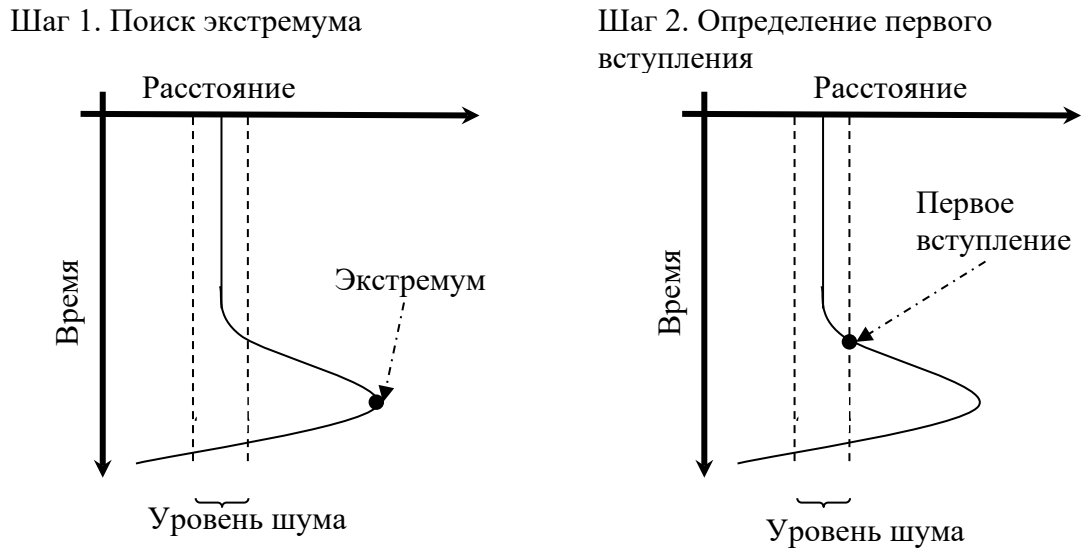

Рисунок 3.13 – Поиск первого вступления для вида 2

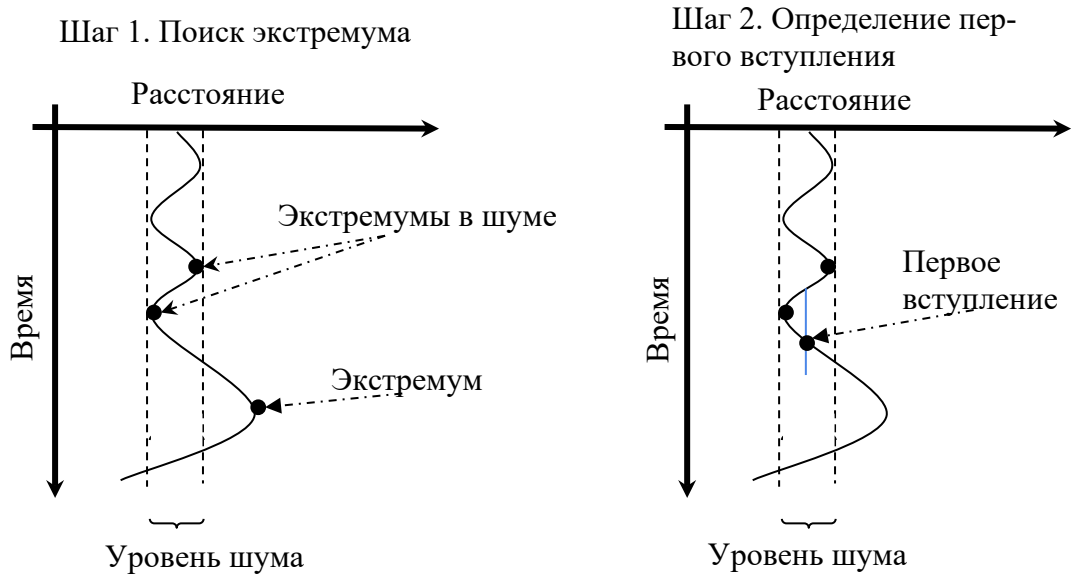

Рисунок 3.14 – Поиск первого вступления для вида 4

Объединив оба подхода в один алгоритм, в котором по линейной модели и автоматическому поиску первого вступления рассчитывается набор скоростей (медианное, минимальное и максимальное значения), получаем возможность предоставить оператору выбор из нескольких вариантов, исключив сложную процедуру

поиска первых вступлений и сократив время камеральной обработки, в среднем, на 15 минут.

Выбранное оператором значение скорости распространения продольной волны используется в следующем шаге – обработке трасс.

Процедура обработки трасс специализированным программным обеспечением завершается формированием данных для построения цифровой модели исследуемой области горного массива (50 х 100 х 200 м), описываемой следующими параметрами:

- уровень разуплотнения *D*, усл. ед.;
- вероятность водопроявления *W*, %;
- расчетная скорость распространения продольной полны *Vp*, м/с;
- расчетная скорость распространения поперечной волны *Vs*, м/с;
- динамический модуль Юнга, ГПа;
- коэффициент Пуассона;
- относительная категория устойчивости (безразмерная величина).

Модель исследованной области в изображении параметра «Уровень разуплотнения» описывает первый (условно) аспект горного массива – изменчивость структуры. Параметр чувствителен к зонам неоднородности массива пород (точкам среды, где поле напряжений претерпевает резкие изменения). Имея опыт исследований в конкретной геологической обстановке, при калибровке по данным геотехнического бурения, данный параметр может быть пересчитан в количество трещин на метр.

Параметр «Уровень разуплотнения» является авторской разработкой профессора В. Б. Писецкого [29, 43] и рассчитывается из атрибутов отраженной волны, а именно амплитуды и частоты (см. соотношение 3.1). Без калибровки данный параметр позволяет оценивать уровень разуплотнения массива качественно и интерпретировать каждую обнаруженную зону на основе дополнительных знаний об объекте исследования. Например, при проходке штрека в теле угольного пласта ш. Распадская, на расстоянии 62 м от груди забоя на момент зондирования были спрогнозированы: зона риска округлой формы, впоследствии в ней была выявлена область

повышенной трещиноватости, заполненная метаном, а в интервале 82-95 м – зона риска в виде плоскости (по факту являлась плоскость тектонического нарушения) (рисунок 3.15). Обе зоны были подтверждены фактом проходческих работ.

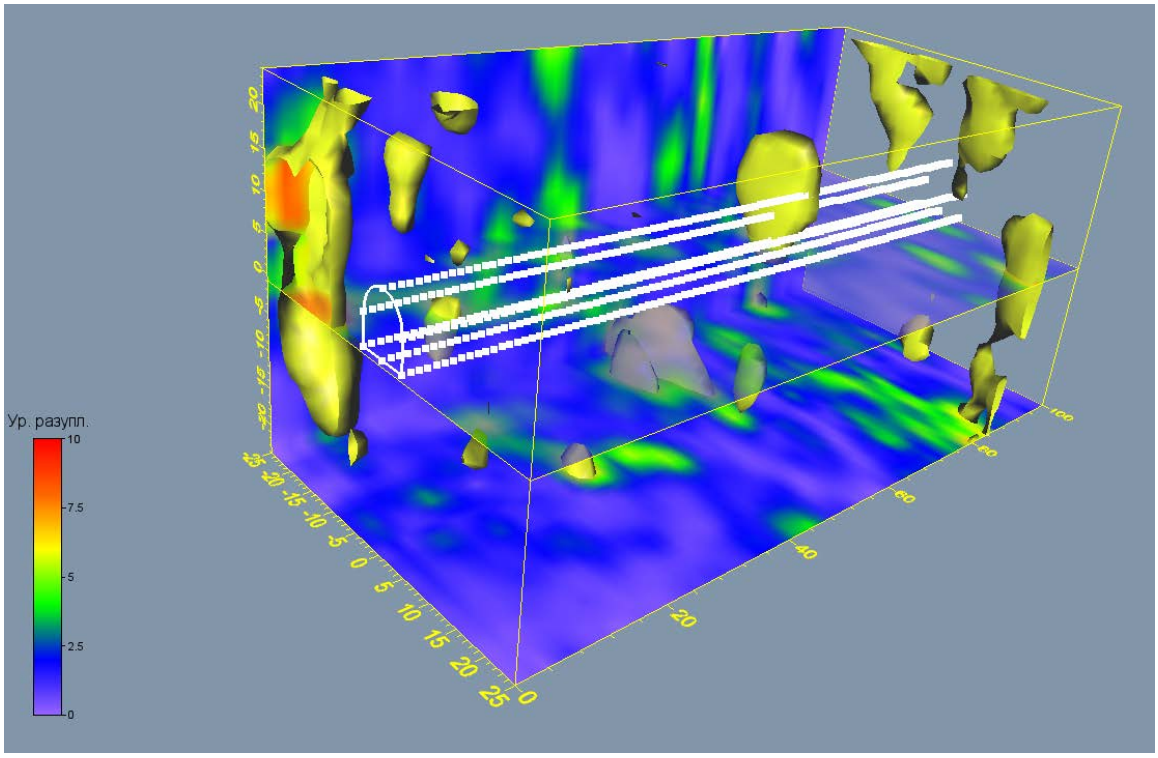

Рисунок 3.15 – Пример трехмерной модели массива в изображении параметра «Уровень разуплотнения» (*D*, усл. ед.)

Модель исследованной области в изображении параметра «Вероятность водопроявления» позволяет определить местоположение зоны возможного водопроявления и вероятность нахождения флюида в ней (рисунок 3.16). Модель массива в изображении данного параметра позволяет заблаговременно реагировать, предупреждая прорывы воды в горные выработки, обнаруживать зоны водопритока, находить действующие промоины в массивах солей, карбонатах и решать другие задачи, связанные с обнаружением водонасыщенных зон. Исследование горного массива в области предполагаемого водопритока позволило своевременно изменить направление проходческих работ и избежать значительных затрат на руднике ПАО «Норильский никель».

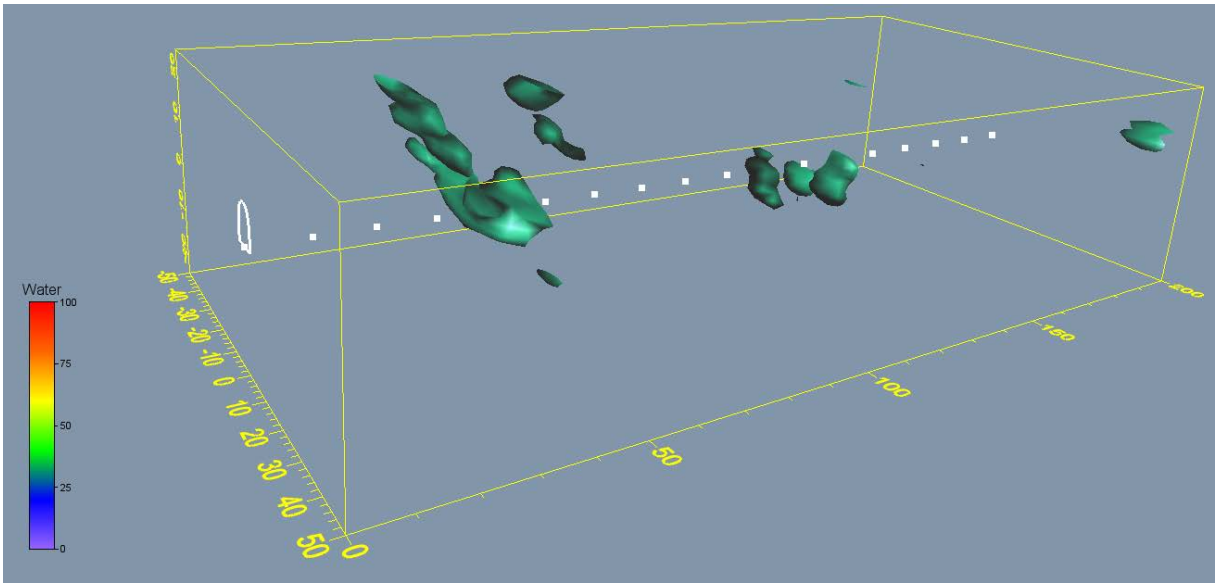

Рисунок 3.16 – Пример трехмерной модели массива в изображении параметра «Вероятность водопроявления» (*W*, %)

Модели исследованной области в изображении любого из вышеуказанных параметров также можно просматривать в виде плоских срезов или вертикальных разрезов, что наиболее удобно в задачах сравнения и сопоставления обнаруженных объектов в процессе интерпретации. Примеры горизонтальных срезов модели горного массива, выполненные на уровне почвы выработки, представлены на рисунке 3.17.

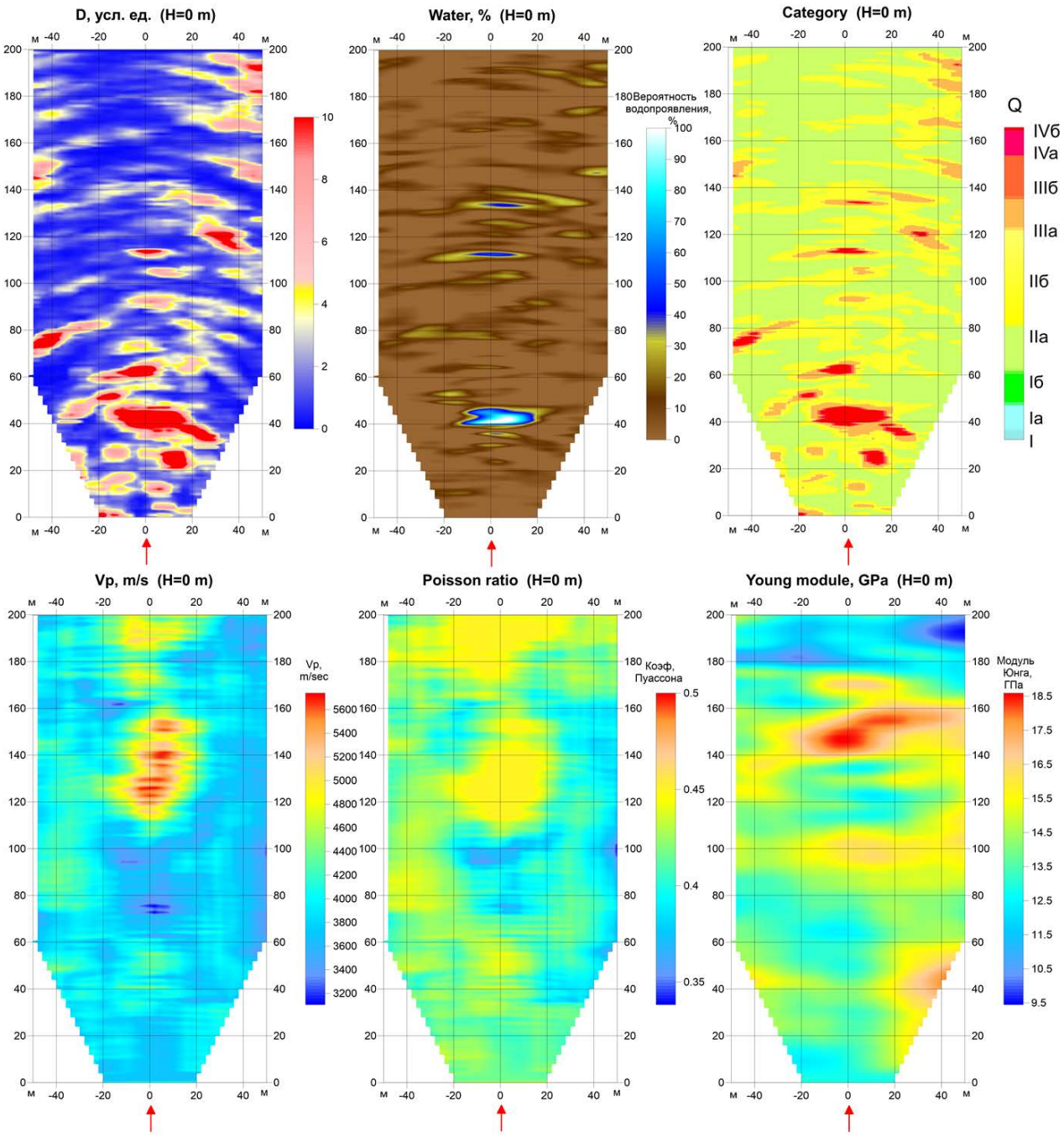

Рисунок 3.17 – Горизонтальные срезы трехмерной модели горного массива

Параметр «Скорость продольной волны» позволяет судить о местоположении более прочных и менее разрушенных пород, «коэффициент Пуассона» – о пластичности той или иной зоны, а «модуль Юнга» – об упругости, совокупный анализ которых в ряде случаев позволяет определять истинное местоположение области тектонических нарушений [36].

Отдельно отметим параметр «Категория устойчивости», который рассчитывается системой из совокупности параметров «Уровень разуплотнения» и

«Вероятность водопроявления» с определенными весовыми коэффициентами по рейтинговой модели для конкретных геологических условий и глубины горнотехнических работ. На рисунке 3.17 цветовая шкала разделена на интервалы, соответствующие принятым в Заполярном филиале Норильского никеля адаптированным категориям устойчивости по шкале Q [21]. Для упрощения процесса интерпретации визуальных образов в программное обеспечение добавлены алгоритмы кластеризации данных [33].

При регулярном применении описанного метода сейсмозондирования, с учетом корректно определенной скорости прохождения упругой волны, в условиях конкретного месторождения и тарировании выделенных категорий устойчивости с помощью результатов кернового бурения может быть достигнута точность прогноза, близкая к инструментальным методам, но с меньшими затратами ресурсов и большей оперативностью, особенно благодаря автоматизации процесса камеральной обработки. Именно это обстоятельство и позволяет своевременно выполнять и корректировать проектные решения по креплению строящихся горных выработок на основании полученных цифровых моделей [34] исследуемого участка горного массива.

3.2 Программные средства агрегации, обработки и визуализации данных

Обработка и интерпретация сейсмоданных как наиболее наукоемкая и трудная задача требует участия высококвалифицированных специалистов. Высокие темпы производства работ и общая тенденция к снижению затрат на подготовку узкоспециализированного персонала обусловливают требования к автоматической обработке, интерпретации и визуализации сейсмоданных.

Специфика подземных работ, а именно: стесненные условия, требования к искробезопасности применяемого оборудования и односторонний доступ к объекту исследования обусловливают довольно скудный ассортимент систем геофизических наблюдений для использования во взрывоопасной атмосфере шахт и рудников. Также по причине применения авторских методов оценки и прогноза

состояния горного массива с применением того или иного геофизического метода разработчики систем вынуждены разрабатывать собственное программное обеспечение.

Система «Микон-ГЕО» (производство ООО «Ингортех», г. Екатеринбург), программный уровень которой разработан при активном участии автора, как одна из наиболее перспективных и технически развитых, имеет три программных пакета для реализации следующих задач:

- X-SEIS – мониторинг области горного массива (200 х 200 м) при ведении добычных или проходческих работ в непрерывном режиме (т. н. текущий прогноз);
- Peleng – мониторинг сейсмоакустической активности в масштабах всего горного отвода предприятия (т. н. региональный прогноз);
- X-TNL – оценка структуры и свойств участка горного массива в произвольный момент времени (т. н. локальный прогноз).

Дополнительно создан программный продукт верхнего уровня GeoDA, осуществляющий агрегацию, обработку и визуализацию данных от ПО X-SEIS и Peleng. В дальнейшем эти данные будут дополняться и результатами обработки сейсмоданных средствами ПО X-TNL, и, таким образом, будет создаваться и поддерживаться цифровая модель горного массива всего предприятия.

Особенность программного обеспечения X-SEIS заключается в непрерывной обработке и визуализации сейсмоданных, регистрируемых подземной частью системы «Микон-ГЕО» и передаваемых на поверхность посредством системы передачи данных.

На этапе ввода объекта в эксплуатацию, например, добычного участка, производится первичная настройка параметров X-SEIS, где задаются геометрия исследуемой области, местоположение сейсмоприемников, средняя скорость волны в данном типе горного массива и др. параметры. Результаты обработки и визуализации сейсмоданных выводятся на дисплей оператора (рисунок 3.18). В левой верхней части окна приведены текущие сейсмограммы, которые позволяют судить об уровне корректности регистрации (например, все ли геофоны ведут запись трасс, не превосходит ли уровень помех полезный сигнал). Под окном сейсмограмм

представлен срез параметра «Уровень разуплотнения», позволяющий оценить состояние горного массива. Справа расположены окна для оценки экспериментального параметра, оценивающего уровень опасности горного массива, расчетный выход буровой мелочи, номограмма и график разуплотнения за грудью забоя посередине среза.

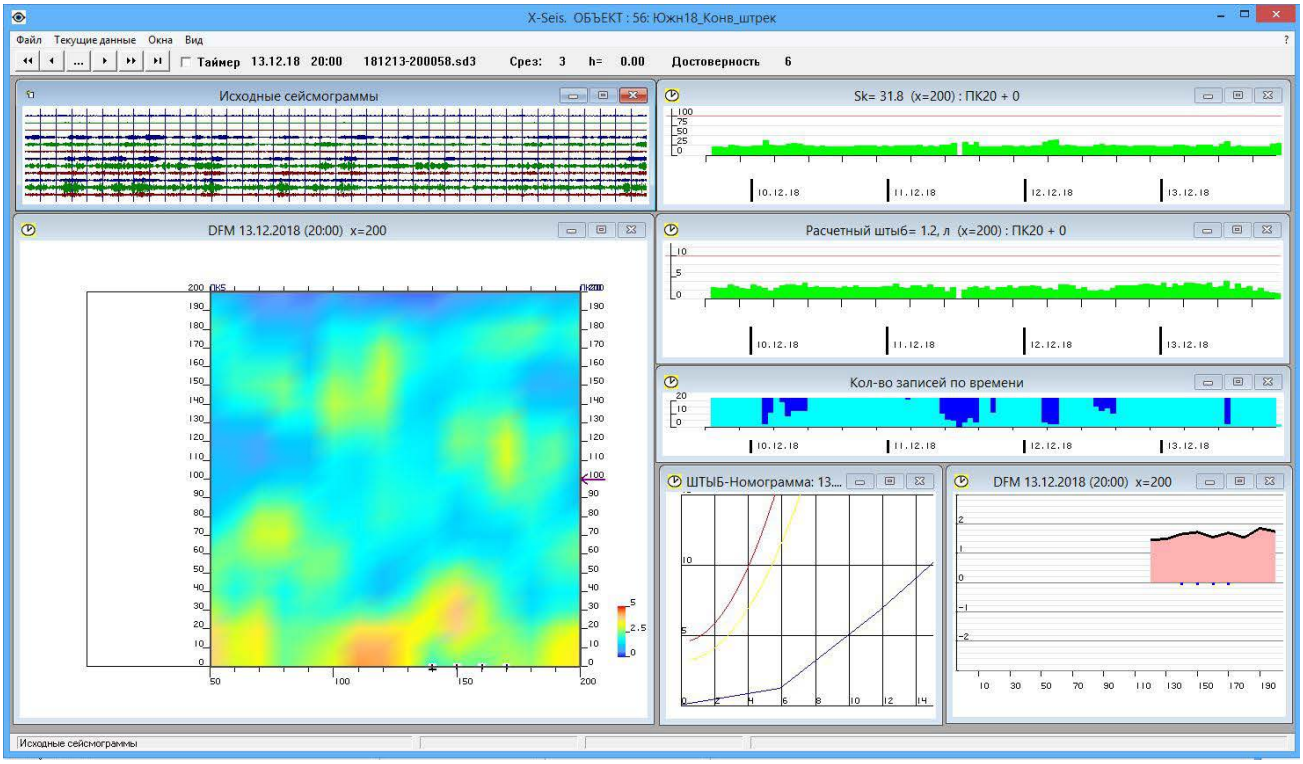

Рисунок 3.18 – Снимок экрана дисплея оператора с запущенным ПО X-SEIS

Информация обновляется каждые 3 минуты и позволяет оператору судить о факте регистрации сейсмоданных, распределении зон разуплотнения, визуально оценивать корректность регистрации сейсмограмм и делать вывод о зонах повышенного горного давления исследуемой области горного массива. С определенной периодичностью ПО X-SEIS осуществляет запись в базу данных для хранения, а также последующей обработки на уровне бизнес-логики программным обеспечением GeoDA. В ближайшем будущем планируется значительная переработка ПО X-SEIS, в результате которой функции будут сведены к обработке сейсмоданных в соответствии с полученной конфигурацией и записи результатов в указанные ячейки базы данных для последующей обработки, визуализации и хранения.

Программное обеспечение Peleng также работает в непрерывном режиме, обрабатывая и визуализируя сейсмоданные, но предназначено для оперативного обнаружения повышения сейсмической активности в масштабах всего горного отвода, то есть в радиусе нескольких километров. На дисплее оператора представлена визуализация, наглядно изображающая зону контроля на подложке в виде плана горных работ с отображением мест установки сейсмической аппаратуры и эпицентров зон сейсмической активности с указанием количества выделившейся в них энергии в Джоулях (рисунок 3.19).

Для упрощения анализа информации дополнительно разработаны и внедрены упрощенные карты отображения событий, а также энергий. Эти карты представляют собой область исследования, разделенную на равновеликие блоки, нанесенные поверх подложки из плана горных работ. В центре блоков, в зависимости от типа карты, могут отображаться или количество событий (рисунок 3.30), или сумма выделившейся в этом блоке энергии за выбранный временной интервал.

Количество событий указывает оператору, в каких зонах за выбранный интервал времени возросла или уменьшилась сейсмическая активность. Распределение энергий в контролируемом пространстве дополняет картину, позволяя своевременно выделять зоны с высокой сейсмической активностью, что на угольных шахтах является одним из предвестников динамических явлений.

Кроме количества событий и их энергий, необходимо оценивать всплески событий как количественно, так и энергетически. К примеру, опасным является не только факт возникновения высоких значений энергий, но и большое количество низкоэнергетических событий, происходящих в определенном малом радиусе.

В программном обеспечении оператора доступна информация по каждому блоку в отдельности (рисунок 3.21), где специалист может оценить максимальные значения энергий по каждой дате выбранного периода, количество событий и увидеть количество событий, превысивших заданный порог.

Программное обеспечение Peleng выполняет функцию непрерывного контроля горного отвода добывающего предприятия в оперативном режиме, оповещая

ответственные службы о возникновении нештатных ситуаций, алгоритмически описанных в программном обеспечении верхнего уровня GeoDA.

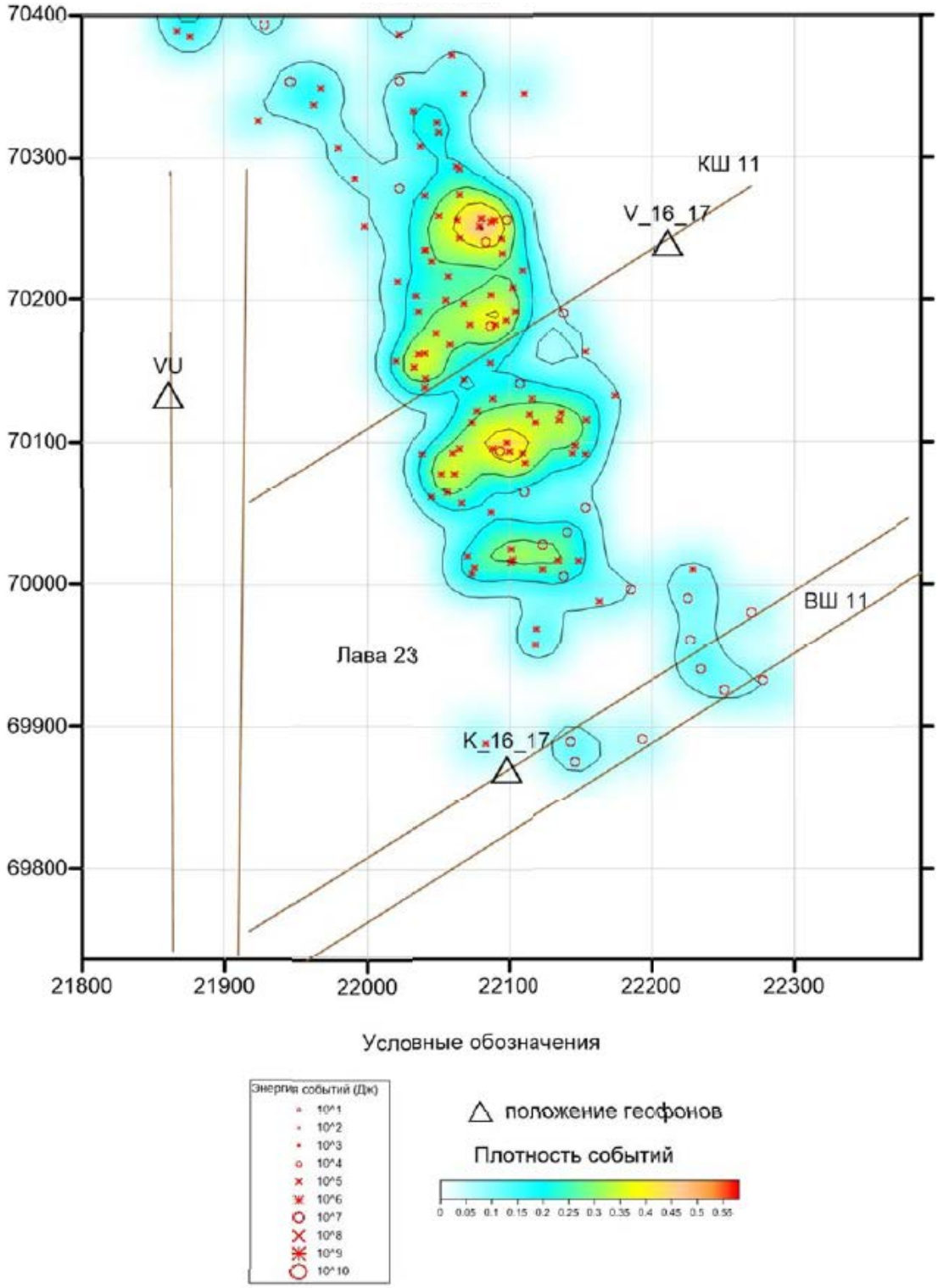

Рисунок 3.19 – Пример карты плотности сейсмических событий, отображаемой на дисплее ПК

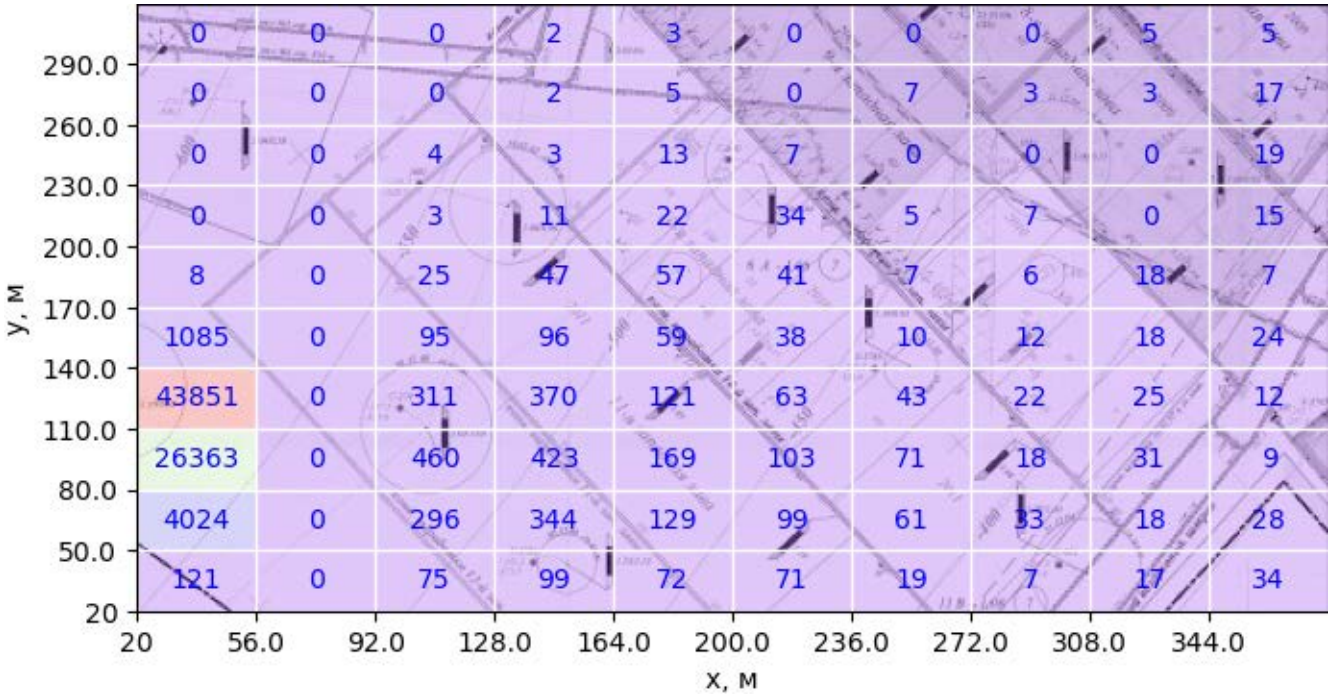

Рисунок 3.20 – Пример карты плотности сейсмических событий, разделенной на блоки

Рисунок 3.21 – Пример графика максимальных энергий в блоке

Программное обеспечение для выполнения оценки структуры и параметров горного массива в произвольном участке было разработано для ведения исследовательских работ в условиях строительства тоннелей, поэтому получило название X-TNL, что является сокращением английской фразы «Explore Tunnel». После сбора сейсмоданных, согласно методике, описанной в п. 3.1 настоящей работы, сейсмограммы в виде SEG-Y файлов копируются пользователем из переносной сейсмостанции в персональный компьютер и обрабатываются в определенной последовательности, предусмотренной ПО X-TNL, где слева направо необходимо вводить данные об объекте исследования, геометрии расстановки, запускать процедуры обработки и визуализации. Вид главного окна ПО X-TNL представлен на рисунке 3.22.

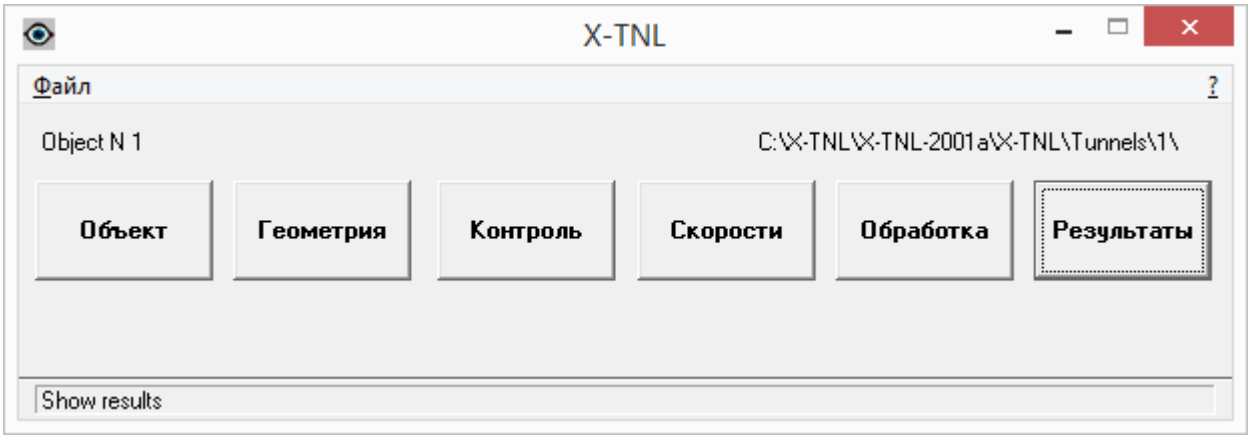

Рисунок 3.22 – Главное окно ПО X-TNL

При входе в пункт «Объект» (рисунок 3.23) пользователю предоставляется возможность выбрать объект из списка или создать новый, а также ввести дополнительную информацию, описывающую место и время проведения исследования.

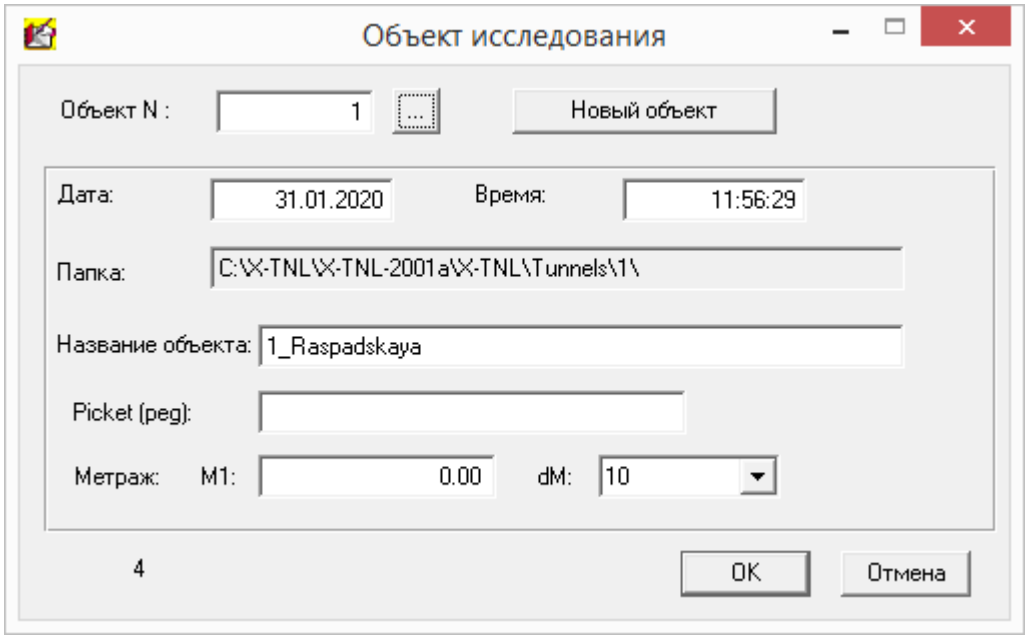

Рисунок 3.23 – Окно «Объект»

Пункт «Геометрия» позволяет выбрать один из предложенных типов геометрии или ввести свободную (рисунок 3.24), а также задать дистанцию зоны исследования для обработки сейсмоданных. Наиболее востребованными являются два типа геометрии: расстановка сейсмоприемников на плоскости (грудь забоя, борт выработки, почва, кровля) и борта выработки (применяется в подготовительных забоях и тоннелях, когда расстановка аппаратуры на груди забоя невозможна). Опция свободного ввода геометрии применяется, когда от двух стандартных типов были допущены значительные отклонения, например, была выполнена расстановка сейсмоприемников в одну линию, или/и они располагались несоосно (допускается отклонение сейсмоприемников от соосности до 15 градусов).

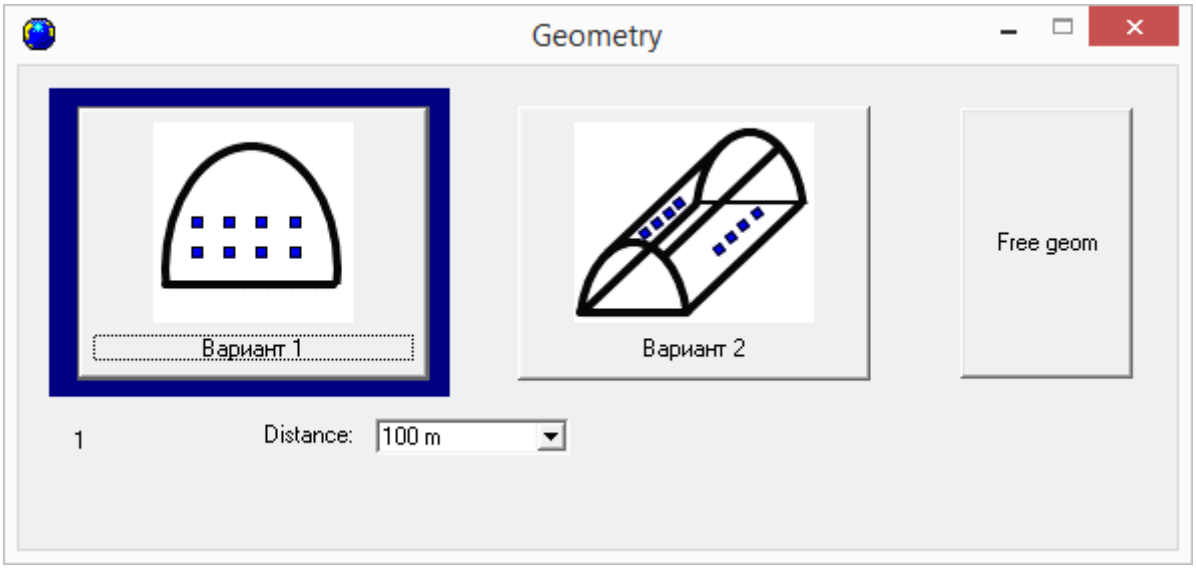

Рисунок 3.24 – Окно «Геометрия»

Выбрав для примера «Вариант 1», пользователю предлагают ввести размеры места установки аппаратуры (рисунок 3.25) и порядковые номера сейсмоприемников (первым считается тот, что подключен к сейсмостанции) и указать очередность и местоположение пунктов возбуждения упругой волны (рисунок 3.26, 3.27).

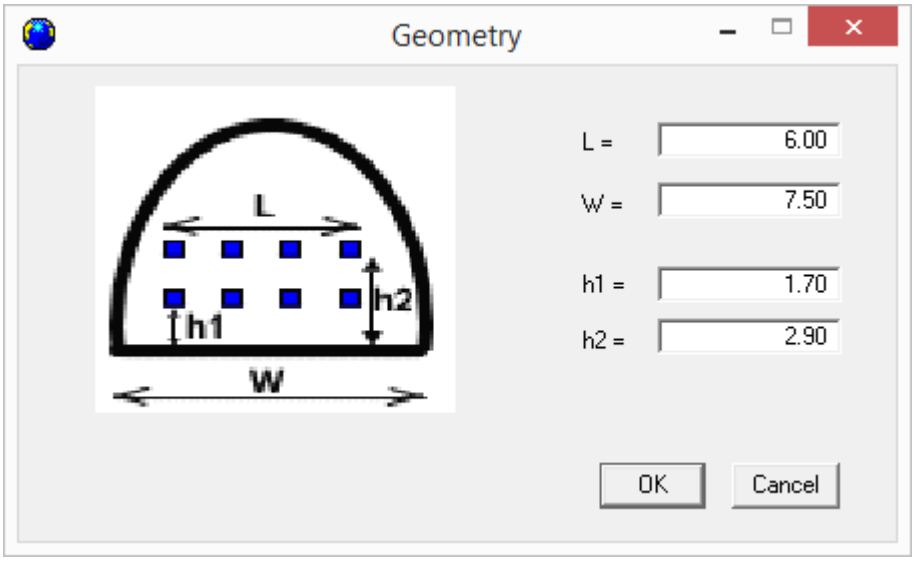

Рисунок 3.25 – Окно ввода размеров расстановки в месте исследования

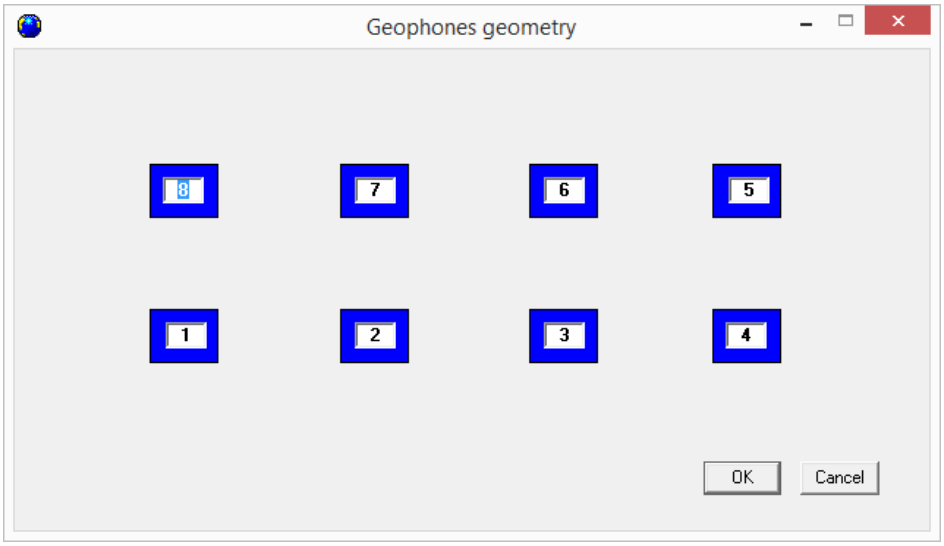

Рисунок 3.26 – Окно ввода порядковых номеров сейсмоприемников

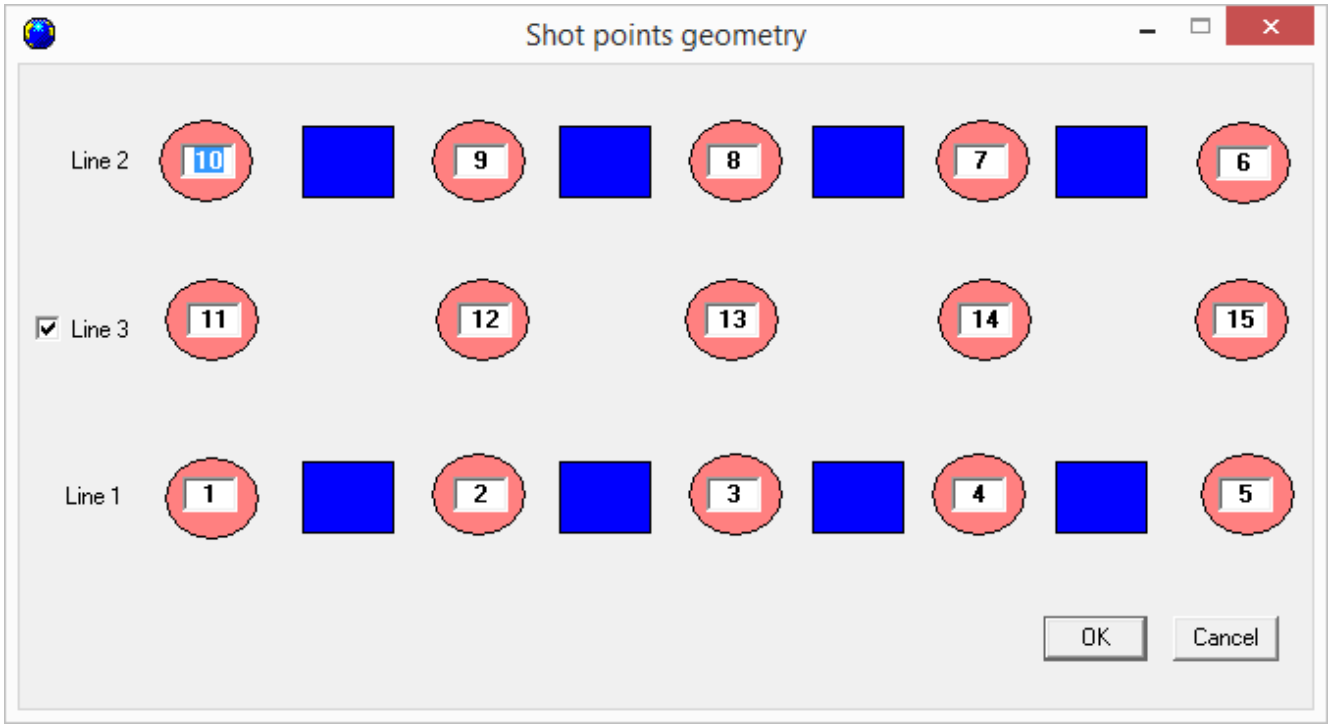

Рисунок 3.27 – Окно ввода порядковых номеров пунктов возбуждения

Далее производится оценка и выбор средней скорости упругой волны (рисунок 3.29), процедура и особенности которого подробно описаны в п. 3.1 настоящей работы. Возможен поиск вручную или расчет с помощью встроенной процедуры – «Калькулятор» (рисунок 3.28).

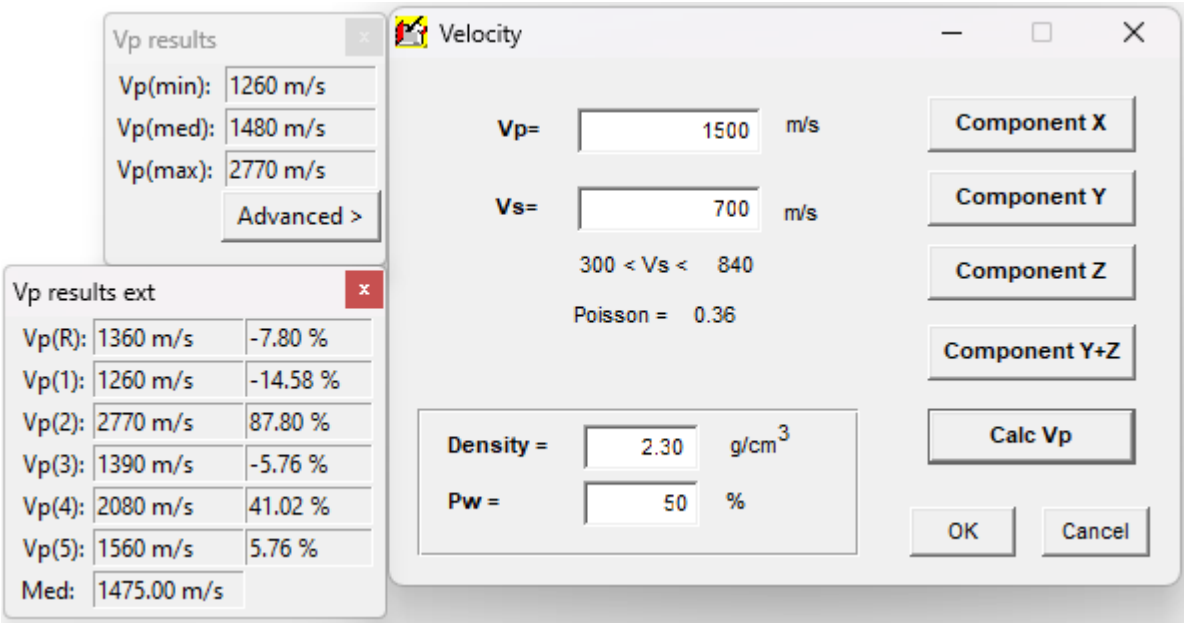

Рисунок 3.28 – Окно автоматического расчета скорости прохождения волны

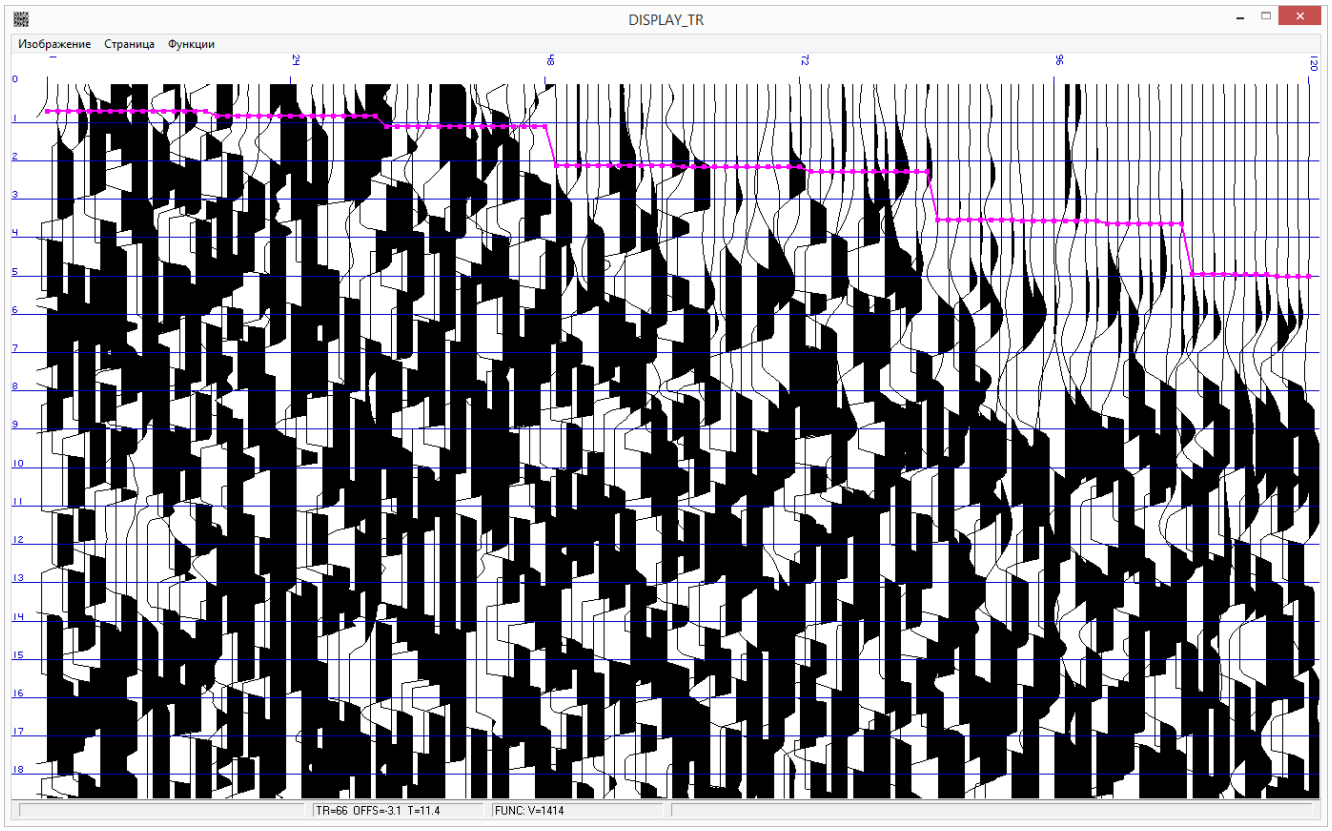

Рисунок 3.29 – Окно просмотра сейсмограмм и выбора средней скорости упругой волны

Автоматический процесс обработки, запускаемый кнопкой «Обработка», длится до 5 минут и далее позволяет пользователю перейти в окно просмотра результатов (рисунок 3.30) по нажатию одноименной кнопки.

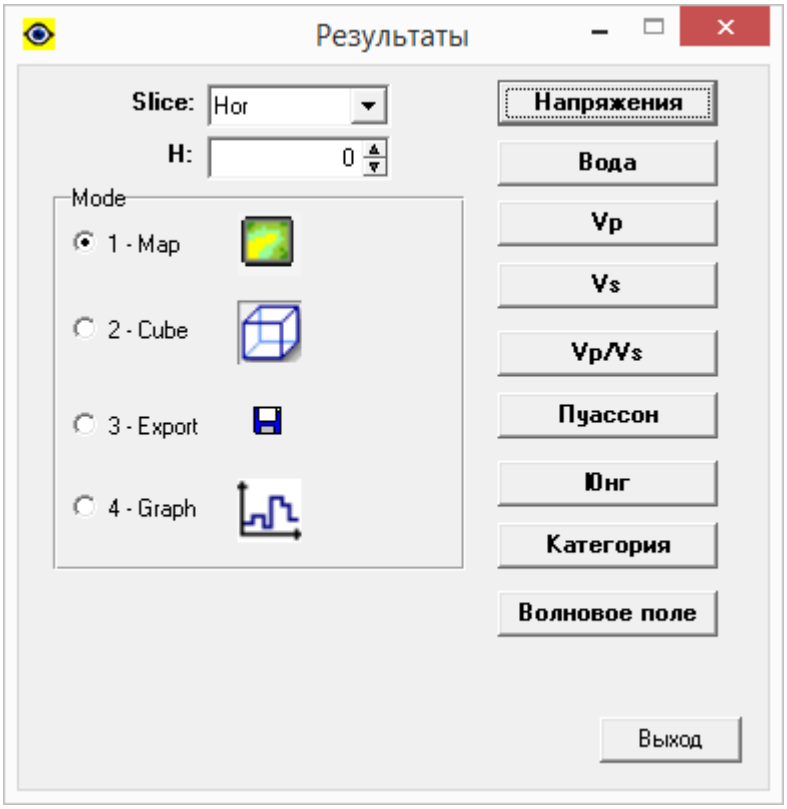

Рисунок 3.30 – Окно просмотра результатов

Далее, выбрав один из пунктов под заголовком «Mode» и нажав на кнопку с наименованием параметра, пользователь получает цифровую модель исследованного горного массива в трехмерном виде, двухмерном, текстовом файле или упрощенном изображении. Трехмерные и двухмерные изображения модели представлены в пункте 3.1, но интерес также представляет график изменения параметра по центральной оси модели (проектная ось строительства выработки), представленный для примера на рисунке 3.31.

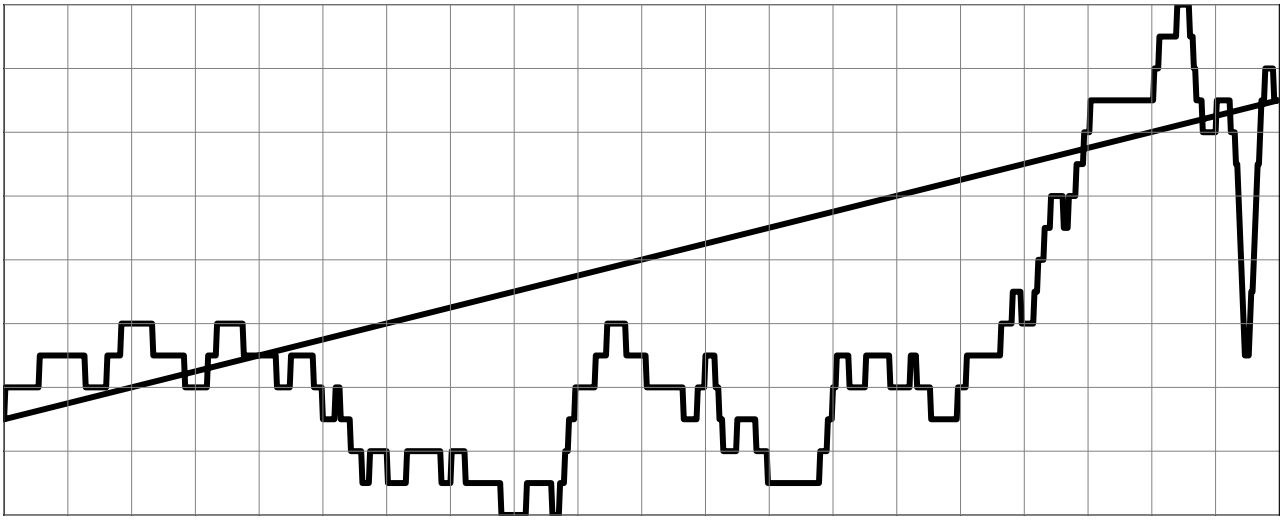

Рисунок 3.31 – График изменения параметра «Модуль Юнга» вдоль проектной оси строительства выработки

Таким образом, разработанное нами программное обеспечение X-TNL в значительной мере позволяет упростить и автоматизировать обработку сейсмоданных, а также получить результат в виде графических изображений или текстовых данных для последующей загрузки в системы расчета и моделирования подземных объектов, например, Micromine (рисунок 3.32).

Данные о структуре горного массива и его свойствах могут быть использованы в системах прочностного расчета при проектировании подземных работ или строительстве инженерных сооружений на бортах карьеров.

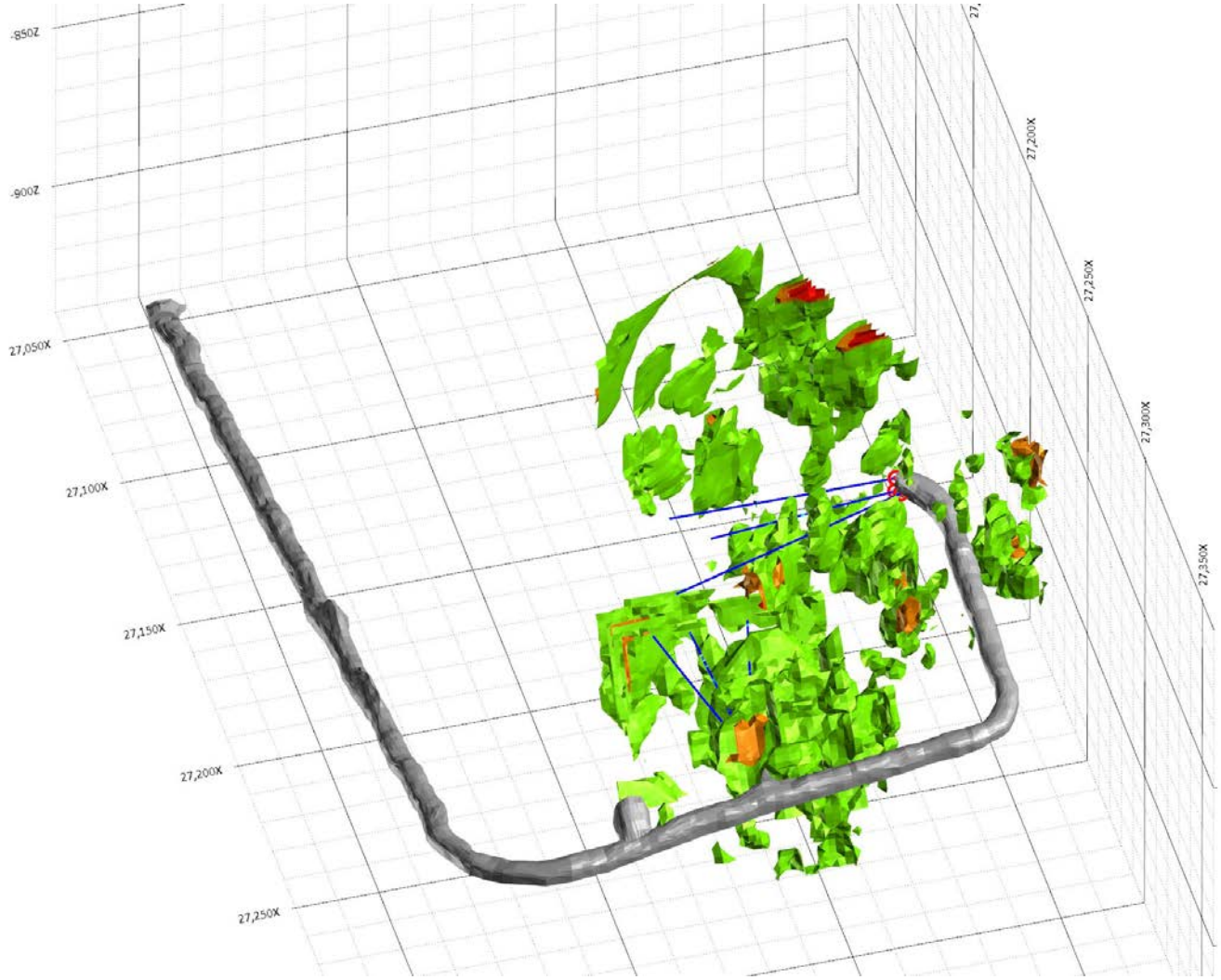

Рисунок 3.32 – Наложение цифровой модели горного массива в виде каркасов на модель горной выработки в ПО Micromine

Программные продукты X-SEIS, Peleng и X-TNL в полной мере решают локальные задачи. Для объединения всех имеющихся данных, включая системы контроля давления в стойках механизированной крепи, цифровые реперные станции (расслоение пластов кровли), данные с систем аэрогазового контроля, с 2019 года началась разработка программного обеспечения верхнего уровня под названием GeoDA (Geoinformation Data Analisys – в пер. с англ. «Анализ геоинформационных данных»), которое образует геоинформационную систему. ПО GeoDA осуществляет сбор информации из баз данных SQL-типа, обработку и визуализацию с последующим хранением обработанной информации (рисунок 3.33).

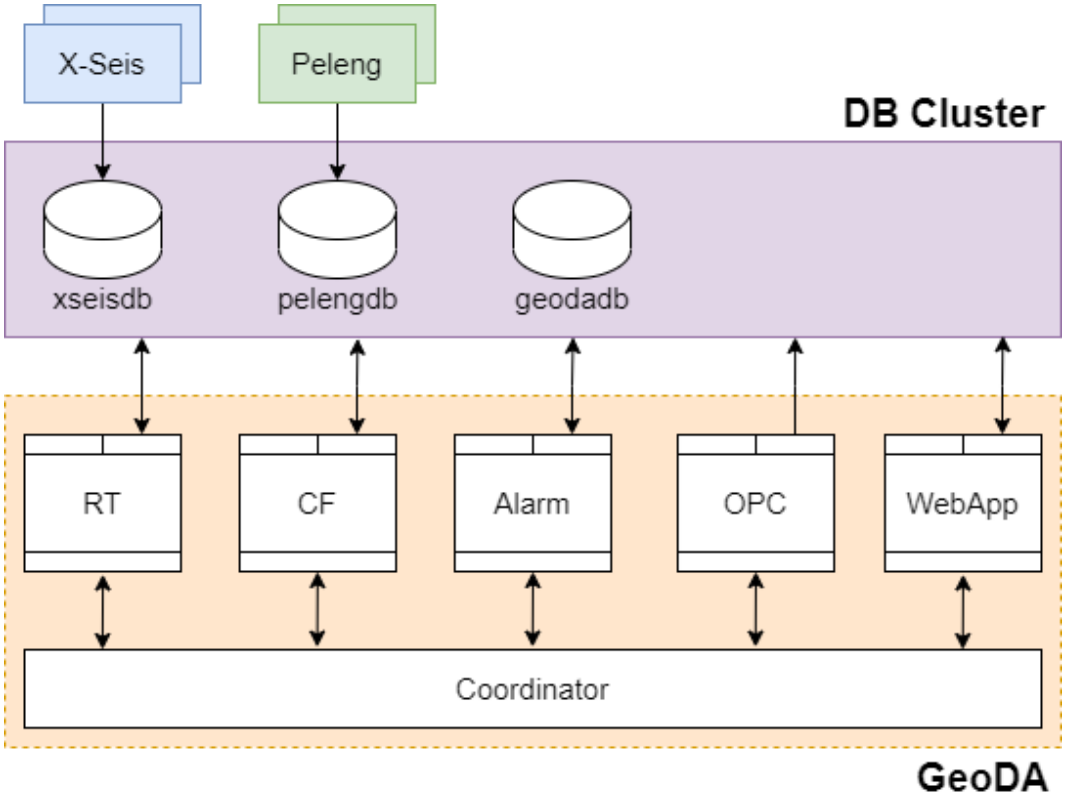

Рисунок 3.33 – Структура архитектуры верхнего уровня геоинформационной системы, где RT, CF, Alarm, OPC, WebApp – программные модули GeoDA, DB Cluster – кластер баз данных

В части визуализации ПО GeoDA предоставляет оператору набор функций, аналогичный современным SCADA-системам: мнемосхемы с упрощенной визуализацией объектов контроля, всплывающие окна, цветовую сигнализацию о достижении параметрами пороговых значений, архив событий и окна подробного просмотра каждого объекта в отдельности (рисунок 3.34). В случае возникновения нештатной ситуации (превышение пороговых значений, выход из строя датчика, потеря связи с подземной частью) оператор незамедлительно получает уведомление, содержащее информацию о возникшей ситуации. Кроме того, специальный сервис e-mail оповещений осуществляет рассылку сообщения с указанием наименования объекта, времени, кода ошибки с расшифровкой всем указанным пользователям. ПО GeoDA запускается на сервере, подключенном к локальной сети предприятия, что позволяет просматривать данные по системе «Микон-ГЕО» при запуске в

браузере другого ПК или смартфона страницы веб-приложения с определенным ip-адресом.

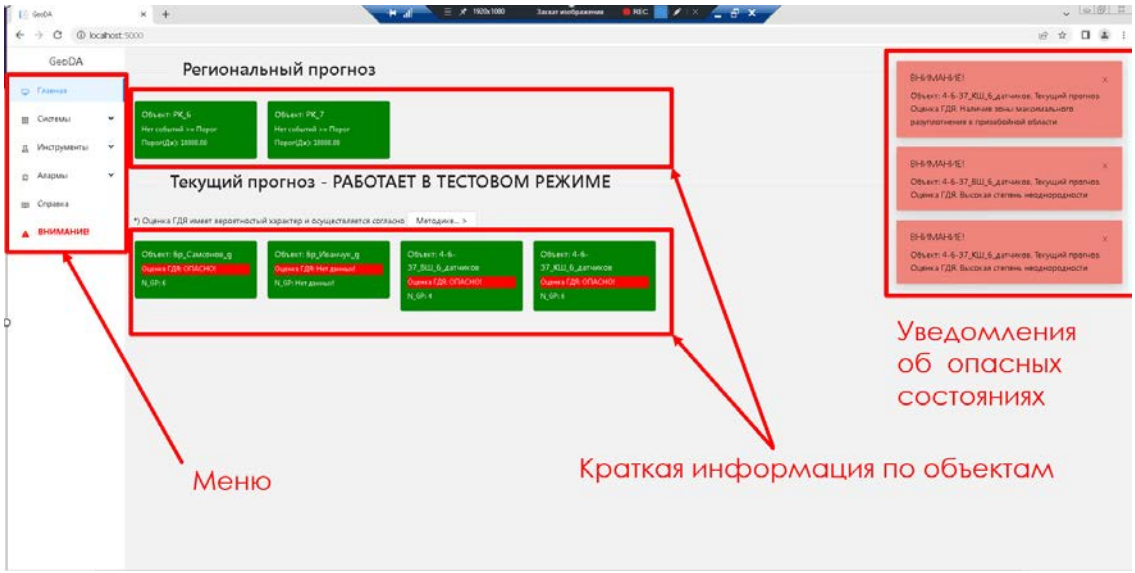

Рисунок 3.34 – Снимок экрана диспетчера с главным окном просмотра объектов ПО GeoDA

На экране подробного просмотра информации об объекте текущего прогноза (рисунок 3.35) пользователь видит не только информацию, отображаемую в ПО X-SEIS, но и диагностическую сводку, настроечные параметры и пороговые значения.

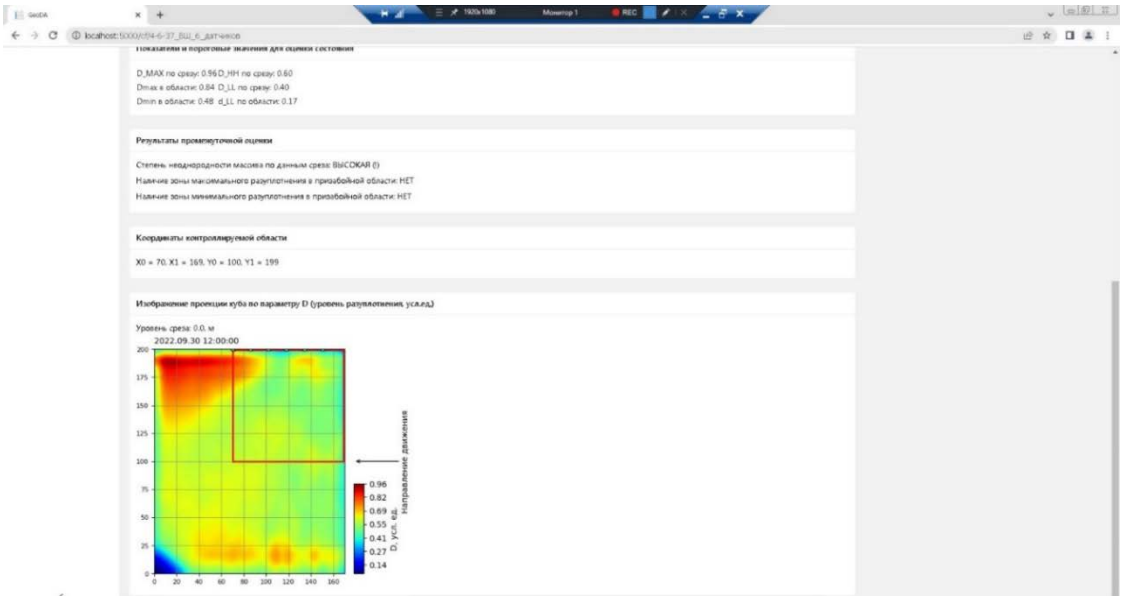

Рисунок 3.35 – Снимок экрана диспетчера с главным окном подробного просмотра объекта текущего прогноза ПО GeoDA

Конфигурация объектов контроля и прогноза осуществляется в конфигурационных файлах на этапе пусконаладочных работ.

ПО GeoDA имеет возможности получения данных не только посредством СУБД, но и по стандарту OPC, что существенно расширяет возможности по интеграции с другими SCADA системами и программными продуктами сторонних производителей, применяемых на современных производствах. Например, в оценке состояния горного массива описанным методом важной информацией являются давление в гидродомкратах стоек механизированной крепи, положение комбайна, данные о расслоении пластов кровли, ток потребления рабочего органа комбайна, концентрация метана и скорость движения воздушного потока в выработке. Все эти данные доступны для регистрации и совместного анализа с информацией о состоянии горного массива. Задача находится в стадии проработки на момент написания настоящей работы, часть информации выводится в виде таблиц и накапливается в базе данных для последующего анализа.

3.3 Оценка экономической эффективности применения метода сейсмического зондирования в задаче прогноза структуры горного массива

Опережающая оценка структуры и параметров горного массива в процессе строительства подземных сооружений осуществляется различными способами, но наиболее точным и достоверным считается описание керна, полученного методом колонкового бурения. Данные о структуре и свойствах горного массива, полученные методом отбора и описания керна наиболее близки к рассматриваемому в настоящей работе методу сейсмического зондирования, поэтому сравнивать их экономические показатели вполне корректно.

Для целей геомеханического описания горного массива выполняют бурение скважин D = 96 мм с отбором керна диаметром 63,5 мм, регистрируя ориентацию трещин по месту. Выполнение работ по отбору ориентированного керна требует значительных капитальных затрат на оснастку, технику и персонал.

Сравним стоимость выполнения работ на отбор и описание 200 метров керна, подразумевая две скважины по 100 метров каждая, пробуренные с груди

проходческого забоя в направлении проектной трассы выработки и выполнение одного сейсмозондирования с груди забоя, в том же направлении. Работы будут выполняться в г. Норильск, командированными сотрудниками на протяжении пяти рабочих дней. Итоговые данные для сравнения затрат приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сводные данные для сравнения затрат

№ п/п	Статья затрат	Затраты на геотехническое бурение, руб.	Затраты на сейсмозондирование, руб.
1	Основная заработная плата	215370,10	46279,86
2	Налоговые отчисления с заработной платы	97131,92	20872,22
3	Расходы на служебные командировки	984000,00	196800,00
4	Накладные расходы	27222,35	129827,85
5	Материалы	46241,13	33286,53
6	Эксплуатация машин и механизмов	452888,80	0
	Итого, рублей с НДС:	**1 822 854,30**	**427 066,47**

Расходы на основную заработную плату приведены в таблицах 3.4 и 3.5 для геотехнического бурения и сейсмозондирования, соответственно. Налоговые отчисления составляют 45,1% от заработной платы.

Таблица 3.4 – Расшифровка статьи затрат «Основная заработная плата» для выполнения геотехнического бурения

№ п/п	Должность	Кол. (чел.)	Оклад среднедневной (руб.) с НДФЛ	Срок (чел./дн.)		Сумма (руб.) с НДС
1	Начальник участка	1	4315,26	1	5	25891,54
2	Буровой мастер	1	3334,51	1	5	20007,03
3	Бурильщик	4	3922,95	4	5	94150,85
4	Помощник бурильщика	4	3138,36	4	5	75320,68
				Итого, рублей с НДС:		**215 370,10**

Таблица 3.5 – Расшифровка статьи затрат «Основная заработная плата» для выполнения сейсмозондирования

№ п/п	Должность	Кол. (чел.)	Оклад среднедневной (руб.) с НДФЛ	Срок (чел./дн.)		Сумма (руб.) с НДС
1	Инженер-геофизик (ст.)	1	3856,66	1	5	23139,93
2	Инженер-геофизик	1	3856,66	1	5	23139,93
				Итого, рублей с НДС:		**46279,86**

Расшифровка командировочных расходов по обоим видам работ приведена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Расшифровка статьи затрат «Расходы на служебные командировки» для выполнения сейсмозондирования

Статьи затрат	Количество командировок	Продолжительность, дни	Затраты на геотехническое бурение, руб. с НДС	Затраты на сейсмозондирование, руб. с НДС
Суточные	1	5	42000	8400
Проживание	1	5	270000	54000
Проезд	1	-	672000	134400
	Итого, рублей с НДС		**984000**	**196800**

Расшифровка статьи затрат «Накладные расходы» для геотехнического бурения приведена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Расшифровка статьи затрат «Накладные расходы» (керн)

№п/п	Наименование	Сумма за 5 дней, руб. с НДС
1	Заработная плата административно-управленческого персонала (АУП)	8058,81
2	Отчисления в ФСС по АУП	3634,52
3	РКО, услуги банков	6,02
4	Аренда офисного помещения	240,92
5	Приобретение канцелярских товаров	80,31
6	Прочие накладные расходы (с расшифровкой):	**15201,78**
	Гарантии и компенсации персонала, работающего вахтовым методом	803,05
	Расходы на содержание производственного персонала	2490,29
	Аренда складских помещений	252,64
	Аренда ориентатора керна	2986,79
	Амортизация прочего оборудования	4931,87
	Интернет	4,02
	Почтовые расходы	32,12
	Расходы по финансовой деятельности, в том числе расходы на лизинг	3125,17
	Содержание офисной техники	8,03
	Содержание помещений	321,22
	Страхование техники и имущества	202,82
	Услуги связи	3,61
	Хозяйственные расходы	40,15
	Итого, рублей, с НДС	**27222,35**

Расшифровка статьи затрат «Накладные расходы» для сейсмозондирования приведена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Расшифровка статьи затрат «Накладные расходы» (зондирование)

№п/п	Наименование	Сумма за 5 дней, руб. с НДС
1	Заработная плата административно-управленческого персонала (АУП)	86729,57
2	Отчисления в ФСС по АУП	39115,04
3	РКО, услуги банков	6,02
4	Аренда офисного помещения	240,92
5	Приобретение канцелярских товаров	96,37
6	Прочие накладные расходы (с расшифровкой):	3639,94
	Гарантии и компенсации персонала, работающего вахтовым методом	160,61
	Расходы на содержание производственного персонала	2988,34
	Аренда складских помещений	0,00
	Аренда ориентатора керна	0,00
	Амортизация прочего оборудования	0,00
	Интернет	4,82
	Почтовые расходы	38,55
	Расходы по финансовой деятельности, в том числе расходы на лизинг	0,00
	Содержание офисной техники	9,64
	Содержание помещений	385,46
	Страхование техники и имущества	0,00
	Услуги связи	4,34
	Хозяйственные расходы	48,18
	Итого, рублей, с НДС	**129827,85**

К материалам, требующимся для выполнения работ по сейсмозондированию, относятся запасные части и расходные материалы на общую сумму 33286,53 руб. с НДС. Эксплуатация машин и механизмов в этом случае не требуется.

Расшифровка статей затрат «Материалы» и «Эксплуатация машин и механизмов» для работ по геотехническому бурению приведены в таблицах 3.9 и 3.10, соответственно.

Таблица 3.9 – Расшифровка статьи затрат «Материалы»

Наименование используемого ресурса	Кол-во, шт.	Цена, руб.	Стоимость, руб. с НДС
Буровые трубы, муфты, стабилизаторы	30	484,47	14534,00
Буровые коронки, расширители	10	2513,51	25135,12
Кернорвательное кольцо, керноприемный стакан	20	328,60	6572,01
Итого рублей, с НДС:			**46241,13**

Таблица 3.10 – Расшифровка статьи затрат «Эксплуатация машин и механизмов»

Наименование используемого ресурса	Кол-во, час	Цена, руб./час	Стоимость, руб. с НДС
Установка колонкового бурения Dimec PHC6 DI-1 (U6)	40	1 556,22	62248,80
Погрузочно-доставочная машина Scooptram STI 030 (перевозка	40	7 266,00	290640,00
КАМАЗ 43118-RS (для доставки керна)	40	2 500,00	100000,00
Итого рублей, с НДС:			**452888,80**

Оценка стоимости метода сейсмического зондирования проведена с учетом сокращения времени на камеральную обработку данных, благодаря внедрённой в программное обеспечение функции автоматического расчета скорости прохождения упругой волны.

Рассмотрев затраты, необходимые для реализации каждого из приведенных видов работ, можно сделать вывод об эффективности выполнения работ по исследованию горного массива геофизическим методом (сейсмозондирование). Выполнение геотехнического бурения для отбора и описания ориентированного керна в 4,3 раза дороже, чем проведение работ по сейсмозондированию. В денежном выражении обследование участка горного массива в объеме 250 000 м^3 (параллелепипед размерами, ВхШхГ, м: 50х50х100), методом направленного кернового бурения в 1 822 854,30 руб. с учетом НДС, а методом сейсмического зондирования всего в 427 066,47 руб. с учетом НДС.

Обосновав экономическое преимущество геофизического метода перед инструментальным, рассчитаем экономию средств за счет применения автоматического калькулятора скорости прохождения волны. Учитывая, что применение калькулятора позволяет выполнять камеральную обработку данных инженеру без геофизического образования, примем зарплату такого специалиста равной 70 000 рублей с учетом всех налогов и сборов. Каждая рабочая смена в месяце (в среднем 22 смены) будет обходиться работодателю в 3182 рубля. Применение калькулятора в процессе камеральной обработки сейсмоданных экономит, в среднем, 15 минут рабочего времени, что с учетом обработки 4-х точек зондирования в день, занимает 1 час. При указанной заработной плате и восьмичасовом рабочем дне, стоимость 1

часа работы инженера составляет 398 рублей. При ежедневной камеральной обработке четырех точек зондирования одним специалистом, работодатель получает экономию в 8756 рублей в месяц. Применение калькулятора для автоматического расчета скорости прохождения волн позволяет выполнять камеральную обработку одной точки зондирования 1 час 45 минут, вместо 2-х часов, что сокращает затраты времени на 8%.

Выводы по главе 3

1. Совершенствование специализированной методики применения системы сейсмической локации для периодического прогноза структуры и свойств горного массива в части упрощения процедуры обработки данных, позволяет не только снизить требования к квалификации персонала, но и получить экономию рабочего времени, следовательно снизить затраты на фонд оплаты труда.
2. Специализированные программные средства обработки и визуализации сейсмоданных, разработанные и адаптированные под конкретную технологическую задачу, в значительной мере увеличивают скорость получения прогноза и снижают требования к квалификации персонала, принимающего управленческие решения.
3. Метод сейсмолокации является экономически эффективным вариантом для решения задач периодической оценки структуры и параметров горного массива в системе «массив пород – горная выработка – крепь».

Приведенные результаты исследований особенности применения системы сейсмической локации в условиях подземной разработки угольных и рудных месторождений позволяют сформулировать второе защищаемое положение в следующем виде:

«Автоматизированное определение скорости распространения упругих волн численными методами по сейсмограммам, в рамках специализированной методики сейсмозондирования, позволяет сократить время камеральной обработки данных на 8%».

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ ГОРНОГО МАССИВА В ШАХТАХ И РУДНИКАХ

Система «Микон-ГЕО» во взрывобезопасном исполнении в настоящий момент сертифицирована на соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах» (ТР ТС 012/2011) и выпускается серийно в г. Екатеринбурге компанией ООО «Информационные горные технологии» при научной поддержке и сопровождении инженеров-геофизиков из Уральского государственного горного университета.

Впервые метод, который с доработками применяется в настоящее время на шахтах Кузбасса и рудниках Норильска, был опробован и показал свою эффективность при строительстве 9-ти транспортных тоннелей в районе г. Большой Сочи в 2010 – 2013 гг. при подготовке к Олимпиаде 2014 г. [30, 58].

В настоящей главе рассматриваются различные примеры использования системы «Микон-ГЕО» на действующих предприятиях РФ в решении задач определения структуры и свойств горного массива в условиях шахт и рудников.

4.1. Прогноз структуры угольного пласта для поиска оптимальных зон расположения скважин заблаговременной дегазации с поверхности

Угольные пласты Кузбасского бассейна, разрабатываемые длинными столбами по простиранию, перед началом процесса добычи предварительно дегазируют, снижая уровень опасности, связанный с газовым фактором, приводящим в том числе к внезапной потере устойчивости массива. В зависимости от свойств слагающего пласт угля и глубины дегазационных скважин, данный метод не всегда показывает высокую эффективность.

Дополнительной мерой является метод заблаговременной дегазации с поверхности, суть которого заключается в нижеследующем.

До начала ведения подготовительных работ по оконтуриванию выемочного столба лавы с поверхности выполняются несколько вертикальных скважин на глубину залегания угольного пласта.

В скважины опускаются устройства, генерирующие ударную волну, под действием которой угольный пласт сжимается и растягивается, что существенно увеличивает проницаемость угля за счет раскрытия существующих и появления новых сетей трещин (рисунок 4.1).

После извлечения воды глубинными насосами скважины начинают работать в режиме дегазации. В них поступает метан из угольного пласта с развитой системой трещин.

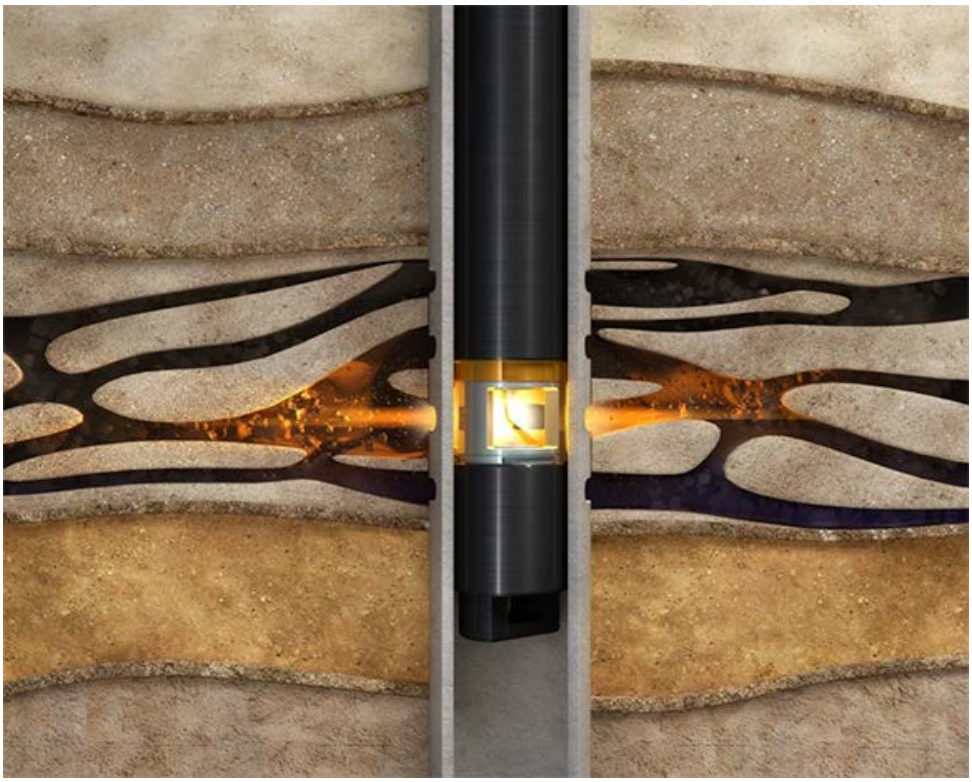

Рисунок 4.1 – Изображение процесса инициации ударной волны посредством плазменно-импульсного воздействия (ПИВ) методом от компании ООО «Георезонанс»

Метод заблаговременной дегазации отличается высокой стоимостью, сложностью исполнения и порой непрогнозируемым результатом, то есть некоторые скважины могут не выйти на расчетные показатели по объему извлекаемого метана, что резко снижает качество дегазации и рентабельность всего мероприятия.

Одной из главных причин невыхода скважин на плановую эффективность, кроме технических проблем, связанных, например, с осыпанием стенок, недостаточной глубиной выбуривания и др., является попадание скважины в область повышенного разуплотнения угольного пласта (например, зоны контакта блоков, области тектонического нарушения, зоны повышенных растягивающих усилий или пачки мягкого угля высокой степени нарушенности).

Ударная волна, инициируемая генератором, распространятся по угольному пласту и теряет значительную часть энергии в зонах повышенной трещиноватости и других неоднородностях. Так, чтобы добиться максимальной эффективности, следует выбирать местоположение дегазационных скважин, соответственно.

Оценить структуру и параметры угольного пласта для выбора оптимального расположения скважин, а также выполнить анализ эффективности существующих, в случае имеющихся оконтуривающих выработок, позволяет вариант аппаратно-программного комплекса «Микон-ГЕО» для периодического прогноза структуры и свойств горного массива.

С целью установления эффективности данного метода было проведено обследование горного массива выемочного столба лавы с вентиляционного и конвейерного штреков 3-3-1 бис угольной шахты с октября 2019 по март 2020 гг. в два этапа, разнесенных во времени. На первом этапе, в октябре 2019 года, в вентиляционном штреке 3-3-1 бис было отработано шесть точек зондирования на пикетах 20, 26, 32, 39, 44, 49. В конвейерном штреке 3-3-1 бис отработана одна точка зондирования, которая находилась напротив выхода газодренажной сбойки №1 КШ 3-1-1 бис. На втором этапе, в марте 2020 года, в конвейерном штреке 3-3-1 бис было отработано четыре точки зондирования на пикетах 32, 37, 42, 48.

После обработки полевых материалов и интерпретации полученных данных было выделено несколько зон повышенного разуплотнения массива, обозначенных овалами с пунктирной границей красного цвета. Две зоны, обозначенные штриховкой в оттенках синего цвета, представляют собой области массива повышенной прочности. Отмеченные зоны приведены на рисунках 4.2 – 4.4.

Схема горных выработок с нанесенными зонами повышенного разуплотнения (овалы) и повышенной прочности пород (штриховка) приведена на рисунке 4.2.

Схемы горных выработок с наложенными срезами модели в изображениях параметров «Уровень разуплотнения» и «Модуль Юнга» приведены на рисунках 4.3 и 4.4, соответственно.

Согласно полученным данным, местоположение дегазационных скважин П1-1, П1-2 и П1-3 совпадает с зонами повышенного разуплотнения горного массива, что свидетельствует об успешно проведенном импульсном воздействии.

Местоположение скважины П1-1бис совпадает с зоной повышенной прочности горного массива, также характеризующейся низким уровнем разуплотнения. По отзыву компании, проводившей дегазацию пласта, скважина П1-бис не вышла на рабочий режим.

Местоположение скважины П1-4 совпадает с зоной повышенной прочности горного массива. Данные о выходе на плановую эффективность по скважине, к сожалению, отсутствуют.

По результатам проведенных работ были сделаны следующие основные выводы:

– структура и свойства углепородного массива определяются однозначно и подтверждаются с нескольких направлений зондирования на дистанции до 200 метров;

– аппаратная реализация позволяет проводить сбор полевых данных в подземных условиях с производительностью 1 точка зондирования в час;

– система дистанционной оценки структуры и параметров горного массива «Микон-ГЕО», реализующая метод сейсмического зондирования, может применяться для определения оптимального местоположения скважин поверхностной дегазации на стадии проектирования, а также для анализа эффективности импульсного воздействия на этапе ввода скважин в промышленную эксплуатацию.

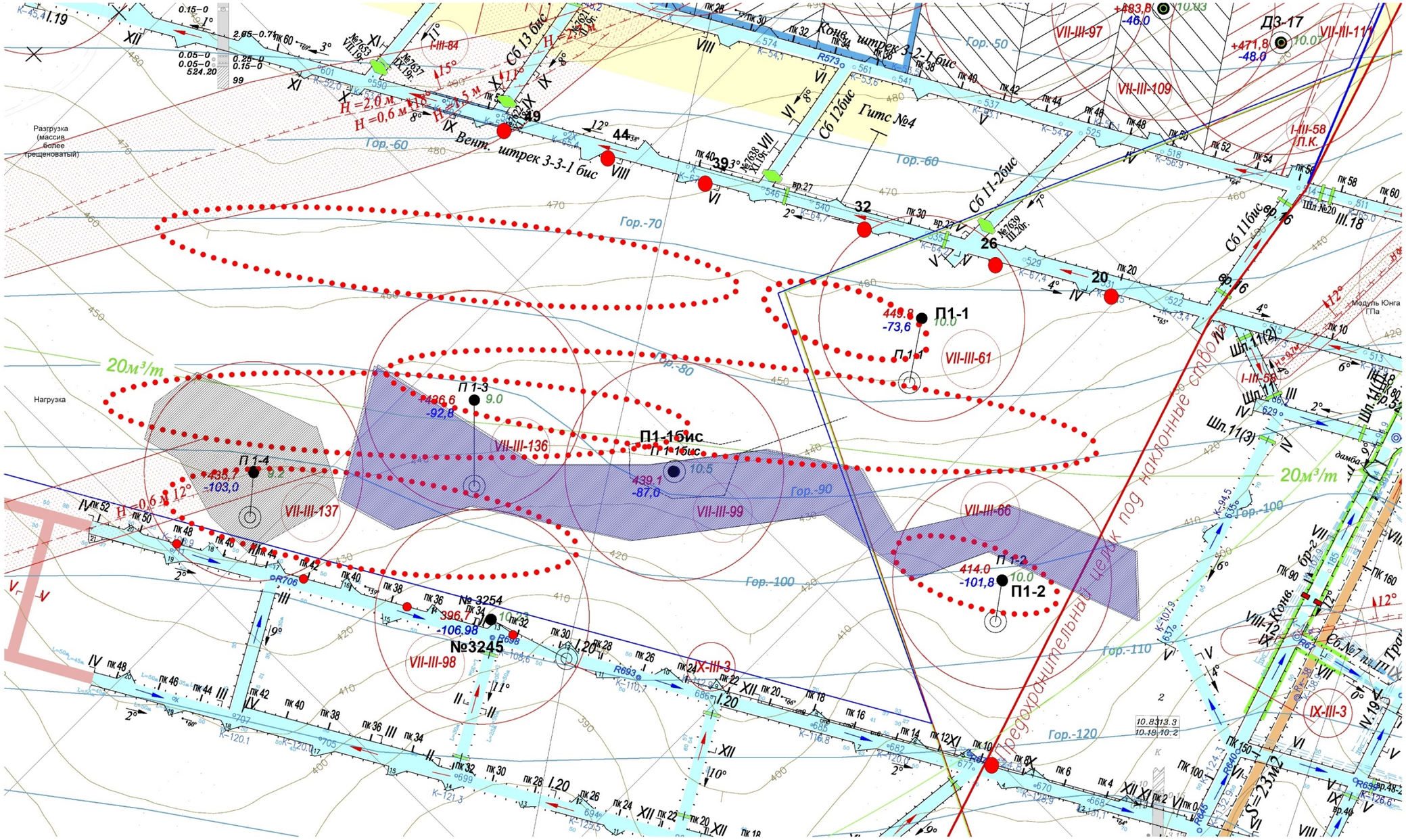

Рисунок 4.2 – Схема горных выработок с нанесенными зонами разуплотнения (овалы красного цвета) и повышенной прочности пород (штриховка в оттенках синего)

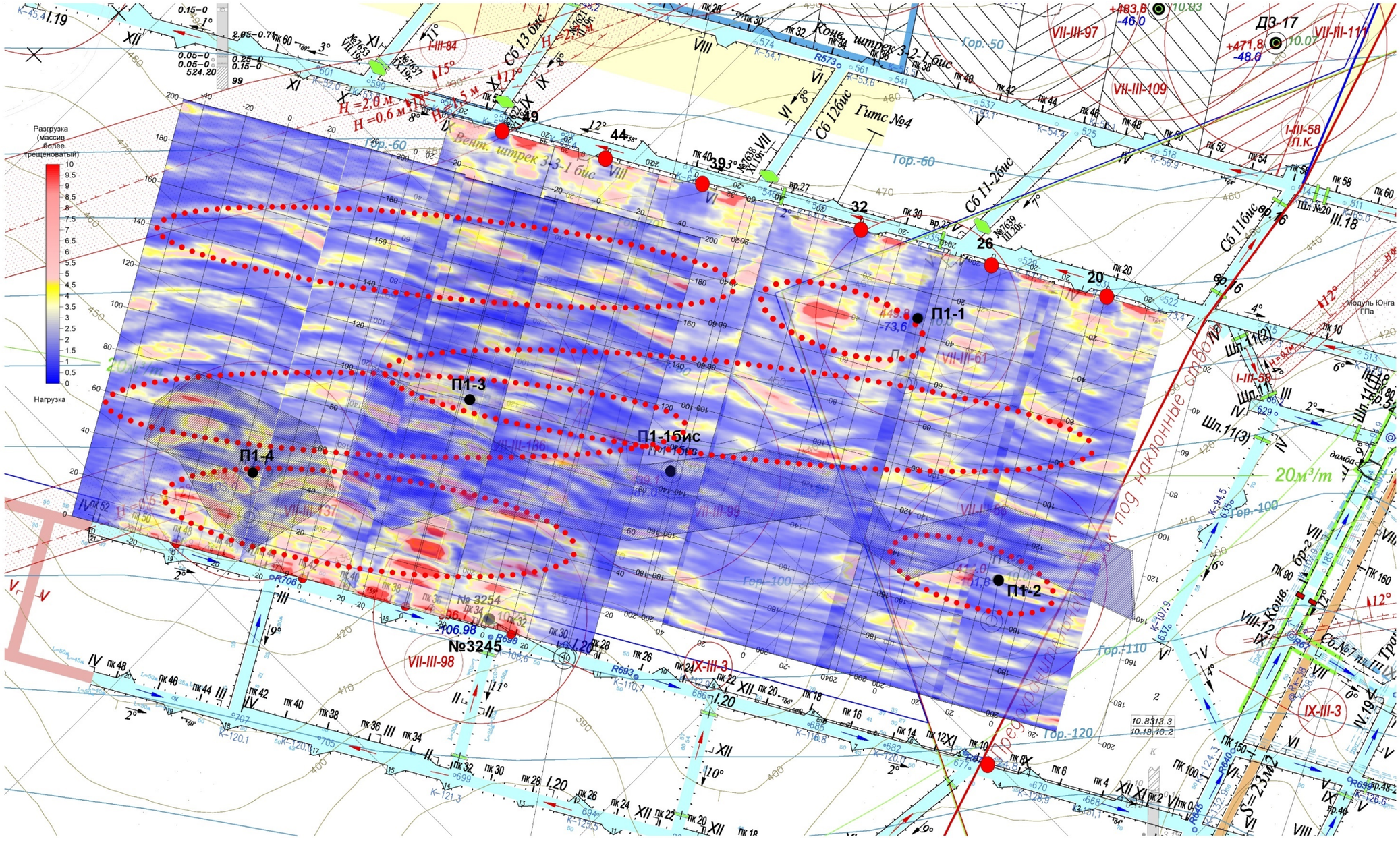

Рисунок 4.3 – Срезы модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения» с нанесенными зонами разуплотнения (овалы красного цвета) и повышенной прочности пород (штриховка в оттенках синего)

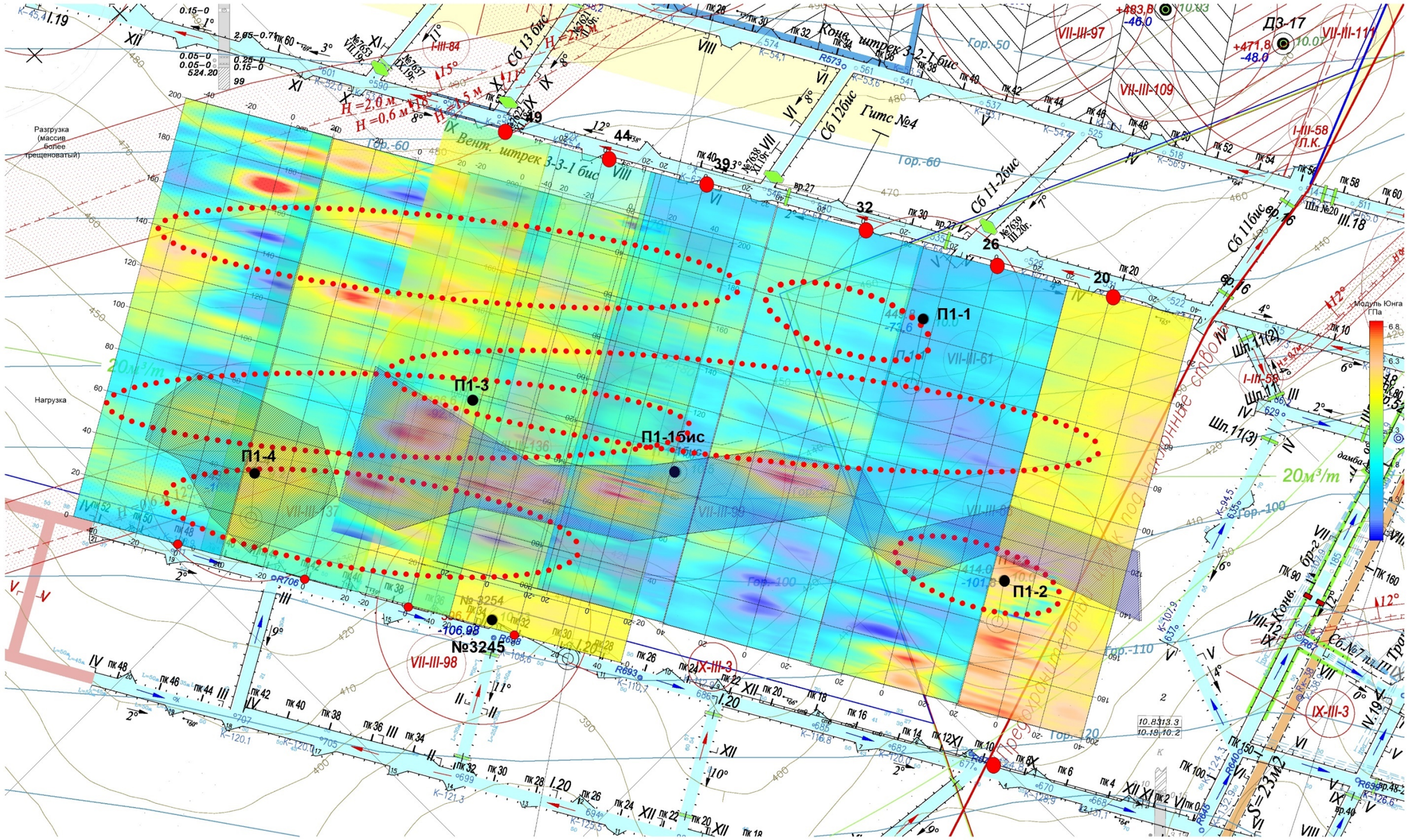

Рисунок 4.4 – Срезы модели горного массива в изображениях параметра «Модуль Юнга» с нанесенными зонами разуплотнения (овалы красного цвета) и повышенной прочности пород (штриховка в оттенках синего)

4.2. Прогноз зон риска возникновения газодинамических явлений в проходческом забое угольной шахты

Ведение проходческих работ в угольных шахтах на глубинах нескольких сотен метров, помимо риска потери устойчивости горного массива по причинам некорректного расчета крепи для данных типов пород, категория которых подразумевает определенный способ крепления, сопряжено с рисками возникновения динамических явлений. Выбор и расчет характеристик крепи в условиях известных величин горного давления, а также теоретических основ его перераспределения, является понятной и решаемой задачей, в то время как прогноз зон риска возникновения динамических явлений остается задачей наукоемкой и сложной.

Методы инструментального прогноза основаны на определении физических свойств и косвенной оценке напряженно-деформированного состояния горного массива, а методы неразрушающего контроля – на оценке электромагнитных полей и характеристик сигналов акустического спектра.

Эффективным методом неразрушающего контроля структуры и параметров горного массива в решении задачи определения местоположения зон проявления внезапной потери устойчивости является сейсмозондирование.

Осенью 2019 года в процессе ведения проходческих работ по нарезке выемочного столба лавы на угольной шахте было выполнено зондирование согласно описанной методике (см. п. 3.1 настоящей работы), когда сейсмоприемники были установлены на груди забоя, а возбуждение упругой волны осуществлялось ударами кувалды.

Исследование горного массива было выполнено на дистанцию 100 метров от места установки сейсмоприемников. Задачей исследования являлся опережающий прогноз местоположения зон, представляющих опасность при ведении проходческих работ и последующей эксплуатации горной выработки при отработке столба лавы, нарезанной в угольном пласте.

Гипсометрия угольного пласта пологоволнистая, углы падения изменяются от 5 до 10 градусов. Уголь пласта полосчатый, за счет чередования тонких слойков полублестящего и блестящего угля имеет сложное строение, содержит от 4 до 10 породных прослоев, представленных преимущественно алевролитами мелкозернистыми, иногда углистыми. Мощность пласта изменяется от 3,60 до 4,50 м, увеличиваясь постепенно от монтажной камеры к границе остановки лавы, составляя в среднем 4,06 м, мощность породных прослоев 0,40 м. Уголь пласта склонен к самовозгоранию, угольная пыль взрывоопасна. Пласт опасный по горным ударам с глубины 200 м, угрожаемый по внезапным выбросам угля, пыли и газа с глубины ниже горизонта – 85 м.

Непосредственная кровля представлена темно-серыми мелкозернистыми и крупнозернистыми алевролитами, массивными до слабослоистых. Непосредственная кровля средней устойчивости относится к II классу по устойчивости, I типу по обрушаемости (вне зоны влияния тектонических нарушений). Основная кровля сложена серыми, темно-серыми песчаниками мелкозернистыми до крупнозернистых, мощностью от 4 до 23 м и алевролитами крупнозернистыми (описаны в разделе непосредственная кровля). В почве пласта залегают темно-серые крупнозернистые алевролиты с редкими прослойками песчаников. Алевролиты обладают средней несущей способностью, при значительном увлажнении теряют свои несущие способности. Породы почвы склонны к пучению.

Кровля в зоне влияния тектонических нарушений неустойчивая, трещиноватая, склонна к отслоению и куполообразованию, обрушается вслед за выемкой угля, относится к I классу по устойчивости, III типу по обрушаемости. Угольный пласт в зоне влияния тектонических нарушений перемят, проявляется кливаж угольного массива, повышенное выделение газа, воды.

Максимальная глубина ведения горных работ составляет 620 м. На данной глубине ширина зоны влияния опорного давления очистного забоя составляет 105 м. Ширина защитной зоны (n) для данного пласта составляет 10 м.

В результате выполненных исследований была получена трехмерная модель горного массива в изображении динамических и кинематических параметров. В ходе интерпретации были выделены две зоны риска, расположенных на проектном пути строящейся выработки (рисунок 4.5). Первая зона, обозначенная литерой «А», расположенная в интервале 60 – 70 м от груди забоя, представляла собой зону разуплотнения, заполненную метаном. Зона А наиболее ярко выражена вблизи кровли выработки.

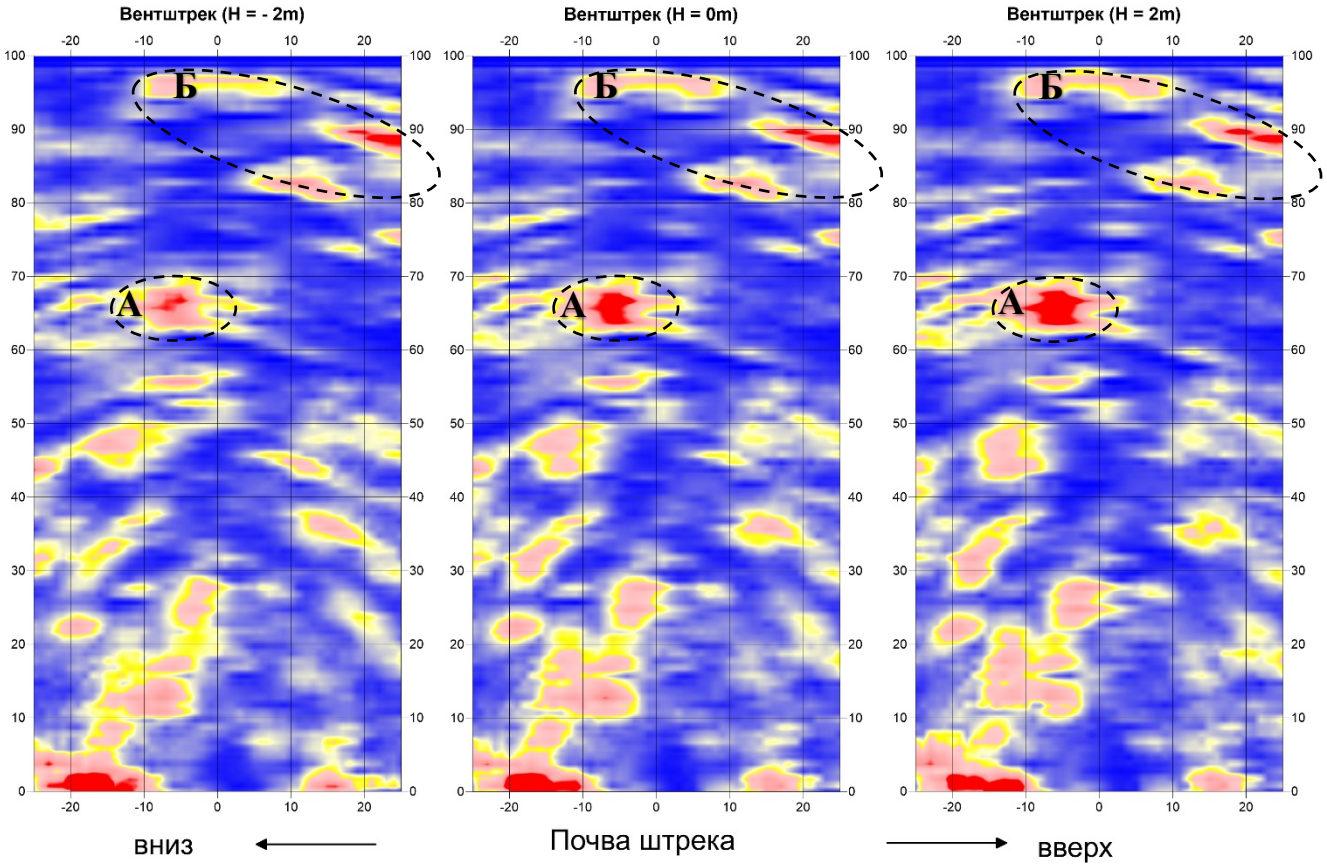

Рисунок 4.5 – Срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения, у. е.»

Вторая зона риска, обозначенная литерой «Б», находилась в интервале 80 – 100 м и представляла собой тектоническое нарушение, плоскость которого была расположена под острым углом к оси выработки.

Изображение трехмерной модели представлено на рисунке 4.6. В процессе интерпретации трехмерные модели позволяют специалистам составить представление о развитии зон (расположении относительно проектной оси выработки и других известных точек привязки к объекту исследования) в пространстве.

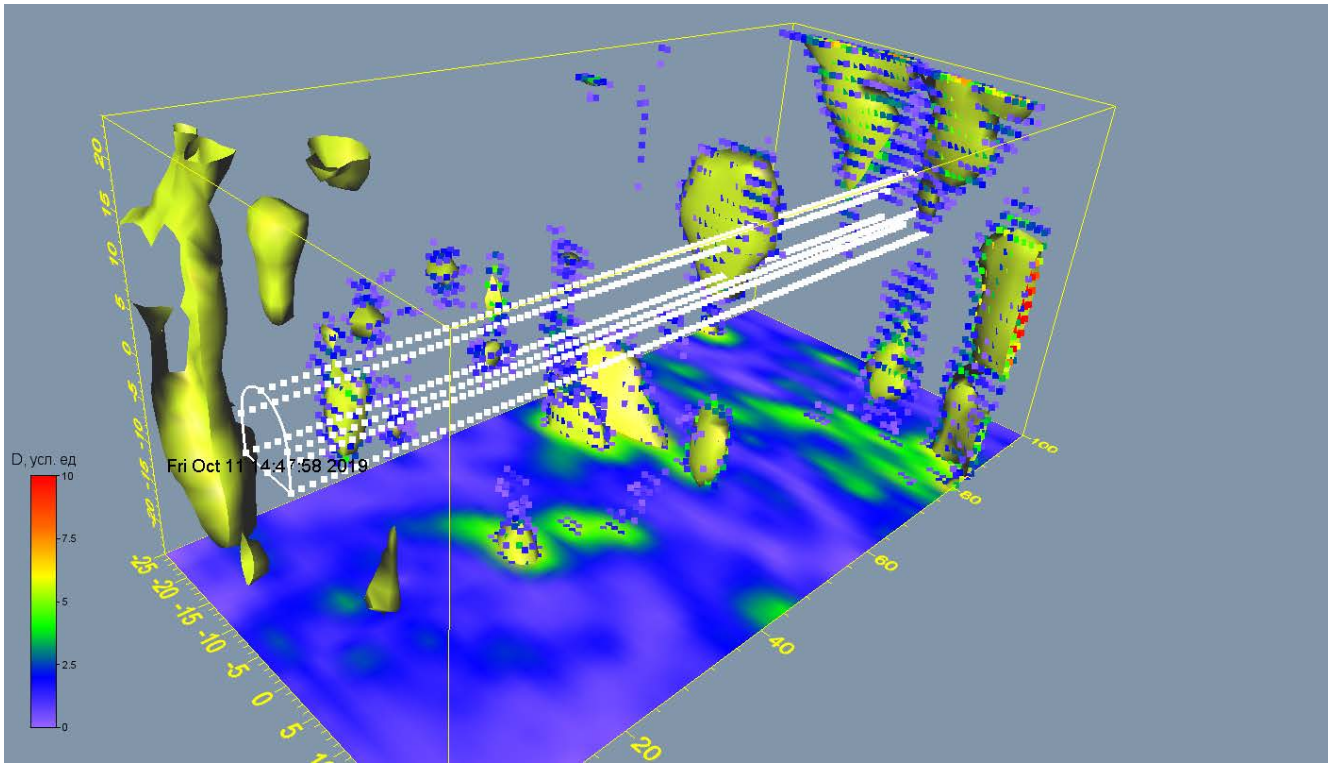

Рисунок 4.6 – Вид трехмерной модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения»

Факт проходческих работ подтвердил прогноз. Зона А заблаговременно была дегазирована, а при подходе к зоне Б были приняты специальные меры по обеспечению дополнительного крепления выработки для обеспечения её устойчивости. Также плоскость геологического нарушения была встречена в процессе нарезки выемочного столба лавы параллельно ведущейся выработкой – конвейерным штреком.

Подведя итог, следует отметить возможность опережающего исследования структуры и свойств углепородного массива методом сейсмозондирования для

обнаружения объектов риска на удалении до 100 метров от места установки приемной аппаратуры, с целью заблаговременной реакции и предотвращения динамических проявлений горного давления как внезапной потери устойчивости горного массива.

4.3. Прогноз зон потери устойчивости горного массива в области влияния тектонических нарушений в условиях алмазодобывающего рудника

Процесс ведения проходческих работ буровзрывным способом, применяемый в рудных месторождениях, сопряжен с риском внезапной потери устойчивости горного массива в приконтурной области выработки, и особенно в зонах влияния тектонических нарушений. Тип нарушения и его местоположение зачастую разведаны, но где именно проходит плоскость разлома и какова степень нарушенности горного массива, прилегающего к этой плоскости, становится известным только при обнаружении признаков в ходе проходческих работ или опережающего разведочного бурения, позволяющего получить информацию в нескольких точках и далее восстанавливать полную картину, основываясь на предположениях и допущениях специалиста.

Применение сейсмического зондирования для оценки местоположения плоскости нарушения, а также состояния горного массива в прилегающих зонах, является одним из методов получения полной картины с высокой достоверностью и в кратчайшие сроки.

В условиях алмазодобывающего рудника Якутии в начале 2020 г. были проведены работы по оценке состояния горного массива в направлении проектной оси строительства транспортного съезда, в кровле которого залегает доломит галитсодержащий грубозернистый (песчанистый) брекчиевидной текстуры. На протяжении всей проходки наблюдались негативные газодинамические признаки, такие, как: образование полости по всей мощности выбросоопасного слоя в пределах ширины выработки в глубину до 2,4 м на всю мощность пласта, дробление породы на

мелкую тонкую плитку с присутствием песчаной фракции, отмечался отброс породы на величину менее (<30°) угла естественного откоса для доломитов на расстояние до 18,0 м. Повышенную опасность представляют тектонические нарушения, где зоны внезапной потери устойчивости приводят к обнажению значительных участков выбросоопасных слоев с возможностью последующей реализации газодинамических явлений.

Сейсмоприемники были установлены на плоскости груди забоя в пласт глинистых доломитов, сильнотрещиноватых, с нефтепроявлениями на контакте с бежевыми доломитами, которые располагаются выше, и выполнено зондирование в направлении проектной трассы выработки.

После обработки исходных сейсмограмм получены параметры, характеризующие структуру горного массива на дистанцию до 70 м. Были зарегистрированы зоны разуплотнения, попадающие в сечение проектируемой выработки. Наиболее обширные из них отмечены литерами "А", "Б", "В", "Г", "Д", "Е". Расположение зон отмечено на вертикальном (рисунок 4.7) и горизонтальном (рисунок 4.8) срезах параметра «Уровень разуплотнения, у. е.».

В первом случае вертикальный срез модели (рисунок 4.7) нанесен на геологический разрез, предоставленный рудником, где тектонические нарушения и предполагаемые зоны дробления представлены пунктирными линиями красного цвета. Зоны разуплотнения, представленные на вертикальном срезе локальными областями красного цвета с желтыми контурами, были подтверждены фактом проходческих работ и частично совпали с представлениями геологической службы рудника.

Сложной задачей в условиях представленной геологии, которую также планировалось решить методом сейсмозондирования, являлось определение потенциально выбросоопасных зон. Газонасыщенные пористые бежевые доломиты в процессе ведения буровзрывных работ разрушаются, высвобождая содержащийся в порах метан, увлекающий за собой горную массу, существенно изменяя проектное

сечение выработки и повышая концентрацию газа в атмосфере выработок, что приводит к срабатыванию системы аэрогазовой защиты и отключению электропитания участка производства работ.

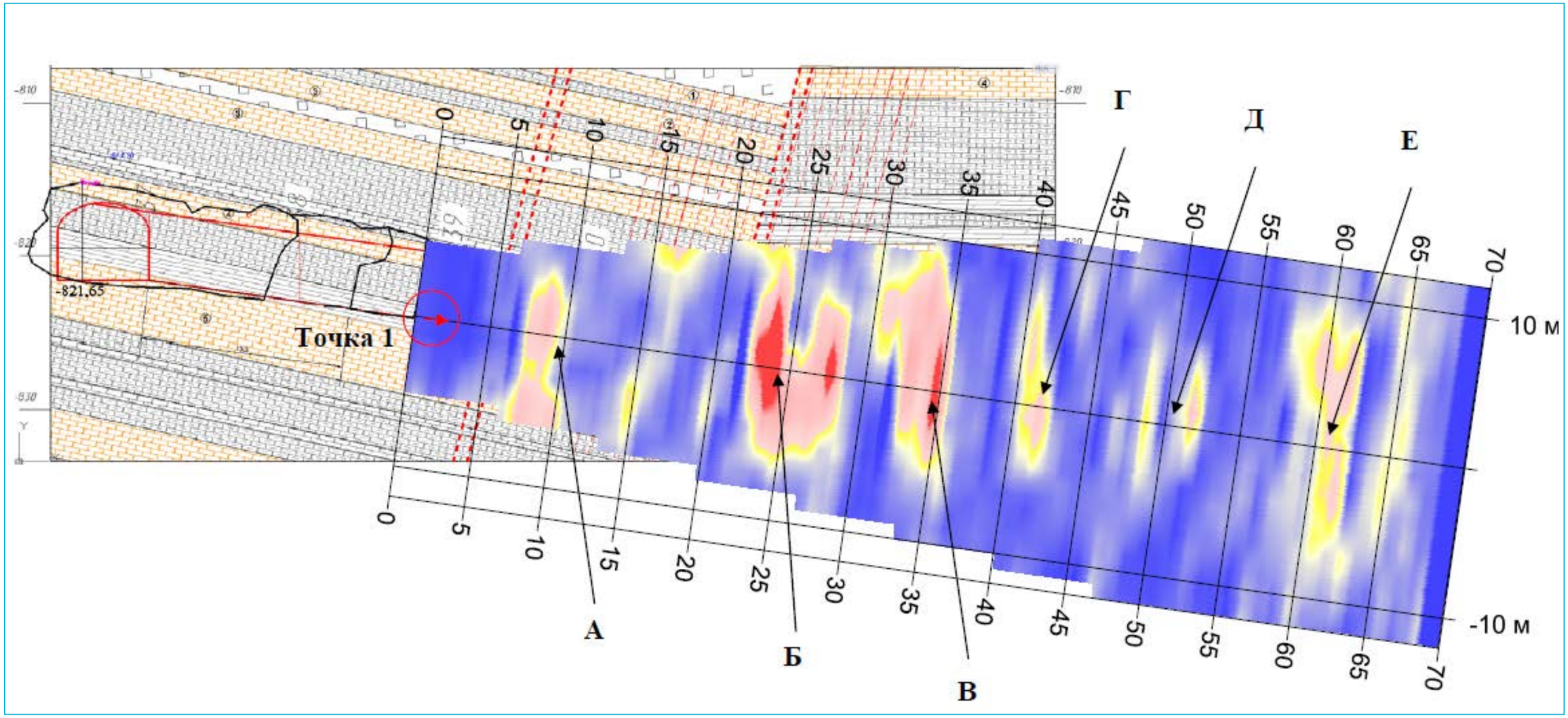

Рисунок 4.7 – Вертикальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», совмещенный с геологическим разрезом

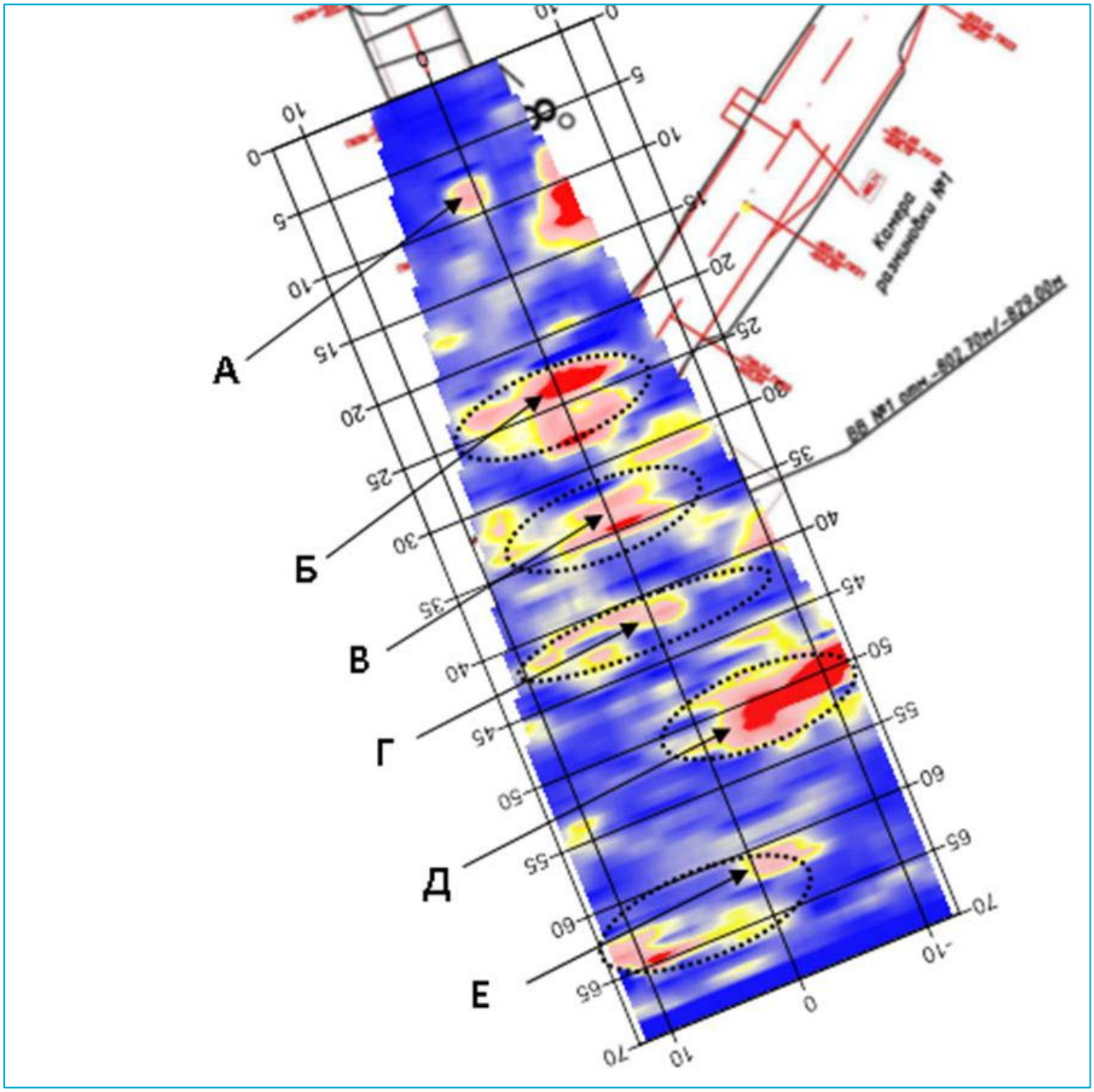

Рисунок 4.8 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения», совмещенный с геологическим разрезом

Наиболее выбросоопасные зоны встречаются в области влияния геологических нарушений и других структурных нарушенностях пластов бежевых доломитов.

Прогноз выбросоопасных зон возможно решить комплексным методом, а именно совмещая данные о геологии исследуемой области горного массива и

результаты сейсмозондирования, где контрастно отображаются области нарушений структуры горного массива (см. рисунки 4.7, 4.8). Совпадение местоположения бежевых доломитов и структурных нарушенностей можно считать потенциально выбросоопасными зонами.

4.4. Мониторинг состояния углепородного массива в призабойной зоне выемочного столба лавы

Отработка выемочного столба угледобывающей лавы механизированным способом является одним из наиболее часто встречающихся способов добычи, применяемых в шахтах Кузбасса. С увеличением глубины разработки растут риски возникновения геодинамических явлений. Мониторинг состояния массива горных пород в ближней зоне влияния выработок, называемый в действующих нормативно правовых актах, предъявляющих требования к безопасности ведения работ [61, 62], текущим прогнозом, позволяет выполнять контроль состояния исследуемой области горного массива в условно-непрерывном режиме. На сегодняшний день мониторинг горного массива выполняется на более чем десяти очистных забоях в действующих шахтах Кузбасского угольного бассейна.

Оценка состояния горного массива производится по параметрам, рассчитываемым специализированным программным обеспечением верхнего уровня, входящим в состав аппаратно-программного комплекса «Микон-ГЕО», из сейсмоданных, регистрируемых в соответствии с методикой применения системы сейсмической локации для непрерывной оценки параметров угольного массива в очистном забое при механизированном способе ведения работ (п. 3.2 настоящей работы). Рассмотрим результаты оценки состояния горного массива на нескольких объектах, где службой эксплуатации были подтверждены факты реализации горного давления.

Объект № 1, где сейсмоприемники были установлены в вентиляционном штреке, в изображении параметра «Уровень разуплотнения, у. е.», а именно среза

модели на уровне почвы, представлял картину, интерпретировавшуюся как ОПАСНО по наличию признаков готовности горного массива к реализации горного удара (рис. 4.9).

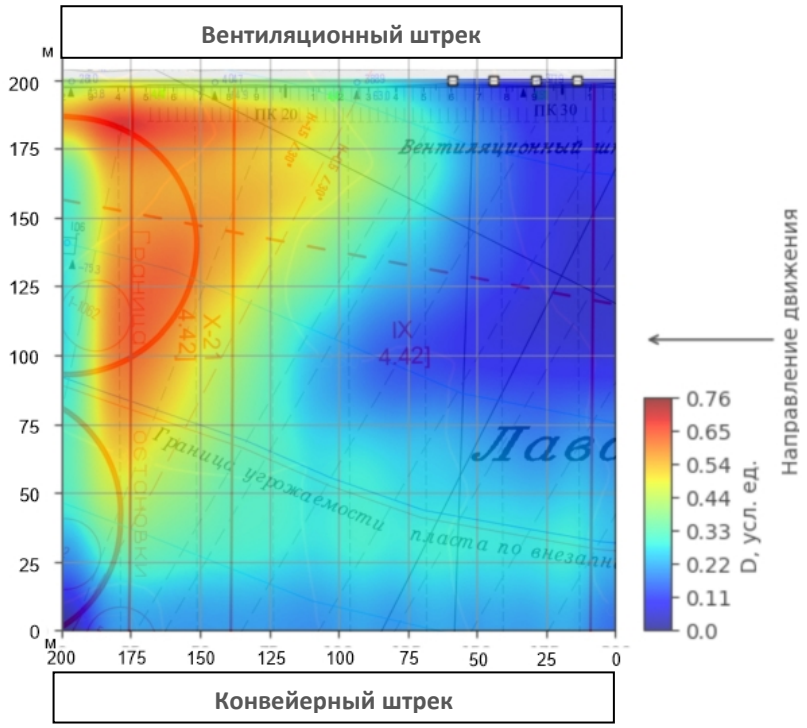

Рисунок 4.9 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (*D*), у. е.», объект № 1

Признаками, свидетельствующими о состоянии готовности горного массива к реализации запасенной энергии упругого сжатия в кинетическую энергию хрупкого разрушения и разлета частиц угля, являются высокие значения параметра *D* (0.97) в исследуемой области, а также отсутствие зон разуплотнения в призабойной зоне, что может быть обусловлено повышенным горным давлением на призабойную область.

Информация о наличии признаков высокого риска проявления динамического явления, полученная от службы эксплуатации объекта № 1, подтверждает корректность интерпретации состояния массива, по данным АПК «Микон-ГЕО», а именно: присутствие предвестников (трески в призабойной части массива,

повышенный уровень газовыделения при разрушении угля, зажатие штанги бурового инструмента) и аварийные значения параметра «объем выхода буровой мелочи», определяемые инструментально в рамках прогноза удароопасности участка горного массива.

По результатам рассмотрения данных от АПК «Микон-ГЕО», а также инструментального прогноза удароопасности были приняты специальные меры по разгрузке горного массива, и добыча была приостановлена до момента нормализации напряжений, о чем свидетельствуют мероприятия по контролю эффективности разгрузки.

Аналогичный случай – влияние повышенного горного давления на устойчивость горного массива, но с более явными последствиями, зарегистрирован на объекте №2, где на дистанции 70-80 м от груди забоя около четвертого сейсмоприемника произошел вывал борта конвейерного штрека (рис.4.10).

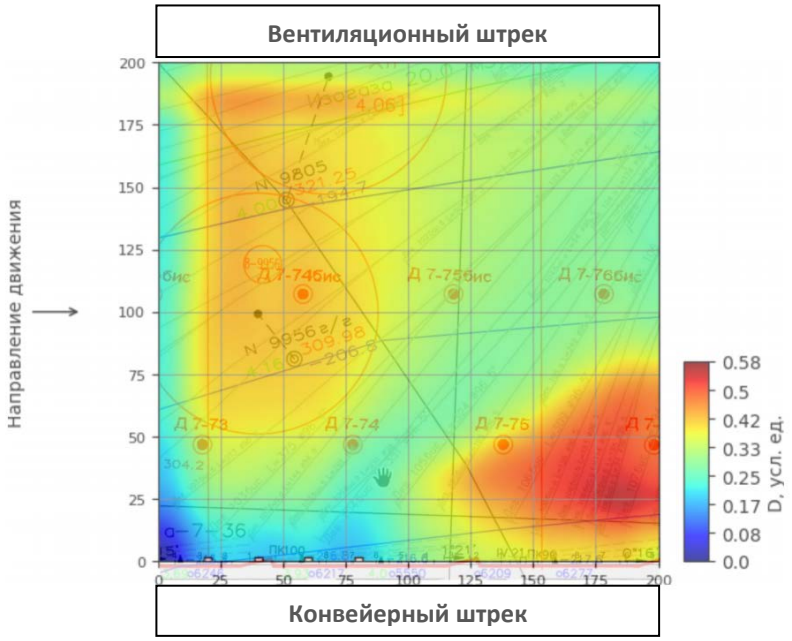

Рисунок 4.10 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (*D*), у. е.», объект № 2

Случившийся вывал был следствием повышенного горного давления в локальной области, отображенной на рисунке 4.10 зоной синего цвета (отсутствием

разуплотнения), и явился сигналом для укрепления кровли конвейерного штрека и противоположного борта.

На объекте № 3 (рисунок 4.11), между вторым и третьим датчиками, в зоне синего цвета, произошло внезапное пучение почвы, способствовавшее резкому уменьшению сечения выработки.

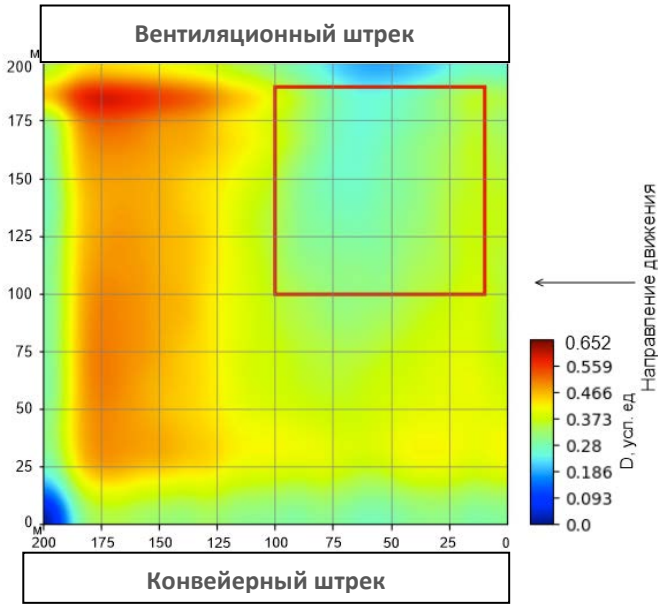

Рисунок 4.11 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (*D*), у. е.», объект № 3

Зона повышенного разуплотнения вблизи оконтуривающих выработок (рисунок 4.12) также является областью с риском внезапной потери устойчивости. Так, на объекте № 4 в районе четвертого сейсмоприемника произошло обрушение борта выработки в результате воздействия растягивающих усилий. Подобные явления могут возникать при зависании кровли в отработанном пространстве лавы [38], когда труднообрушаемый пласт основной кровли опирается на краевую (призабойную) часть выемочного столба и стойки механизированной крепи, и в теле выемочного столба начинают действовать значительные растягивающие усилия.

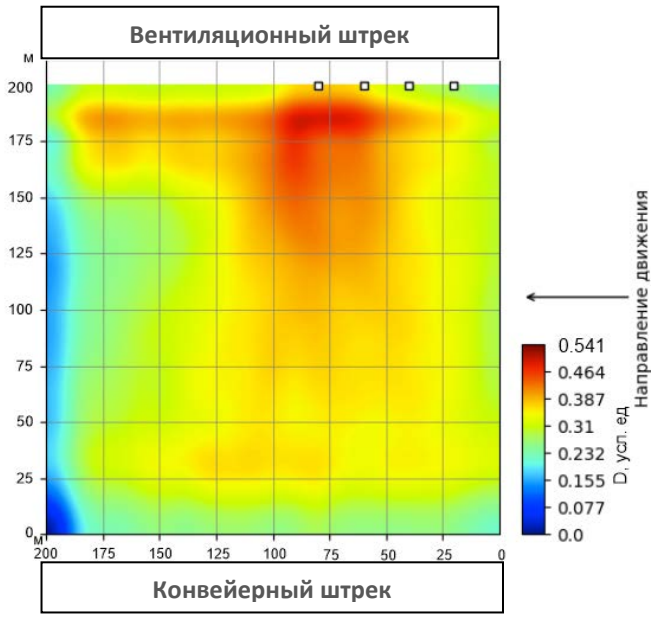

Рисунок 4.12 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (*D*), усл. ед.», объект № 4

Так, с учетом существующих представлений о расположении характерных областей (зон упругих и пластических деформаций) в столбе лавы, по данным АПК «Микон-ГЕО», можно осуществлять прогноз устойчивости приконтурных областей с целью обеспечения безопасности и корректировки технологии производства добычных работ.

4.5 Контроль эффективности гидрорыхления угольного пласта по параметрам сейсмоакустического сигнала

При проведении добычных и проходческих работ в угольных шахтах, где пласты склонны к динамическим явлениям и отнесены к угрожаемым по горным ударам, выполняется прогноз удароопасности различными методами, описанными в действующей Инструкции [62]. При выявлении категории «ОПАСНО» производство работ на участке приостанавливается и выполняется комплекс мер по предотвращению возникновения динамических явлений. Основными мероприятиями по приведению массива угля в неопасное состояние являются: дополнительная

дегазация, разгрузка скважинами, увлажнение и гидрорыхление. Приведенные мероприятия могут быть использованы в комплексе или отдельно. По факту их проведения в обязательном порядке проводится контроль эффективности описанными способами [62].

Имея в распоряжении техническую базу (система «Микон-ГЕО») и актуальную задачу (контроль эффективности гидрорыхления) автором, была изучена нормативная документация по данной проблеме и предложен способ оценки эффективности процесса гидрорыхления по параметрам искусственного акустического сигнала [62].

Одной из проблем, которая возникает при изучении действующей нормативно-правовой документации в области безопасного ведения работ на угольных шахтах, опасных по газу и пыли, является краткость и неоднозначность изложенных материалов. Так, согласно [62], предлагается контролировать параметр «низкочастотная составляющая спектра искусственного акустического сигнала, Ан, у. е.»:

«188. Контроль эффективности гидрорыхления угольного пласта по параметрам искусственного акустического сигнала проводится в процессе нагнетания жидкости в угольный пласт. Для регистрации акустического сигнала геофон устанавливается на расстоянии 5–10 м от устья скважины, через которую жидкость нагнетается в угольный пласт.

189. Искусственный акустический сигнал, возникающий при воздействии жидкости на угольный пласт под большим давлением, обрабатывается в равных временных интервалах, в течение которых жидкость нагнетается в угольный пласт.

Регистрация и обработка акустического сигнала выполняются в соответствии с главой XII Инструкции.

190. Прогностическим параметром служит низкочастотная составляющая спектра искусственного акустического сигнала Ан, у. е.

Гидрорыхление считается эффективным, если в течение времени нагнетания жидкости в угольный пласт после достижения максимального значения Ан снизилась более чем на 5 %, и давление жидкости в гидросистеме снизилось более чем на 30 % от максимального.»

Однако определения параметра *Ан* не дано, какова длительность равных временных интервалов оценки и частотный диапазон сигнала, принимаемого для расчетов, также не указано. На официальный запрос в Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору (РОСТЕХНАДЗОР) был получен ответ, из которого следует, что к низкочастотной составляющей спектра относится сигнал в диапазоне 0 – 200 Гц, в котором необходимо выполнять оценку выделившейся энергии, а также подсчитывать сейсмические события (трески массива, возникающие при раскрытии трещин в процессе нагнетания жидкости под высоким давлением в угольный пласт). Дополнительно в разъяснениях РОСТЕХНАДЗОРА было отмечено, что наличие событий в частотном диапазоне 0–60 Гц является признаком повышенной напряженности массива в области контроля.

Известно [62], что критерием эффективности гидрорыхления является снижение низкочастотной составляющей спектра на 5 % после достижения максимального значения, а также снижение давления жидкости в гидросистеме на 30 %. Второй параметр остается в зоне ответственности специалистов шахты, а первый – возможно контролировать средствами системы «Микон-ГЕО». Энергию тресков описывает амплитуда, значения которой аппаратура регистрирует с шагом 0,5 мс (шаг дискретизации регистрируемого сигнала). Необходимо оценивать не только максимальные значения амплитуд в диапазоне 0–200 Гц амплитудно-частотного спектра, но и площадь под кривой, характеризующей суммарную энергию, выделившуюся в массиве за выбранный временной интервал. Ввиду отсутствия разъяснений о длительности было принято решение разделить период проведения гидрорыхления на интервалы в 10 минут как наиболее понятные для человеческого восприятия.

На угольной шахте, где проводились испытания данной методики, длительность проведения процедуры гидрорыхления установлена регламентом предприятия и составляет не менее 40 минут. Равные временные интервалы используются для подсчета количества событий. Подсчет количества событий выполняется методом сравнения текущего значения с пороговым для каждого из параметров. Пороговые значения задаются оператором вручную. Если пороговые значения не заданы, то они рассчитываются для максимальных и интегральных значений амплитуд в диапазонах частот 0–60 Гц и 0–200 Гц следующим образом: за время регистрации акустической эмиссии в процессе гидрорыхления рассчитываются 90-й процентиль и среднее значение, среди них выбирается наименьшее, которое принимается в качестве порогового значения амплитуды сигнала. Пороговое значение рассчитывается для каждого параметра и каждого диапазона частот индивидуально.

Исходя из анализа полученной информации было принято решение осуществлять обработку сейсмоакустического сигнала в диапазонах 0–200 Гц, 0–60 Гц и рассчитывать следующие параметры:

- максимальные значения амплитуд в частотном диапазоне 0–200 Гц;
- интегральные значения амплитуд в частотном диапазоне 0–200 Гц;
- количество событий по максимальным значениям амплитуд в равных временных интервалах в частотном диапазоне 0–200 Гц;
- количество событий по интегральным значениям амплитуд в равных временных интервалах в частотном диапазоне 0–200 Гц;
- количество событий по максимальным значениям амплитуд в равных временных интервалах в частотном диапазоне 0–60 Гц;
- количество событий по интегральным значениям амплитуд в равных временных интервалах в частотном диапазоне 0–60 Гц.

Регистрирующая аппаратура для решения задачи контроля эффективности гидрорыхления представлена тремя сейсмоприемниками ИПСМ2, записывающими сигнал в собственный буфер, передающими на поверхность сейсмограммы через контроллер синхронизации ИПКС2Х. Сейсмоприемники были расставлены в

борт вентиляционного штрека в одну линию с интервалом в 5 метров, однако между вторым и третьим сейсмоприемником интервал составил 10 м, так как между ними находилась скважина для нагнетания воды в пласт. Схема расположения сейсмоприемников и скважины в борту выработки изображена на рисунке 4.13, где черными треугольниками изображены сейсмоприемники, а черной линией – скважина, пробуренная в борту горной выработки, оконтуривающей выемочный столб.

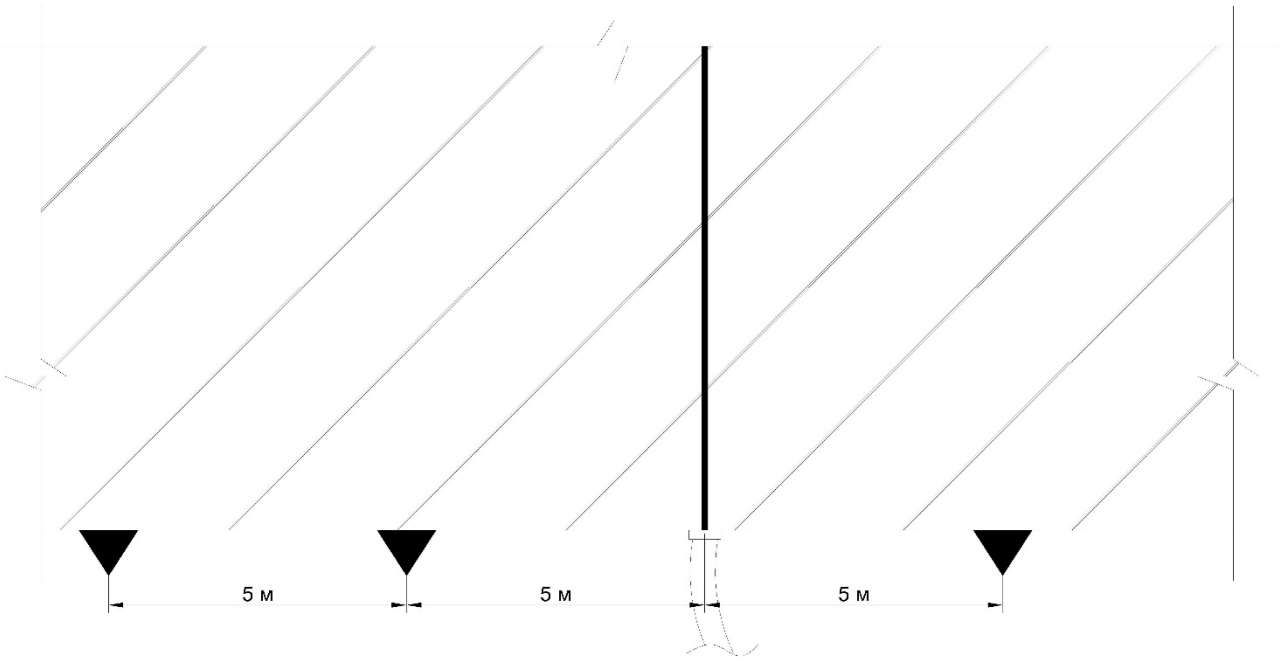

Рисунок 4.13 – Схема расстановки сейсмоприемников в борту выработки относительно положения скважины при гидрорыхлении

Амплитуды зарегистрированных сигналов на протяжении всего времени нагнетания жидкости в угольный пласт приведены на рисунке 4.14

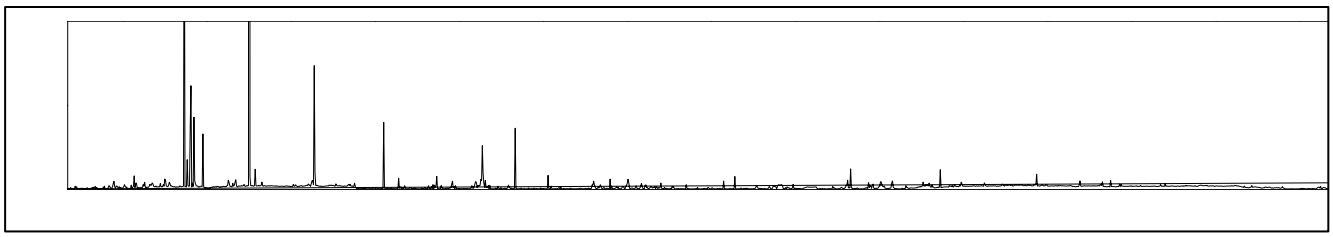

Рисунок 4.14 – Амплитуды сигналов, зарегистрированных в процессе гидрорыхления

Вода подавалась в массив двумя этапами: с 12:28 по 12:38 и с 12:55 по 13:10. Из полученных данных, представленных на рисунке 4.14, видно, что процесс нагнетания воды отмечен фоновым уровнем значений амплитуд в пределах 30 единиц, пики, соответствующие трескам массива, в начале процесса нагнетания воды имеют значения второго и третьего порядка, а ближе к завершению процесса – снижаются до уровня фоновых шумов. Также отмечено снижение количества тресков в единицу времени в процессе нагнетания жидкости в пласт угля, что может свидетельствовать о разгрузке горного массива.

Таким образом, теоретические представления о процессах, происходящих в угольном пласту при нагнетании в него жидкости под высоким давлением, были подтверждены экспериментом, в ходе которого произошло снижение уровня энергии, выделяющегося при раскрытии трещин, и сократилось количество раскрытий трещин в единицу времени, что демонстрирует применимость адаптированного автором настоящей работы метода.

4.6 Исследование возможности применения сейсмического зондирования для оценки трещиноватости горного массива

Относительные параметры, позволяющие оценивать массив горных пород качественно, играют важную роль в определении перспективных направлений разработки или поиска местоположения объектов с известными характеристиками (например, тектонических нарушений, водопритоков и др.). В настоящее время на добывающих предприятиях широко применяется метод исследования горного массива по характеристикам ориентированного керна. Характеристики отобранного материала приписываются той области горного массива, из которой он был извлечен. Применение специальной оснастки (керноориентатора) и описание образцов в процессе извлечения позволяет определить истинное положение и направление трещин в горном массиве.

Отобранные интервалы керна описываются следующими параметрами:

– качество породы (RQD);

– строение (литология, степень выветривания, степень окварцевания, обводненность);

– прочность (оценка прочности, процент крепких пород);

– нарушенность (количество открытых трещин);

– микродефекты;

– залеченные трещины (количество, литология заполнителя, прочность заполнителя, мощность заполнителя);

– количество систем трещин;

– описание открытых трещин (под углами 0-30°, 31-60° и 61-90°; зеркала скольжения количество трещин, макрошероховатость, микрошероховатость, литология заполнителя, прочность заполнителя, раскрытие, прочность стенок трещины).

На основе вышеописанных параметров дополняется модель рудного поля добывающего предприятия, созданная в программном обеспечении Micromine.

Имея в распоряжении данные о местоположении литологических разностей и результаты геотехнического бурения с одного из рудников в г. Норильск в виде

моделей Micromine и таблиц с описанием керна, автором было выполнено сопоставление результатов зондирования с фактической ситуацией, а также предпринята попытка перехода от относительных оценок структуры массива, выраженных в условных единицах параметра «Уровень разуплотнения», к качественной оценке трещиноватости.

Выполним сопоставление значений параметров цифровой модели массива в Micromine, предоставленной геологической службой рудника в области известного местоположения плоскости тектонического разлома, литологических разностей и зон дробления с результатами сейсмических исследований.

Зондирование производилось в борт горной выработки рудника из ниши. Условно назовем местоположение зондирования точкой № 3. В том же направлении, но под некоторым углом было выполнено несколько скважин геотехнического бурения с последующим дополнением модели рудника в ПО Micromine. Далее в этих же координатах были нанесены цифровые модели исследованной области, полученные в результате сейсмозондирования.

В результате интерпретации данных, полученных при сейсмическом зондировании в точке № 3, проведенном в борт выработки, выявлено две области трещиноватости. На рисунке 4.15 представлены горизонтальные срезы трехмерной модели на уровне почвы выработки, на +5 метров и +10 метров выше уровня почвы.

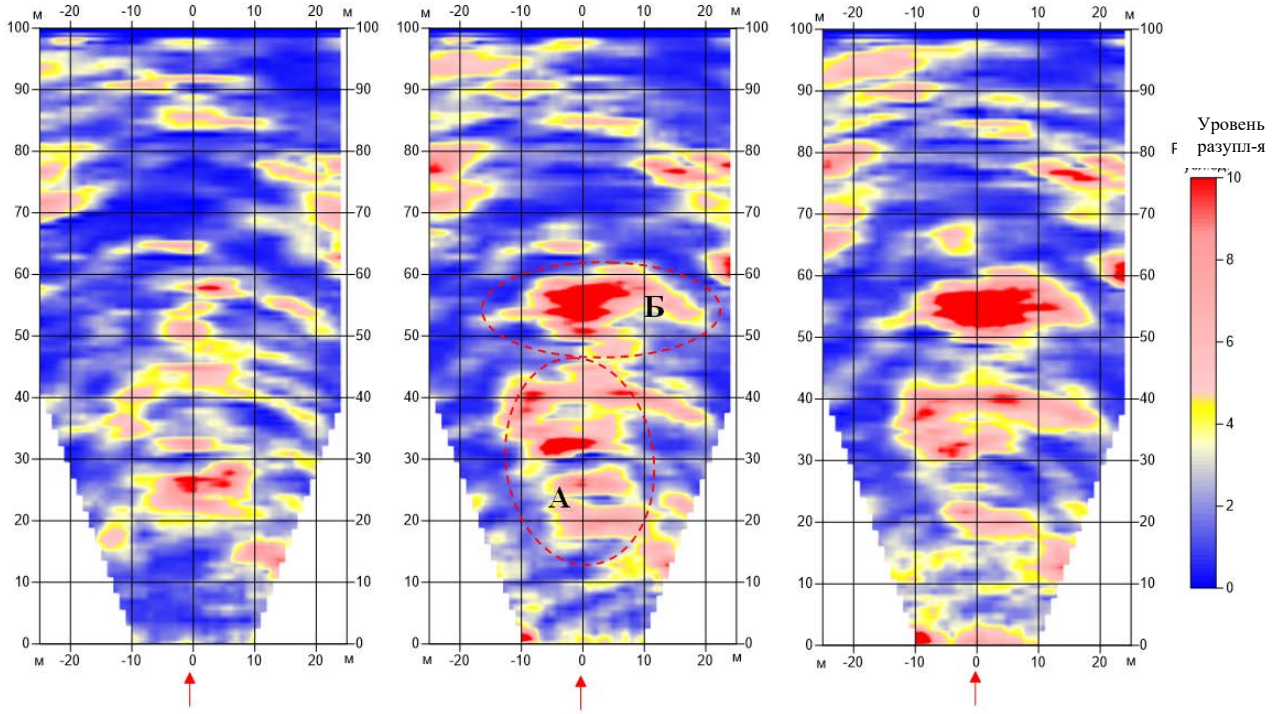

Рисунок 4.15 – Результаты зондирования в точке № 3 (горизонтальные срезы параметра «Уровень разуплотнения» слева-направо: на уровне почвы выработки, +5 метров и +10 метров выше)

Обширная зона трещиноватости «А» расположена в интервале от 15 до 55 метров от точки зондирования, контрастная и обширная зона «Б» – в интервале 50-65 метров. В ходе дальнейшего сопоставления результатов зондирования с моделями тектонических разломов и нарушений выявлено, что линия простирания разлома проходит через зону «Б» (рисунок 4.16).

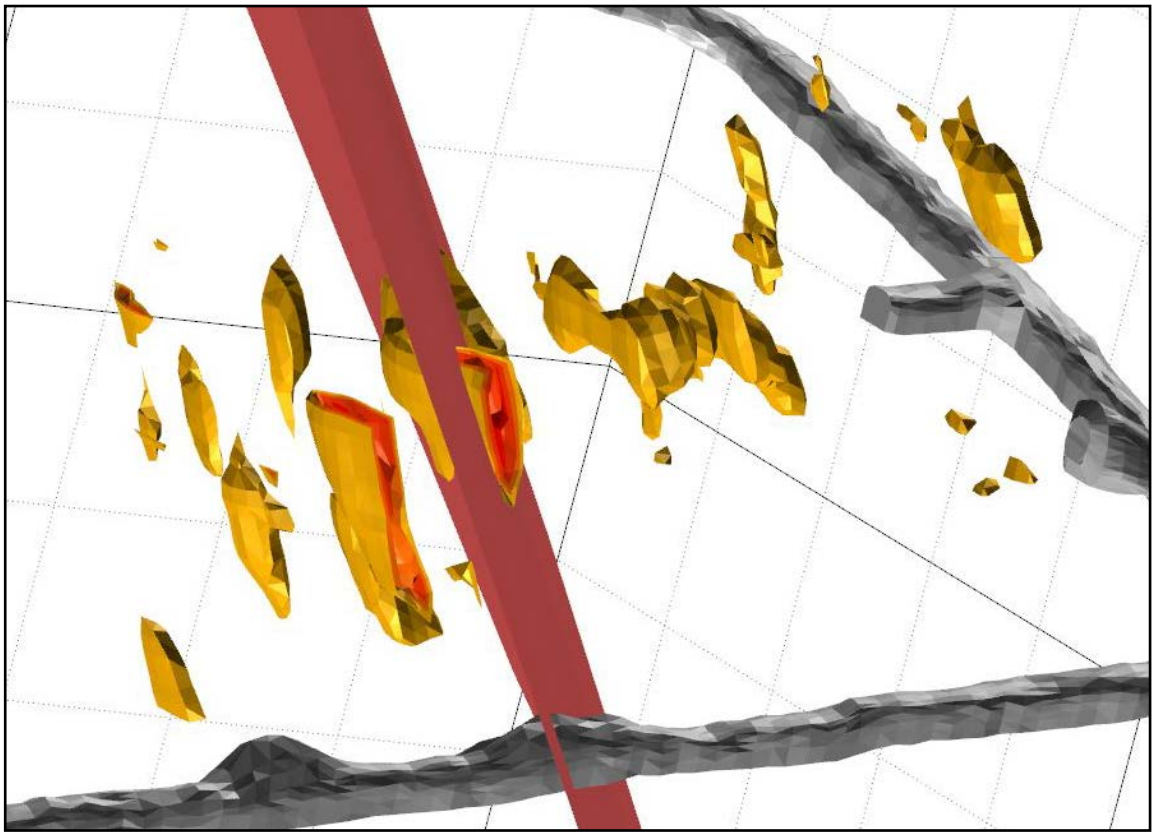

Рисунок 4.16 – Сопоставление местоположения зон высокого уровня разуплотнения и модели плоскости разлома

Для поиска параметров геофизической модели (в данном контексте цифровой модели исследуемой области массива, в изображении различных параметров) в области разлома наилучшим образом описывающих данную неоднородность, была составлена таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Значения параметров геофизической модели в области разлома

Параметр	20 м до области разлома	Область разлома	20 м после области разлома
Уровень разуплотнения, усл. ед.	2 - 7	7 - 9,5	2 - 6
Water, %	10 - 20	5 - 10	5 - 10
Vp, м/с	1900 - 2300	1900 - 2100	1800 - 2200
Отношение Vp/Vs	1,8 – 2,2	1,8 - 2	1,8 - 2
Коэф. Пуассона	0,29 – 0,38	0,29 – 0,36	0,29 – 0,36
Модуль Юнга, ГПа	6,4 – 7,4	6,6 – 7,6	6,7 – 8,7
Категория	2 – 3,5	3,5 – 4,5	2 - 3

Из таблицы 4.1 видно, что местоположение плоскости разлома наилучшим образом описывает параметр «Уровень разуплотнения».

При сопоставлении модели в изображении параметра «Уровень разуплотнения» с моделями выделенных зон дробления также прослеживается фиксирование этих зон отдельными небольшими областями зондирования (рисунок 4.17). По значениям регистрируемых параметров они схожи со значениями, приведёнными в таблице 4.1.

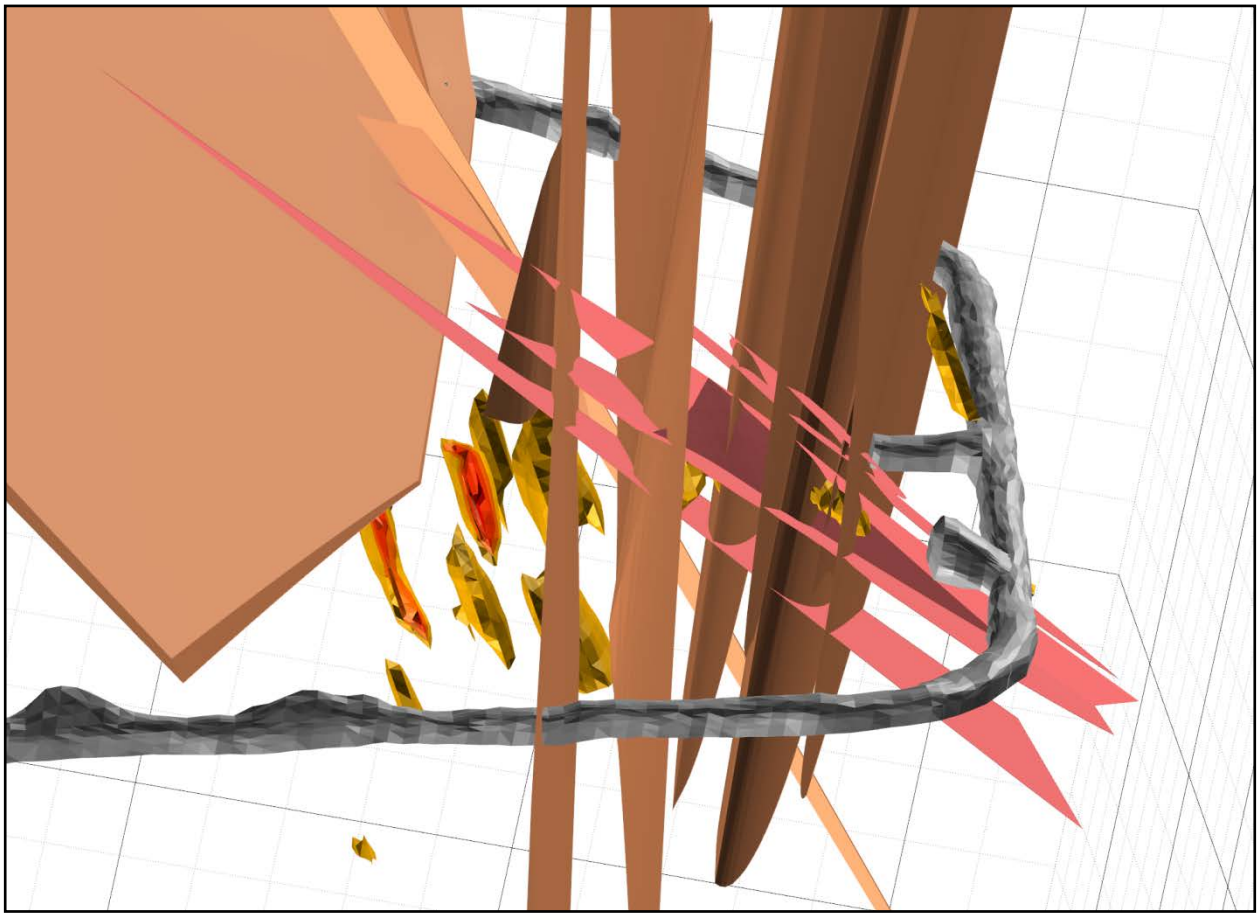

Рисунок 4.17 – Сопоставление местоположения зон высокого уровня разуплотнения и моделей зон дробления (дезинтеграции)

Литология в районе зондирования представлена мощными слоями из аргиллита и осадочных пород с включениями маломощного слоя из долерита (рисунки 4.18 – 4.20). Также видно, что данные слои «пронизаны» зонами дезинтеграции в

разных направлениях и перемешаны между собой, что подтверждается результатами сейсмического исследования (рисунок 4.21).

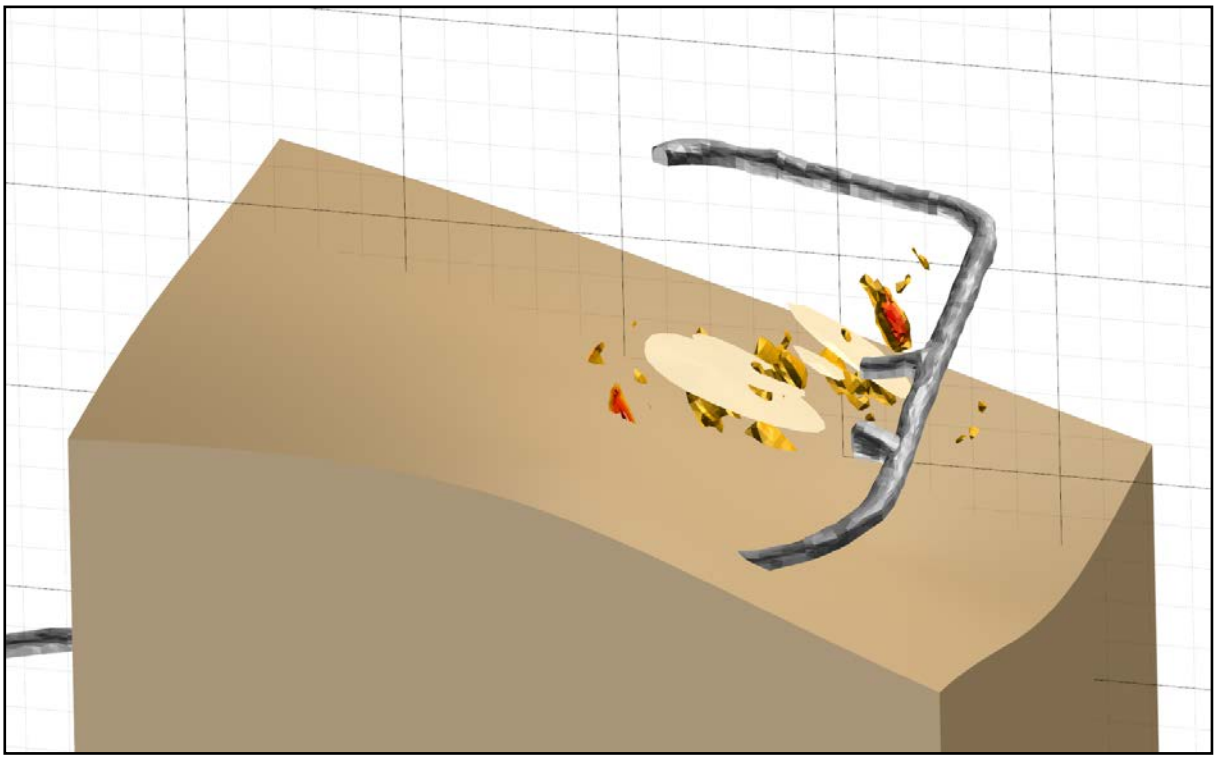

Рисунок 4.18 – Модель слоя аргиллитов в точке зондирования

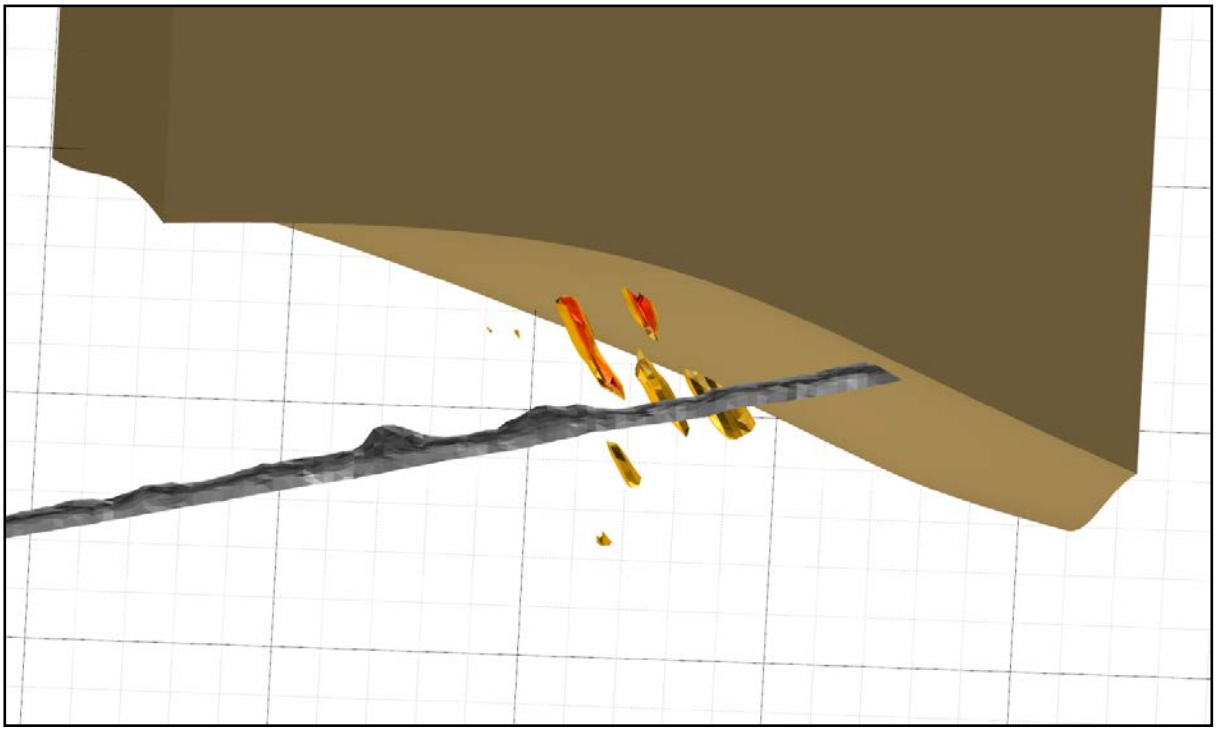

Рисунок 4.19 – Модель слоя осадочных пород в точке зондирования

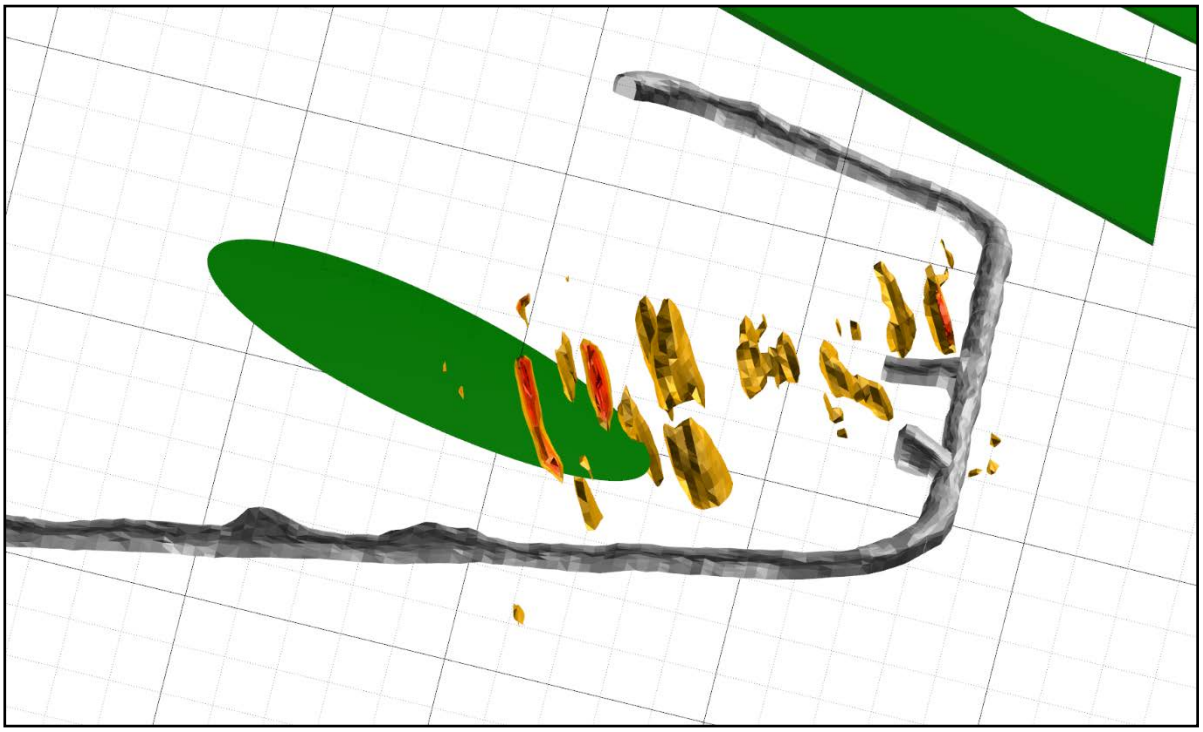

Рисунок 4.20 – Модель слоя долерита в точке зондирования

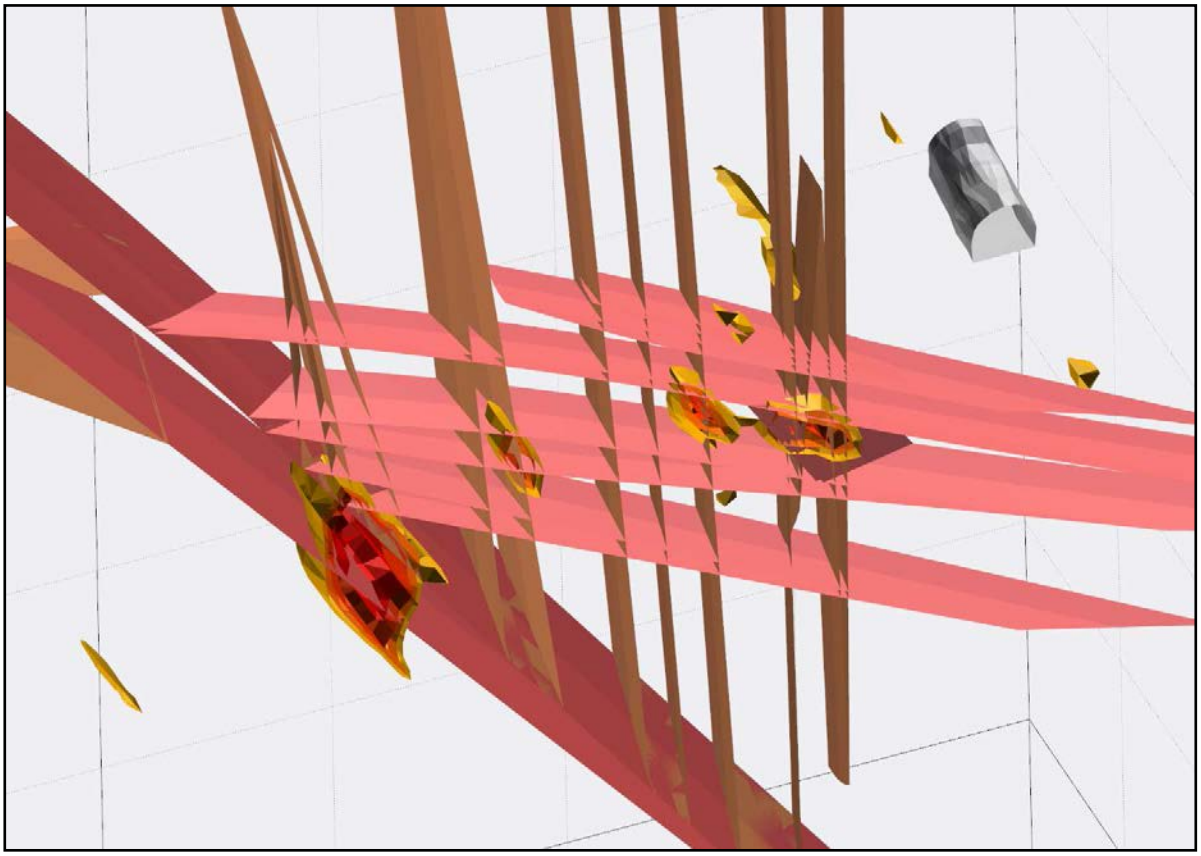

Рисунок 4.21 – Совмещение моделей зон разуплотнения, модели-плоскости разлома и моделей зон дробления

Различие горных пород по физическим свойствам в значительной мере позволяет определять границы разностей по динамическим параметрам. Так, литологическая граница отображается на параметре «Модуль Юнга» резким увеличением численных значений: более 8 ГПа в слое аргиллита (рисунок 4.22).

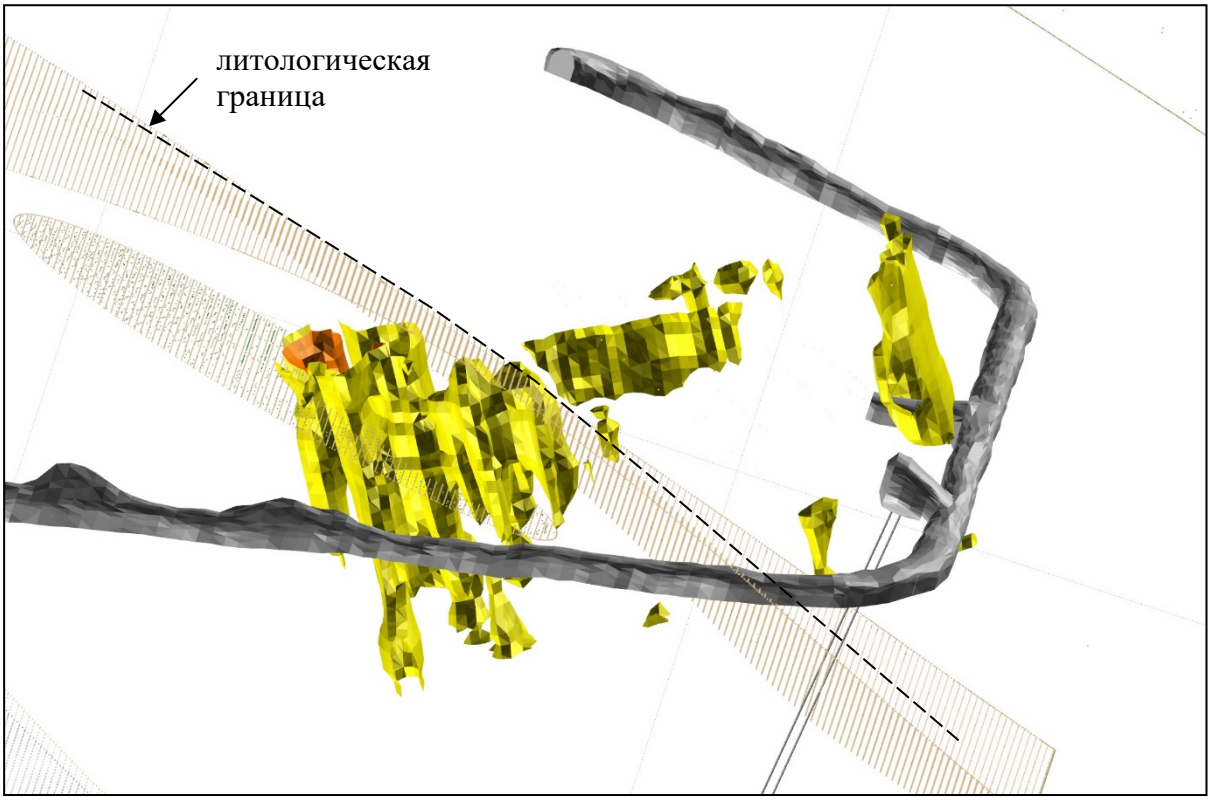

Рисунок 4.22 – Совмещение плоскости литологической разности и модели горного массива в изображении параметра «Модуль Юнга»

Исходя из сопоставления геологических объектов (предоставлены рудником в системе Micromine) с моделями, полученными методом сейсмического зондирования, можно сделать вывод, что тектонические нарушения, зоны дробления пород и контакта литологических разностей изображаются параметром «Уровень разуплотнения» в виде областей со значениями (7 – 10) усл. ед. Геологические объекты (типы горных пород) с контрастными физическими свойствами можно определять по численным значениям динамических параметров «Модуль Юнга» и «Коэффициент Пуассона». Так, в данном конкретном случае аргиллиты имеют значения параметра «Модуль Юнга» около 8 ГПа.

Далее сопоставим количество трещин, подсчитанных по результатам описания керна из скважин, с численными значениями параметра «Уровень разуплотнения». Керн описан в интервалах от 0,4 м до 1,5 м. Модель горного массива, построенная по сейсмоданным, представляет собой параллелепипед размерами (ВхШхГ), 50x50x100 м. Взаимное расположение модели и скважин приведено на рисунке 4.23.

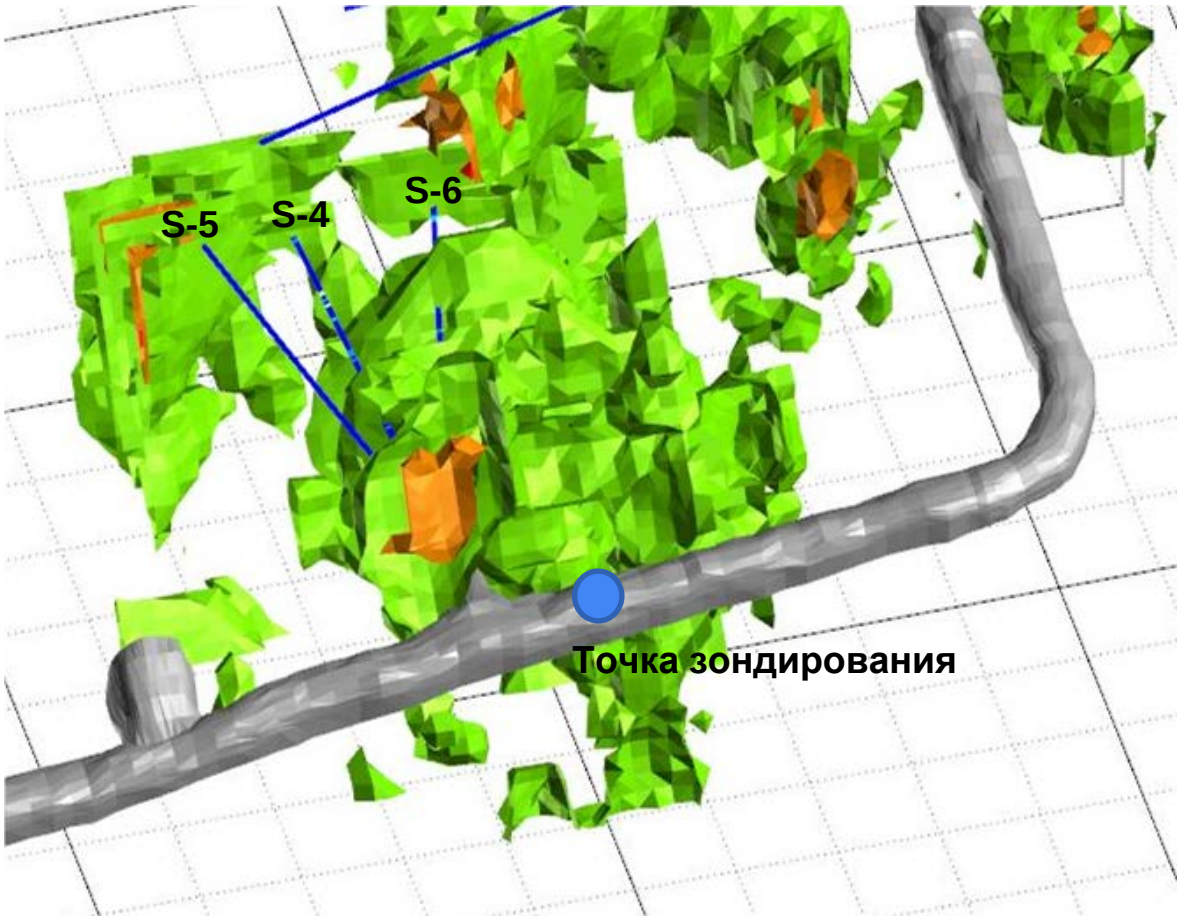

Рисунок 4.23 – Модель горного массива в виде изоповерхностей параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» в точке 3 и нанесенные скважины S-4, S-5, S-6

Данная точка зондирования и скважины были выбраны среди других материалов по причине наибольшего совпадения направлений исследования и близости пространственного расположения устьев скважин и центра расстановки сейсмоприемной аппаратуры (именуемой центром зондирования / точкой зондирования). Центр зондирования находился правее ниши, откуда проводилось бурение

геотехнических скважин, а угол между осью зондирования и скважинами составил около 22°.

Было выполнено два подхода к сравнению:

1) значения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» в виде облака точек были нанесены в модель Micromine. Визуально проводилось считывание значений параметра вблизи скважин S-4, S-5 поинтервально с усреднением, когда скважина проходила между несколькими точками параметра «Уровень разуплотнения, у. е.». Графики зависимости представлены на рисунках 4.24, 4.25;

2) изоповерхности со значениями параметра «Уровень разуплотнения, у. е.»: 1, 2, 3, ... 10 были импортированы в Micromine в виде каркасов, и были найдены точки пересечения этих десяти каркасов с геотехническими скважинами. Далее значения также были соотнесены с интервалами. Отсутствующие значения на интервалах были внесены в таблицу в виде 0. Графики зависимости представлены на рисунках 4.26–4.28.

Примечание. В обоих случаях значения количества трещин были приведены к шкале 0–10 ед., где 10 – максимальное количество трещин по данной скважине, 0 – трещины отсутствуют.

Рисунок 4.24 – График изменения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» и количества трещин на интервале, приведенное к шкале 0 – 10 ед. по скважине S-4

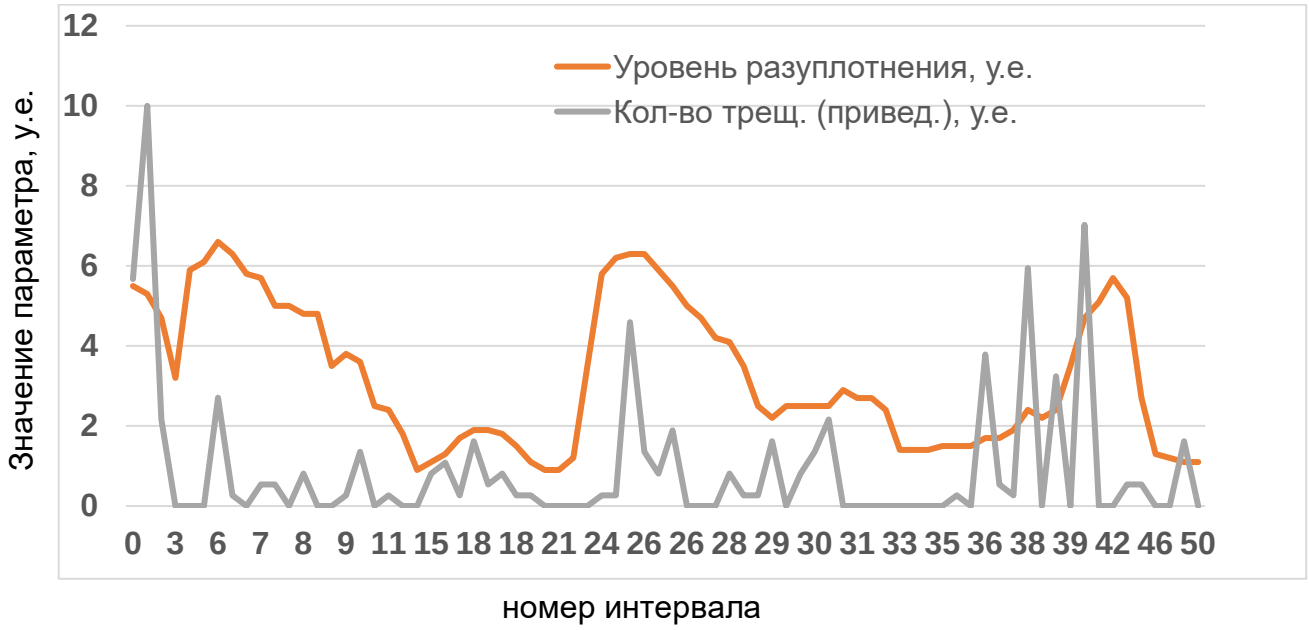

Рисунок 4.25 – График изменения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» и количества трещин на интервале, приведенное к шкале 0 – 10 ед. по скважине S-5

Рисунок 4.26 – График изменения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» (по пересечению с изоповерхностями) и количества трещин на интервале, приведенное к шкале 0 – 10 ед. по скважине S-4

Рисунок 4.27 – График изменения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» (по пересечению с изоповерхностями) и количества трещин на интервале, приведенное к шкале 0 – 10 ед. по скважине S-5

Рисунок 4.28 – График изменения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» (по пересечению с изоповерхностями) и количества трещин на интервале, приведенное к шкале 0 – 10 ед. по скважине S-6

Таким образом, по имеющимся данным геотехнического бурения скважин S-4, S-5, S-6 и геофизического исследования в точке № 3, найти формулу для прямого пересчета параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» в «Количество трещин в интервале, шт.» не представляется возможным по следующим причинам:

- местоположение устьев скважин и точки зондирования разнесены друг от друга более чем на 6 м (ширина базы приёма), а значит скважина не попадает в конус наибольшей чувствительности аппаратуры;
- ось зондирования и оси скважин не параллельны (угол превышает 5°), а значит, субвертикальные отражающие границы имеют более острый угол, часть энергии сигнала рассеивается, что уменьшает численные значения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» и, следовательно уменьшает показатели корреляции;

- с удалением от точки зондирования волны в высокочастотной области спектра гаснут сильнее, чем в низкочастотной, а значит, и разрешающая способность по глубине (раскрытие трещин) будет снижаться.

Однако, несмотря на несовпадение мест бурения/зондирования, существенной разницы в углах заложения относительно горизонта (и азимуте), можно отметить, что геофизический метод реагирует на наличие зон разуплотнения (трещиноватости) – тренд на рисунках выше прослеживается однозначно: скважина S-4, что подсекла меньшее количество трещин, имеет низкие значения параметра «Уровень разуплотнения, у. е.» на интервалах кернового бурения, а по скважинам S-5, S-6 не только заметно увеличение количества отражающих границ (неоднородностей - трещин), но и численных значений параметра (раскрытие трещин).

Целесообразно продолжить изучение данного вопроса в части определения ограничений и возможностей метода сейсмического зондирования с последующим пересчетом в инструментально определяемые характеристики горного массива.

Выводы по 4 главе

По результатам анализа выполненных исследований на действующих добывающих предприятиях были сделаны следующие выводы:

1. Система сейсмической локации для периодического прогноза структуры и параметров массива горных пород с автоматизированной процедурой определения скорости прохождения волн может успешно применяться в решении различных задач, связанных с обнаружением местоположения структурных нарушенностей (нарушений сплошности среды): зон контакта литологических разностей, карстовых полостей, геологических нарушений, зон флюидонасыщения, а также оценки устойчивости горного массива.

2. Система сейсмической локации для непрерывной оценки параметров распределения напряжений в отрабатываемом участке угольного массива выемочного столба лавы позволяет осуществлять мониторинг зон разуплотнения и косвенно

судить о распределении напряжений в исследуемой области, что, учитывая характеристики слагающего пласт угля, делает возможным прогноз местоположения зон риска развития геодинамических явлений.

3. Контроль эффективности гидрорыхления, по данным искусственного акустического сигнала, позволяет не только установить факт эффективности, но и регулировать время проведения гидрорыхления, а значит, повысить управляемость процессом.

4. Качественная оценка структуры горного массива реализуема методом сейсмического зондирования, но для перехода к количественной оценке трещиноватости и регламентным шкалам оценки устойчивости горного массива требуется проведение дополнительных исследований.

Полученный опыт применения системы «Микон-ГЕО» для периодической и непрерывной оценки структуры и параметров горного массива сейсмическим методом, позволяет сформулировать третье защищаемое положение:

«*Технология мониторинга состояния горного массива сейсмическим методом, прошедшая апробацию на угольных шахтах Кузнецкого бассейна и ряде рудных месторождений, позволяет решать ряд технологических задач, связанных с дистанционной оценкой структуры и параметров горного массива, а при наработке критериев, может применяться в качестве системы прогноза геодинамических явлений, согласно действующим регламентам в области промышленной безопасности*».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические решения по оценке структуры и параметров горного массива сейсмическим методом для заблаговременного оперативного обнаружения зон, представляющих опасность в процессе ведения подземных горных работ.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Разработан и реализован в программном обеспечении подход к оценке состояния устойчивости горного массива, а также определения местоположения зон возможного проявления опасных геодинамических явлений в условиях выемочного столба угледобывающей лавы, на основе системы сейсмического мониторинга, где источником сейсмических волн является рабочий орган комбайна.

2. Адаптирован для применения существующими аппаратными средствами и реализован в программном обеспечении метод контроля эффективности гидрорыхления угольного пласта по параметрам сейсмоакустического сигнала.

3. Разработан и реализован в программном обеспечении подход автоматического расчета скорости распространения продольной волны для применения в задачах сейсмического зондирования горного массива в рамках специализированной методики.

4. Продемонстрированы результаты применения системы сейсмической локации в задачах оценки структуры и параметров горного массива в шахтах и рудниках, с учетом разработанных подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений / Н. С. Булычев – М.: Недра, 1994. – 69 с.
2. Писецкий, В. Б. Результаты испытаний сейсмических систем контроля состояния устойчивости горного массива в процессах строительства автодорожных тоннелей в Китае / Писецкий, В. Б., Robert Huang, Ю. В. Патрушев, А. Э. Зудилин, М. П. Широбоков, **И. В. Шнайдер** // Сб. докладов XIII международной конференции инженерной геологии и геофизики. – Пекин. 2017.
3. Зыков, В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах / В. С. Зыков. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010. – 333 с. ББК 33.181. УДК 622.411.33. П71.
4. Алексеев, А. Д. Изменение трещинно-пористой структуры и газопроницаемости угля в условиях неравномерного объемного сжатия / А. Д. Алексеев, Н. В. Недодаев, Г. П. Стариков. УДК 622.831.4 // Внезапные выбросы угля и газа, рудничная аэрология: Науч. сообщ. / Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского. – М., 1990. – 178с.
5. Казикаев, Д. М. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: учебное пособие / Д. М. Казикаев, А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, М. А. Иофис. – М.: Горная книга, 2016. – 490 с.: ил.
6. Byerlee, J. D. Friction of rocks / J. D. Byerlee. – Pure Appl. Geophys. – 1978. – Vol.116.
7. Мащенко, А.В. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов: учеб. пособие / А. В. Мащенко, А. Б. Пономарев, Е. Н. Сычкина. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
8. Зерцалов, М. Г. Механика скальных грунтов и скальных массивов: учеб. / М. Г. Зерцалов. – М.: Юриспруденция, 2003. – 184 с.

9. Deere, D. U. The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie)/ Deere, D. U., Deere, D. W. – Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat. 1988 – ASTM Special Publication 984, 91-101.
10. Рац, М. В., Чебышев С. Н. Трещиноватость и свойства горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чебышев. – М.: Недра, 1970. – с. 164.
11. Петухов, И. М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа. / И. М. Петухов, А. М. Линьков / стр. 62. УДК 622.831.321.001// Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. М.: Недра, 1978. с. 62-91.
12. Ходот, В. В. Внезапные выбросы угля и газа / В. В. Ходот. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 263 с.
13. Авершин, С. Г. Горные удары / С. Г. Авершин. – М.: Углетехиздат, 1955. – 236 с.
14. Laubscher, D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design / D. H. Laubscher. – Trans. S. Afr. Inst. Min. Metal., 9(10). 1990.
15. Bieniawski, Z.T. Rock Mass Classification in Rock Engineering / Z.T. Bieniawski // Symposium on exploration for rock engineering. – Balkema: Rotterdam, 1976. – p. 97-106.
16. Bieniawski, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses / Z. T. Bieniawski // Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 1973 – v. 15. – p. 335-344.
17. Bieniawski, Z. T. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends / Z. T. Bieniawski / Comprehensive Rock Engineering, Volume 3: Oxford ; New York, 1993. – Pergamon Press, p. 553-573.
18. Bieniawski, Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering / Z. T. Bieniawski. – New York, 1989. – Wiley, XII. – 251 p. p.

19. Laubscher , D. H. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses. Foundations for Design / D. H. Laubscher, J. Jacubec. – Brisbane, 2000. – P.475-481.
20. Barton N. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support / N. Barton, R. Lien and J. Lunde // Rock Mechanics, 1974. – 6 (4). – pp. 189-236.
21. Barton, N. Application of Q-System and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses / N. Barton // Workshop on Norwegian Method of Tunneling. – New Delhi, 1993. – pp. 66-84.
22. Петросян, А. Э. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа: Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа / А. Э. Петросян, Б. М. Иванов. – М.: Недра, 1978. – С. 3-61.
23. Pisetski, V. B. Calibration of Seismic Attributes for Reservoir Characterization. Final Technical Report for D.O.E. / V. B. Pisetski, W. D. Pennington. – USA: Michigan Technological University, 2003. – pp.134-185.
24. Biot, M.A. Mechanics of incremental deformations / M.A. Biot. – New York: GU, 1965. – P. 430.
25. Хилтерман, Ф. Дж. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке / Ф. Дж Хилтерман. – ГЕРС, 2010. – 256 с.
26. Лапин, Э. С. «МИКОН-ГЕО» - система оперативного обнаружения и контроля состояния зон развития опасных геодинамических 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.
27. Лапин, Э. С. Экспериментальное исследование системы «Микон-Гео» на шахте «Алмазная» / Э. С. Лапин, А. В. Александрова, Ю. В. Патрушев // Безопасность труда в промышленности. –2012. – № 6. – С. 44-47.

28. Шериф, Р. Сейсморазведка: в 2-х т. / Р. Шериф, Л. Гелдарт. – Т. 2. – С. 39-40. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. 448 с., ил.
29. 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, Э. С. Лапин, А. Э. Зудилин, С. Э. Лапин, А. Г. Бабенко, И. В. Абатурова, Ю. В. Патрушев, А. В. Александрова, В. А. Шинкарюк // Материалы научного семинара «Геодинамика, Геомеханика и Геофизика». – Новосибирск, 2013.
30. 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.
31. 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** // VI Уральский горнопромышленный форум. III Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в горном деле», 2-4 декабря 2015 г.: сб. докл. [электронный ресурс]. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015.
32. Патрушев, Ю. В. Обзор методов и технологий сейсмических систем контроля состояния устойчивости горного массива в подземных условиях /Ю. В. Патрушев, **И. В. Шнайдер** // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки: сборник материалов I междунар. науч.-техн. конф. в рамках Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – С. 63-68.

33. Абдрахманов, М. И. Применение алгоритмов кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных / М. И. Абдрахманов, С. Э. Лапин, **И. В. Шнайдер. –** DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-27-44. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 6. – С. 27-44.

34. **Шнайдер, И. В.** Создание цифровой модели горного массива в процессе ведения проходческих работ методом сейсмозондирования / **И. В. Шнайдер,** М. И. Абдрахманов, С. Э. Лапин // Цифровая трансформация в горной промышленности и машиностроении: сборник докладов / ФГБОУ ВО «УГГУ» – Екатеринбург, 2022. – С. 60 – 63.

35. **Шнайдер, И. В.** Опыт применения специализированного программного обеспечения для автоматизированной обработки сейсмоданных и оценки состояния горного массива при строительстве транспортных тоннелей / **И. В. Шнайдер** // Уральская горнопромышленная декада: сборник докладов. – Екатеринбург: УГГУ, 2018. – С. 531 – 532.

36. Сергунин, М. П. Выполнение геофизических исследований на Талнахском и Октябрьском месторождениях сейсмическим методом / М. П. Сергунин, Т. П. Дарбинян, И. А. Костенко, С. В. Кузьмин // Горный журнал. – 2021. – № 2. – С. 11-15.

37. Король, В. И. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах / В. И. Король, А. В. Скобенко // Днепропетровск: НГУ, 2013. – 181 с.

38. Недзельский, А. И. Прогнозирование обрушения и мониторинг текущего состояния основной кровли в очистных забоях угольных шахт с пологим залеганием пластов / А. И. Недзельский, **И. В. Шнайдер**, Э. С. Лапин // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С.13-18. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-13-18

39. Молотков, Л. А. Эффективная модель трещиноватой среды с трещинами, описываемыми поверхностями разрывов смещений / Л. А. Молотков, А. В. Бакулин // Математические вопросы теории распространения волн: сборник научных трудов / XXIV Зап. научн. сем. ПОМИ, 218, ПОМИ. – СПб., 1994. – С.118–137.
40. Патрушев, Ю. В. Опыт применения сейсмической системы МИКОН-ГЕО в оперативном сопровождении проходческих работ на Северо-Уральском бокситовом руднике и в КУЗБАССе / Ю. В. Патрушев, А. В. Александрова, В. А. Шинкарюк, С. Б. Кузьмин, С. М. Чевдарь // Материалы конференции «Геомеханика в горном деле» в рамках V Уральского горнопромышленного форума. – Екатеринбург, 2013.
41. Патрушев, Ю. В. Функциональные испытания аппаратуры сейсмического контроля МИКОН-ГЕО на ОАО «Воркутауголь» СП шахта «Северная» / Ю. В. Патрушев, Д. Салендер // Уральская горная школа – регионам: сборник докладов междунар. научно-практ. конф. в рамках Уральской горнопромышленной декады / под общ. ред. Н. Г. Валиева. – Екатеринбург, УГГУ, 2014. – С. 519.
42. Писецкий, В. Б. Механизм разрушения осадочных отложений и эффекты трения в дискретных средах / В. Б. Писецкий // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – Екатеринбург, 2005. – № 1.
43. Писецкий, В. Б. 3D-3C сейсмическая технология (поляризационный сейсморадар) обнаружения зон развития опасных геодинамических процессов на стадиях проектирования и строительства горнотехнических сооружений / В. Б. Писецкий, С. В. Власов, А. Э. Зудилин, В. И. Самсонов, Ю. В. Патрушев, В. А. Шинкарюк // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: сборник материалов XV научно-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2011.

44. Писецкий, В. Б. Прогноз устойчивости горного массива на основе метода сейсмической локации в процессах строительства подземных сооружений / В. Б. Писецкий, С. В. Власов, В. П. Черепанов, И. В. Абатурова, А. Э. Зудилин, Ю. В. Патрушев, А.В. Александрова // Инженерные изыскания. – 2014. – № 7. – С. 46-51.
45. Писецкий, В. Б. Прогноз и контроль развития опасных инженерно-геологических процессов в подземном строительстве / В. Б. Писецкий, И. А. Савинцев, Ю. В. Патрушев, С. М. Чевдарь // Горный журнал. Руда и металлы. – М., 2015. – № 9. – С. 11-16.
46. 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, А.Э. Зудилин, Ю. В. Патрушев, С. Э. Лапин, С. В. Власов // Инженерная геофизика-2015: сборник трудов 11-я научно-практ.конф. и выставки с междунар. участием / EAGE. – Геленджик, 2015. – Режим доступа: //earthdoc.org/publication/publicationdetails/ ?publication=80055
47. Писецкий, В. Б. Сейсмический мониторинг процессов строительства и эксплуатации подземных сооружений на основе системы МИКОН-ГЕО / В. Б. Писецкий, И. В. Абатурова, С. В. Власов, М. С. Мартыненко, А. Э. Зудилин, Ю.В. Патрушев // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. Вып. 17. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (19-20 марта 2015 г.). – М.: РУДН, 2015. – С. 190-194.
48. Протодьяконов, М. М. Давление горных пород и рудничное крепление / М. М. Протодьяконов. – М.: 1930. – Ч. 1. – 219 с.
49. Фадеев, А. Б. Прочность и деформируемость горных пород / А. Б. Фадеев, Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

50. Шинкарюк, В. А., Методика и результаты моделирования параметров НДС в окрестности строительства тоннелей / В. А. Шинкарюк, Ю. В. Патрушев // Уральская горная школа – регионам: сборник материалов междунар. научно-практ. конф. в рамках IX Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. С. 165 – 167.
51. Яковлев, Д. В. Мониторинг безопасности угольных шахт, геодинамические риски, контроль состояния массива, технические средства контроля, сейсмические системы контроля, геофизические наблюдения, деформационные датчики, безопасность горных работ / Д. В. Яковлев, Т. И. Лазаревич, А. Н. Поляков, С. Н. Мулев, А. С. Харкевич, С. Ф. Панин, Д. А. Поляков // Методические указания. – СПб.: 2012. – С. 82.
52. Hanson, D. Seismic Tomography Applied to Site Characterization / D. Hanson, K. Haramy, D. Neil // Geo-Denver 2000 Conference. – Denver (CO), 2000.
53. Junlong, Shang, Advanced Predication of Geological anomalous Body Ahead of Laneway Using Seismic Tomography Technique / Shang Junlong, Luo Xianwei, Gao Feng, Hu Jianhua, Zhou Keping // ISSSE in China, 2012. – С. 324-330.
54. Абдрахманов, М. И. Создание цифровой модели структуры выемочного столба лавы методом сейсмозондирования / Абдрахманов М. И., Лапин С. Э., **Шнайдер И. В.** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-2. – С. 148–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_148.

Патентные документы

55. Patent, № 5,796, 678. US / Method for Determining the Presence of Fluids in a Subterranean Formation, 1998 / V. Pisetski.
56. Patent. № 6, 498, 989 B1. US / Method for predicting dynamic parameters of fluids in a Subterranean reservoir, 2002 / V. Pisetski, V. Kormilcev, A. Ratushnak.

Авторефераты диссертации

57. Патрушев Ю. В. Дистанционная оценка и прогноз развития опасных инженерно-геологических процессов при строительстве тоннелей: специальность 25.00.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Патрушев Юрий Владимирович. – Екатеринбург: УГГУ, 2017.
58. Власов С. В. Методика и технология 3D-3C сейсмических исследований геологического строения и мониторинга состояния устойчивости горного массива в процессе проходки транспортных тоннелей (в условиях г. Большой Сочи) : специальность 25.00.10: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – Екатеринбург: УГГУ, 2012.
59. Шинкарюк В. А. Оценка параметров состояния устойчивости горного массива в процессе ведения подземных работ на основе сейсмических и инженерно-геологических данных: специальность 25.00.10: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – Екатеринбург: УГГУ, 2013.
60. Писецкий В. Б. Прогноз флюидодинамических параметров нефтегазоносных бассейнов по сейсмическим данным: специальность 25.00.12: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. – Екатеринбург: УГГУ, 2005.

Нормативно-правовые акты

61. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 507 от 08.12.2020 г.

62. 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 № 515 от 30.12.2020.

63. СП 91.13330.2012. Свод правил. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80.

Стандарты

64. ГОСТ Р 57717-2017. Безопасность в угольных шахтах. Термины и определения – Введ. 26.09.2017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 28 с.

Приложение 1

РЕСУРС
ММК-УГОЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью
«Шахта им. С.Д. Тихова»
652515 Кемеровская область
Ленинск-Кузнецкий
Зварыгина, 18 А
Тел.:+7(38456) 2-97-16
Факс: +7(38456) 2-97-16
E mail: tihova@mmk-coal.ru

18.09.2023 № 2210

ОТЗЫВ

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА «МИКОН-ГЕО»

В августе 2023 года, при проходческих работах в магистральном вентиляционном штреке №1 (далее – МВШ1) было выполнено сейсмическое зондирование с груди забоя с целью обнаружения потенциально опасных зон. Также в направлении проектируемой трассы выработки было выполнено дополнительное зондирование с параллельного штрека, в крест направлению движения забоя МВШ1.

По результатам обработки сейсмоданных были выделены две зоны риска в радиусе 50м от груди забоя, угрожающие безопасности проведения горнопроходческих работ. В указанные зоны было выполнено опережающее бурение скважин, в ходе которого были обнаружены включения вмещающих пород и скопления метана. Также, в ходе выполнения бурения, произошла разгрузка призабойной области горного массива, сопровождающаяся характерными одиночными звуками.

Отметим, что значительный вклад в упрощение обработки и точность определения искомых объектов внесла функция автоматического расчета скорости прохождения волны по сейсмограммам, применяемая в последней версии программного обеспечения X-TNL.

Также нашим предприятием применяется система «Микон-ГЕО» для непрерывной оценки параметров угольного массива в очистном забое при механизированном способе ведения работ, в качестве системы геомониторинга, где нашла свое применение методика интерпретации, предложенная Шнайдером И. В.

Применение сейсмического метода для оценки структуры и параметров горного массива несомненно является перспективным направлением и наше предприятие выражает крайнюю степень заинтересованности в дальнейшем развитии методической и программной базы системы «Микон-ГЕО».

Главный инженер **А.В. Утюпин**

Приложение 2

георезонанс

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ГЕОРЕЗОНАНС»
ОГРН 1107746240975 ИНН/КПП 7707722821/770701001
127473, г.Москва, ул.Селезнёвская, д.15, стр.1, каб.5
тел.+7(499) 968-42-68, e-mail: info@georez.ru

07.02.2020 № 12

ООО "Информационные горные технологии"

Отзыв о результатах сейсмических исследований

Исследование методом сейсмической локации массива проводились в вентиляционном штреке 3-3-1 бис и конвейерном штреке 3-3-1 бис шахты «Распадская-Коксовой» в октябре-ноябре 2019 года.

Для проведения сейсмических исследований применялся аппаратно-программный комплекс «Микон–ГЕО».

Целью исследований было определение в горном массиве зон напряжений (концентрации и деконцентрации) и их прочностных характеристиках (модуль Юнга) в области влияния действующих скважин заблаговременной дегазации с применением технологии плазменно-импульсного воздействия (ПИВ), а так же в планируемых областях бурения скважин для ПИВ.

После обработки полевых сейсмических материалов и интерпретации полученных данных, были выделены зоны повышенной трещиноватости и зоны с плотными и крепкими породами.

Полученные результаты интерпретации сейсмических исследований предоставили специалистам ООО «Георезонанс» понимание результатов эксплуатации действующих скважин ПИВ и определение будущих результатов на новых скважинах.

На основании результатов интерпретации были выявлены области с повышенной трещиноватостью вокруг скважин П1-1 и П1-2, что является результатом проведения ПИВ.

Скважина П1-1бис после окончания бурения вышла "сухая", без признаков наличия жидкости. Результаты сейсмических исследований показали, что П1-1бис попала в зону прочного горного массива с повышенным значением модуля Юнга, что не даёт возможности сформировать депрессионную воронку вокруг скважины. В тоже время, ближе к горной выработке выявлена обширная зона с повешенной трещиноватостью, куда фильтруется метан. Так же возможно наличие связи этой зоны с горной выработкой через скважины пластовой дегазации.

По результатам сейсмических исследований новая скважина П1-3 не попала ни в одну из аномальных зон. После проведения ПИВ в скважине П1-3 из-за неперекрития верхних водоносных горизонтов при бурении, установить эффективность воздействия не представляется возможным. Было бы целесообразно, провести повторное исследование методом сейсмической л

окации в области скважин П1-3 и П1-4 с целью определения наличия изменения в горном массиве, возникновения зон напряжений и их прочностных характеристик после проведения ПИВ.

Применение системы «Микон-ГЕО» для исследования состояния горного массива с целью уточнения работы действующих скважин заблаговременной дегазации в угольном пласте считаем полезным.

Генеральный
директор Н.П. Агеев

исп.: гл.инженер проектов Десяткин А.С.
тел.: +7 (499) 968 42 68 доб. 132

Приложение 3

«Шахта «Южная» (филиал АО «Черниговец»)
Ул. Южная, 1, п. Разведчик, Кемеровский район, Кемеровская область, Россия, 652432
Тел./факс: (38-445) 96-6-38, 96-3-55
Office@uznaya.hcsds.ru, sds-ugol.ru

От 30.05.19 № 504

Начальнику Управления
«Кузбасское»
ООО «ИНГОРТЕХ»
А.Н. Кокореву

Уважаемый Алексей Николаевич!

В период с 19.04.2018 по 22.04.2018 были проведены сейсмические исследования мобильным комплексом "Микон-ГЕО" участка Монтажной камеры 10Л для оценки влияния внешнего воздействия техногенного характера. Исследования проводились в два этапа (до и после внешнего воздействия). Результаты исследования, представленные в виде прогноза, подтвердили изменение состояния горного массива (изменение положения зон разуплотнения до и после воздействия). Данные результаты, так же подтверждены двумя независимыми компаниями, проводившими исследования в этот же промежуток времени другими методами.

Мобильный комплекс «Микон-ГЕО» может быть использован для оперативного прогнозирования зон разуплотнения и состояния горного массива, для прогнозирования условий проведения выработок в сложных горно-геологических условиях.

Главный инженер
Шахта «Южная» (филиал АО «Черниговец») **С.Н. Якунин**

Исп.: Тельбуков М.Ю.
Тел. (384-45) 96-532
n.davydyuk@uznaya.hcsds.ru

Приложение 4

РАСПАДСКАЯ
УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ
ПАО «Распадская»

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОВЕДЕННОГО ИСПЫТАНИЯ
ПЕРЕНОСНОГО КОМПЛЕКТА «МИКОН-ГЕО»
В УСЛОВИЯХ ПАО «РАСПАДСКАЯ»

Для выявления местоположения потенциально опасных зон 10.04.2019 были проведены сейсмические исследования мобильным комплексом "Микон-ГЕО" на проходческом участке Вентиляционный Штрек 5а-7-36. Прогноз, выполненный по результатам исследования подтвердился в полной мере. Были обнаружены две зоны разуплотнения массива на расстоянии 65 и 92 метров перед грудью забоя. Первая зона (65м) была подтверждена повышенной концентрацией газа при подходе проходческого комбайна к данному участку. Вторая зона (92м), проходящая через все сечение выработки, подтверждена затягиванием бурового инструмента в массив при бурении разгрузочных скважин, при вскрытии проходческим комбайном обнаружено нарушение (зона дезинтеграции) проходящее через всю площадь груди забоя штрека.

Система "Микон-ГЕО" может применяться для обнаружения и уточнения зон с разуплотнения массива природного и техногенного генезиса, а также поиска полостей с флюидом (газом / водой).

Начальник участка АБ *В.В. Шустов*

Зам. начальника участка АБ *Е.А. Плотников*

Публичное акционерное общество «Распадская»
ул. Мира, д. 10б, г. Междуреченск, Кемеровская область, Россия, 652870
тел. (38475) 4-60-83, 4-60-91, факс (38475) 4-60-02 e-mail raspadskaya@evraz.com
ОКВЭД 11312, ОКПО 05019458, ИНН /КПП 4214002316/421650001