

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»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург
2024

Работа выполнена на кафедре горного дела ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Научный руководитель **Валиев Нияз Гадым оглы** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Официальные оппоненты: **Голик Владимир Иванович** - доктор технических наук, профессор кафедры горного дела ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Аксенов Анатолий Аркадьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией горных ударов АО «ВНИМИ» (Уральский Филиал)

Ведущая организация ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН)

Защита состоится «06» июня 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д **24.1.503.01**, при ФГБУН Институте горного дела Уральского отделения РАН, по адресу 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

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

Автореферат разослан «___»_____ 2024 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Панжин А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: 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.

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.

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 сейсмондирования, 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.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о публикациях и об апробации работы.

Глава 1 содержит результаты анализа публикаций, касающихся применяемых в настоящее время методов и технологий оценки состояния горного массива в процессах ведения подземных работ.

Согласно международной практике, наиболее эффективными являются геофизические методы и в частности, сейсмический, как наиболее точно описывающий не только параметры устойчивости, но и структуру горного массива.

В настоящий момент 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. Менее распространены системы сейсмической локации, позволяющие не только определить наличие ослабленных зон, но и указать местоположение зон риска с точностью до нескольких метров.

Примеры применения системы сейсмической локации, при строительстве транспортных тоннелей в г. Сочи и угольных шахтах Кузнецкого бассейна, для оценки структуры и параметров устойчивости горного массива подтверждают эффективность метода в процессе строительства транспортных тоннелей, а также при проведении подземных выработок в шахтах и рудниках.

Особенностью применения названных выше систем является периодичность выполнения исследований. Непрерывный мониторинг состояния массива в процессе строительства подземного сооружения с упомянутыми системами невозможен.

С увеличением глубины производства горных работ значительно повышается вероятность возникновения геодинамических явлений.

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 посвящена рассмотрению параметров горного массива, влияющих на характеристики устойчивости введённой системы «массив пород – горная выработка – крепь» (далее - Система) и

подходу к текущему прогнозу местоположения опасных по геодинамическим явлениям зон.

Ведение горных работ как техногенное воздействие на среду формирует новую систему, образующуюся 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 и очистных работ, типы и схемы крепления массива).

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.

Следующей особенностью горного массива является то, что ещё в своём изначальном положении он находится в напряжённом состоянии, которое называют естественным. Будем считать естественные напряжения, действующие в горном массиве, вторым параметром, оказывающим влияние на устойчивость Системы.

Собственное напряженно-деформированное состояние массива горных пород претерпевает существенные изменения в зоне влияния подземной инфраструктуры, что зачастую приводит к опасным явлениям. Примем техногенное воздействие на горный массив в качестве третьего параметра, оказывающего влияние на устойчивость Системы.

В качестве четвертого параметра отметим уровень энергонасыщения, представляющий собой запас потенциальной энергии упругой деформации массива, возникающий под действием полей естественных и техногенных напряжений.

Наиболее часто в шахтах и рудниках регистрируют геодинамические явления, относящиеся к классам «горный удар» и «выброс угля (породы) и газа». Существующая теория по динамическим явлениям позволяет определить следующие основные контролируемые показатели, свидетельствующие о готовности

исследуемой области массива к горному удару в зоне влияния очистного участка угледобывающей лавы:

- 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.).

Определим основные контролируемые параметры, позволяющие судить о подготовке горного массива к внезапному выбросу угля и газа, исходя из имеющихся представлений (также в зоне влияния очистного участка угледобывающей лавы):

- 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 нарушений 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 1 схематично представлен исследуемый участок выемочного столба угледобывающей лавы размером 200х200 м.

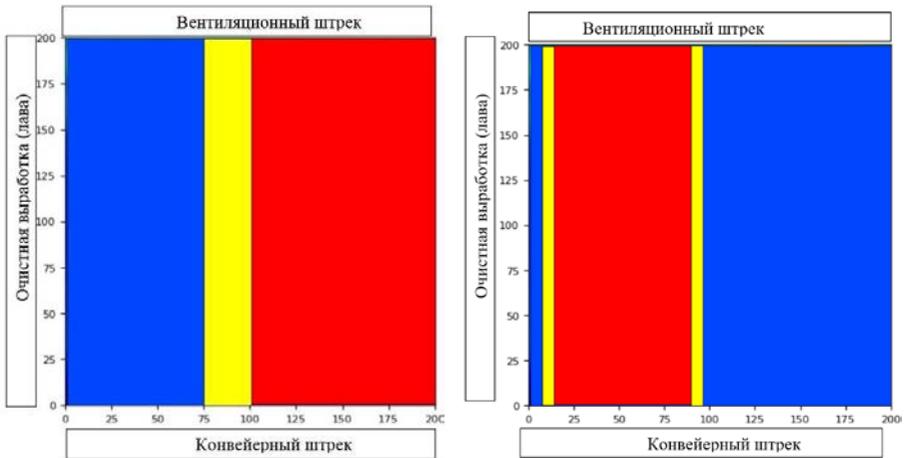


Рисунок 1 – Схема распределения напряжений в исследуемой зоне угольного пласта при готовности к горному удару (слева) и к внезапному выбросу (справа), где красным цветом - местоположение зоны растягивающих напряжений, синим – сжимающих напряжений (зона повышенного горного давления), желтым – переходная зона

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. Атрибуты поля отраженных волн имеют корреляционную связь с параметрами неоднородностей, которые встречает прямая волна на своем пути, что обосновано в диссертационной работе д.г.-м.н. профессора Писецкого В. Б. «Прогноз флюидодинамических параметров нефтегазоносных бассейнов по сейсмическим данным».

Проследив связь горное давление – структура массива – атрибуты волны, с помощью технических систем, выполняющих анализ параметров упругих волн, становится возможным решение задачи оценки напряжений в горном массиве, а следовательно, и прогноза местоположения зон рисков возникновения динамического проявления горного давления.

В задачах геомониторинга в ряде угольных шахт Кузбасса применяется система контроля состояния горного массива «Микон-

ГЕО», обеспечивающая локацию источников отражения сейсмических волн в режиме сейсмозондирования.

Аппаратная часть системы для реализации предлагаемого метода непрерывного (текущего) прогноза состояния горного массива, выполняющая регистрацию волнового пакета, состоит из тех же технических средств, что применены в системе «Микон-ГЕО» в исполнении для периодического прогноза состояния горного массива. Существенные изменения касаются методического обеспечения и программного обеспечения верхнего уровня. Ключевое отличие системы текущего прогноза заключается в источнике сейсмических волн, представленного 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 (D), усл. ед.» (рис. 2), разработанного д.г.-м.н. Писецким В. Б.

В данном случае (см. рисунок 2) 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, отсчет ведется от сопряжения конвейерного штрека и очистной выработки. 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 численные значения параметра D , усл. ед., описывающего области разуплотнения массива: красным – наибольшего, синим –

областях синего цвета, обусловленные исключительно полем действующих напряжений.

На основе исследованных теоретически обоснованных взаимосвязей и полученных в условиях действующих угольных шахт эмпирических данных, были выделены и описаны шесть ключевых состояний исследуемой области выемочного столба лавы. Для примера, два из них приведены на рисунке 3, 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.

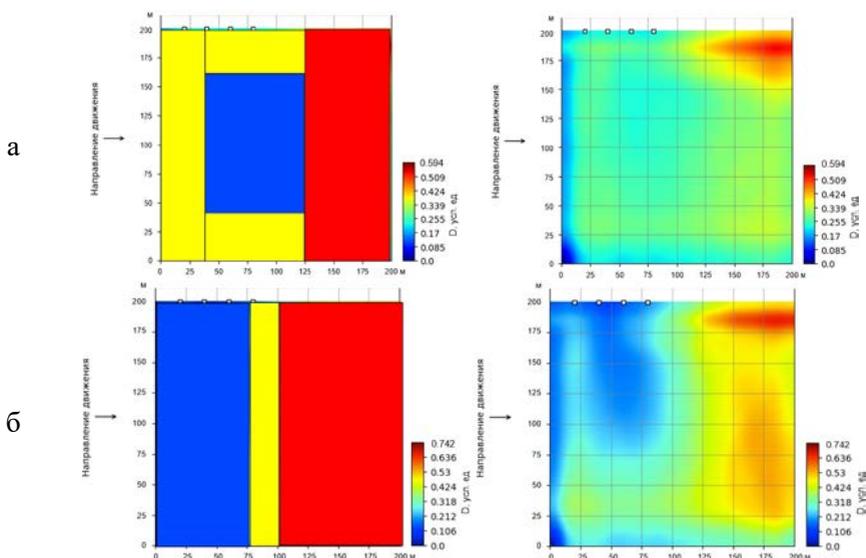


Рисунок 3 – Примеры ключевых состояний горного массива, где а – удовлетворительное состояние, б – приближение зоны повышенного горного давления к груди забоя

Локация зон разуплотнения (дезинтеграции) позволяет в каждый момент времени осуществлять относительную оценку распределения напряжений в горном массиве и заблаговременно реагировать, вплоть до изменения темпов очистных работ, то есть, корректируя ситуацию на уровне технологии.

Таким образом, на основе применения технологии сейсмолокации, при использовании воздействия рабочего органа комбайна в качестве источника сейсмических волн, с учётом рисков возникновения геодинамических явлений в системе «массив пород – горная выработка – крепь», возможна непрерывная оценка устойчивости горного массива в автоматическом режиме.

Глава 3 содержит описание методики применения системы сейсмической локации в задачах оценки структуры и параметров горного массива при производстве работ в условиях угольных шахт и рудников, с учетом применения подхода к автоматизированному расчету скорости распространения продольной волны.

Система сейсмической локации для периодического прогноза структуры и свойств горного массива позволяет заблаговременно обнаруживать объекты риска:

- 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.

Благодаря сотрудничеству производственных и научных коллективов, с учетом известной проблематики и имеющегося опыта, была разработана и с 2012 года запущена в серийное производство система «Микон-ГЕО» (далее - Система).

Разработка методической и программной части была выполнена сотрудниками кафедры геоинформатики государственного горного университета под руководством доктора геолого-минералогических наук, заслуженного геолога РФ, профессора Писецкого Владимира Борисовича. Аппаратно Система представлена цифровыми трехкомпонентными сейсмоприемниками и носимой сейсмостанцией с комплектом соединительных кабелей и датчиком синхронизации. В основу оценки структуры и параметров горного массива положен метод отраженных волн. Применение источников импульсного типа

(кувалда, взрывчатое вещество) обеспечивает дистанцию обнаружения объектов до 200 м.

Одним из основных факторов, влияющих на корректность результатов, при использовании Системы, является средняя скорость распространения продольной волны в исследуемом объеме горного массива, принимаемая для проведения расчетов при обработке сейсмограмм. В случае ошибочно выбранного значения, прогнозируемое местоположение искомых объектов будет определено неправильно. Скорость распространения упругой волны в образце можно определить при исследовании кусков породы в лаборатории с последующим пересчетом на среднюю скорость в массиве или путем проведения измерений непосредственно в выработке, что более объективно, так как способ учитывает особенности среды именно в исследуемой области горного массива.

Предложен подход, в котором программное обеспечение в автоматическом режиме двумя различными способами (алгоритмами) обрабатывает сейсмограммы и предлагает оператору набор из нескольких значений скорости распространения продольной волны на выбор.

Суть первого способа заключается в следующем. Для каждой записанной трассы определяется первый значимый экстремум, величина которого по модулю выше уровня шума. Зная расстояние между датчиками 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 распространения продольной волны. Далее трассы располагаются наборами, в которых расстояние между источником и приемником одинаковое. Для каждой группы находится агрегированный экстремум, как среднее арифметическое всех экстремумов сейсмограмм, входящих в группу. Из полученных значений формируется новый набор, содержащий значения экстремумов, упорядоченный по признаку увеличения расстояния между источником и приемником и определяется разница во времени (dt) между найденными экстремумами. Далее по полю точек экстремума строится линейная модель - годограф прямой волны (рис.

4) и полученная скорость распространения волны предлагается пользователю по завершении процедур автоматического расчета.

Суть второго способа, также реализованного в рамках описанного подхода, заключается в следующем. Сейсмические трассы сортируются по увеличению расстояния между источником и приемником. Выбираются пять трасс, где это расстояние максимально и выполняется поиск времени первого вступления между точкой пересечения трассы с уровнем собственных шумов аппаратуры и первым экстремумом (рис. 4). Для оценки окончательного значения используется медианное значение скорости для полученного набора.

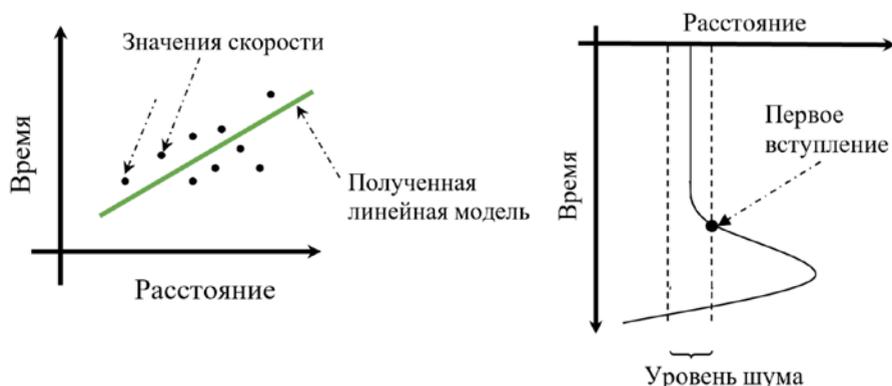


Рисунок 4 – Построение годографа прямой волны (слева), момент первого вступления (справа)

Объединив оба подхода в один алгоритм, в котором по линейной модели и автоматическому поиску первого вступления рассчитывается набор скоростей (по пяти наиболее удаленным сейсмограммам и по линейной модели), 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 процедуре обработки сейсмоданных специализированным программным обеспечением, которое создает цифровую модель исследуемой области горного

массива в виде параллелепипеда размерами (50x100x200) м, в изображении следующих параметров:

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

Примеры трехмерной модели и двумерных срезов модели исследуемой области массива представлены на рисунке 5.

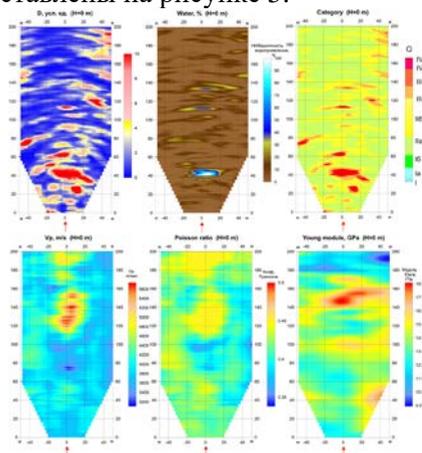
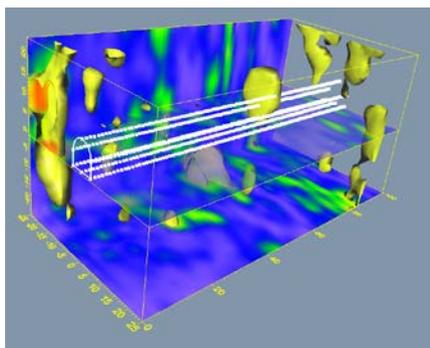


Рисунок 5 – Примеры трехмерной модели и двумерных срезов модели исследуемой области массива

При регулярном применении метода сейсмондирования, с учетом корректно определенной скорости прохождения упругой волны, в условиях конкретного месторождения и подстройке выделенных категорий устойчивости с помощью результатов кернового бурения, может быть достигнута точность прогноза, близкая к инструментальным методам.

Применение подхода к автоматическому расчету скорости прохождения волны, реализованного в программном обеспечении, позволяет выполнять камеральную обработку одной точки зондирования 1 час 45 минут, вместо 2-х часов, что позволяет достичь экономии средств в размере 8756 рублей в месяц и сокращает затраты времени на 8%.

Глава 4 содержит описание результатов применения системы сейсмической локации, с учетом предложенных подходов, в задачах оценки структуры и параметров горного массива в шахтах и рудниках.

Существует практика заблаговременной дегазации пологих угольных пластов скважинами большого диаметра, пробуренными с дневной поверхности. Оценить структуру и параметры угольного пласта для выбора оптимального расположения скважин, в случае имеющихся оконтуривающих выработок, позволяет система «Микон-ГЕО» для периодического прогноза структуры и свойств горного массива, с внедренным подходом к автоматизированному расчету скорости распространения продольной волны.

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. по заказу ООО «Георезонанс», проводивших работы по предварительной дегазации. После обработки полевых материалов и интерпретации полученных данных было выделено несколько зон повышенного разуплотнения массива и две зоны повышенной прочности (рис. 6), объясняющие причины успешного выхода в рабочий режим только трёх скважин из пяти.

По результатам проведенных работ были сделаны следующие основные выводы:

- время камеральной обработки данных, благодаря применению функции автоматического расчета скорости распространения продольной волны, удалось сократить более, чем на 8% без потери качества прогноза.
- 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.

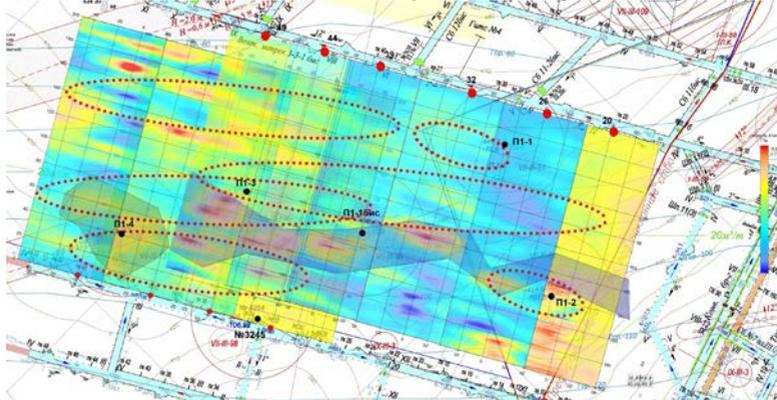


Рисунок 6 – Срезы модели горного массива в изображениях параметра «Модуль Юнга» с нанесенными зонами разуплотнения (овалы красного цвета) и повышенной прочности пород (штриховка в оттенках синего)

Осенью 2019 года в процессе ведения проходческих работ по подготовке выемочного столба лавы в угольной шахте, было выполнено зондирование с груди забоя. Исследование горного массива было выполнено на дистанцию 100 метров от места установки сейсмоприемников.

В ходе обработки и интерпретации полученных данных были выделены две зоны риска (рис. 7), расположенные на проектном пути строящейся выработки.

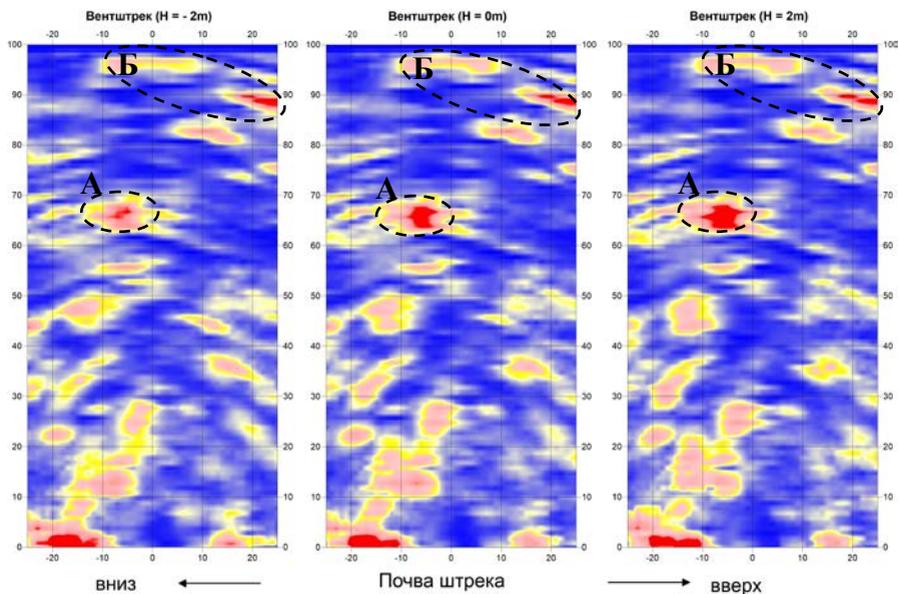


Рисунок 7 – Срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения, усл. ед.»

Первая зона, обозначенная литерой «А», расположенная в интервале 60–70 м от груди забоя, представляла собой зону разуплотнения, заполненную метаном. 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. 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 подготовки выемочного столба лавы параллельно ведущейся выработкой – конвейерным штреком. Факт проходческих работ подтвердил прогноз, что позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве прогноза и применимости процедуры автоматического расчета скорости распространения продольной волны в задачах сейсмического зондирования горного массива в рамках методики, реализованной в системе «Микон-ГЕО».

Аналогичные исследования были проведены в условиях алмазодобывающего рудника в рамках решения задачи по прогнозированию зон риска внезапных выбросов породы и газа, приуроченных к залежам газонасыщенных пористых бежевых доломитов. В процессе ведения работ была подтверждена чувствительность сейсмической волны к изменениям структуры горного массива и применимость внедренного подхода к расчету скорости, однако решение задачи прогноза зон риска внезапных выбросов породы и газа требует более тщательной проработки и дальнейших исследований.

Обработка выемочного столба угледобывающей лавы механизированным способом является одним из наиболее часто встречающихся способов добычи, применяемых в шахтах Кузбасса. Мониторинг состояния массива горных пород в ближней зоне влияния выработок очистного забоя позволяет выполнять контроль состояния исследуемой области горного массива в непрерывном режиме. 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 подходом, описанным в главе 2.

Рассмотрим несколько примеров, полученных в процессе работы действующих очистных забоев.

Состояние объекта № 1, где сейсмоприемники были установлены в вентиляционном штреке, в изображении параметра «Уровень разуплотнения (D), усл. ед.», а именно среза модели на уровне почвы, было интерпретировано как *опасное* по наличию признаков готовности горного массива к реализации горного удара (рис. 8).

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.

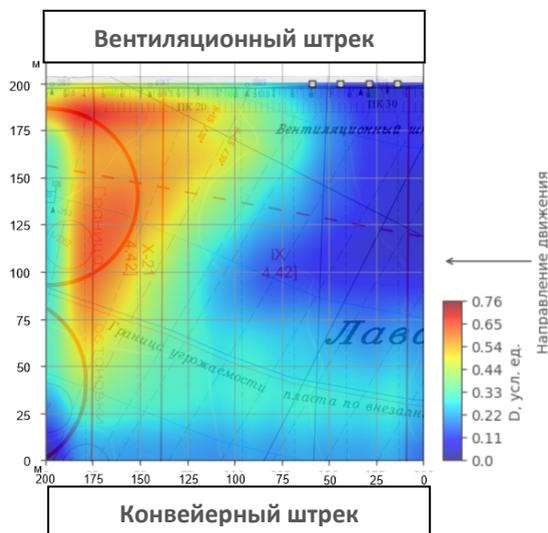


Рисунок 8 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (D), усл. ед.», объект № 1

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, добыча была приостановлена до момента нормализации напряжений.

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 сейсмоприёмника произошел вывал борта конвейерного штрэка (рис. 9).

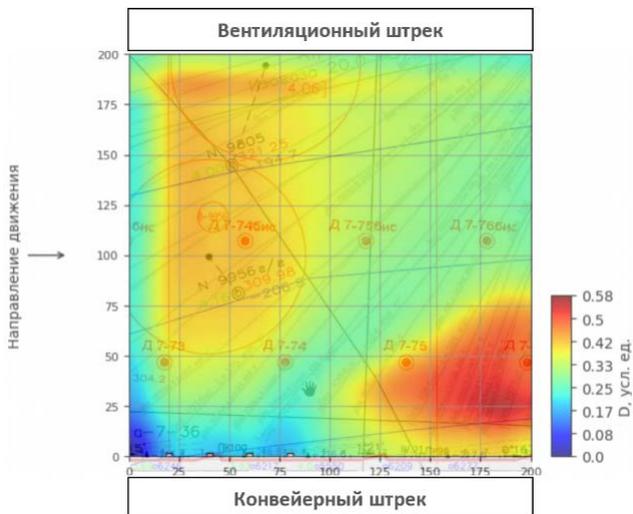


Рисунок 9 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (D), усл. ед.», объект № 2

Случившийся вывал был обусловлен повышенным горным давлением в локальной области, отображенной на рисунке 9 зоной синего цвета, и явился сигналом для укрепления кровли конвейерного штрека и противоположного борта.

На объекте № 3 (рисунок 10), на интервале (25-75) м, считая от сопряжения очистной выработки и вентиляционного штрека, в зоне синего цвета, произошло внезапное пучение почвы, способствовавшее резкому уменьшению сечения выработки.

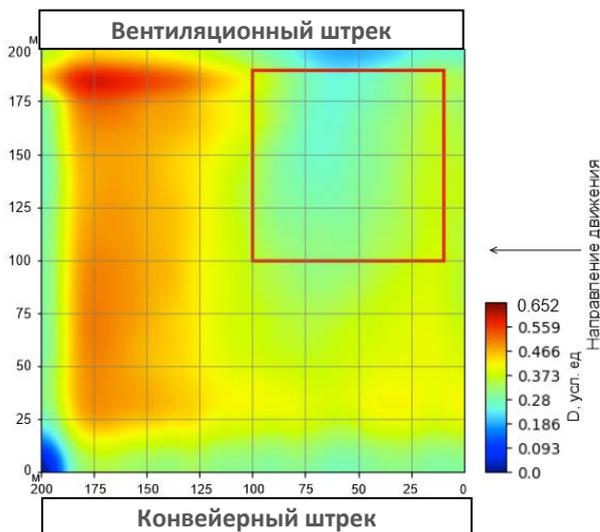


Рисунок 10 – Горизонтальный срез модели горного массива в изображениях параметра «Уровень разуплотнения (D), усл. ед.», объект № 3

Так, с учетом существующих представлений о расположении характерных областей в исследуемом участке выемочного столба лавы в ближней зоне влияния очистных работ, по данным АПК «Микон-ГЕО», можно осуществлять прогноз устойчивости приконтурных областей с целью обеспечения безопасности и корректировки технологии производства добычных работ.

При наработке критериев и апробации метода с привлечением отраслевых институтов, возможно применение системы «Микон-ГЕО» в качестве системы прогноза удароопасности при отработке пологих угольных пластов по простиранию механизированными средствами.

Еще одним возможным применением системы сейсмической оценки состояния горного массива является контроль эффективности гидрорыхления угольного пласта по параметрам сейсмоакустического сигнала. Согласно действующей нормативной документации, гидрорыхление применяется для приведения участка угольного пласта в неудароопасное состояние. Суть метода заключается в оценке амплитуды и частотного состава тресков, возникающих в пласте при нагнетании жидкости под высоким давлением. Основываясь на

рекомендациях из нормативной документации и результатах проведенных экспериментов, был определен ряд параметров, рассчитываемых по данным сейсмических наблюдений, позволяющих выполнять оценку эффективности гидрорыхления.

После наработки пороговых значений вышеуказанных параметров метод позволяет оперативно, в течение процесса нагнетания жидкости в угольный пласт, определять эффективность гидрорыхления.

Экспериментально полученные амплитуды сигналов, зарегистрированные на протяжении 40 минут нагнетания жидкости в угольный пласт, приведены на рисунке 11.

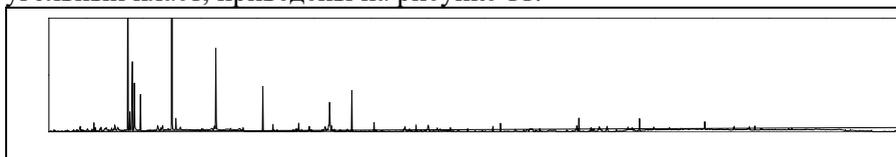


Рисунок 11 – Амплитуды сигналов, зарегистрированных в процессе гидрорыхления

Проведенные исследования показали, 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 доказывает применимость адаптированной методики.

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.

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Шнайдер, И. В. Выявление водообильных зон в окрестностях выработок на руднике «Таймырский» / Дарбинян Т. П., Былков А. В., Кузьмин С. В., Шнайдер И. В. // Горный журнал. – 2023 - №6. – С32–39. DOI: 10.17580/gzh.2023.06.05

2. Шнайдер, И. В. 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.

3. Шнайдер, И. В. 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

4. Шнайдер, И. В. 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.

5. Шнайдер, И. В. 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.

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

6. 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.

7. 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.

8. Шнайдер, И. В. 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. Ширококов, И. В. Шнайдер // Сб. докладов XIII международной конференции инженерной геологии и геофизики. – Пекин. 2017.

9. 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.

10. Шнайдер, И. 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.