

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Аксенов Захар Владленович

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО
ИСКУССТВЕННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СИГНАЛАМ ДЛЯ УСЛОВИЙ
ШАХТ АО «СУЭК-КУЗБАСС»**

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

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой ФизГео

Винников Владимир Александрович

Москва – 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время регистрируется увеличение темпов и объемов добычи угля в России, в том числе за счет перехода к разработке более глубоких горизонтов, при этом прогнозируется снижение объемов добычи угля открытым способом ввиду планомерного ужесточения экологических требований. Следует отметить, что по мере увеличения глубины разработки и скорости подвигания очистных забоев вследствие применения современного высокопроизводительного очистного и горнопроходческого оборудования многократно возрастает опасность негативного проявления повышенного горного давления и, как следствие, возникновения геодинамических явлений в угольных шахтах. Особую актуальность приобретает необходимость обеспечения контроля за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на угольных шахтах Кузбасса ввиду увеличения средней длины выемочных столбов и очистных забоев, что приводит к значительному усложнению условий ведения горных работ.

Своевременный прогноз негативных геодинамических явлений по-прежнему сопряжен с определенными трудностями в части его реализации в связи с необходимостью детального анализа параметров, определяющих состояние массива горных пород. Соответственно, даже при учете актуальных достижений в части управления горным давлением и контроля техногенной сейсмичности, вопрос совершенствования технологий обеспечения безопасности ведения горных работ остается весьма важным по причине невозможности объективной и своевременной идентификации изменений НДС массива горных пород.

Создание методики мониторинга массива горных пород по параметрам искусственного акустического сигнала в целях прогноза посадки основной кровли в очистных забоях и определения участков деформирования горных выработок призвано обеспечить принятие эффективных технологических решений в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях при подготовке и отработке выемочных участков, а также поддержании и эксплуатации горных выработок угольных шахт Кузбасса.

В части комплексного обеспечения безопасности ведения горных работ необходимо решать задачи текущего прогноза динамических явлений (в частности, горных ударов) и мониторинга массива горных пород по параметрам искусственного акустического сигнала, возникающего при воздействии горного оборудования на забой в процессе выемки угля. В силу этих причин разработка рационального подхода к анализу и процессу автоматизированной обработки регистрируемых искусственных акустических сигналов для принятия объективных решений по текущему прогнозу динамических явлений, мониторингу НДС массива горных пород и контролю технологических процессов воздействия на угольный пласт является актуальной научной задачей.

Целью работы является обоснование и разработка метода контроля напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород по искусственным акустическим сигналам для прогноза участков посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт и определения участков нарушения эксплуатационного состояния горных выработок.

Идея работы состоит в использовании спектральных характеристик и информативных параметров искусственного акустического сигнала (коэффициента относительных напряжений K , частоты спектрального максимума F и суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E) для контроля напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород, установления местоположения ослабленных межслоевых контактов и оценки интенсивности развития межслоевых деформаций.

Задачи исследования:

1. Провести анализ и систематизацию существующих технических решений и результатов мониторинга геодинамических явлений в шахтных условиях.
2. Исследовать факторы и причины проявления опасных геодинамических явлений в угольных шахтах.
3. Исследовать характер распределения значений искусственных акустических сигналов, возникающих вследствие воздействия горного оборудования на массив, на участках деформирования массива горных пород и горных выработок, а также обрушения пород кровли в условиях угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс».
4. Провести оценку интенсивности развития межслоевых деформаций, возникающих в процессе выемки угля, по распределению спектральных характеристик и параметрам искусственного акустического сигнала.
5. Установить порядок регистрации и обработки искусственных акустических сигналов для контроля напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород в процессе непрерывного ведения очистных работ.
6. Исследовать особенности распределения спектральных характеристик и параметров искусственных акустических сигналов при воздействии очистных работ на призабойную часть массива горных пород для решения конкретных горно-геологических задач в условиях угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс».
7. Определить порядок проведения мониторинга массива горных пород по параметрам искусственного акустического сигнала для прогнозирования участков посадки основной кровли в очистных забоях и выявления участков нарушения эксплуатационного состояния горных выработок.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Выявление участков локальной разгрузки с интенсивным развитием межслоевых деформаций, представляющих наибольшую опасность по обрушению пород кровли угольного пласта, возможно по динамике изменения коэффициента

относительных напряжений K по сравнению с фоновыми значениями, измеряемыми на безопасном участке массива горных пород.

2. Определение местоположения межслоевого контакта с максимальным ослаблением относительно угольного пласта на участках сдвижения пород и их обрушения в горных выработках можно производить по наибольшей амплитуде резонансной частоты искусственного акустического сигнала, что позволяет отследить динамику процесса посадки основной кровли при движении очистного забоя.

3. В целях оценки динамичности процесса посадки основной кровли возможно применение прогностического параметра $P_{кр}$, равного отношению нормированных значений коэффициента относительных напряжений K и суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E , вычисляемых в каждом цикле выемки угля, что позволяет определять участки посадки основной кровли в соответствии с установленными пороговыми значениями, превышение которых свидетельствует об опасности протекания данного процесса, выраженной фактами повышенных газовыделений в горных выработках и их деформированием.

Научная новизна:

1) получены новые экспериментальные данные о физико-механических свойствах и параметрах напряженно-деформированного состояния массива горных пород в области влияния горных работ в условиях угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс»;

2) установлены закономерности распределения относительных напряжений и интенсивности развития межслоевых деформаций в лавах угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс», позволяющие на основе параметров искусственных акустических сигналов осуществлять прогноз участков посадки пород основной кровли и оценку степени опасности возникающих при этом динамических явлений;

3) обоснована возможность применения метода контроля напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород по параметрам искусственного акустического сигнала для определения участков относительной разгрузки напряжений с интенсивным развитием межслоевых деформаций, представляющих наибольшую опасность по обрушению пород основной кровли угольного пласта и нарушению эксплуатационного состояния горных выработок;

4) установлены соответствующие пороговые значения параметров искусственного акустического сигнала и методические приемы их получения для определения участков предполагаемой посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс»;

5) динамика процесса посадки основной кровли при движении очистного забоя отражается в спектрах искусственного акустического сигнала: по наибольшей амплитуде резонансной частоты определяется расстояние до межслоевого контакта

с максимальным ослаблением на участках сдвижения пород и их обрушения (процесс посадки пород основной кровли) в угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс»;

б) использование суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах в качестве одного из параметров искусственного акустического сигнала для оценки напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород и динамики посадки основной кровли позволяет определять интенсивность развития межслоевых деформаций.

Методы исследования: в работе использован комплексный метод исследований, основанный на анализе и обобщении данных горно-геологических и горнотехнических условий разработки угольных месторождений Кузбасса подземным способом; оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород и исследованиях механических свойств горных пород периодическими акустическими наблюдениями и непрерывным акустическим мониторингом на объектах ведения горных работ; компьютерной обработке, анализе и интерпретации данных, полученных по результатам шахтного акустического мониторинга.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- представительным объемом экспериментальных исследований, проведенных на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (4 шахты, 5 пластов);
- сохраняющейся стабильностью значений установленных параметров искусственного акустического сигнала;
- использованием при проведении экспериментальных исследований аппаратного обеспечения с высокими метрологическими характеристиками и апробированного программного обеспечения;
- удовлетворительной сходимостью прогнозируемых теоретически и полученных экспериментально характеристик и параметров искусственных акустических сигналов, возникающих в процессе ведения горных работ.

Практическая значимость работы заключается:

- в использовании разработанных научно-обоснованных решений по контролю за напряженно-деформированным состоянием призабойной части массива горных пород и прогнозу участков посадки основной кровли на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс»;
- во включении результатов исследований в корпоративный нормативный документ, имеющий практическое применение на 3-х угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях и форумах: на научном семинаре ИПКОН РАН «Передовые технологии и методики прогноза динамических явлений» (г. Москва, 2019),

III Международной научно-практической конференции «Безопасность технологических процессов и производств» (г. Екатеринбург, 2021); научных семинарах кафедры «Физических процессов горного производства и геоконтроля» Горного института НИТУ «МИСиС» (Москва, 2019-2021 гг.).

Реализация результатов работы. Полученные результаты и выводы по диссертационной работе использованы для контроля параметров безопасности ведения горных пород, прогноза участков посадки пород основной кровли и оценки степени опасности возникающих при этом геодинамических явлений на 3-х шахтах АО «СУЭК-Кузбасс», а также в Стандарте компании АО «СУЭК» - «Руководство по применению системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ)».

Публикации. По теме диссертации опубликованы 3 печатных работы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и зарегистрированных в базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и одного приложения. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 18 таблиц и 54 рисунка. Библиография включает 139 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Сохранение актуальных позиций Российской Федерации среди мировых лидеров-производителей и экспортеров угля обеспечивается планомерным стабильным развитием традиционных центров угледобычи страны, крупнейшим из которых, по производственным показателям, является Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс).

Однако, положительная динамика в части ежегодного увеличения объемов добычи угля в том числе обеспечивается за счет перехода к отработке более глубоких горизонтов, а также связана с увеличением средней длины выемочных столбов и очистных забоев, что сопряжено с осложнением условий ведения горных работ ввиду негативного влияния горного давления и проявлений геодинамических явлений (далее – ГДЯ).

Соответственно, безопасность подземной разработки угольных пластов в условиях необходимости поддержания высоких темпов ведения очистных работ и обеспечения непрерывности технологических процессов может быть обеспечена только посредством интеграции современных методов контроля напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) массива горных пород, наибольшей перспективностью из которых характеризуется метод, основанный на регистрации искусственных акустических сигналов (далее – ИАС), возникающих при воздействии горного оборудования на забой.

Отмечается, что значительный вклад в исследования динамики напряженно-деформированного состояния массива горных пород, причин возникновения геодинамических явлений в угольных шахтах внесли видные советские и российские ученые: В.В. Ржевский, М.В. Курленя, А.Д. Рубан, В.В. Ходот, В.Н. Опарин, В.Л. Шкуратник, И.М. Петухов, А.М. Линьков, В.В. Иванов, В.С. Зыков, К.Х. Ли, Ю.М. Филатов, В.В. Семенцов, Д.В. Яковлев, С.Н. Мулёв, С.М. Простов, С.В. Цирель, А.С. Вознесенский, В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова, Е.Б. Черепецкая, А.Г. Гликман, А.И. Бобров, А.С. Батугин и др.

Анализ причин крупнейших аварий на угольных шахтах Кузбасса также подтверждает актуальность выбранной темы и сформулированных цели и задачи исследования, одной из которых является обоснование и разработка метода контроля НДС призабойной части массива горных пород по параметрам ИАС для прогноза участков посадки основной кровли в очистных забоях и участков нарушения эксплуатационного состояния горных выработок угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс».

В первой главе анализируются показатели и факторы, определяющие динамику развития угольной промышленности РФ, причины аварийности, обусловленной геодинамическими явлениями, на примере крупнейшего и наиболее аварийного центра угледобычи в стране, а также зависимость производственных показателей угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс» от необходимости проведения прогноза ГДЯ традиционными методами.

Рассматриваются также современные звукометрические методы оценки НДС массива горных пород и перспективность контроля за состоянием его призабойной части по параметрам ИАС для решения актуальных горно-геологических задач в целях своевременного определения степени разупрочнения горных пород, оценки целесообразности превентивных мер по предотвращению горных ударов, прогноза зон посадки пород основной кровли в очистных забоях и участков нарушения эксплуатационного состояния горных выработок, что позволит обеспечить безопасность и непрерывность технологических процессов выемки угля.

Во второй главе представлено исследование условий возникновения ИАС в массиве горных пород и установление особенностей распределения спектральных характеристик ИАС при проведении локальных акустических зондирований и в процессе непрерывного акустического мониторинга в целях обоснования эффективности и достоверности применения его информативных параметров для решения конкретных горно-геологических задач.

Известно, что вследствие импульсного воздействия на массив в каждом слое горных пород, ограниченном ослабленным механическим (межслоевым) контактом (далее – ОМК), возникают собственные (резонансные) колебания.

Происхождение ОМК обусловлено межслоевыми деформациями, возникающими при прогибании толщи горных пород в процессе ведения очистных или проходческих работ, а также в период эксплуатации горных выработок.

Соответственно, возбуждаемый в слоистом массиве горных пород искусственный акустический сигнал является суперпозицией собственных (резонансных) упругих колебаний, возникающих в каждом отдельном слое толщиной (h , м) и характеризующихся собственной резонансной частотой (f_p , Гц) в соответствии с выражением:

$$h = \frac{v}{f_p} \quad (1)$$

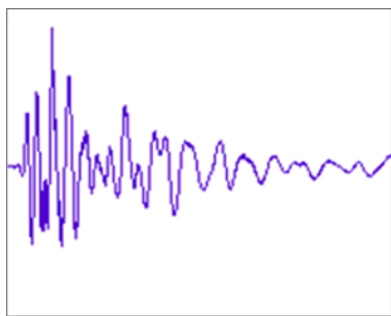
где v - скорость поперечных волн (для большинства осадочных пород составляет ≈ 2500 м/сек);

h - мощность слоя горных пород, ограниченного ОМК.

Таким образом, по спектрам ИАС оценивается интенсивность вышеуказанных межслоевых деформаций, а регистрируемые резонансные частоты ИАС и их амплитуды позволяют контролировать изменения НДС массива горных пород.

При импульсном возбуждении ИАС может быть зарегистрирован в виде осциллограммы или линейного спектра (рис. 1). При этом каждая резонансная частота спектра ИАС соответствует положению ослабленного межслоевого контакта в породах горной выработки относительно угольного пласта на расстоянии, определяемом по формуле (1).

а)



б)

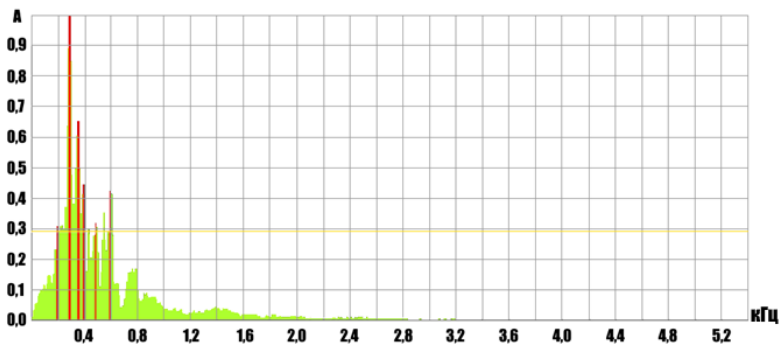


Рисунок 1 – Осциллограмма импульса акустического сигнала (а) и линейный спектр импульса акустического сигнала с выделенными резонансными частотами (б): по вертикали – относительная амплитуда A (доли ед.); по горизонтали – частота спектрального максимума f (кГц)

По результатам обработки спектров ИАС устанавливается распределение ОМК по разрезу углевмещающих пород, оценивается интенсивность их ослабления и определяются соответствующие информативные параметры:

– коэффициент относительных напряжений K (ед.), определяемый по формуле:

$$K = \frac{A_B}{A_H} \quad (2)$$

где A_B и A_H – суммы амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра акустического сигнала соответственно, определяемые в процессе обработки третьооктавного спектра ИАС путем его масштабирования (нормирования) по максимальному значению амплитуды в спектре, в результате которого определяются «доли максимума» по обеим сторонам от границы деления спектра, дальнейшее суммирование которых позволяет получить данные величины (в границах частотного диапазона регистрирующей аппаратуры: от 20 до 3500 Гц);

- частота спектрального максимума F (Гц), соответствующая расстоянию от обнажения кровли до контакта с максимальным ослаблением;

- суммарная энергия спектральных составляющих на резонансных частотах E (отн. ед.), характеризующая степень развития межслоевых деформаций в толще углевмещающих пород вблизи исследуемой горной выработки.

Реализация непрерывного мониторинга призабойной части массива горных пород предусматривает автоматизированную регистрацию и обработку собственных (резонансных) колебаний, возбуждаемых под воздействием очистного комбайна на забой, что исключает влияние субъективного фактора на интерпретацию конечных результатов.

Принципиальная схема работы системы мониторинга состояния массива в очистном забое угольной шахты АО «СУЭК-Кузбасс» представлена на рисунке 2.

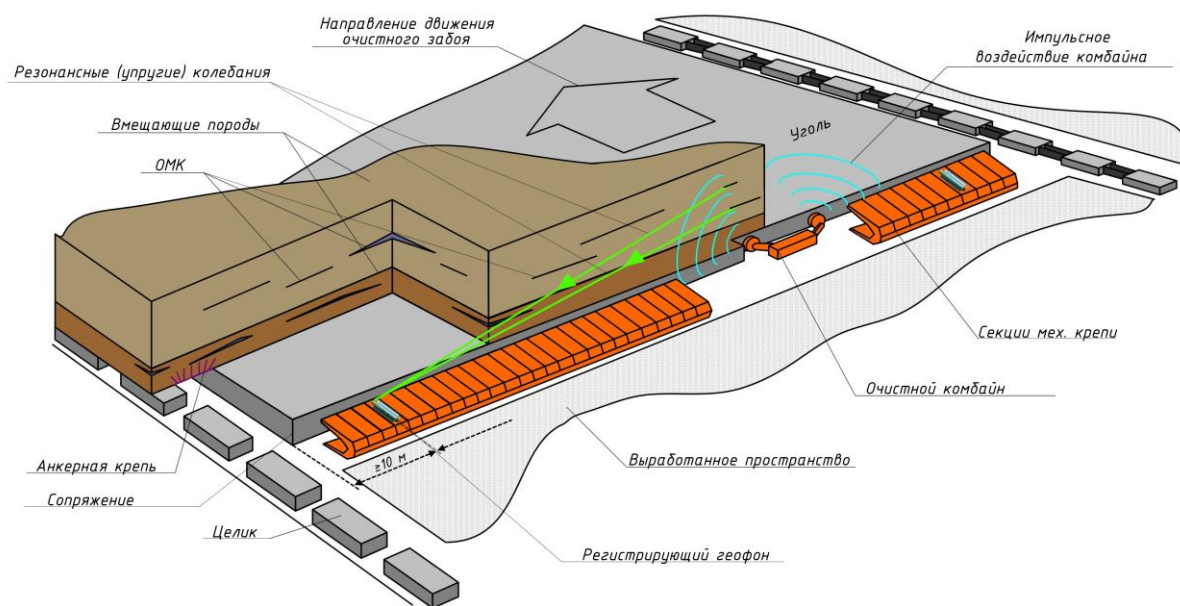


Рисунок 2 – Принципиальная схема работы системы мониторинга состояния массива САКСМ в очистном забое угольной шахты АО «СУЭК-Кузбасс»

Обработка непрерывно регистрируемых акустических импульсов сводится к определению усредненного спектра ИАС, получаемого в течение цикла выемки угля, для выделения резонансных частот и определения значений вышеуказанных информативных параметров, характеризующих состояние исследуемого участка массива.

Исследованиями в лаве 70-10 шахты «Талдинская-Западная №2» подтверждено, что положения ОМК, определенные по результатам акустического зондирования вблизи буровой скважины, соответствуют литологическим контактам, установленным непосредственно по результатам бурения (рис. 3).

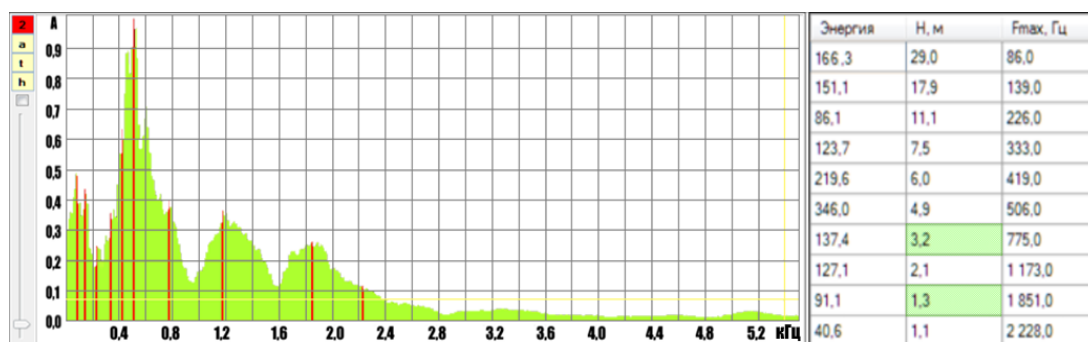


Рисунок 3 – Спектр ИАС и значения расстояний до ОМК в вентиляционном штреке лавы 70-10 (ПК 44, скв. № 1): по вертикали - относительная амплитуда A (доли. ед.); по горизонтали – частота спектрального максимума f (кГц)

Таблица 1 – Геологическое описание контрольной скважины

Интервал (мощность слоя, м.)	Наименование пород	Положение границы, м
Пикет 44, шпур № 1		
0.0–1.3 м (1.3)	Аргиллит	1.3
1.3–3.1 м (1.8)	Алевролит	3.1
3.1–6.4 м (3.3)	Песчаник	6.4

Резонансными частотами в спектрах ИАС отмечены литологические контакты на расстоянии около 1.3 м и 3.2 м. Установлено, что относительная ошибка определения местоположения ОМК по результатам эксперимента не превышает 9%.

На основе распределения коэффициента относительных напряжений K определены зоны интенсивного развития межслоевых деформаций, в пределах которых, в дальнейшем, при пересечении очистным забоем отмечен высокий уровень аварийности штрека в виде образования вывалов и уменьшения его сечения. Вышеуказанные зоны относительной разгрузки напряжений с интенсивным расслоением пород кровли характеризуются минимальными значениями данного коэффициента по профилю наблюдений, сменяющимися локальными повышениями до максимальных значений, что является устойчивым признаком повышенной опасности обрушения пород кровли при их пересечении очистным забоем (рис. 4).



Рисунок 4 – Распределение относительных напряжений в вентиляционном штреке 70-10: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.); по горизонтали – номера пикетов по профилю наблюдений

В третьей главе представлены результаты оценки НДС массива горных пород по параметрам ИАС на участках ведения горных работ, характеризующихся особо сложными условиями, к которым отнесены: геологические нарушения; зоны повышенного горного давления (далее – ПГД); участки пересечения очистным забоем передовых горных выработок и сбоек оконтуривающих выработок.

Исследованиями на шахтах «Им. С.М. Кирова» и «Комсомолец» на основе анализа непрерывно возбуждаемых ИАС установлено распределение коэффициента относительных напряжений K , характерное для НДС массива при пересечении горными выработками протяженных зон ПГД относительно небольшой ширины (ленточных зон ПГД).

На рисунке 5 представлен план горных работ по угольному пласту «Поленовский» шахты «Им. С.М. Кирова» в зоне расположения газодренажного штрека 25-03, забой которого пересек угол зоны ПГД.



Рисунок 5 – План горных работ по угольному пласту «Поленовский» в зоне расположения газодренажного штрека 25-03

В данном случае ширина зоны ПГД – 32 м, а установленное максимальное значение коэффициента относительных напряжений K составило 1.65 ед. при фоновых 0.6 - 0.7 ед. (рис. 6).



Рисунок 6 – Распределение относительных напряжений в газодренажном штреке 25-03 при пересечении зоны ПГД: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.); по горизонтали – расстояние от начального пикета в метрах

Учитывая, что вышеуказанные исследования основаны на возбуждении ИАС в массиве при проведении операций по выемке угля, в целях повышения объективности оценки НДС массива горных пород в зонах ПГД, проведены дополнительные исследования характера распределения параметров ИАС при импульсном воздействии на массив, который не подвержен влиянию очистных работ.

Так, при проведении акустических зондирований по пласту «Болдыревский» шахты «Им. С.М. Кирова» установлено, что максимальное значение коэффициента относительных напряжений K локализовано при входе в зону ПГД и составило 2.4 ед. при фоновых 0.6 ед. (рис. 7).

При этом, динамика напряжений, характеризующаяся отношением максимальных и минимальных значений коэффициента относительных напряжений K , по результатам локальных акустических зондирований составила 3.8 ед., что вдвое превышает значения, полученные при непрерывном автоматизированном мониторинге (1.9 ед.). Данная особенность объясняется различием в характере воздействия на массив. В целом установлено, что наблюдаемая динамика относительных напряжений свидетельствует о существенном изменении НДС массива горных пород в зонах ПГД вне зависимости от способа возбуждения ИАС.

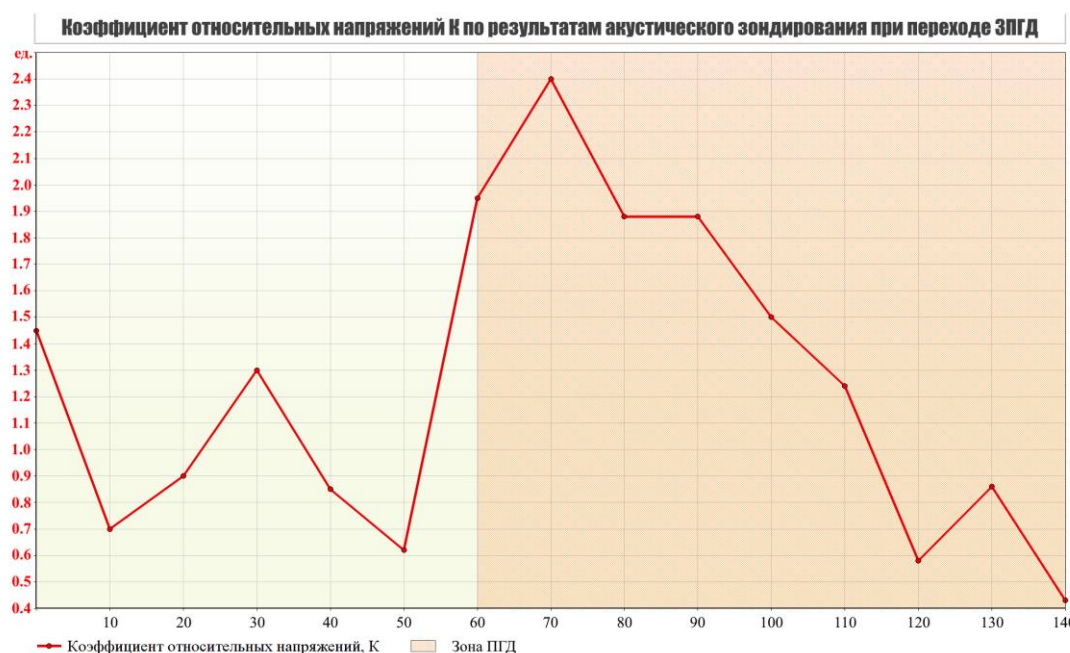


Рисунок 7 – Распределение относительных напряжений по результатам акустических зондирований в вентиляционной печи 25-96 при подходе к зоне ПГД с защищенной стороны пласта: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.); по горизонтали – расстояние от начального пикета в метрах

Дальнейшее исследование особенностей НДС массива горных пород по параметрам ИАС выполнено при пересечении очистным забоем передовых горных выработок и сбоек оконтуривающих выработок.

Участки пересечения передовых выработок при ведении очистных работ являются потенциально удароопасными, поэтому в соответствии с действующим ФНИП от 10.12.2020 № 515 необходимо проводить мероприятия по предотвращению горных ударов при приближении к данным выработкам.

Установлено, что при пересечении очистными забоями передовых горных выработок минимальные значения информативных параметров ИАС локализуются непосредственно в зоне пересекаемых выработок, что указывает на локальную разгрузку относительных напряжений в приконтурной части массива вследствие увеличения дальности максимальных расслоений пород кровли пласта и относительно равномерного воздействия на крепь и краевую часть пласта (рис.8).

При этом величина локальной пригрузки, отражающаяся в повышении значений коэффициента относительных напряжений K , не превышает фоновые значения более чем в 2 раза, что указывает на незначительную ее интенсивность и нецелесообразность выполнения превентивных мероприятий по предотвращению горных ударов в исследованных горно-геологических условиях.

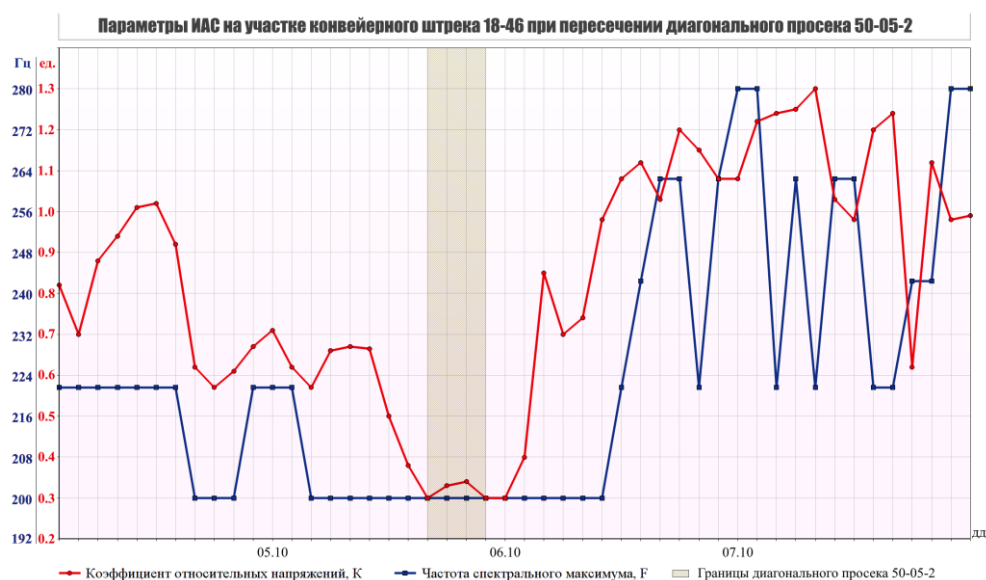


Рисунок 8 - Распределение параметров ИАС на участке вентиляционной печи при пересечении промежуточного штрека 25-101 ш. «Им. С.М. Кирова»: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.) и частоты спектрального максимума f (Гц); по горизонтали – временная шкала

Однако, данный характер распределения коэффициента относительных напряжений K , наряду с зафиксированным уменьшением частоты спектрального максимума F более чем в 4 раза, свидетельствует о сохранении опасности блоковых обрушений пород на участках непосредственного перехода выработок.

Соответственно, опасность проявления негативных ГДЯ при пересечении передовых выработок и сбоек оконтуривающих выработок зависит от степени разупрочнения горных пород в приконтурной их части, эффективную оценку которой возможно производить на основе отношения значений коэффициента относительных напряжений K .

Учитывая установленную при проведении исследований в различных горно-геологических условиях стабильность и достоверность значений информативных параметров ИАС, что явилось возможным ввиду представительного объема обрабатываемой информации (регистрация до 20 спектров ИАС за 1 секунду), предлагается «усовершенствование» коэффициента прогноза геологических нарушений впереди движущегося забоя P_g (у. е.), вычисляемого в каждом цикле регистрации и обработки ИАС:

$$P_g = \frac{K_b}{K_f} + \frac{F_p}{F_f} \quad (3)$$

где K_b и F_p – текущие значения коэффициента относительных напряжений K и частоты спектрального максимума F в цикле регистрации и обработки ИАС; K_f и F_f – фоновые значения, для определения которых предлагается учитывать 25 предшествующих значений данных параметров, а именно путем усреднения 3-х минимальных значений в рамках данных последних 25 циклов.

Предполагается, что данная конфигурация в том числе позволит детализировать оценку «поведения» геологических нарушений, проверка эффективности которой реализована при исследованиях на различных объектах шахт «АО СУЭК-Кузбасс» в зонах влияния геологических нарушений (5 угольных пластов, 7 лав).

Так, при исследовании в зоне пересечения Восточно-Камышанского взброса вентиляционным штреком 25-04 шахты «Им. С.М. Кирова» установлена значительная динамика информативных параметров ИАС (K – от 0.3 до 3.3 ед.; F – от 120 до 480 Гц), что указывает на смещение положения максимальных расслоений пород кровли в диапазоне от 20.8 до 5.2 м относительно угольного пласта (рис. 9).

Также стоит отметить увеличение коэффициента прогноза геологических нарушений P_g до максимальных значений (11.0 у.е) непосредственно в зоне геологического нарушения, что втрое превышает пороговый уровень для данных горного-геологических условий.



Рисунок 9 – Распределение параметров ИАС при пересечении Восточно-Камышанского взброса вентиляционным штреком 25-04: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.), частоты спектрального максимума f (Гц) и коэффициента прогноза геологических нарушений P_g (у.е.); по горизонтали – расстояние от начального пикета в метрах

Установленные в данных условиях аномальные значения информативных параметров ИАС и их динамика значительно отличаются от наблюдаемых на остальных исследованных объектах в зоне влияния разрывных нарушений, что объясняется существенным смещением угольного пласта и углом наклона сместителя Восточно-Камышанского взброса. В целом по рассмотренным

дизъюнктивным нарушениям динамика относительных напряжений в среднем составила 3.0 ед., за исключением исследования в данных условиях (10 ед.).

Отдельно стоит отметить динамичность относительных напряжений при пересечении пликативных нарушений (средние значения – 4.4 ед.), которая в целом превышает динамику по дизъюнктивным нарушениям и объясняется значительными размерами зон их влияния. Изменения НДС массива в зонах их влияния также отражаются на динамике частоты спектрального максимума F : при приближении очистного забоя к пликативным нарушениям максимальные расслоения в породах кровли локализуются на минимальных расстояниях от пласта, а при непосредственном пересечении данных нарушений – смещаются на удаленные расстояния, что объясняется повышенной трещиноватостью и снижением несущей способности пласта.

Также установлено, что значения коэффициента прогноза геологических нарушений P_g выше в подготовительных забоях, поскольку в очистных забоях более широкий фронт воздействия на массив в процессе выемки угля. При этом объективность применения данного коэффициента обеспечивается определением его пороговых значений индивидуально для каждого отдельных горно-геологических условий.

В четвертой главе представлены результаты прогнозирования участков посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт и оценки степени опасности возникающих при этом ГДЯ посредством внедрения прогностических параметров и установления соответствующих пороговых значений.

Анализ спектров ИАС, регистрируемых в процессе отработки угольного пласта «50» лавой 50-05 шахты «Им. В.Д. Ялевского», позволил детально установить характер распределения коэффициента относительных напряжений K на участке посадки основной кровли при движении очистного забоя (рис. 10):

1. зона первых минимальных напряжений ($\min 1$), предшествующая процессу посадки основной кровли;
2. глобальный максимум напряжений ($\max$), отражающий момент начала смещения пород основной кровли;
3. зона вторых минимальных напряжений ($\min 2$), соответствующая локальной разгрузке массива, при которой происходит смещение и обрушение пород основной кровли.

Также на основе анализа динамики частоты спектрального максимума F на данном участке установлен характер смещения ОМК относительно угольного пласта: смещение на удаленные расстояния от пласта в зоне минимальных напряжений ($\min 1$); дальнейшая локализация вблизи пласта в зоне максимальных напряжений ($\max 2$); и обратное смещение от пласта в процессе посадки основной кровли ($\min 2$).



Рисунок 10–Распределение параметров ИАС в вентиляционном штреке 50–05 шахты «Им. В.Д. Ялевского» на участке посадки основной кровли: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.) и частоты спектрального максимума f (Гц); по горизонтали – расстояние от начального пикета в метрах

Динамика процесса посадки основной кровли отражается в спектрах ИАС, что продемонстрировано на рисунке 11 и в таблице 2 на примере отдельного этапа данного процесса в конвейерном штреке 50–05 шахты «Им. В.Д. Ялевского».

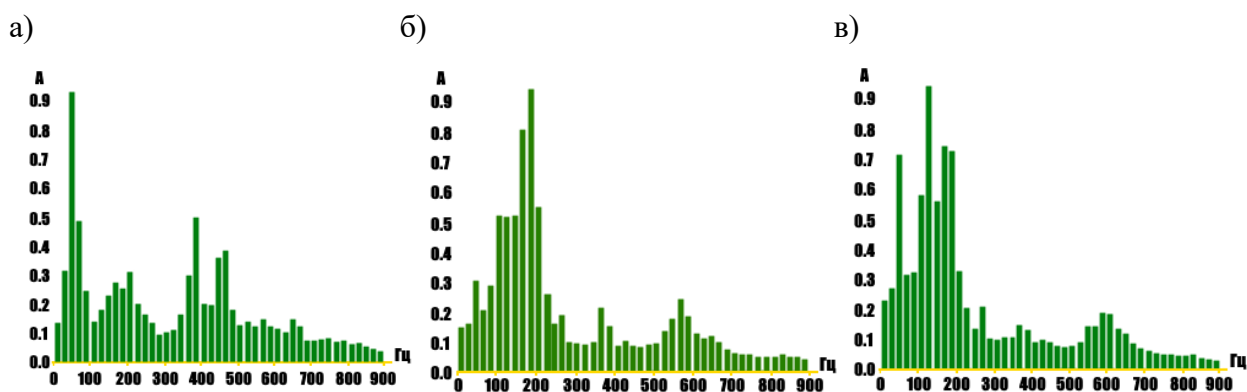


Рисунок 11 – Спектры ИАС в конвейерном штреке 50-05 шахты «Им. В.Д. Ялевского» на участке посадки основной кровли, а) – min 1 (29.11.2019 00:39), б) – max (29.11.2019 17:09), в) -min 2 (29.11.2019 21:25): по вертикали – относительная амплитуда A (доли ед.); по горизонтали – частота спектрального максимума f (Гц)

Таблица 2 Местоположение ОМК относительно угольного пласта и относительная интенсивность их ослабления на отдельном участке посадки пород основной кровли в конвейерном штреке лавы 50-05 шахты «Им. В.Д. Ялевского»

Конвейерный штрек 50-05 шахты «Им. В.Д. Ялевского»									
Дата	Время	Зона посадки кровли	Интервалы удаленности ОМК от угольного пласта, м.						
			42	31-18	18-13	13-10	10-7	7-5	5-4
			Относительная амплитуда резонансных частот, ед.						
29.11.2019	00:39	Min 1	1.00*	-	-	0.32	-	0.52	0.28
29.11.2019	17:09	Max	0.29	0.51	-	1.00*	-	0.17	0.23
29.11.2019	21:25	Min 2	0.75	-	1.00*	0.75	-	0.14	-

* - максимально ослабленные контакты (расслоения).

Соответственно, по результатам исследования установлено:

- в зоне первых минимальных напряжений, предшествующей процессу посадки основной кровли, интенсивные ослабления межслоевых контактов активизируются на значительном расстоянии от угольного пласта (до 42 м);

- последующий рост напряжений обуславливает развитие межслоевых деформаций перед началом процесса смещения пород основной кровли и характеризуется задействованием преобладающего количество ОМК в диапазоне от 5 до 42 м;

- в глобальном максимуме напряжений максимальные расслоения пород кровли смещаются на 10–13 м от пласта, что приводит к «защемлению» его краевой части;

- дальнейший спад напряжений до вторых минимальных значений приводит к интенсивному развитию деформационных процессов на удаленных контактах (до 42 м), при котором наблюдается прогибание и сдвижение толщи интенсивно расслоившихся пород, что приводит к их обрушению.

Полученные результаты также подтверждают взаимосвязь развития межслоевых деформаций и динамики спектра ИАС. Причиной изменения степени ослабления ОМК являются именно межслоевые деформации, возникающие непосредственно в процессе ведения очистных работ.

Поэтому для оценки интенсивности развития межслоевых деформаций в толще углевмещающих пород дополнительно выбран параметр суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E , представляющий собой сумму квадратов амплитуд резонансных частот в быстром преобразовании Фурье, что позволит повысить устойчивость прогноза посадки основной кровли.

Установленный характер взаимосвязи относительных напряжений и интенсивности развития межслоевых деформаций представлен на рисунке 12 и указывает на снижение значений суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E при увеличении значений коэффициента относительных напряжений K .

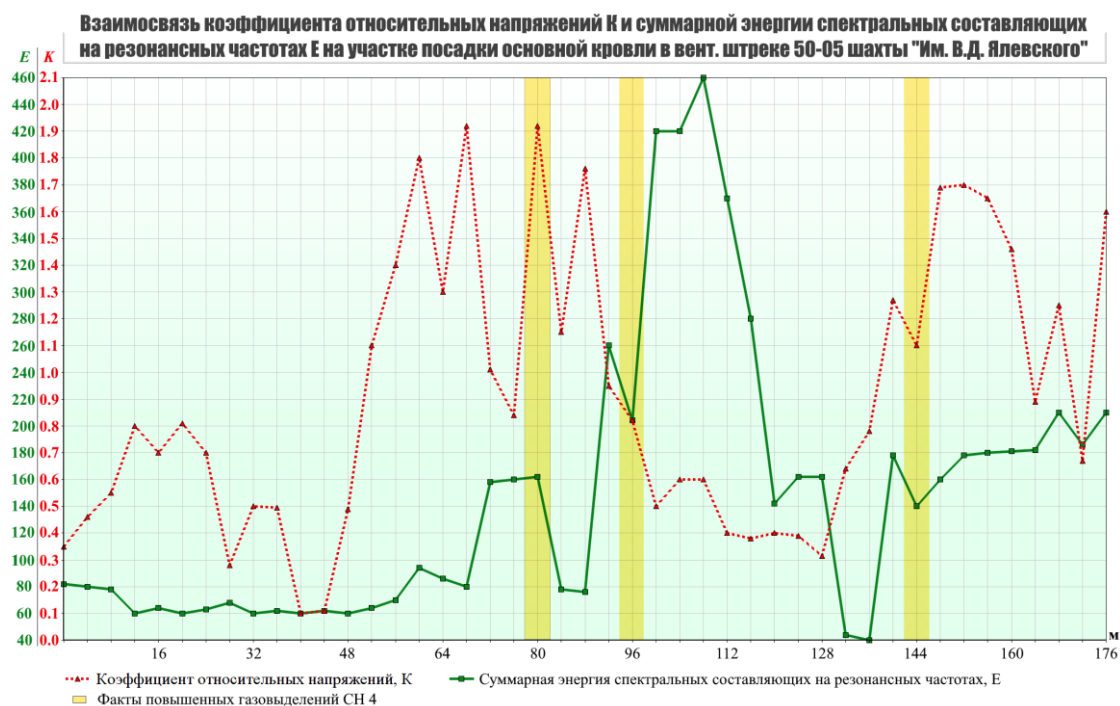


Рисунок 12 – Распределение параметров ИАС в вентиляционном штреке 50-05 шахты «Им. В.Д. Ялевского» на участке посадки основной кровли: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.) и суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E (отн. ед.); по горизонтали – расстояние от начального пикета в метрах

В связи с установленной стабильностью и предсказуемостью динамики вышеуказанных параметров ИАС на участках посадки основной кровли предлагается нормирование их текущих значений посредством усреднения массива предшествующих значений, оптимальный объем которого должен составлять не менее 30 циклов:

$$K_H = \frac{K_i}{K_{cp}} \quad \text{и} \quad E_H = \frac{E_i}{E_{cp}} \quad (4)$$

где K_i и E_i – текущие значения коэффициента относительных напряжений K (ед.) и суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E (отн. ед.) соответственно; K_{cp} и E_{cp} – усредненные значения данных параметров по выборке предыдущих наблюдений.

Соответственно, на основе данного усреднения значений информативных параметров ИАС предлагается введение прогностического параметра посадки основной кровли:

$$P_{кр} = \frac{K_H}{E_H} \quad (5)$$

где K_H и E_H – нормированные значения коэффициента относительных напряжений K (ед.) и суммарной энергии спектральных составляющих резонансных частотах E (отн. ед.) соответственно.

На основе многочисленных шахтных наблюдений установлены пороговые уровни параметра прогноза $P_{кр}$ (ед.): посадка основной кровли прогнозируется при

превышении порогового уровня в 1.5 ед. при наличии перед этим значений ниже минимума в 0.8 ед. Непосредственно степень динамичности данного процесса оценивается по превышению прогнозным параметром значения второго уровня – 3.0 ед., при котором возможны обрушения пород кровли и повышенные газовыделения в горные выработки.

На рисунке 13 представлены результаты данного порядка прогноза посадки основной кровли на отдельном участке лавы 24-62 шахты «Им. С.М. Кирова».

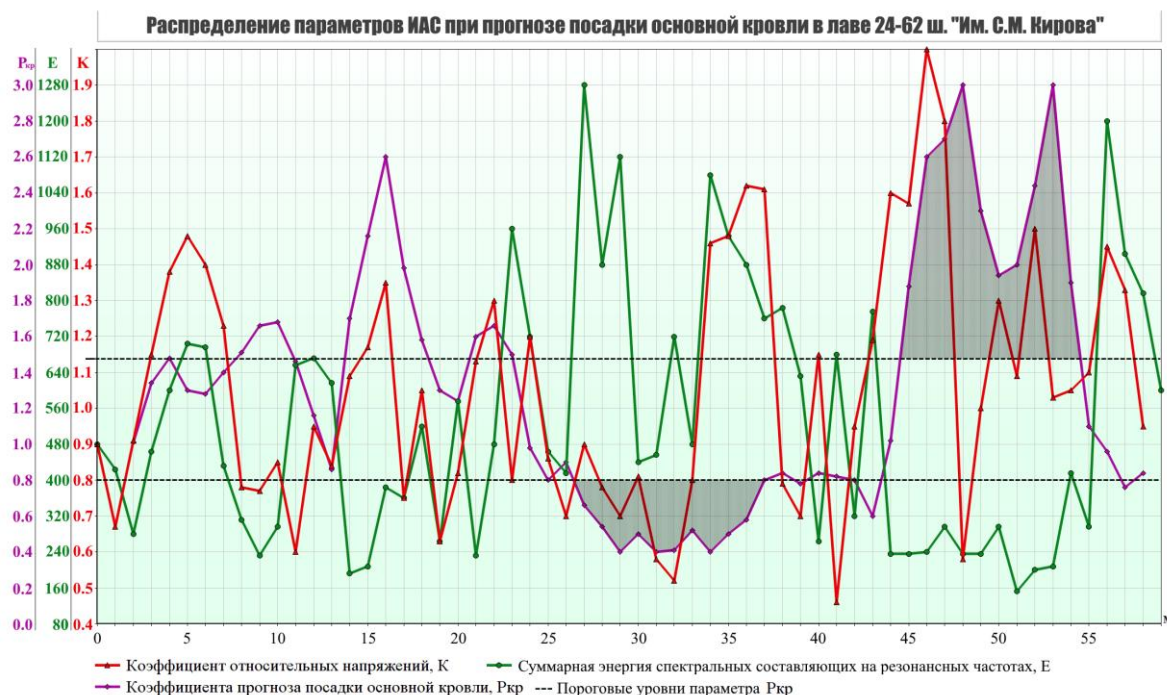


Рисунок 13– Распределение параметров ИАС при прогнозе посадки основной кровли в лаве 24-62 шахты «Им. С.М. Кирова»: по вертикали – значения коэффициента относительных напряжений K (ед.), суммарной энергии спектральных составляющих на резонансных частотах E (отн. ед.) и параметра прогноза посадки основной кровли $P_{кр}$ (ед.); по горизонтали – расстояние от начального пикета в метрах

В данном случае посадка основной кровли происходила в зоне влияния геологического нарушения при подвигании забоя на 28 м, максимальное значение прогностического параметра достигло второго уровня пороговой величины – 3.0 ед., поэтому в единый диспетчерский центр передано сообщение о возможных динамических явлениях, а именно за 5 часов до факта возникновения купола с обрушением пород до 3.0 м в вентиляционной печи 24-62.

Проверка эффективности и достоверности предлагаемого порядка прогнозирования реализована на 3-х угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс», при этом максимальные значения параметра прогноза $P_{кр}$ варьировались от 1.7 до 3.0 ед., среднее же значение составило – 2.1 ед.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача разработки метода контроля напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород для прогноза участков посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт и определения участков нарушения эксплуатационного состояния горных выработок, что имеет важное значение для обеспечения безопасности и непрерывности технологических процессов выемки угля, а также увеличения темпов и объемов его добычи в целом.

Основные научные результаты и выводы по выполненным в диссертации исследованиям заключаются в следующем:

1. Проведен анализ современного состояния исследований в области управления горным давлением и контроля техногенной сейсмичности. Установлено, что недостатки традиционных методов обусловлены невозможностью объективной и своевременной идентификации параметров, определяющих изменения напряженно-деформированного состояния массива в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, при необходимости поддержания непрерывности технологических процессов по выемке угля и увеличения темпов и объемов его добычи в целом.

2. Обоснована возможность применения метода контроля напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород по параметрам искусственного акустического сигнала для определения участков относительной разгрузки напряжений с интенсивным развитием межслоевых деформаций, представляющих наибольшую опасность по обрушению пород основной кровли угольного пласта и аварийному состоянию горных выработок. Установлено, что выявление данных участков возможно по динамике изменения коэффициента относительных напряжений K по сравнению с фоновыми значениями, измеряемыми на безопасном участке массива горных пород.

3. Установлены особенности распределения параметров ИАС в зонах ПГД в зависимости от характера воздействия на массив горных пород: возбуждение ИАС в массиве при проведении операций по выемке угля характеризуется меньшими значениями коэффициента относительных напряжений K в сравнении с импульсным воздействием на массив, который не подвержен влиянию добычных работ. В целом же результаты исследований свидетельствуют о существенном изменении НДС массива горных пород в зонах ПГД вне зависимости от способа возбуждения ИАС.

4. Установлено, что опасность проявления негативных геодинамических явлений при пересечении очистными забоями передовых горных выработок и сбоек

оконтуривающих горных выработок зависит от степени разупрочнения горных пород в приконтурной части, эффективную оценку которой возможно производить на основе отношения максимальных и минимальных значений коэффициента относительных напряжений K в целях определения целесообразности превентивных мер по предотвращению горных ударов.

5. Предложено определять фоновые значения коэффициента прогноза геологических нарушений P_g путем усреднения 3-х минимальных значений из 25 предшествующих циклов регистрации и обработки ИАС. Эффективность данного подхода к локализации и определению характера «поведения» геологических нарушений подтверждена исследованиями в различных очистных горных выработках.

6. Установлено, что наибольшая амплитуда резонансной частоты в спектре искусственного акустического сигнала указывает на удаленность смещения межслоевого контакта относительно угольного пласта и позволяет отследить динамику процесса посадки основной кровли при движении очистного забоя.

7. Предложен порядок прогнозирования участков посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт и оценки степени опасности возникающих при этом ГДЯ на основе установления взаимосвязи относительных напряжений и интенсивности развития межслоевых деформаций на участках посадки основной кровли по характеру изменения параметров ИАС. Разработан и испытан прогнозный параметр $P_{кр}$, позволяющий определять участки посадки основной кровли с оценкой степени динамичности данного процесса, в целях повышения устойчивости и объективности прогноза, а также обеспечения непрерывности технологических процессов.

8. Результаты работы включены в корпоративный нормативный документ (Стандарт компании) АО «СУЭК – «Руководство по применению системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ)», внедрены на трех шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» и используются для контроля параметров безопасности ведения горных работ, а также прогноза участков посадки пород основной кровли и оценки степени возникающих при этом динамических явлений.

Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в следующих статьях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Костеренко В.Н., Смирнов Р.О., Аксенов З.В. Динамика газовыделений в очистных забоях // Горная промышленность. 2019. - № 2 - С. 52-55. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-52-55;

2. Еременко В.А., Аксенов З.В., Пуль Э.К., Захаров Н.Е. Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы MAP 3D // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. - № 5 - С. 91-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104;

3. Аксенов З.В. Исследование межслоевых деформаций, возникающих при посадке основной кровли угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. – № 9 - С. 23-35. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_23.