

Сведения о выполненных работах в 2016 году  
по проекту **«Изучение механизмов формирования и развития очагов разрушения  
в горных массивах как в многомасштабных нелинейных динамических  
системах с целью прогноза опасны катастрофических разрушений»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 14-17-00198

Руководитель д-р фи.-мат. наук Макаров Павел Васильевич

Основные цели третьего (2016) года выполнения проекта состояли в:

- 1) совершенствовании и модификации структурных и физических моделей, описывающих эволюцию НДС как нагружаемых малых образцов горных пород, так и в участках горного массива с выработками в процессе ведения горных работ;
- 2) проведении численного эксперимента по моделированию процессов неупругого деформирования и разрушения, включая катастрофические, элементов горного массива с выработками и по разрушению малых образцов горных пород;
- 3) разработке методов анализа параметров НДС и в изучении особенностей эволюции НДС нагружаемой среды с целью оценки степени неравновесности и близости к критическому состоянию, в выявлении возможных предвестников катастрофического разрушения.

Получены следующие конкретные результаты:

1. Выполнена модификация структурных и физических моделей горных пород. Структурные модели учитывают значимые структурные элементы. Для горных пород это структура порового пространства, зерна, наличие разного рода включений. Построены структурные модели горного массива с выработками, учитывающие особенности (физико-механические параметры в том числе) разрабатываемого угольного пласта, кровли и почвы. В том числе были построены структурные модели горного массива с выработками на нескольких горизонтах. Выполнена модификация физических моделей, описывающих деформационный отклик как малых образцов, так и элементов горного массива.
2. Проведены испытания образцов горных пород на сжатие и трёхточечный изгиб, определены долговечности при заданной величине нагрузки. Эти результаты позволили верифицировать физическую модель, в частности, модель разрушения. Показано, что все выполненные численные расчёты по разработанным моделям качественно очень хорошо согласуются с наблюдениями, демонстрируют все этапы эволюции НДС, включая катастрофические разрушения и долговечности, которые количественно совпадают с экспериментальными данными. Таким образом, разработана прогностическая математическая модель, позволяющая на основе численного эксперимента и анализа особенностей эволюции НДС разрабатывать методы статистического анализа данных геомеханического мониторинга.

3. Проведён численный эксперимент (2D и 3D расчёты) по моделированию процессов неупругого деформирования и разрушения элементов горного массива с выработками при ведении горных работ. Изучены режимы перехода разрушений разных масштабов в катастрофическую стадию. Изучена структура формирующихся областей сейсмического затишья при миграции деформационной активности в область развития будущего очага катастрофического разрушения.

4. Разработаны методы статистического анализа флуктуаций параметров НДС (отклонений напряжений от среднего тренда в численных расчётах, временные зависимости скоростей движений боковых поверхностей разрушаемых образцов в лабораторных экспериментах) с целью оценки степени неравновесности нагружаемой среды как нелинейной динамической системы и выявления предвестников катастрофического разрушения.

Была доработана методика вычисления расчётных сейсмических событий и построены графики повторяемости этих событий для ряда последовательных времён, включая крупные катастрофические разрушения и генеральное обрушение кровли.

В качестве таких предвестников можно рассматривать изменения наклона (уменьшение) АЧХ графиков, эволюцию формы графика РОЕ, эволюцию графиков повторяемости расчётных сейсмических событий (уменьшение наклона графика в области крупных событий).

5. При проведении численного эксперимента по изучению эволюции НДС горного массива с выработками в ходе ведения горных работ выявлено явление миграции деформационной активности - замирания деформационного процесса, включая интенсивности сейсмических событий, в одних частях горного массива и смещение деформационной активности в другие области. Причём, отмечены области формирования очагов крупномасштабных катастрофических разрушений на периферии наметившихся областей снижения деформационной активности.

6. Проведено численное изучение эволюции НДС как нагружаемых образцов горных пород вплоть до их катастрофического разрушения, так и эволюции НДС горного массива с выработками в ходе ведения горных работ, включая генеральное обрушение кровли.

Получены следующие результаты:

6.1. Анализ эволюции временных рядов, отражающих эволюцию НДС нагружаемой среды вплоть до катастрофических разрушений, показал, что в целом процесс скоррелирован и отвечает состоянию динамического хаоса, а на отдельных участках, где коэффициент корреляции был высок, состоянию самоорганизованной критичности.

6.2. Кросскорреляционный анализ методом скользящего окна показал, что высокий уровень коэффициента корреляции катастрофического разрушения с предшествующим процессом накопления повреждений и разрушения наблюдается только на очень коротком временном интервале, приблизительно равным 8-10 временам выхода разрушения на критическую стадию. Так как уверенный прогноз возможен только в области корреляции, то эти времена крайне малы, по-видимому, не более 10-20 минут

для реального горного массива. Этот вопрос требует дальнейшего тщательного изучения.

6.3. Спектральный анализ (БПФ сигнала) и 2D годограф комплексного вектора БПФ сигнала выявили фрактальную структуру процесса разрушения. Увеличенные фрагменты годографа ярко демонстрируют многомасштабность разрушения, увеличенные картины годографа качественно эквивалентны исходной картине. Причём, резкое изменение структуры годографа, свидетельствующее о нарастании масштабов разрушения, наблюдается только вблизи катастрофического события, что также можно рассматривать как предвестник катастрофического разрушения.

6.4. Вейвлет-анализ (симметричный вейвлет Добеши) хорошо фиксирует короткие выбросы сигнала, отвечающие локальным разрушениям. Их нарастание по мере приближения к катастрофе также является свидетельством приближения крупномасштабной катастрофы.

6.5. Эволюция АЧХ характеристики (уменьшение наклонов), эволюция графиков РОР, уменьшение наклона графиков повторяемости сейсмических событий по мере приближения к катастрофическим разрушения также являются предвестниками крупномасштабного разрушения. Особо отметим, что все выявленные предвестники и особенности эволюции НДС нагружаемой среды наблюдаются в том числе при анализе результатов численного моделирования процесса неупругого деформирования и разрушения горного массива в ходе ведения горных работ. Эти особенности эволюции в математической модели полностью совпадают с эволюцией реальных объектов, разрушаемых образцов горных пород. Экспериментальное изучение неустойчивого развития деформационных процессов и их численное моделирование по разработанной модели приводит к полному совпадению всех этапов эволюции НДС, отраженных в АЧХ и РОЕ зависимостях. Анализ данных акустоэмиссии разрушаемых образцов даёт схожие результаты. Подобные результаты получены во многих работах по изучению сейсмического процесса в элементах земной коры.

Таким образом, в результате выполнения проекта разработана предсказательная математическая модель, описывающая процессы деформации и разрушения прочной среды как типичной нелинейной динамической системы. Разработан комплекс методов статистического анализа как данных численного эксперимента, так и экспериментов по разрушению реальных объектов, включая данные геомеханического мониторинга. Развиваемая методология позволила выявить комплекс предвестников перехода разрушения в катастрофическую стадию.

Дальнейшее развитие предлагаемой фундаментальной теории и математической модели видится в приложении разработанных моделей и методов к анализу эволюции НДС реального горного массива