

## Сведения о ходе выполнения проекта

### **«Изучение механизмов формирования и развития очагов разрушения в горных массивах как в многомасштабных нелинейных динамических системах с целью прогноза опасных катастрофических разрушений», поддержанного Российским научным фондом**

Соглашение № 14-17-00198

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

#### **2014 год**

Получены следующие, запланированные на первый год работы над проектом, результаты.

1. Разработаны модели хрупкого и квазихрупкого разрушения горных пород и элементов горного массива.

Ряд модельных представлений основан на модификации уже известных и апробированных моделей. Так для модели геосреды В.Н. Николаевского, в которой учитываются внутреннее трение и дилатансия как независимые эффекты, разработана ее модификация, учитывающая возможность компакции среды в зависимости от среднего давления и сдвиговых деформаций.

Разработаны новые модели хрупкого и (или) квазихрупкого разрушения горных пород. Модельные представления разрушения материала основываются на идеях иерархической многомасштабной организации среды, в которой при нагружении формируются фрактальные структуры трещин разных масштабов. Таким образом, любое разрушение есть процесс наращивания масштабов разрушения вплоть до макроскопической глобальной катастрофы, который осуществляется по законам нелинейной динамики. По этой причине наращивание масштабов разрушения отвечает степенным законам, а скорость накопления повреждений оказывается связанной с уже накопленными повреждениями также степенной зависимостью. Этим представлениям отвечают распределения числа землетрясений разной интенсивности от энергии (закон Гуттенберга-Рихтера), а также закон Омори для афтершокового процесса при разрушении элементов земной коры.

Параметры построенных и модифицированных моделей для горных пород и горных массивов определены как по известным экспериментальным данным, так и по экспериментам, выполненным в рамках настоящего проекта, в которых определялись времена предразрушения.

2. Разработаны структурные модели образцов горных пород, в том числе песчаников, алевролитов и габбро. Разработаны структурные модели элементов горного массива с явным учетом его значимых структурных элементов, в том числе, слоистости, пористости и трещиноватости.

При разработке структурных моделей были применены как методы петрологии (петроструктурные методы и петрохимический анализ), позволившие выделить значимые структурные элементы изучаемых образцов, определить их минералогический состав, а также наличие трещин и пор, так и современные методы изучения физических свойств материалов.

Методами рентгено-флуоресцентным (РФА), рентгеноспектральным микроанализом с электронным зондом, рентгенофазовым, рентгеноструктурным, методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), а также механическими испытаниями были определены тонкая структура изучаемых образцов, распределения по размерам составляющих зерен и входящих в них кристаллитов, особенности их деформирования, наличия мягких микропрослоек, а также средние механические параметры, включая макроскопическую прочность на сжатие и растяжение.

При построении структурных моделей горного массива рассматривалось его геологическое строение и состав толщ, из которых сложен массив. В качестве базовой структурной модели горного массива, необходимой для проведения тестовых расчетов и верификации модели, была взята модель массива пласта 53 шахты “Котинская” по данным геологического отчета.

3. Экспериментально определены времена предразрушения для двух материалов – габбро и искусственного материала, изготовленного на основе извести карбонизационного твердения.

Для образцов из габбро времена предразрушения были определены ранее для трёх величин приложенной нагрузки. По этим экспериментам были подобраны параметры модели, фактически один параметр, определяющий скорость накопления повреждений в среде при заданном масштабе сжатия расчётного времени (он равен  $10^3$ ). Так как модель описала эти эксперименты с исключительной точностью, габбро был принят за эталонный образец, для которого эксперименты продолжались при других уровнях нагрузки с целью отработки методики экспериментов. Под временем предразрушения понимается стадия накопления в среде повреждений до перехода процесса разрушения в сверхбыстрый катастрофический режим. Так как в большинстве экспериментов стадия катастрофического режима практически на 2 и более порядков меньше квазистационарной стадии, то при временах всего процесса разрушения в несколько секунд, времена предразрушения для заданной нагрузки регистрируются очень надёжно.

4. Численно смоделированы эксперименты по определению времен предразрушения и определены параметры модели хрупкого и квазихрупкого разрушения образцов.

В результате проведения экспериментов по определению времен разрушения в образцах горных пород (габбро и искусственный материал) при трехточечном изгибе получено, что времена разрушения образцов при нагрузке 45 кг составляют 1 и 0,3 с соответственно. Именно эти времена разрушения являются контрольными для определения параметра модели  $\sigma_0^*$ , характеризующего скорость накопления повреждений в модели квазихрупкой среды.

Остальные параметры материала являются материальными константами, определенными в соответствующих опытах или взятых по литературным данным.

В результате приложения различного уровня нагрузок к балкам в численном эксперименте получены зависимости времен предразрушения от уровня нагрузки.

В результате модель квазихрупкой среды была верифицирована по экспериментальным данным о характерных временах разрушения образцов горных пород.

5. Численно изучены механизмы формирования очагов макроскопического разрушения как образцов горных пород, так и элементов горного массива в зависимости от вида нагружения, выявлены характерные особенности состояния горного массива с выработками.

Так как в горном массиве с выработками всегда реализуется сложно-напряженное состояние, то обязательно присутствуют области растяжений-сдвигов, в которых трещины растут наиболее быстро. Наличие интерфейсов с изменяемой кривизной также всегда приводит к появлению растягивающих напряжений в одном из направлений, даже в условиях сжимающих нагрузок. Особенно ярко эти эффекты растяжений проявились в 3D расчетах при наличии сжимающих тектонических напряжений. В ортогональном им направлении инициируются растягивающие напряжения. Таким образом, наличие тектонических напряжений в горном массиве с выработками всегда ухудшает обстановку, стимулируя усиленный рост повреждений.

Описаны три сценария развития очагов разрушения, отвечающие разным скоростям накопления повреждений, которые определяются уровнем действующих напряжений.

Анализ состояния НДС горного массива и/или образца горной породы проводился как методом Фурье-анализа – изучались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) флуктуаций напряжений от среднего тренда, так и методом Вейвлет-анализа (дискретное преобразование, базисная функция – мексиканская шляпа). Вблизи критического состояния резко меняется (уменьшается) наклон графика АЧХ характеристики.

Вейвлет картины, построенные для последовательных времен для реальной части однозначно выявляют место расположения развивающейся трещины и ее развитие во времени.

Таким образом, разработан программный инструмент, позволяющий по пространственно-временным записям параметров НДС отслеживать состояние нагружаемой среды как нелинейной динамической системы и оценивать ее близость к критическому состоянию.

6. Численно изучены особенности эволюционных сценариев (эволюции НДС) нагружаемых образцов горных пород и элементов горного массива вблизи критического состояния (вблизи глобальной потери устойчивости образцов и/или в горном массиве), выявлено наличие предвестников наступления глобальной катастрофы.

На тестовых расчетах показано, что образцы горных пород, а также элементы горного массива вблизи критического состояния проходят стадии эволюционного процесса, присущие подавляющему большинству многомасштабных нелинейных динамических систем: динамического хаоса, самоорганизованной критичности и глобальной потери устойчивости.

Исследование особенностей эволюционных сценариев проведено на основе статистического анализа флуктуаций параметров напряженно-деформированного состояния нагружаемых образцов горных пород и элементов горного массива вблизи критического состояния. Применены методы Фурье-анализа, а также вейвлет-анализа. В расчетах получено, что изменение наклона амплитудно-частотных характеристик флуктуаций напряжений является наиболее

показательным индикатором изменения состояния среды, в том числе индикатором близости системы к критическому состоянию.

В расчетах также установлено, что по мере приближения к критическому состоянию (стадии глобальной потери устойчивости) частота событий, превосходящих по амплитуде средний уровень флуктуаций, возрастает, что находится в соответствии с известной моделью формирования очага разрушения в геосреде – моделью лавинно-неустойчивого трещинообразования.