

На правах рукописи



Франц Владимир Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОВАТОСТИ
ДЛЯ ПРОГНОЗА ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ СДВИГЕ**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный горный университет» (УГГУ) на кафедре шахтного строительства.

Научный руководитель: **Корнилков Михаил Викторович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Барях Александр Абрамович**, доктор технических наук, директор ФГБУН Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, член-корреспондент РАН.
Аксенов Анатолий Аркадьевич, кандидат технических наук, директор Уральского филиала ОАО «ВНИМИ».

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург).

Защита состоится «20» июня 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.010.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН) по адресу: 620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58, конференц-зал (к. 405).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института горного дела УрО РАН и на сайте www.diss.igduran.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.А. Панжин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование устойчивости обнажений пород в выработках является важнейшей научной и практической задачей в горном деле. Решению данной задачи посвящены многочисленные публикации, где критерием устойчивости является соотношение действующих напряжений и прочности породного массива. При этом теория вопроса нередко сводится к рассмотрению идеально упругой или идеально сыпучей среды. Однако потеря устойчивости трещиноватых массивов определяется преимущественно сдвигом пород по трещинам. Надежной методики осуществления сдвига пород по реальным трещинам массива (натурного эксперимента) практически не существует. Поэтому при решении данного вопроса преобладают лабораторные исследования на эквивалентных материалах (гипс, цемент и пр.). Причем, как правило, условия подобия не выдерживаются или, вообще, не рассматриваются, и реальный профиль трещины заменяют геометрически правильными выступами (зубцами). В такой модели на основе чисто геометрических построений дается теория сдвига породы по трещине. Очевидно, что реальные трещины далеки от такой идеализированной модели. Поэтому нужно проводить эксперименты с горной породой и присущей ей реальной трещиной. Однако это связано с двумя проблемами – трудностью сохранения природной трещины в образце и невозможностью многократных испытаний с одной и той же трещиной, что требуется для статистически надежных выводов. В связи с этим наиболее эффективным методом исследований служит статистическое (имитационное) моделирование.

Таким образом, тема представленной диссертации, направленной на изучение указанных вопросов, является актуальной.

Работа выполнена в рамках стратегической программы исследований технологической платформы твердых полезных ископаемых.

Объект исследований – трещиноватые скальные породы и породные массивы месторождений Урала.

Предмет исследований – закономерности процесса сдвига горных пород по трещинам с различной их геометрией.

Цель работы – повышение надежности прогноза прочности и устойчивости трещиноватого породного массива на основе фрактального анализа трещинной структуры горных пород.

Идея работы заключается в использовании фрактального анализа природных трещин для статистического моделирования и прогноза устойчивости обнажений пород, осложненных поверхностями ослабления.

Задачи исследований:

1. Исследование комплекса свойств и трещиноватости горных пород.
2. Фрактальный анализ геометрии трещин.
3. Экспериментальные исследования сдвига горных пород по трещине.
4. Количественная оценка шероховатости и извилистости трещин как параметров паспорта прочности горных пород.
5. Разработка статистической (имитационной) модели процесса сдвига горных пород по трещине.
6. Совершенствование методов прогноза прочности и устойчивости трещиноватых горных пород и массивов.

Методы исследований: современные стандартные методики лабораторного определения свойств горных пород; методы и инструментарий фрактальной геометрии; статистическое моделирование методом Монте-Карло; аналитические исследования закономерностей сдвига горных пород по трещине на основе классических представлений физики горных пород и геомеханики; оценка результатов с позиций математической статистики и теории вероятностей.

Защищаемые научные положения:

1. Извилистость природных трещин как фрактальных объектов определяется спектральным анализом поверхности по критической величине топотезы; коэффициент шероховатости и фрактальная размерность траектории трещин связаны степенной зависимостью.
2. Статистические модели трещин основаны на изученных параметрах фрактального броуновского движения и вероятностных характеристиках их трещинной структуры; многократный розыгрыш моделей методом Монте-Карло позволяет адекватно оценивать прочность горных пород при сдвиге по трещине.
3. Прогноз устойчивости обнажений пород, ослабленных трещинами, основывается на результатах имитационного моделирования процесса сдвига, учитывающего фрактальные характеристики трещин, дилатансию горных пород и величину жесткости трещин.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы обеспечивается достаточным (для принятой надежности 95 %) объемом экспериментальных исследований; доказанной адекватностью статистической модели сдвига горных пород по трещине; удовлетворительным (в пределах естественно-

го разброса данных) соответствием аналитических и экспериментальных результатов прогноза прочности горных пород при сдвиге по трещине.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

- впервые предложен и обоснован метод оценки коэффициента шероховатости природных трещин по фрактальной размерности их траектории;
- обоснована процедура выделения и оценки характеристик извилистости трещин на основе спектрального анализа их сечений как случайных функций;
- предложен способ идентификации трещин по величине топотезы и фрактальной размерности их поверхности, определяемых спектральным и триангуляционным методами;
- установлена зависимость сдвиговой жесткости трещины от нормальных напряжений сжатия, учитывающая фрактальную размерность траектории трещины;
- разработана методика компьютерного анализа геометрии трещин, основанная на генерации их вероятностной траектории по законам фрактального броуновского движения и аппроксимации координат берегов трещины кусочно-линейными функциями;
- предложен новый способ оценки прочности материала берегов трещины путем внедрения в поверхность трещины плоского штампа;
- разработана компьютерная имитационная модель процесса сдвига горных пород по трещине, отличающаяся тем, что математические соотношения модели базируются на фрактальных характеристиках трещинной структуры пород;
- обоснована расчетная схема прогноза прочности и устойчивости обнажений пород, базирующаяся на результатах имитационного моделирования процесса сдвига пород по трещине с учетом вероятностных и фрактальных характеристик формирования природных трещин.

Практическая значимость работы заключается в обосновании методов фрактального анализа природных трещин, позволяющих определять параметры паспорта прочности трещиноватых породных массивов; в разработке статистической (имитационной) модели сдвига пород по трещине, реализация которой повышает точность и надежность прогноза прочности и устойчивости обнажений трещиноватых пород.

Личный вклад автора состоит в его непосредственном участии в лабораторных исследованиях свойств и сдвиговой прочности горных пород; фрактальном анализе трещин; разработке статистической модели процесса сдвига пород

по трещине; формировании основных выводов и рекомендаций по результатам исследований.

Реализация результатов работы. Комплексная методика прогноза прочности и устойчивости трещиноватого породного массива, включающая: комплексный фрактальный анализ геометрии трещин; процедуру построения паспорта прочности при сдвиге горных пород по трещине; комплект компьютерных программ и статистическую модель процесса сдвига; алгоритм расчета устойчивости обнажений пород с учетом геометрии поверхности ослабления, передана для использования в организации: ЗАО «Проекты и Технологии – Уральский регион», Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых «Уралмеханобр», ОАО «Уральский проектно-изыскательский институт транспортного строительства».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы для подготовки учебно-методических пособий и при проведении занятий по курсам «Моделирование физических процессов в горном деле», «Физика горных пород», «Математические методы в горном деле», а также в организации научно-исследовательской работы студентов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и её отдельные результаты докладывались на X Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2016 г.), на V Международной конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений» (г. Екатеринбург, 2016 г.), на Международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам» (г. Екатеринбург, 2016 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 9 научных работах, из них 5 статей – в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Объем и структура работы. Объем диссертации составляет 156 страниц машинописного текста, включая 96 рисунков и 13 таблиц. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 84 наименований и приложения.

В главе 1 на основе анализа современных методов и средств прогноза устойчивости трещиноватых горных пород и массивов поставлена цель и обоснованы задачи исследований.

В главе 2 приводятся результаты экспериментального изучения свойств горных пород и их сдвиговой прочности, обоснование методики фрактального анализа природных трещин и построения паспортов прочности.

Глава 3 посвящена разработке, проверке работоспособности и адекватности имитационной модели процесса сдвига горных пород по трещине, реализации модели и анализу результатов.

В главе 4 обсуждаются результаты прогноза прочности и устойчивости трещиноватых горных пород и массивов на базе экспериментальных и модельных исследований процесса сдвига горных пород по трещине.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору М. В. Корнилку, лично доктору технических наук О. Г. Латышеву, а также сотрудникам кафедры шахтного строительства ФГБОУ ВО УГГУ за оказанную помощь и поддержку при написании диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Прочность и устойчивость трещиноватых массивов определяется преимущественно сдвигом вмещающих пород по трещине. Применительно к скальным породам результаты исследования данного вопроса отражены в работах отечественных (Л. И. Барон, Э. Г. Газиев, В. Т. Глушко, М. Г. Зерцалов, Ю. М. Карташов, О. Г. Латышев, М. Е. Певзнер, И. И. Попов, М. М. Протодяконов, М. В. Рац, В. И. Речицкий, К. В. Руппенейт, Г. Л. Фисенко, Г. П. Черепанов и др.) и зарубежных ученых (Н. Р. Бартон, В. Витке, Р. Гудман и др.).

Основой прогноза устойчивости является паспорт прочности при сдвиге горных пород по трещине. Анализ исследований показывает, что наиболее адекватным является подход Н. Бартона. Уравнения паспорта прочности описывают две стадии процесса сдвига. На первом этапе до некоторого порогового значения сжимающих напряжений $\sigma^* = \sigma_{тр}/10^{(\alpha_B/K_{ш})}$ зависимость предельных касательных и нормальных напряжений описывается уравнением:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}[\varphi_{ост} + K_{ш} \cdot \lg(\sigma_{тр}/\sigma)] + C. \quad (1)$$

Второй этап соответствует уравнению:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}[\varphi_{ост} + \alpha_B] + C. \quad (2)$$

Таким образом, уравнения паспорта прочности определяются следующими параметрами: коэффициентами извилистости α_B и шероховатости $K_{ш}$; прочно-

стью берегов трещины $\sigma_{тр}$; сцеплением C и углом внутреннего трения $\phi_{ост}$. Именно они являются объектами исследований.

Извилистость определяет дилатансию при сдвиге породы по трещине, т.е. подъем берегов трещины по линии извилистости. Шероховатость учитывает те неровности берегов трещины, которые при данном усилии прижатия срезаются в процессе сдвига. Аналитически вопрос оценки шероховатости и извилистости решен только для идеальной модели геометрически правильных зубцов. Для анализа реальной ситуации предлагается (М. Г. Зерцалов) сравнивать траекторию трещины с некоторыми эталонами (рисунок 1).

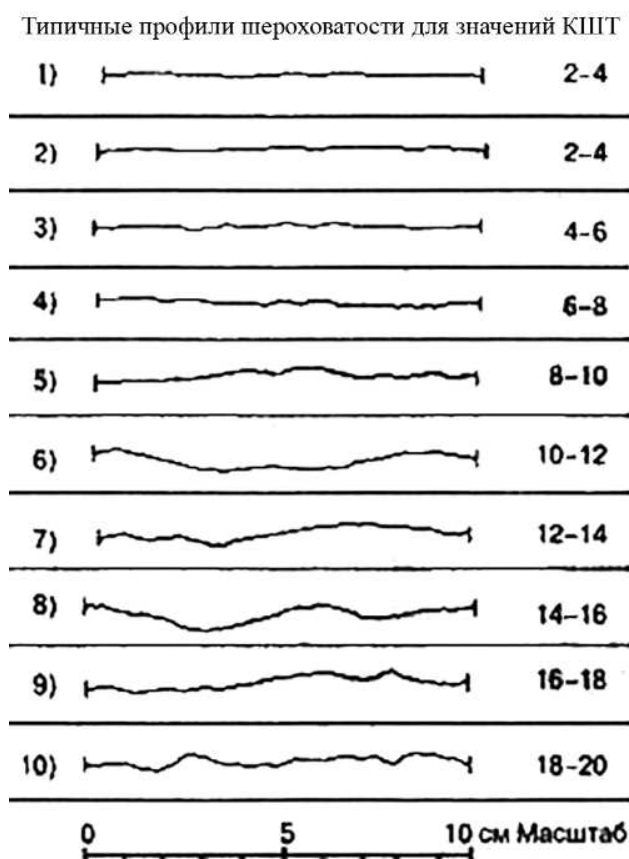


Рисунок 1. Шаблоны трещин
(по М. Г. Зерцалову)

Но очевидно, что такое сравнение весьма субъективно. Необходима разработка количественного критерия выделения и оценки шероховатости и извилистости трещин.

С этой целью нами сканированы траектории эталонных трещин и по разработанным компьютерным программам определены их координаты. Отклонения координат от средней линии трещины $h(l)$ можно рассматривать как случайную величину, описываемую корреляционной функцией (К. В. Руппенейт):

$$K(\Delta m) = \frac{1}{n-m} \sum_{j=0}^{n-m-1} h(j\Delta l) \cdot h[(j+m)\Delta l], \quad (3)$$

где $\Delta l m = m \cdot \Delta x$ при $(m = 0, 1, 2, \dots)$.

Проведенный анализ показал, что только для первых четырех эталонных трещин наблюдается устойчивая связь коэффициента шероховатости с корреляционной функцией. Последние четыре эталона этой связи не имеют. Это обусловлено тем, что их траектория уже не представляют классическую случайную

функцию. Накладывается неслучайная составляющая, а именно, извилистость трещин, что проявляется даже при визуальном сравнении эталонов.

Тогда задачей является исключение этой неслучайной составляющей, то есть извилистости трещин. Анализ природных трещин показывает, что линия их извилистости не описывается ни одной из гладких функций. Нами установлено, что наиболее адекватно извилистость трещин описывается кусочно-линейными функциями. Коэффициент волнистости представляет собой средний угловой коэффициент этих функций.

Доказано, что трещины представляют собой фрактальные объекты, то есть их траектории самоподобны и инвариантны к масштабным преобразованиям. В соответствии с законом Ричардсона их размер зависит от масштаба измерений δ :

$$L(\delta) = \alpha \cdot \delta^\beta, \quad (4)$$

где α - некоторая константа; β - отрицательный показатель степени.

Траектории трещин описываются нигде не дифференцируемыми линиями, имеющими дробную размерность $d_f = 1 - \beta$. Фрактальная размерность трещин определяется на основе линейной аппроксимации зависимости (4) в двойных логарифмических координатах. Из этого уравнения следует: $\log L = \beta \log \delta + \log \alpha$, где $\log \alpha = \text{const}$.

Фрактальная размерность трещин определялась методом «фрактальных длин», предложенным Л. Берлагой и Л. Клейном. Анализ результатов показал, что зависимость длины линии шероховатости от шага измерений в двойных логарифмических координатах строго линейна. Это подтверждает фрактальную природу трещин. На основании корреляционного анализа установлено, что коэффициент шероховатости трещин надежно определяется фрактальной размерностью ее траектории d_f :

$$K_{\text{ш}} = 0,5 d_f^{5.2}. \quad (5)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,972$ свидетельствует о статистически надежной связи.

Следующей задачей является разработка критерия выделения извилистости природных трещин. Для этого использован метод спектрального анализа, хорошо разработанный для космической и аэрофотосъемки (А. А. Потапов), где профиль земной поверхности также представляется фрактальным объектом. Поэтому данный инструментарий можно также применить для анализа профилей трещин. Для оценки как геометрических, так и статистических свойств поверхности вводится понятие *топозезы* L_0 , которая связана с дисперсией следующим образом: $\sigma^2 = L_0 \lambda_0 = L_0 / f_0 = 2\pi L_0 / \omega_0$, где $\lambda_0 = 1/f_0$ - наибольшая длина волны поверхности.

Комплексной характеристикой неровностей рельефа служит пространственный спектр мощности, который связан с фрактальной размерностью D_f соотношением $G(f) = L_0 f^{(2D_f - 7)}$. Спектральный анализ принятых к изучению трещин и их шаблонов (рисунок 1) показал, что усложнение траектории трещин сопровождается закономерным ростом их спектра мощности. Характерным признаком (критерием) выделения извилистости трещин служит величина топотезы $L_0 > 10^{-5}$ м.

Помимо чисто геометрических характеристик, следует учитывать прочность стенок трещины и внешнее сжимающее усилие по нормали к средней линии трещины. По определению шероховатостью следует считать те неровности берегов трещины, которые при данных условиях будут срезаться, а извилистость будет определять дилатансию горной породы. В связи с этим разработана процедура анализа трещин с целью разделения факторов шероховатости и извилистости. Ее идея состоит в последовательном построении от одной из вершин трещины линии, квадраты отклонений от которой всех точек трещины будут минимальны (линии тренда). Эта линия рассечет трещину на несколько отрезков. Каждый из них можно оценить максимальной амплитудой f_i на базе a_i . Отношение f_i/a_i уже будет некоторой геометрической мерой данного участка трещины. Процедура повторяется для каждого выделяемого участка до тех пор, пока отношение f_i/a_i не будет заведомо соответствовать шероховатости трещины, т. е. выделенные неровности будут разрушаться при данном давлении и свойствах берегов трещины.

Важнейшей характеристикой при определении паспорта прочности является длина несущей способности трещины с учетом ее извилистости и шероховатости. В соответствии с законом Ричардсона истинная (фрактальная) длина трещины $L_{фр} = L_0(L_0/\delta)^{df-1}$, где L_0 – линейная длина трещины, принимаемая как расстояние между ее вершинами; δ – принятая точность (шаг) измерений трещины. Шаг измерений δ определится существом решаемой задачи и требуемой точностью результатов. Опыт показывает, что в большинстве случаев достаточно адекватные результаты дает шаг $\delta = L_0/100$.

Таким образом, нами разработан комплекс компьютерных программ и методика определения показателей шероховатости и извилистости трещин.

Видимая на обнажении или образцах пород траектория трещины – лишь одна из множества реализаций ее поверхности, геометрия которой и определяет сопротивление горных пород сдвигу. В связи с этим выполнено профилирование поверхностей трещин различных скальных пород Урала. По полученным координатам выполнен фрактальный анализ геометрии поверхности трещин. Все ис-

пользуемые методы такого анализа можно разделить на две группы – исследование совокупности сечений (спектральный анализ, метод дисперсий, метод Хёрста) и анализ координат поверхности как единой статистической базы (метод покрытия, триангуляционный метод).

Анализ результатов применения указанных методов к оценке фрактальных характеристик исследуемых трещин показал, что наиболее информативными являются два метода – описанный метод спектрального анализа сечения и триангуляционный метод. Спектральный анализ позволяет оценить топорность поверхности и выявить в трещине наличие извилистости. Метод триангуляции ценен тем, что позволяет оценить истинную площадь поверхности трещин. Суть метода триангуляции заключается в аппроксимации поверхности набором пирамид разного масштаба и измерении их боковых поверхностей. В качестве высоты пирамид принимается максимальное превышение координат z в данной области. Вычисляется апофема A каждой пирамиды и определяется ее боковая поверхность. При неравных сторонах основания a, b площадь боковой поверхности $S = (a A_2 + b A_1)$, где $A_1 = [(b/2)^2 + z^2]^{1/2}$ и $A_2 = [(a/2)^2 + z^2]^{1/2}$. Для реализации триангуляционного метода разработана компьютерная программа, в которой на основе матрицы координат трещин определяется относительная суммарная площадь боковых граней пирамид S/S_0 , покрывающих поверхность трещины при ступенчатом изменении размеров сторон их основания d . Автоматически производится построение графика уравнения $\ln (S/S_0) = f(\ln d)$. Тангенс угла наклона графика $H = \operatorname{tg} \alpha$ определяет фрактальную размерность поверхности трещины $D_s = 2 + H$.

Анализ механизма сдвига горной породы по трещине позволил выделить основные факторы, определяющие данный процесс. Наиболее значимы: трение по берегам трещины; прочность материала берегов трещины; геометрия поверхности плоскостей трещины; свойства материала заполнителя трещины.

Для оценки трения по берегам трещины проведены экспериментальные исследования образцов с естественными поверхностями трещин и после их шлифования. Для сравнения испытаны на сдвиг соприкасающиеся поверхности наждачного камня. Полученные количественные оценки сцепления и коэффициента трения послужили основой построения паспортов прочности.

Прочность материала берегов трещин предлагается оценивать по величине отскока молотка Шмидта (А. И. Речицкий). Сравнение данного показателя с кубиковой прочностью материала показало их малое соответствие (коэффициент корреляции 0,3 – 0,5). Это обусловлено тем, что испытания молотком Шмидта производятся в динамике, а прочностные характеристики материала трещин,

формирующих сдвиг, заведомо являются статическими. В связи с этим нами предложена методика оценки прочности берегов трещин по результатам вдавливания в ее поверхность плоского цилиндрического штампа. Получаемая при этом величина контактной прочности P_k надежно взаимосвязана с прочностью пород при сжатии: $\sigma_{сж} = 0,068 P_k$. Кроме прочности материала берегов трещины внедрение штампа с замером деформации позволяет также оценивать контактный модуль упругости и коэффициент хрупкости. Также экспериментально установлены характеристики глинистых заполнителей трещин и изменение прочностных характеристик скальных пород при их увлажнении.

Результаты данных исследований создают базу для аналитического описания процесса сдвига горных пород по трещине. С этой целью проведены лабораторные испытания на сдвиг представительных пород Урала. Трещины образовывались путем раскалывания кернов по образующим или плоских образцов клиньями. Производилось профилирование образующихся поверхностей. По описанным выше методикам определялась вероятная траектория трещин, их фрактальная размерность и вычислялись коэффициенты шероховатости $K_{ш}$ и извилистости α_B . Установлено, что наиболее точно паспорта прочности описываются уравнениями (1-2). В качестве примера на рисунке 2 приведен паспорт прочности гранита Шарташского месторождения.

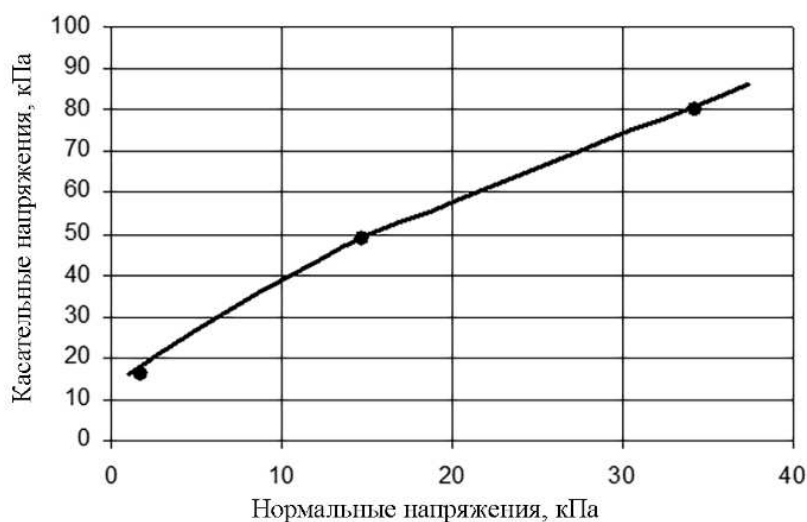


Рисунок 2. Паспорт прочности гранита

Для данной породы начальная часть паспорта прочности описывается нелинейным уравнением (1) вида: $\tau = \sigma \cdot \lg[54 + 11 \cdot \lg(450/\sigma)] + 7$. В финальной части эта кривая переходит в прямую, описываемую уравнением (2) вида:

$\tau = \sigma \cdot \lg[54+4,2]+25$. Граница перехода определяется прочностью при сжатии материала стенок трещины $\sigma_{тр} = 450$ кПа и составляет $\sigma^* = 15$ кПа.

Процесс сдвига горной породы по трещине определяется множеством случайных независимых факторов, учесть которые в единой детерминированной модели не представляется возможным. Кроме того, требуемые для достижения надежных результатов многократные испытания пород невозможно осуществить с одной и той же реальной трещиной. В этих условиях наиболее эффективным способом исследований является статистическое (имитационное) моделирование, основанное на методе Монте-Карло. В его основе лежат установленные количественные закономерности процесса, рассматриваемые в вероятностном аспекте.

Базой модели является генерация вероятной траектории трещин. Как показано выше, трещины в скальных горных породах являются фрактальными объектами, т. е. их траектории описываются нигде не дифференцируемыми самоподобными кривыми. Определяющим параметром является их фрактальная размерность. Доказано (Б. Мандельброт, Р. Кроновер), что такие объекты моделируются на основе соотношений фрактального броуновского движения. Главным инструментом является теория итерированных функций. Для графической (компьютерной) реализации используется «*терпл-графика*» (*turtle* – черепаха). При этом точка (черепашка) движется по экрану дискретными шагами, прочерчивая свой след. В случае развития трещины по модели фрактального броуновского движения ее приращение $\Delta x = x(t_2) - x(t_1)$ есть случайная величина, имеющая нормальное распределение вида:

$$P(\Delta x < x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t_2 - t_1)^H} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{\sigma(t_2 - t_1)^H}\right)^2\right] du, \quad (6)$$

где u – равномерно распределенная в интервале от 0 до 1 случайная величина; σ – масштабный коэффициент; $H = d - d_f$ – показатель Гельдера (для плоской модели топологическая размерность $d = 2$).

Таким образом, приращение подчиняется распределению Гаусса с математическим ожиданием:

$$M [|x(t_2) - x(t_1)|] = \sqrt{2/\pi} \sigma(t_2 - t_1)^H. \quad (7)$$

При компьютерном моделировании элемент случайности задается с помощью генератора случайных чисел. Максимальное приращение трещины в каждой итерации можно изменять в зависимости от требуемой разрешающей способно-

сти метода или из соображений последующего фрактального анализа получаемых трещин.

Данная процедура моделирует шероховатость трещин. Их извилистость (в зависимости от прогнозируемой ситуации) задается одним из двух способов – путем случайной реализации установленного распределения углов извилистости или непосредственным заданием координат характерных точек трещины. В последнем случае траектория трещины должна обязательно пройти через данные точки. В этом случае реализуется метод «срединных смещений», который заключается в генерации отклонений со все уменьшающимся шагом, задаваемым выражением:

$$\Delta y(t) = \frac{1}{2^{kH}} \sigma \sqrt{1 - 2^{2H-2}} g, \quad (8)$$

$$t = k/2^n \text{ при } k = 0, 1, \dots, 2^n.$$

Следующей задачей является моделирование зияющих трещин. В зависимости от конкретной ситуации предусмотрены следующие ситуации. Для трещин отрыва два их берега являются зеркальным отражением друг друга. Тогда для моделирования зияющих трещин достаточно сгенерировать одну поверхность, дублировать ее и отнести на нужное расстояние от первой. Для трещин сдвига задается шаг продольных перемещений δ и соответствующая ему дилатансия α . Параметры сдвига α и δ генерируются в модели на основании установленного закона распределения в зависимости от характера решаемой задачи. При этом, если траектории трещин пересекаются, то их общая часть принимается за площадь контактов.

Для построения модели сдвига требуется количественно оценить характеристики трещины. С этой целью разработана комплексная компьютерная программа анализа, включающая следующие блоки: формирование модели берегов трещины (по описанным выше правилам); оценка наличия извилистости трещины (по величине топотезы); аппроксимация траектории трещины кусочно-линейными функциями и определение показателя извилистости путем усреднения угловых коэффициентов этих функций; выделение линии шероховатости, определение ее фрактальной размерности и коэффициента шероховатости; моделирование сдвига трещины с учетом ее дилатансии для определения относительной площади контактов ее берегов ξ . Так, по результатам реализации моделей установлена зависимость относительной площади контактов берегов трещины от их фрактальной размерности:

$$\zeta_i = k d_{f0} (1 - b d_{fi}), \quad (9)$$

где d_{f0} – фрактальная размерность средней линии исходной трещины; k и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от размеров трещины и соотношения нормальных и сдвигающих деформаций. В частности, для изученных трещин данная зависимость описывается параметрами: $d_{f0} = 1,468$, $k = 7,9 \cdot 10^{-3}$, $b = 0,68$.

Реализация комплексной компьютерной программы анализа геометрии трещин программы иллюстрируется на рисунках 3-5.



Рисунок 3. Компьютерная модель берегов трещины



Рисунок 4. Аппроксимация участков линии извилистости кусочно-линейными функциями

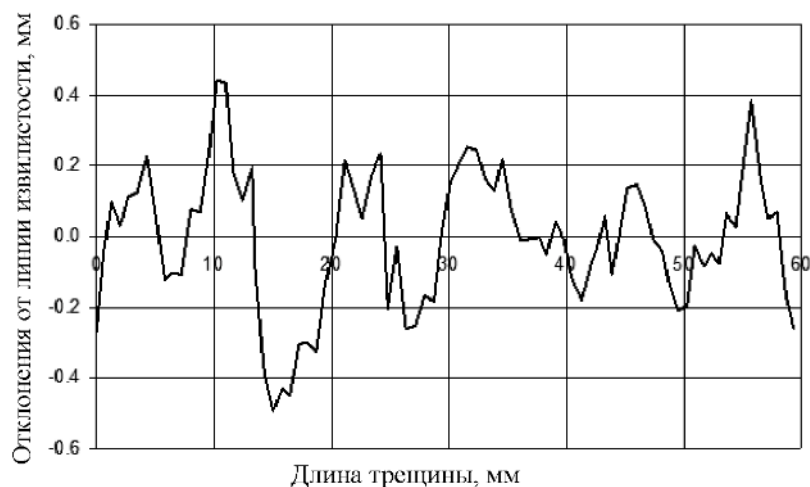


Рисунок 5. Отклонения от линии извилистости, формирующие шероховатость трещины

Полученные результаты анализа составляют основу математического аппарата имитационной модели сдвига горных пород по трещине. Модель включает два блока – оценку вероятностных характеристик деформации сдвига и построение паспорта прочности. На рисунке 6 в качестве примера представлена одна из реализаций модели сдвига.

На вход модели подаются прочностные и упругие свойства вмещающей трещину горной породы, полученные в результате описанного выше анализа геометрии трещины: фрактальная размерность d_f ; коэффициент шероховатости $K_{ш}$; показатель извилистости α_B ; относительная площадь контактов берегов трещины ξ при разном уровне нагрузки σ .

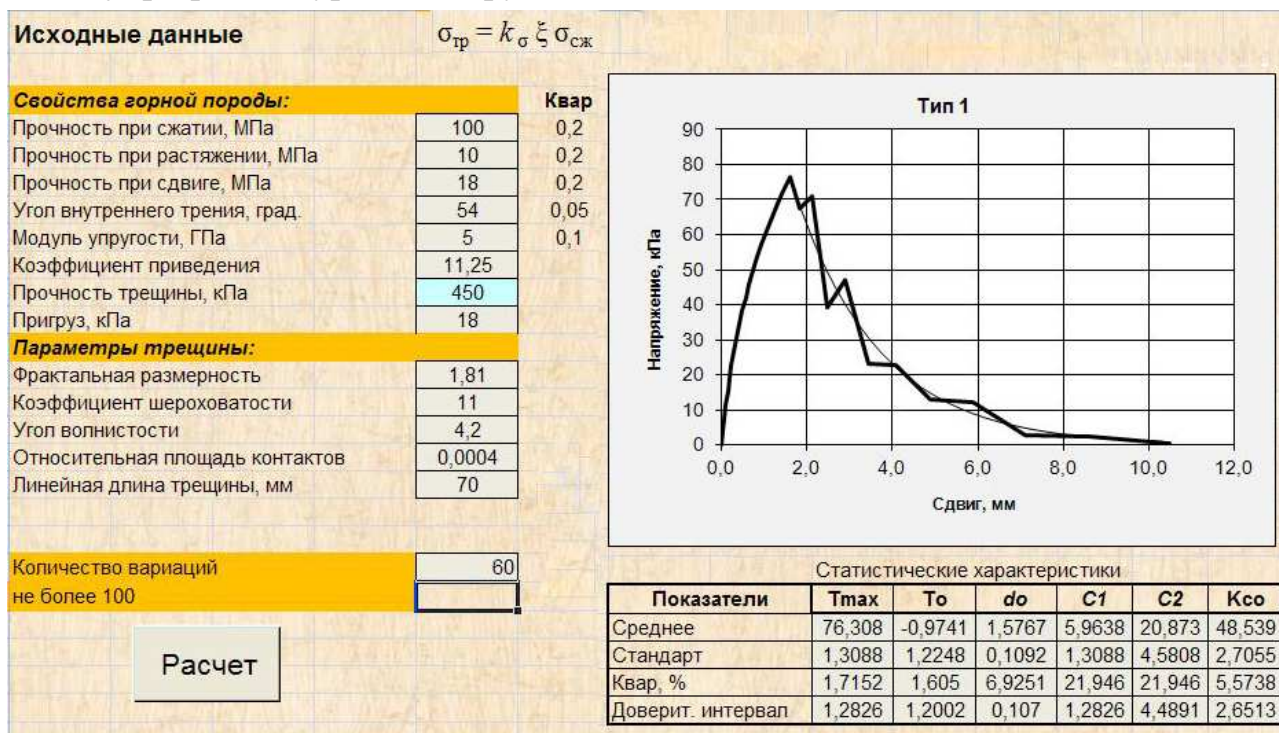


Рисунок 6. Реализация модели сдвига

Линии нагружения и спада нагрузки задаются соответственно уравнениями:

$$\delta_i = \delta_{\max} \Delta_{\delta} \exp(\tau_i / \tau_{\max} - 1), \quad (10)$$

$$\tau = (\tau_{\max} - \tau_{\text{ост}}) \exp[-q(\delta - \delta_{\max})] + \tau_{\text{ост}}, \quad (11)$$

где Δ_{δ} – шаг сдвига; q – масштабный коэффициент.

Предельное напряжение сдвига определится величиной сцепления C и относительной площадью контактов $\tau_{\max} = \xi C$. Соответствующая сдвиговая деформация:

$$\delta_0 = \frac{k_L \tau_{\max}}{K_{C0}} \sqrt[3]{\frac{L^2}{K_{ш}}}, \quad (12)$$

где k_L – масштабный множитель, зависящий от единицы измерения трещины L ; K_{C0} – сдвиговая жесткость трещины, зависит от прижимающей нагрузки σ и определяется установленной нами зависимостью:

$$K_{C0} = k d_f \exp(0,025 \sigma), \quad (13)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала берегов трещины.

Остаточная прочность:

$$\tau_{\text{ост}} = \tau_0 + \tau_0 (\text{tg } \varphi_c - \text{tg } \varphi_f), \quad (14)$$

где $\text{tg } \varphi_f$ и $\text{tg } \varphi_c$ ($\varphi_c < \varphi_f$) – соответственно угловые коэффициенты, характеризующие темп роста предельных напряжений сдвига и остаточной прочности; определяются путем анализа огибающей предельных кругов напряжений горной породы (методика О. Г. Латышева).

Ломаная линия спада нагрузки (рисунок 6) отражает процесс среза зубьев шероховатости трещины при ее сдвиге и моделируется методом срединных смещений, учитывающим фрактальную размерность линии шероховатости трещины.

Множественная реализация описанной выше модели сдвига и статистическое усреднение их результатов позволяют осуществить построение паспорта прочности с оценкой надежности результатов. На рисунке 7 показана реализация модели для трещины гранита.

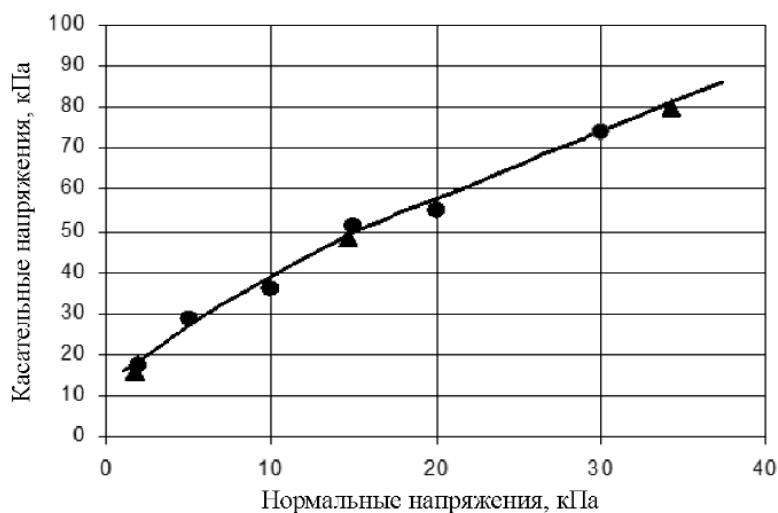


Рисунок 7. Паспорт прочности гранита
(модельное представление)

Здесь треугольными маркерами показаны опытные значения. На графике видно хорошее совпадение опытных данных с результатами моделирования, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Модель адаптирована к процедуре построения паспорта прочности при сдвиге горной породы по трещине с заполнителем. Если трещина полностью заполнена материалом и ширина ее зияния больше, чем суммарная высота зубьев, то сдвиг определится только прочностью материала заполнителя, и геометрия трещины роли играть не будет. Если мощность заполнителя меньше ширины

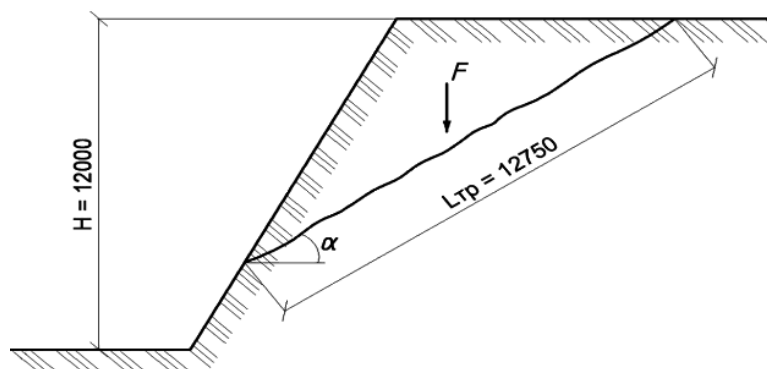
зрения трещины и прочность его ниже вмещающей породы, то процедура моделирования будет аналогичной описанной выше. Однако при этом в модель вводятся поправки на дилатансию, учитывающие сжимаемость заполнителя трещины.

Таким образом, реализация разработанной модели позволяет прогнозировать процесс сдвига различных горных пород с изменяющейся геометрией трещины.

Выполненные экспериментальные и модельные исследования создают базу для прогноза прочности и устойчивости обнажений трещиноватых пород. Такой прогноз осуществляется на основе совместного анализа паспортов прочности породного массива и сдвига пород по плоскостям ослабления (трещинам). Проверка работоспособности (апробация) методики выполнена для двух типовых горно-геологических ситуаций.

Прогноз устойчивости пород при открытой разработке выполнен для условий месторождения «Удачное» (рисунок 8). Для вмещающих пород (доломиты) определены свойства и произведен их анализ. Выполнен фрактальный анализ трещины. Определены коэффициенты шероховатости и извилистости трещины. Построен паспорт прочности при сдвиге породы по трещине. Для расчета устойчивости использована методика И. И. Попова.

а)



б)



Рисунок 8. Поверхность ослабления (трещина):

а – схема уступа карьера,

б – фотография поверхности ослабления (трещины)

Угол падения трещины в массиве $\alpha = 30$ град. Тогда коэффициент устойчивости $n_y = 1,1$. Однако, как показывают расчеты, при угле падения трещины в 35 град. коэффициент устойчивости становится меньше единицы. Если принять допустимую при проектировании открытых горных работ величину коэффициента устойчивости $n_y = 2,0$, то допустимая нагрузка на уступ карьера составит $F = 3,4$ МПа.

Для условий строительства выработок рудника «Сафьяновская медь» произведен указанный выше комплекс исследований. Выполнен прогноз устойчивости по схеме вывалообразования методом «отсеков», адаптированный к условиям подземной выработки в работе А. Г. Протосени (рисунок 9).

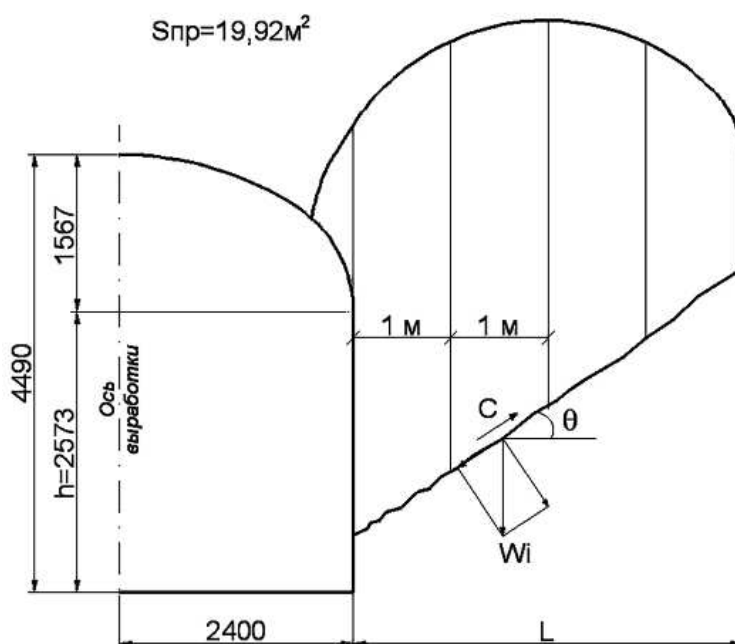


Рисунок 9. Расчетная схема к определению устойчивости пород при сдвиге по трещине

Критерий устойчивости: $F = \text{tg } \varphi / \text{tg } \theta + 2 n C / (\sum W_i \sin 2\theta)$, где n – число отсеков. При угле падения трещин в массиве $\theta = 30$ град критерий устойчивости составит $F = 1,4$. Можно сделать вывод, что для данных условий породы относятся к классу слабой устойчивости и для выработки необходимо соответствующее крепление.

При прочих равных условиях критерий устойчивости во многом зависит от угла падения трещины. Данная зависимость представлена на рисунке 10.

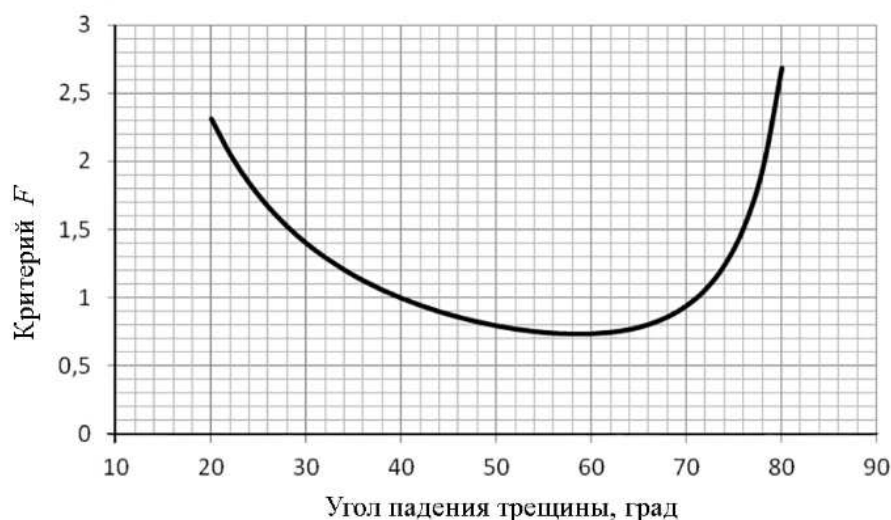


Рисунок 10. Влияние угла падения трещины на устойчивость пород в выработке

График показывает, что для данных условий наиболее опасны трещины с углом падения 60 град. Напротив, углы менее 22 и более 78 град. имеют $F > 2$, т.е. породы устойчивые, и выработка может не крепиться.

Таким образом, использование результатов теоретических и модельных исследований позволяет осуществлять прогноз устойчивости горных пород в выработках, имеющих плоскости ослабления (трещины).

Заключение

В диссертации дано новое решение научно-практической задачи прогнозирования устойчивости трещиноватых горных пород и массивов, имеющее существенное значение для проектирования безопасной технологии горного производства.

При достижении поставленной цели и решении задач диссертационного исследования в работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. На основе статистического анализа координат различных трещин скальных пород обоснована процедура определения вероятностной траектории трещин по их следу на обнажении.
2. Обоснован способ выделения характеристик шероховатости и извилистости трещин по величине топотезы их траектории, рассматриваемой как пространственный спектр мощности.

3. Предложена процедура аппроксимации траектории трещин кусочно-линейными функциями, угловые коэффициенты которых определяют показатель извилистости трещин.

4. Установлено, что коэффициент шероховатости трещин статистически надежно оценивается фрактальной размерностью их траектории.

5. Сравнительная оценка фрактальных характеристик трещин позволила установить комплексный критерий их идентификации с помощью методов спектрального и триангуляционного анализа координат поверхности трещин.

6. Разработана компьютерная процедура комплексного анализа трещин, включающая оценку их статистических характеристик, фрактальной размерности траекторий, определение коэффициентов шероховатости и извилистости трещин.

7. Определены основные факторы, определяющие характеристики процесса сдвига горных пород по трещине.

8. На основании экспериментальных исследований и фрактального анализа трещин произведено построение паспортов прочности при сдвиге различных скальных пород по трещине.

9. Установленные закономерности позволили разработать статистическую (имитационную) модель процесса сдвига горных пород по трещине с вероятностной оценкой сдвиговой и остаточной прочности пород.

10. Многократная реализация (розыгрыши) модели при различных условиях сдвига позволяет производить построение паспорта прочности пород и прогнозировать устойчивость обнажений массива, ослабленного трещиной. Удовлетворительное соответствие экспериментальных данных и результата моделирования свидетельствует об адекватности предложенной модели.

11. Разработанная комплексная методика прогноза прочности и устойчивости трещиноватого породного массива передана для использования в ЗАО «Проекты и Технологии – Уральский регион», Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых «Уралмеханобр», ОАО «Уральский проектно-изыскательский институт транспортного строительства». Результаты исследований используются в учебном процессе.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, определяемых Высшей аттестационной комиссией

1. Латышев, О. Г. Фрактальная размерность трещины как мера ее шероховатости / О. Г. Латышев, В. В. Франц, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. – 2015. – №8. – С. 55-60.
2. Латышев, О. Г. Определение геометрических характеристик трещин для построения паспорта прочности горных пород / О. Г. Латышев, В. В. Франц, М. В. Корнилков, В. В. Соколов // Изв. вузов. Горный журнал. – 2016. – №1. – С. 58-65.
3. Латышев, О. Г. Исследование поверхности природных трещин как фрактального объекта / О. Г. Латышев, В. В. Франц, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. – 2016. – №3. – С. 44-50.
4. Латышев, О. Г. Статистическое моделирование природных трещин / О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа, В. В. Франц // Изв. вузов. Горный журнал. – 2016. – №5. – С. 38-45.
5. Латышев, О. Г. Моделирование и прогноз прочности при сдвиге горных пород по трещине / О. Г. Латышев, В. В. Франц, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. – 2017. – №2. – С. 50-56.

Статьи, опубликованные в других изданиях

6. Франц, В. В. Лабораторные исследования сдвига горных пород по трещине / В. В. Франц, В. В. Соколов, Т. Д. Ланских, А. В. Смирнягина // XIV Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа – регионам». Сборник докладов; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – С. 362-363.
7. Франц, В. В. Компьютерное представление трещинной структуры горных пород / В. В. Франц // XIV Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа – регионам». Сборник докладов; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – С. 364-365.
8. Латышев, О. Г. Паспорт прочности трещиноватого породного массива / О. Г. Латышев, В. В. Франц, Д. В. Прищепа, В. В. Соколов // V Международная конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов под-

земных сооружений», г. Екатеринбург, 7-8 октября 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – С.118-122.

9. Франц, В. В. Методика оценки прочности материала поверхности трещин для прогноза устойчивости обнажений пород / В. В. Франц // V Международная конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений», г. Екатеринбург, 7-8 октября 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – С. 201-205.