

УДК 519.246.8+539.42

**ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГАББРО
ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

С.А. Имашев

Представлены результаты исследования вариаций электросопротивления образцов габбро в процессе деформации при одноосном сжатии. Фрактальный анализ шумовой составляющей временного ряда нормированного электросопротивления R/R_0 образцов с помощью метода DFA (анализ флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов) показал наличие характерного минимума в вариациях параметра Херста, который может быть связан с моментом перехода материала от стадии упрочнения к процессу разрушения. Полученные результаты согласуются с данными, полученными для электросопротивления образцов других горных пород, в частности, гранита и мрамора.

Ключевые слова: фрактальный анализ; метод DFA; параметр Херста; габбро; электросопротивление.

**БИР ОКТУК КЫСУУДА ГАББРО ҮЛГҮЛӨРҮНҮН ЭЛЕКТР КАРШЫЛЫГЫН
ФРАКТАЛДЫК ТАЛДОО**

Бир октук кысуудагы деформация процессинде габбро үлгүлөрүнүн электр каршылыгынын вариацияларын изилдөө натыйжалары көрсөтүлдү. DFA ыкмасын колдонуу аркылуу убактылуу катарын шуулдоо түзгөн R/R_0 үлгүлөрүнүн нормалдаштырылган электрдик каршылыгына фракталдык талдоо жүргүзүлдү жана анда Херст параметринин вариацияларына мүнөздүү минимум байкалды. Бул минимум материалдын катуулануу стадиясынан бузулуу процессине өтүшү менен байланыштуу болушу мүмкүн. Бул натыйжалар, башка тоо тектердин, атап айтканда гранит жана мрамор үлгүлөрүнүн электр каршылыгы жөнүндө маалыматтары менен төп келишет.

Түйүндүү сөздөр: фракталдык талдоо; DFA методу; Херст параметри; габбро; электр каршылыгы.

**FRactal ANALYSIS OF ELECTRICAL RESISTANCE OF GABBRO SAMPLES
DURING UNIAXIAL COMPRESSION**

S.A. Imashev

The article presents the results of study of electrical resistance of gabbro samples during deformation under uniaxial compression. Fractal analysis of noise component of normalized electrical resistance R/R_0 of the samples using DFA method (Detrended Fluctuation Analysis) showed presence of characteristic minimum in variations of Hurst exponent, which can be related to the moment of material transition from the compaction stage to the fracture process. The obtained results are in agreement with electrical resistance of samples of other rocks, in particular granite and marble.

Keywords: fractal analysis; DFA method; Hurst exponent; gabbro; electrical resistance.

Введение. Исследование процессов деформации в образцах горных пород в ходе их протекания является одной из важных задач изучения оклика геосреды на энергвоздействие [1, 2]. Одним из методов количественной оценки повреждаемости образца геоматериала является измерение его электрофизических характеристик [3–5]. В частности, вариации электросопротивления образца во время деформирования и разрушения могут дать дополнительную информацию о процессах, про-

текающих в нем, а также отражать структурные изменения, что не всегда выявляется при использовании традиционных методов контроля повреждаемости [6].

При исследовании деформации и разрушения образцов гранита (месторождение Каинды, Кыргызстан) и мрамора (месторождение Ак-Таш, Кыргызстан) при одноосном сжатии, на фоне линейного роста деформаций наблюдались скачки и периоды ускорения деформаций, связанные

с трещинообразованием и подготовкой к разрушению, которые показывали и вариации электрического сопротивления. А именно, характерный минимум нормированного сопротивления R/R_0 совпадал со скачкообразным ростом поперечной деформации, являясь результатом активизации трещинообразования, что подтверждалось всплеском активности акустической эмиссии dN/dt . При этом каждое значительное изменение в накоплении событий акустической эмиссии N , и соответственно, ее активности, сопровождалось откликом в значениях нормированного сопротивления R/R_0 [6].

Анализ вариаций электросопротивления этих образцов показал, что в обоих случаях наблюдается снижение сопротивления до минимума при нагрузках ниже 61 и 65 % от предела прочности для мрамора и гранита соответственно (рисунок 1). Этот отчетливый минимум электросопротивления соответствует моменту перехода материала от стадии упрочнения к процессу разрушения, что согласуется с результатами, полученными в работе [7], где образец гранита показал резкое падение значений b -value в диапазоне напряжений 60–65 % от предела прочности, что объяснялось неупругой объемной деформацией за счет формирования большого количества новых микротрещин.

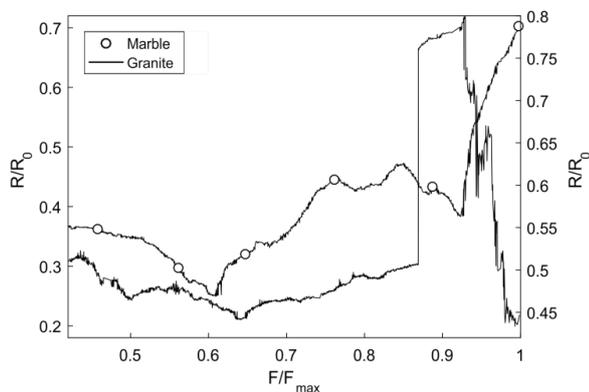


Рисунок 1 – Вариации электросопротивления образцов мрамора и гранита в зависимости от уровня нагрузки

Однако указанные особенности поведения нормированного электросопротивления образцов мрамора и гранита не просматривались в явном виде в экспериментах над образцами габбро. Целью настоящего исследования является анализ вариаций электросопротивления образцов габбро на основе методов фрактального анализа на предмет выявления структурирования шумов при переходе геоматериала от стадии упрочнения к стадии разрушения.

Методика. Эксперименты проводили на рычажной установке [8], которая позволяет реали-

зовать режим одноосного сжатия с максимальной нагрузкой до 250 кН. Для испытаний были изготовлены образцы габбро (Gb1, Gb2, Gb3) в форме правильной призмы с размерами 30 мм в длину (ось X), 20 мм в ширину (ось Y) и 60 мм в высоту (ось Z) (рисунок 2).

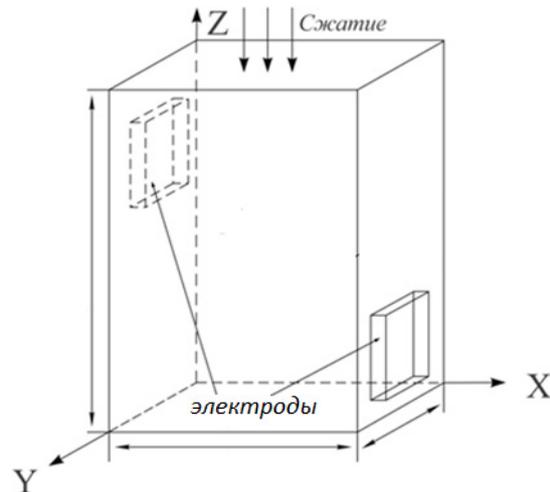


Рисунок 2 – Схема проведения эксперимента

Для измерения диэлектрических параметров образцов в ходе эксперимента использовали измеритель иммитанса Актакон АМ-3001, который представляет собой устройство для измерения RLC-характеристик, добротности и тангенса угла диэлектрических потерь на 5 частотах при точности измерений 0,05 %. Для автоматизации процесса измерения разработана программа управления прибором и сбора данных через последовательный интерфейс RS-232. Считывание значений проводили на 5 частотах: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 100 кГц.

Для оценки фрактальных свойств был использован метод анализа флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов – Detrended Fluctuation Analysis (DFA) [9–11].

Результаты и обсуждение. Для фиксации изменений в структуре образца производили снимки поверхности образца до и после разрушения с помощью микроскопа Leica DM IL (рисунок 3).

На фотоснимках видно, что наряду с крупной трещиной, проходящей вдоль материала образца, приведшей к его разлому, также более отчетливо выделялись и границы зерен за счет возникновения трещин вдоль границ. Возникновение этих трещин вдоль границ зерен горной породы является причиной вариаций сопротивления, наряду с закрытием порового пространства в процессе деформации [5].

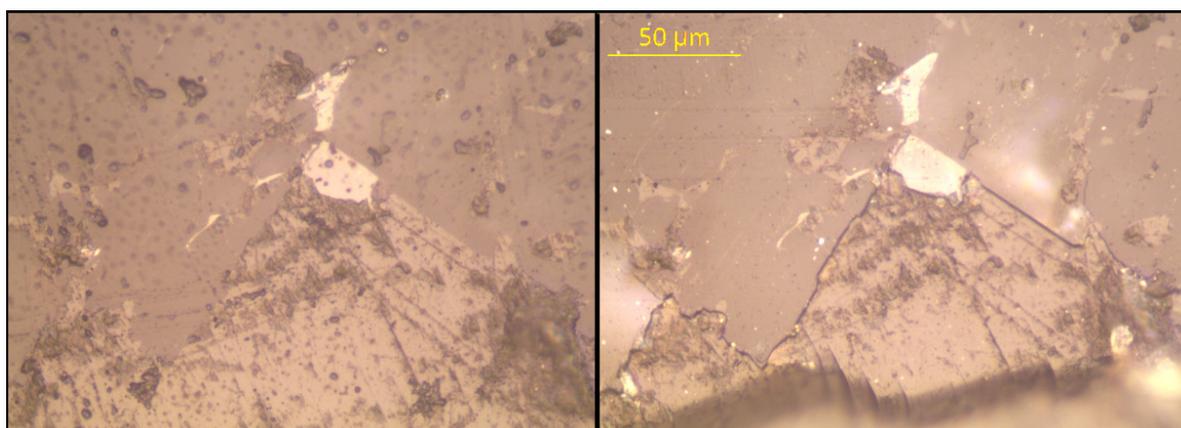


Рисунок 3 – Микрофотография участка образца габбро (Gb1) до (слева) и после (справа) разрушения

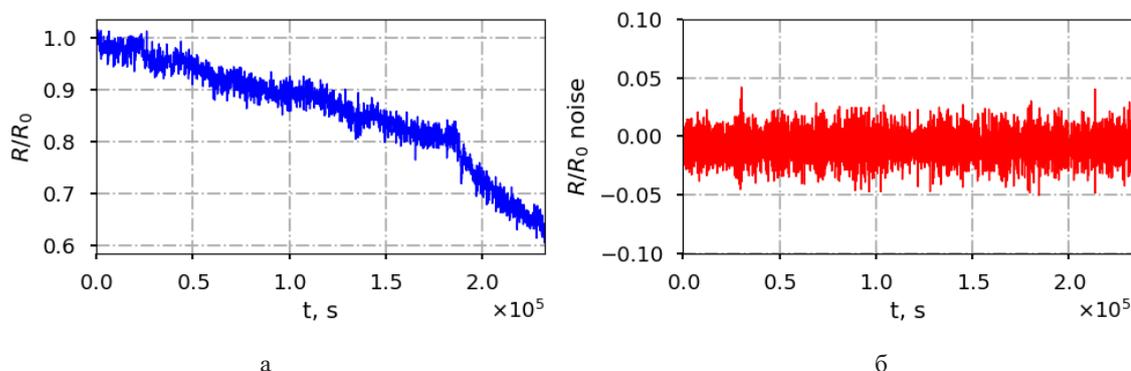


Рисунок 4 – Вариации нормированного электросопротивления R/R_0 образца габбро (Gb1) (а) и высокочастотный шум после удаления низкочастотного тренда (б)

На рисунке 4, а представлен временной ряд вариаций нормированного сопротивления R/R_0 образца габбро Gb1 на частоте 10 кГц. На рисунке видно, что в отличие от образцов мрамора и гранита, в вариациях R/R_0 образца габбро в явном виде не выделяется отчетливый минимум (есть три относительных участка подъема и спада), характеризующий момент перехода геоматериала от стадии уплотнения к фазе разрушения.

Для дальнейшей обработки было решено удалить из исходного временного ряда низкочастотный тренд с помощью нелинейной пороговой фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования [12]. Параметры фильтрации: вейвлет – Добеши 6-го порядка, количество уровней детализации – 6, алгоритм выбора порога фильтрации – универсальный (*sqtwolog*) на основе одиночной оценки шума по коэффициентам первого уровня декомпозиции. Фильтрация низкочастотного тренда позволила выделить высокочастотные шумоподобные вариации (рисунок 4, б), которые в дальнейшем исследовали с помощью методов фрактального анализа, отличительной особенностью которых является возмож-

ность извлекать дополнительную информацию из зашумленных сигналов [10, 11].

Для оценки фрактальных свойств высокочастотных вариаций нормированного электросопротивления R/R_0 был проведен расчет параметра Херста с помощью метода DFA (рисунок 5). Как

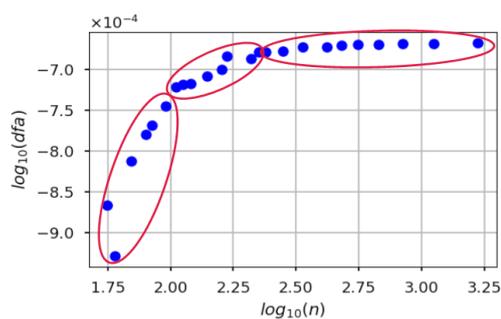


Рисунок 5 – К расчету параметра Херста временного ряда вариаций R/R_0 образца габбро (Gb1) методом DFA: точки – расчетные данные; выделенные участки – области с различными углами наклона линейной аппроксимации

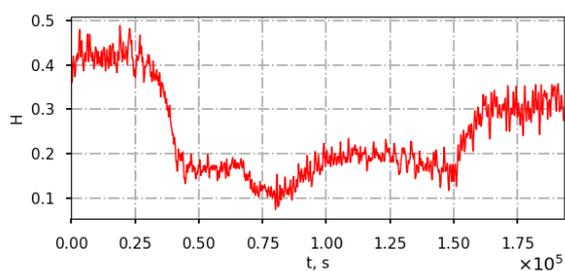


Рисунок 6 – Вариации параметра Херста нормированного электросопротивления R/R_0 образца габбро (Gb1)

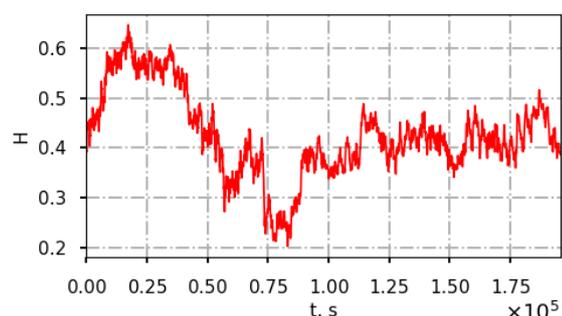
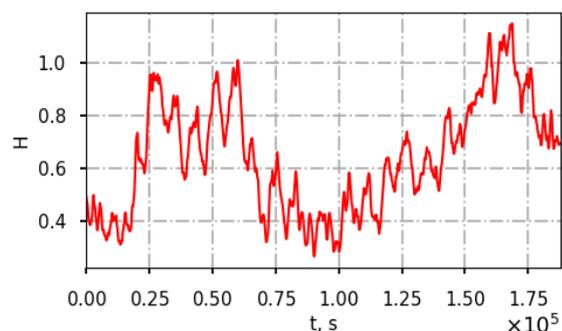


Рисунок 7 – Вариации параметра Херста нормированного электросопротивления R/R_0 для образцов габбро Gb2 и Gb3

видно на рисунке, данные распределились на три группы (выделены красными овалами) и аппроксимация их одной линейной зависимостью (одно значение тангенса угла наклона) будет некорректной.

Данный факт указывает на то, что временной ряд не может быть описан одним значением параметра Херста, т. е. сигнал характеризуется мультифрактальностью. Для выявления вариаций параметра Херста был произведен расчет его значений в скользящем окне шириной в 600 отсчетов (рисунок 6).

На рисунке видно, что динамика временных вариаций параметра Херста в скользящем окне де-

монстрирует несколько областей спада и подъема. Минимум вариаций параметра Херста ($H \approx 0.08$) приходится на момент времени, когда образец достиг $\sim 54\%$ от предела прочности. Результаты обработки двух других образцов габбро дали похожие вариации параметра Херста в процессе деформирования (рисунок 7). Отчетливые минимумы приходились на моменты времени, когда образцы испытывали нагрузки в 55 и 58 % от предела прочности.

Полученные результаты согласуются с данными, полученными авторами в работе [6], для образцов мрамора и гранита. При этом, смещение положения минимума, в данном случае минимума вариаций параметра Херста, может быть связано с особенностями структуры самих образцов и исходным распределением локальных дефектов.

Выводы. Временные ряды нормированного электросопротивления R/R_0 образцов габбро демонстрируют наличие мультифрактального поведения. Вариации параметра Херста данных временных рядов, рассчитанные с помощью метода DFA в скользящем окне, показали наличие характерного минимума, который приходится на моменты времени, когда образцы испытывали нагрузки в $\sim 54\text{--}58\%$ от предела прочности. Хорошее согласие с данными электросопротивления, полученными для образцов мрамора и гранита, дают основание предположить, что участок, содержащий характерный минимум вариаций параметра Херста, может служить индикатором момента перехода геоматериала от стадии упрочнения к стадии разрушения. Указанный момент перехода может быть также использован для задания сеансов облучения образца электроимпульсами в задачах изучения триггерного эффекта, так как на стадии разупрочнения электровоздействие будет более эффективным по сравнению с воздействием на стадии упрочнения.

Литература

1. Гаврилов В.А. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы / В.А. Гаврилов, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин // Физика Земли. 2011. № 11. С. 63–74.
2. Боровский Б.В. К вопросу о стимулировании акустической эмиссии образцов геоматериалов электромагнитными полями / Б.В. Боровский, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, В.А. Мубассарова // Физика Земли. 2011. № 10. С. 71–81.
3. Bontea D.-M. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement / D.-M. Bontea, D.D.L. Chung, G.C. Lee // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. № 4. P. 651–659.

4. *Chen B.* Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis / B. Chen, J. Liu // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. № 11. P. 2196–2201.
5. *Niccolini G.* Correlated Fracture Precursors in Rocks and Cement-Based Materials Under Stress / G. Niccolini, O. Borla, G. Lacidogna, A. Carpinteri // *In Acoustic, Electromagnetic, Neutron Emissions from Fracture and Earthquakes*. Springer. 2015. P. 237–248. doi 10.1007/978-3-319-16955-2_16.
6. *Сычев В.Н.* Вариации электрических характеристик в процессе разрушения образцов горных пород / В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов, С.А. Имашев, В.А. Мубассарова // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2017. Т. 4. № 2. С. 163–168.
7. *Rao M.V.M.S.* Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture / M.V.M.S. Rao, K.J. Lakshmi // *Current Science*. 2005. Vol. 89, №. 9. P. 1577–1582
8. *Закупин А.С.* Пат. 2012148683/28 РФ. Рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия / А.С. Закупин, Б.В. Боровский // *БИ*. 2015. № 5.
9. *Kantelhardt J.W.* Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis / J.W. Kantelhardt, E. Koscielny-Bunde, H.H.A. Rego, S. Havlin, A. Bunde // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2001. Vol. 295. № 3–4. P. 441–454.
10. *Сычев В.Н.* Оценка параметра Херста сейсмического сигнала / В.Н. Сычев, С.А. Имашев // *Геосистемы переходных зон*. 2017. № 2. С. 50–61.
11. *Имашев С.А.* Оценка возможностей применения методов фрактального анализа для исследования геофизических данных. Часть 2. Фрактальный анализ сейсмосигнала / С.А. Имашев, В.Н. Сычев // *Вестник КРСУ*. 2017. Т. 17. № 5. С. 78–82.
12. *Mallat S.G.* A wavelet tour of signal processing: The sparse way. Amsterdam, Boston: Elsevier/Academic Press, 2009. 805 p.