

УДК 531+550.3

**КОРРЕЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
И ДЕФОРМАЦИИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

*В.Н. Сычев, С.А. Имашев*

Представлены результаты измерения электрического сопротивления, деформации и акустической эмиссии образцов горных пород (гранит и мрамор) при одноосном сжатии. Выявлено, что электрическое сопротивление горных пород увеличивается за счет раскрытия микротрещин, что подтверждается корреляцией вариаций электрического сопротивления с деформациями, накоплением дефектов в образце и активностью акустической эмиссии.

*Ключевые слова:* разрушение; горные породы; электрическое сопротивление; модуль Юнга; акустическая эмиссия.

---

**CORRELATION OF ELECTRICAL RESISTANCE  
AND DEFORMATION IN ROCK SPECIMENS**

*V.N. Sychev, S.A. Imashev*

Results of measurements of electrical resistance, deformation and acoustic emission of rock samples (granite and marble) under uniaxial compression are presented. It is revealed that electrical resistance of rocks is increased due to opening of microcracks, which is confirmed by correlation of electrical resistance variations with deformations, accumulation of defects in the sample and acoustic emission activity.

*Keywords:* fracture; rocks; electrical resistance; Young's modulus; acoustic emission.

**Введение.** Исследования особенностей влияния электромагнитных импульсов на неупругое деформирование и разрушение геологической среды – одна из актуальных задач геофизики [1]. Наряду с измерениями сейсмического шума и геоакустической эмиссии в скважинах [2, 3], существенный вклад в исследование реакции геосреды на энергвоздействие вносит и физическое моделирование на образцах горных пород. Моделирование неупругого деформирования, структурообразования и разрушения при помощи испытаний образцов геоматериалов на реологических прессах уже продемонстрировало свою эффективность для ряда задач сейсмологии и тектонофизики [4–6]. Помимо исследований наведенной и триггерной сейсмичности, обусловленных эффектами внешних физических полей, представляют интерес и результаты модельных экспериментов, в которых контролируется деформирование и накопление повреждений в нагруженных образцах в условиях дополнительных воздействий (в частности, вибраций и электромагнитных импульсов).

В ряде известных работ достаточно хорошо изучена и теоретически описана зависимость диэ-

лектрических параметров горных пород от температуры [7], их химического состава [8], а также частоты внешнего электрического поля [9]. Однако связь этих параметров с деформацией материала изучена недостаточно, что требует дополнительных исследований. Цель настоящего исследования – изучение корреляции электрического сопротивления, деформаций и накопления повреждений в образцах горных пород при одноосном сжатии.

**Материал и методика эксперимента.** Эксперименты проведены на рычажной установке [10], которая позволяет реализовать режим одноосного сжатия с максимальной нагрузкой до 250 кН и возможностью бесшумной регистрации акустической эмиссии. Для испытаний были изготовлены образцы мрамора Ак-Таш и гранита Каинда (Кыргызстан) в форме правильной призмы с размерами 40 мм в длину (ось X), 20 мм в ширину (ось Y) и 80 мм в высоту (ось Z).

Начальная нагрузка для обеспечения полного контакта образца со сжимающими поверхностями составляла  $F = 35\text{--}40$  кН. Далее нагрузку увеличивали с постоянной скоростью 0.4 Н/с вплоть до разрушения образца.

Осевую (продольную) деформацию определяли укорочением рабочего пространства между верхней траверсой и нижней давящей пятой, в котором устанавливается образец. Измерение поперечных деформаций производили в точках – центрах боковых граней образца. Изменение нагрузки на образце регистрировали с помощью встроенного в давящую пяту динамометра с чувствительностью 0.3 Н. Чувствительность измерения продольной деформации в направлении z составляла 0,4 %, поперечной в направлении x – 0.7 % и поперечной в направлении y – 0.4 %. Схема эксперимента приведена на рисунке 1.

Сигналы АЭ регистрировали пьезоэлектрическими датчиками в частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц с заданным порогом по амплитуде сигнала 25 мкВ. Далее вычисляли зависимости накопления числа сигналов и активность АЭ.

Для измерения диэлектрических параметров образцов в ходе эксперимента использовали измеритель иммитанса Актаком АМ-3001. Данный прибор представляет собой устройство для измерения RLC – характеристик, а также добротности Q и тангенса угла диэлектрических потерь D 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, 120 Гц; 1, 10 и 100 кГц. В данной работе использовались данные канала 1 кГц.

Измеренные величины сопротивления R нормировали на значение, определенное для ненагруженного образца  $R_0$ , и далее временную зависимость  $R/R_0$  анализировали в комплексе с параметрами АЭ и деформации.

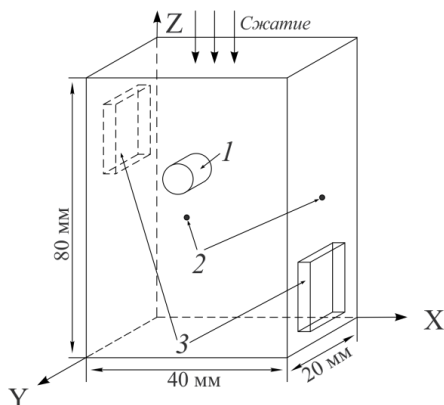


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента: 1 – датчик АЭ; 2 – точки регистрации поперечных компонент деформации; 3 – электроды измерения электрических характеристик

**Результаты и обсуждение.** На рисунке 2, а приведены кривые продольной и поперечных деформации ( $\epsilon_z$ ,  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$ ), а также изменения электрического сопротивления  $R/R_0$ . На фоне линейного роста деформаций наблюдаются скачки и периоды ускорения деформаций, связанные с трещинообразованием и подготовкой к разрушению. Эти характерные периоды отмечаются также и вариациями электрического сопротивления, а именно, первый характерный минимум  $R/R_0$  совпадает со скачкообразным ростом поперечной деформации  $\epsilon_x$  (цифра I), тогда как второй – с началом роста скорости деформации (цифра II). Необходимо отметить, что второй минимум электрического сопротивления также является результатом активизации трещинообразования, что подтверждается всплеском активности акустической эмиссии  $dN/dt$  (рисунок 2, б). При этом каждое значительное изменение в накоплении событий акустической эмиссии N и соответственно ее активности, сопровождается откликом в значениях нормированного сопротивления  $R/R_0$  (цифра III).

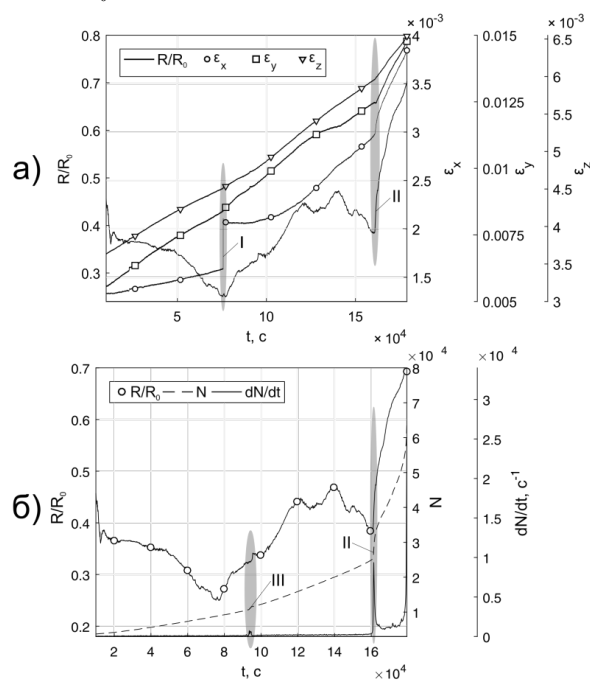


Рисунок 2 – Зависимости от времени параметров образца мрамора: а – деформации и нормированное сопротивление; б – нормированное сопротивление, накопление событий и активность АЭ

На рисунке 3 представлены результаты расчета мгновенного модуля Юнга для образца мрамора по методике, описанной в работе [11]. Начальный участок (до 55 МПа) обусловлен процессами усадки образца после пригрузки. Дальнейшее поведение

модуля упругости показывает относительно постоянное значение с отклонениями, обусловленными неупругим поведением образца (цифры соответствуют минимумам нормированного сопротивления  $R/R_0$  на рисунке 2).

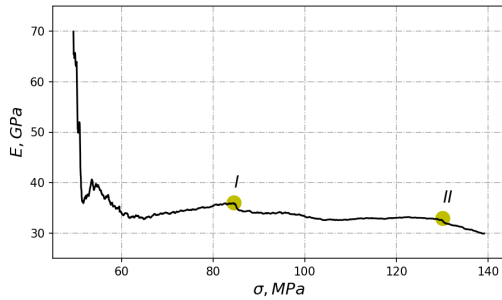


Рисунок 3 – Мгновенный модуль Юнга и характерные участки поведения нормированного сопротивления  $R/R_0$  для образца мрамора

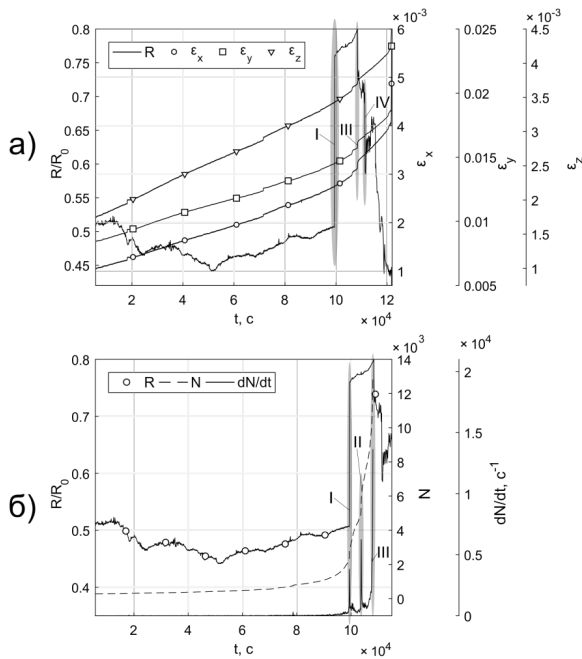


Рисунок 4 – То же, что на рисунке 2, но для образца гранита

Схожее, но менее выраженное поведение параметров, можно наблюдать и для образца гранита (рисунок 4). Здесь резкий рост сопротивления также сопровождается ростом активности АЭ (цифры I, II и III). Однако первый характерный минимум нормированного сопротивления  $R/R_0$  не проявил себя на кривых деформаций, что вероятнее всего, связано со структурой самого образца, а также большей чувствительностью электрического со-

противления к процессам, происходящим внутри образца и не выражающихся в заметных изменениях размеров и появлениях трещин.

На рисунке 5 представлены результаты расчета мгновенного модуля Юнга для образца гранита. На этом графике, как и на кривых деформаций и акустической эмиссии, не выделяется участок с минимумом нормированного сопротивления  $R/R_0$  (рисунок 4), а лишь участок III, соответствующий разрушению образца.

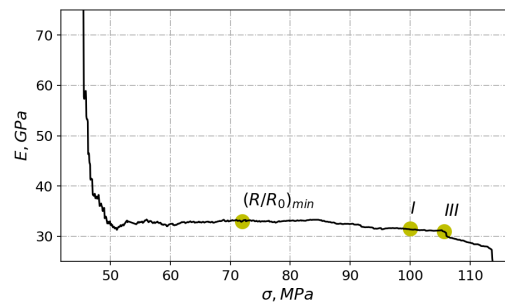


Рисунок 5 – Мгновенный модуль Юнга и характерные участки поведения нормированного сопротивления  $R/R_0$  для образца гранита

Данный факт свидетельствует о том, что при анализе процессов деформирования образцов горных пород, измерение электрических параметров может дать дополнительную информацию, которая зачастую не выявляется при использовании традиционных методов контроля повреждаемости.

Анализ вариаций электросопротивления обоих образцов (рисунок 6) показывает, что, во-первых, значения сопротивления образцов после начальной нагрузки отличаются: почти в два раза – сопротивление гранита выше, во-вторых, у обоих образцов наблюдается снижение сопротивления до минимума при нагрузках ниже 0.61 и 0.65 от разрушения для мрамора и гранита соответственно. При переходе к стадии предразрушения (нагрузки выше 0.9 от разрушения) сопротивление гранита снижается резкими изменениями (ступенчато) до минимального значения, а сопротивление мрамора растет плавно, достигая максимума, что, по-видимому, обусловлено свойствами самих геоматериалов. Полученные данные согласуются с данными, полученными авторами при анализе значения  $b$ -value (соотношение Гутенберга–Рихтера), рассчитанными по данным акустической эмиссии для образцов гранита [12]. В частности, анализ 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.

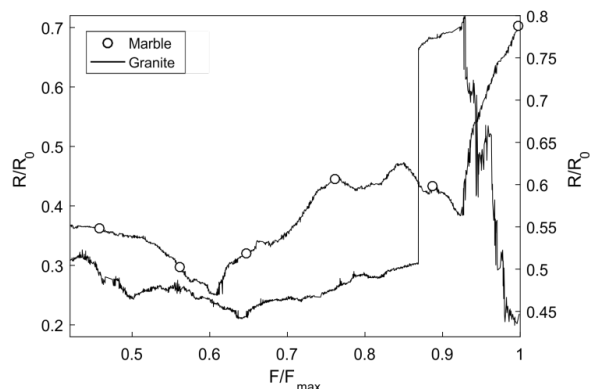


Рисунок 6 – Вариации электросопротивления образцов мрамора и гранита в зависимости от уровня нагрузки

При нагрузках ниже 0,65 от разрушения, структура образца испытывает процесс уплотнения, в связи с чем, и деформации и активность АЭ имеют минимальные значения, при этом электросопротивление образцов уменьшается (подобно случаю гранулированных сред). При дальнейшем увеличении главного напряжения по мере накопления микродефектов и процесса их консолидации в более крупные дефекты, растет и электросопротивление образцов. Данный вывод согласуется с результатами, полученными при измерении электрического сопротивления образцов горных пород и цементно-песчаной смеси в работе [13].

**Выводы.** Для относительно сухих образцов горных пород электрическое сопротивление увеличивается за счет раскрытия микротрещин, что подтверждается корреляцией вариаций электрического сопротивления с деформациями, накоплением дефектов в образце и активностью акустической эмиссии. Отчетливый минимум электросопротивления демонстрирует момент перехода материала от стадии упрочнения к процессу разрушения. Контроль электрических параметров может использоваться для экономичного мониторинга повреждаемости сооружений.

#### Литература

1. Закупин А.С. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натурных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы / А.С. Закупин, Л.М. Богомолов, В.А. Гаврилов // Физика земли. 2011. № 11. С. 63–74.

2. 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 КPCУ. 2017. Том 17. № 5. С. 78–82.
3. Сычев В.Н. Методика мультифрактального анализа сейсмического шума / В.Н. Сычев, Б.К. Долгополов, С.А. Имашев // Геосистемы переходных зон. 2017. № 2. С. 62–68.
4. Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений / С.Д. Виноградов. М.: Наука. 1989. 177 с.
5. Шамина О.Г. Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред / О.Г. Шамина, В.И. Понятовская. М.: ИФЗ РАН. 1993. 179 с.
6. Sobolev G.A. Development of block hierarchy and of acoustic emission in samples of rock under three dimensional compression / G.A. Sobolev, Kh.O. Asatryan, V.A. Mansurov // J. Earthquake Prediction Res. 1995. Vol. 4. № 1. P. 107–111.
7. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Н.Б. Дортман. М.: Недра. 1984. 455 с.
8. Воробьев А.А. Теоретические вопросы физики горных пород / А.А. Воробьев, М.П. Тонконогов, Ю.А. Векслер. М.: Недра. 1972. 150 с.
9. Гусейнов А.А. Исследование электропроводности минералов класса слоистых силикатов и горных пород в зависимости от температурного и кристаллохимического факторов / А.А. Гусейнов: дис... докт. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2012. 362 с.
10. Закупин А.С. Патент 2012148683/28 РФ. Рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия / А.С. Закупин, Б.В. Боровский // БИ. 2015. № 5.
11. Diederichs M.S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling / M.S. Diederichs // Can Geotech J. 2007. Vol. 44. P. 1082–1116.
12. 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.
13. 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.