

## ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННУЮ ДИНАМИКУ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ГРАНИТА

*И.А. Пантелейев<sup>1</sup>, В.А. Мубассарова<sup>2</sup>, Е.Е. Дамаскинская<sup>3</sup>,  
Л.М. Богомолов<sup>4</sup>, О.Б. Наймарк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup> Научная станция РАН, Бишкек, Киргизия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>4</sup> Институт морской геологии и геофизики ДвО РАН, Южно-Сахалинск

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния слабого электрического поля на процесс накопления повреждений при квазистатическом одноосном сжатии гранитных образцов. Для непрерывного мониторинга эволюции дефектов различного типа при деформировании гранита используется метод акустической эмиссии. Анализ пространственно-временных закономерностей следования акустической эмиссии в экспериментах по одноосному сжатию гранита без воздействия и с непрерывным воздействием слабого электрического поля позволил установить, что воздействие слабого электрического поля меняет характер накопления повреждений в образце и приводит к изменению амплитудно-частотных свойств сигналов акустической эмиссии.

### Введение

Вопросу влияния воздействия слабых внешних физических полей (электроимпульсов, магнитного поля, вибраций) на дефектную структуру нагруженных горных пород уделяется пристальное внимание последние нескольких десятилетий. С одной стороны интерес к этой задаче определяется гипотетической возможностью использования слабых воздействий для релаксации (разрядки) избыточных напряжений в геосреде, начиная от массива горных пород в районе добычи полезных ископаемых, заканчивая сейсмоопасными зонами. С другой стороны, в случае внешнего воздействия слабого электрического поля – необходимостью объяснения механизмов наблюдаемых при скважинных измерениях эффектов модуляции уровня геоакустической эмиссии внешним электромагнитным излучением [Гаврилов, 2010, 2014; Gavrilov, 2013]. Одним из основных направлений работы в этой научной области является оценка энергетических характеристик откликов нагруженного материала на внешнее слабое воздействие.

В ряде работ [Chelidze, Lursmanashvili, 2003; Авагимов, Зейгарник, 2008; Боровский и др., 2011; Мубассарова и др., 2014], посвященных исследованию влияния периодического или одиночного воздействия слабого электрического поля с напряженностью не более 1 кВ/м на процесс трещинообразования в нагруженных горных породах, установлен статистически значимый прирост активности акустической эмиссии (АЭ), вызванный внешним воздействием. В результате такого воздействия происходит перестройка дефектной структуры породы, которая отражается в изменении ряда параметров и закономерностей следования акустической эмиссии: 1 – максимум активности АЭ существенно возрастает при приближении действующей механической нагрузки к пределу прочности, а также увеличивается время задержки (время между моментами включения поля и максимумом активности АЭ); 2 – включение внешнего электрического поля при действующем приложенном усилии меньше 85% от разрушающего приводит к увеличению высокоэнергетических импульсов АЭ (высокоамплитудных) в общем объеме зарегистрированных за период воздействия импульсов. Тогда как при нагрузке, составляющей больше чем 85% от предельного уровня, включение внешнего электрического поля вызывает увеличение суммарного количества импульсов АЭ (по сравнению с периодом до воздействия), но не изменяет относительное распределение этих импульсов АЭ по энергии.

Несмотря на установленные закономерности, вопрос о механизмах влияния слабого электрического поля на дефектную структуру горной породы до сих пор остается открытым и актуальным. Оценки, полученные для случая действия прямых механизмов преобразования электрической энергии в механическую (пьезоэффект, электрострикция и т.д.), не позволяют объяснить наблюдаемые закономерности.

Настоящая работа посвящена исследованию эффекта влияния слабого электрического поля на пространственно-временную динамику развития поврежденности при одноосном квазистатическом сжатии гранита. Отличительной чертой настоящего исследования является сравнительный анализ параметров и закономерностей развития акустической эмиссии в случае деформирования гранита без воздействия и с непрерывным воздействием слабого поля от момента начала деформирования до разрушения.

## Оборудование и материалы

Для экспериментального исследования влияния слабого электрического поля на активность акустической эмиссии при деформировании горных пород были выбраны цилиндрические образцы гранита Мансуровского месторождения с диаметром 41, и высотой 95,5 мм. Минеральный состав гранита представлен в Таблице. Все образцы были разделены на две группы. Первая группа подвергалась квазистатическому одноосному сжатию без воздействия, вторая – с воздействием. Для реализации механической нагрузки была использована электромеханическая машина Shimadzu AGX-Plus с максимальным усилием 30 тонн. Для непрерывного мониторинга акустоэмиссионной активности в процессе деформирования была использована система Amsy-5 Vallen (Германия), укомплектованная антенной с 8 датчиками: 6 широкополосными DECI SE2MEG-P (частотный диапазон 200–2000 кГц) и 2 датчиками AE105A (450–1150 кГц). Система позволяет помимо регистрации стандартных параметров акустоэмиссионного процесса по четырем каналам записывать

форму волны для последующего частотного анализа, а также осуществлять объемную локацию источников АЭ.

При испытании второй группы образцов непрерывное воздействие электрическими импульсами осуществлялось путем подачи на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца, напряжения от генератора сигналов произвольной формы АКИП-3407/1А, усиленного при помощи усилителя Tabor 9400 с коэффициентом усиления 50. Параметры электрических импульсов при этом составляли: форма – прямоугольные, однополярные положительной полярности, напряжением 100 В, частотой 2,5 кГц, длительностью 100 мкс, скважностью 25%. Расположение датчиков АЭ для первой и второй групп гранитных образцов было идентичным. На рис. 1 представлена фотография испытательной машины с установленным образцом и схема расположения датчиков АЭ и графитовых электродов на боковой поверхности образца. Для улучшения электрического контакта между образцом и электродами на образец наносился толстый слой проводящего графитового лака.

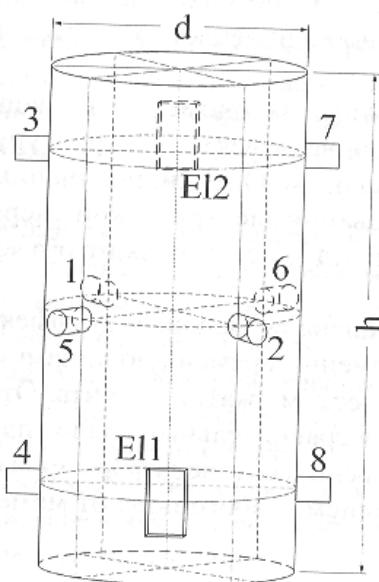
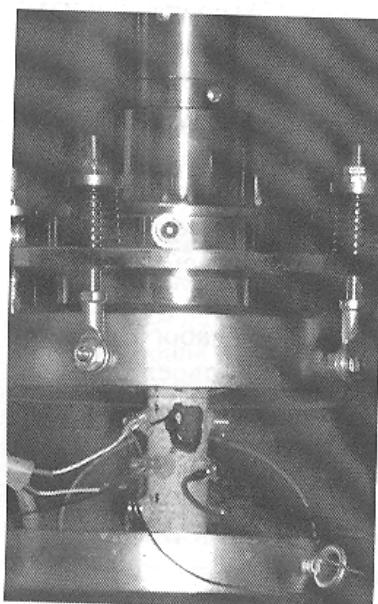


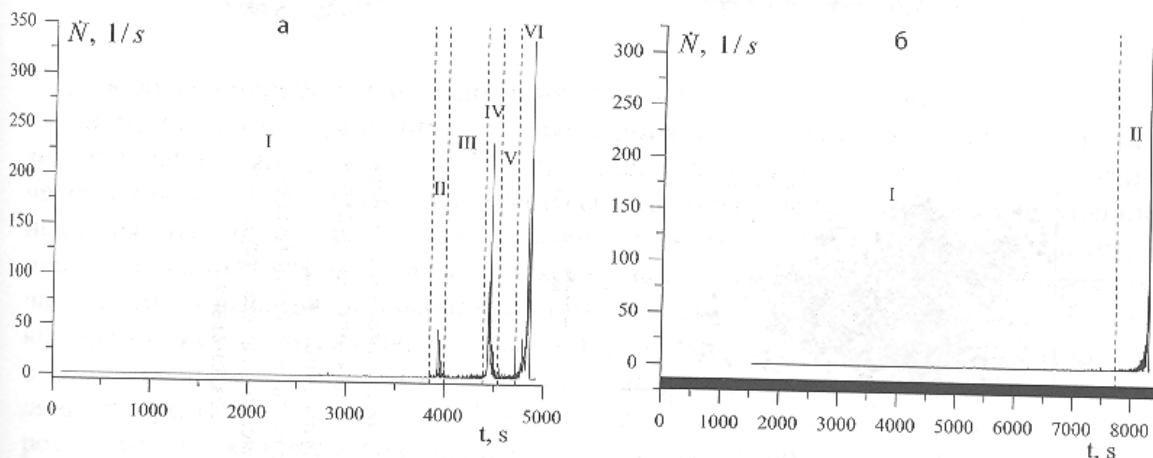
Рис. 1. Фотография испытательной машины с установленным образцом (слева) и схема расположения датчиков АЭ (1–8) и электродов (Е11, Е12) на образце (справа)

Для более детального исследования процесса перехода от дисперсного накопления повреждений к макроскопическому разрушению и влияния на него слабого электрического поля испытания образцов гранита осуществлялись со ступенчато-изменяемой скоростью нагружения: до нагрузки 7,5 тонн скорость нагружения составляла 0,03 мм/мин, с 7,5 до 15 тонн скорость нагружения была 0,015 мм/мин, свыше 15 тонн – 0,0075 мм/мин. Таким образом, при приближении действующей на образец нагрузки к предельному значению скорость деформирования образца уменьшалась в несколько раз, что позволило растянуть во времени стадию предразрушения.

Перед началом каждого эксперимента проводились калибровка датчиков акустической эмиссии с целью определения качества акустического контакта между датчиком и образцом, измерения падения амплитуды модельного импульса в зависимости от расстояния между источником и приемником с целью последующей корректировки максимальных амплитуд локированных сигналов АЭ.

## Результаты экспериментов

Анализ всего комплекса полученных экспериментальных данных позволил выявить ряд отличительных особенностей процесса накопления повреждений в граните в присутствии электрического поля. В случае испытаний гранита без внешнего воздействия установлено, что активность акустической эмиссии в процессе деформирования изменяется ступенчато, квазистационарные стадии чередуются со стадиями активизации. При деформировании гранитных образцов с непрерывным электрическим воздействием показано, что активность акустической эмиссии не содержит отдельных локальных периодов увеличения акустоэмиссионной активности, кроме периода непосредственно предшествующего макроразрушению, характеризующегося развитием процесса накопления повреждений в режиме с обострением. Ранее в работах [Макаров, 2010; Пантелеев и др., 2012, 2013; Panteleev et al., 2014], посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию эволюции ансамбля дефектов различного вида в нагруженных горных породах, было показано, что стадия лавинообразного роста поврежденности при деформировании горных пород и геосред является фундаментальным свойством деформируемой среды и следствием эффекта взаимодействия дефектов на широком спектре пространственных масштабов. На рис. 2 представлены зависимости активности акустической эмиссии от времени при одноосном квазистатическом сжатии образца гранита без воздействия и с непрерывным воздействием.



**Рис. 2.** Скорость следования акустической эмиссии при одноосном сжатии гранитного образца без (а) и с непрерывным воздействием электрического поля (б).  
Римскими цифрами показаны выделенные стадии акустоэмиссионной активности

Для анализа характера пространственно-временной кластеризации источников акустической эмиссии была решена задача объемной локации источников АЭ. Пространственное расположение источников акустической эмиссии, зарегистрированных в течение всего времени деформирования гранитных образцов с и без воздействия, представлено на рисунках 3 и 4. В случае эксперимента без внешнего воздействия показано, что этапам активизации акустической эмиссии (II, IV, VI на рис. 2) соответствует процесс появления и укрупнения зон локализации источников АЭ вдоль нескольких выделенных плоскостей (прообразов магистральных трещин). При деформировании гранитного образца с непрерывным воздействием слабого электрического поля процесс накопления повреждений (накопления источ-

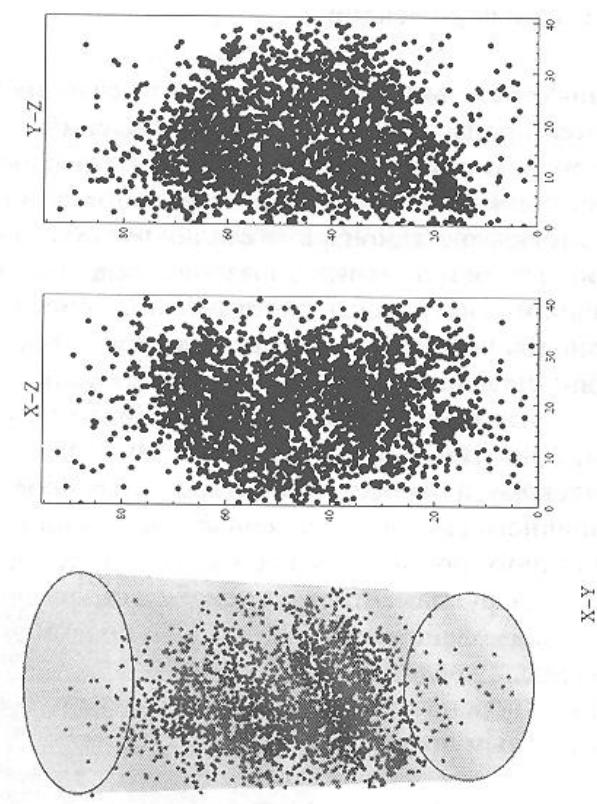


Рис. 3. Пространственное расположение источников импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной в течение всего эксперимента в случае отсутствия воздействия

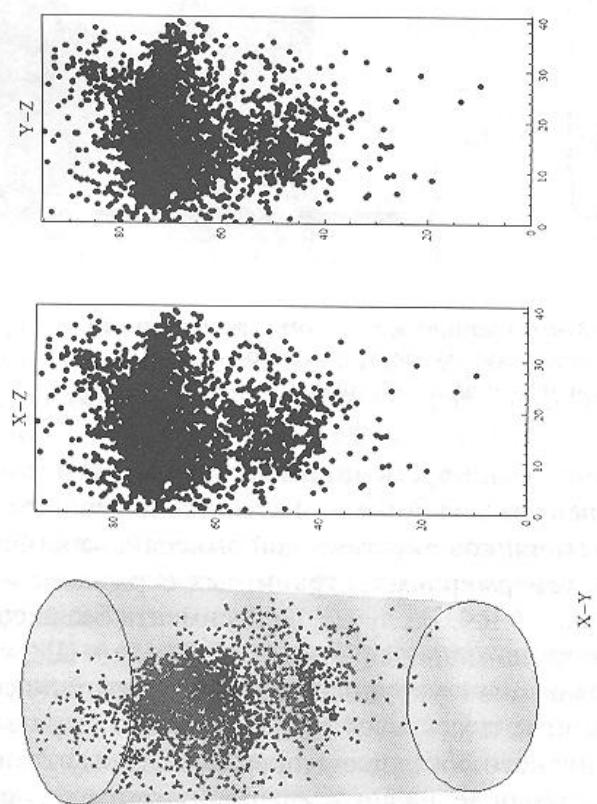


Рис. 4. Пространственное расположение источников импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной в течение всего эксперимента в эксперименте с воздействием

ников АЭ) достаточно равномерно распределен по объему образца в течение всего времени деформирования.

Для всех зарегистрированных импульсов АЭ в эксперименте без и с непрерывным воздействием слабого электрического поля был построен график повторяемости (рис. 5.). Наклон графика повторяемости для случая отсутствия воздействия составил 1,98, при воздействии электрического поля – 2,25, что указывает на уменьшение высокоэнергетических событий в общем объеме зарегистрированных импульсов АЭ в случае непрерывного внешнего воздействия слабого электрического поля.

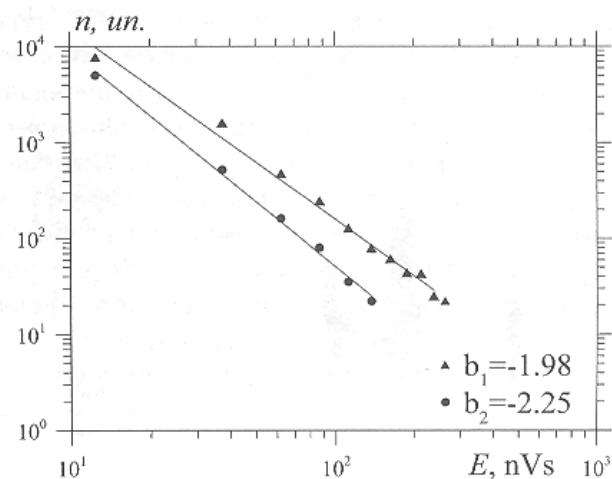
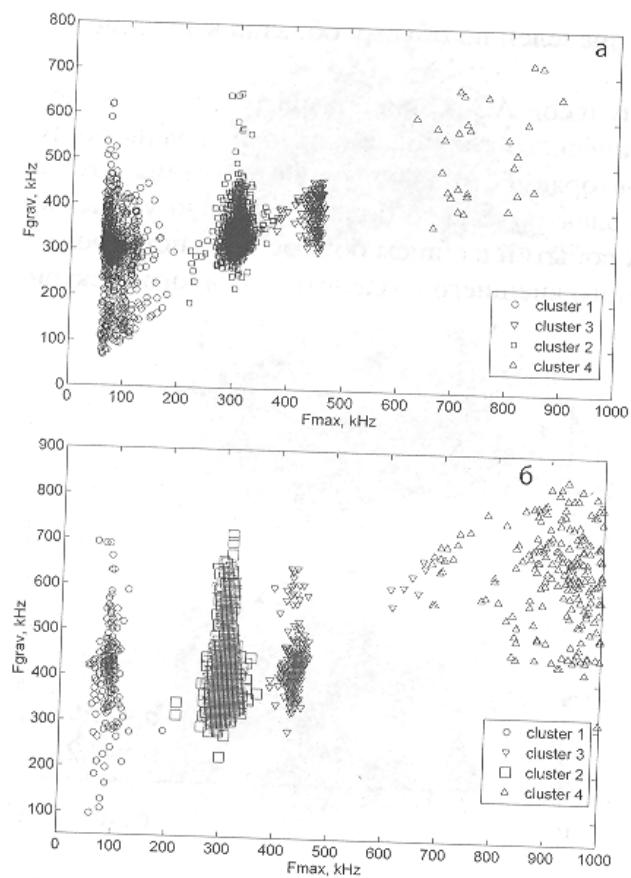


Рис. 5. Графики повторяемости для энергий сигналов АЭ, зарегистрированных в экспериментах на одноосное квазистатическое сжатие гранитного образца с непрерывным воздействием электрического поля (●) и без (▲)

Для более подробного исследования влияния непрерывного воздействия слабого электрического поля на процесс накопления повреждений при одноосном квазистатическом сжатии гранита был проведен кластерный анализ данных акустической эмиссии с использованием метода *k*-средних. Был рассмотрен следующий исходный набор параметров акустической эмиссии: пикивая амплитуда, длительность, медианная частота, частота максимума спектра, время нарастания, средняя частота импульса, нормированное на пикивую амплитуду время нарастания. Для выделения независимых параметров АЭ, которые имеют наибольший разброс в обоих экспериментах, были последовательно реализованы два метода обработки данных: кросс-корреляция каждой из пар параметров, метод главных компонент. В результате для кластеризации данных были использованы пикивая амплитуда, частота максимума спектра и нормированное время нарастания импульсов АЭ. Для оценки качества кластеризации данных и выбора оптимального количества кластеров был использован индекс Силуетта.

На рис. 6 представлены результаты кластеризации данных АЭ для случая деформирования гранита без и с непрерывным воздействием слабого электрического поля. Было получено, что все импульсы АЭ разделяются на четыре кластера, каждый из которых можно охарактеризовать соответствующим частотным диапазоном: первый кластер низкочастотный – от 50 до 200 кГц, второй и третий – среднечастотные, от 200 до 400, и от 400 до 500 кГц соответственно, четвертый кластер – высокочастотный, от 600 до 1000 кГц. Анализ динамики акустической эмиссии, зарегистрированной в эксперименте по квазистатическому одноосному сжатию гранита без внешнего воздействия, позволил установить ряд особенностей процесса накопления повреждений. С самого начала деформирования преобладают среднечастотные сигналы акустической эмиссии, соответствующие второму кластеру. При действующем

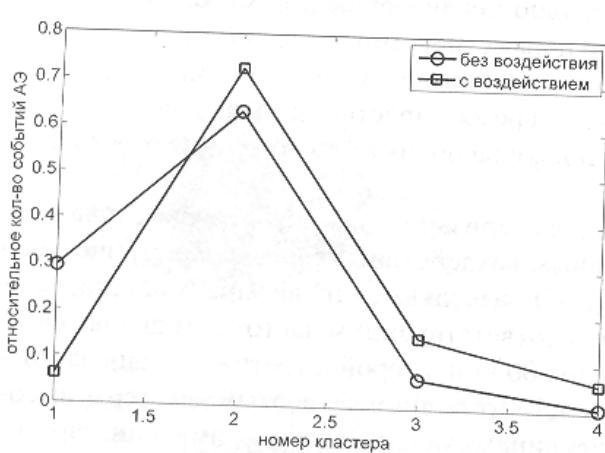


**Рис. 6.** Зависимость медианной частоты от частоты максимума спектра импульсов АЭ, зарегистрированных в эксперименте без (а) и с непрерывным воздействием электрического поля (б)

ции. Происходит перераспределение относительного количества сигналов между кластерами: количество низкочастотных сигналов АЭ заметно уменьшается, тогда как количество средне- и высокочастотных кластеров пропорционально увеличивается (рис. 7). Для каждого из кластеров наблюдается увеличение разброса сигналов АЭ по медианной частоте в направлении более высоких частот, что указывает на увеличение в сигналах АЭ высокочастотной составляющей. Сравнение распределений импульсов АЭ по пикивой амплитуде для каждого из кластеров в случае отсутствия и наличия внешнего воздействия показало, что в случае внешнего воздействия количество высокоамплитудных низкочастотных сигналов резко сокращается, а как количество высокоамплитудных высокочастотных сигналов увеличивается.

на образец напряжении, составляющим 50% от разрушающего, появляются сигналы АЭ низкочастотного диапазона. Данный результат физически обоснован, так как в процессе деформирования происходит укрупнение трещин, их коалесценция. Начиная с первой стадии локализации источников АЭ, сопровождающийся резким ростом активности АЭ, появляются сигналы АЭ третьего и четвертого кластеров, с частотами выше 400 кГц. Появление высокочастотных сигналов АЭ при формировании и росте магистральной трещины было отмечено ранее в работе [Ohnaka, Mogi, 1982] и связано, по мнению авторов, с появлением локальными зон высоких напряжений. В этих зонах происходит интенсивное микротрецинообразование, которое и сопровождается высокочастотной эмиссией.

В случае непрерывного воздействия на образец слабого электрического поля наблюдаются изменения в закономерностях следования и параметрах акустической эмиссии. Происходит перераспределение относительного количества сигналов между кластерами: количество низкочастотных сигналов АЭ заметно уменьшается, тогда как количество средне- и высокочастотных кластеров пропорционально увеличивается (рис. 7). Для каждого из кластеров наблюдается увеличение разброса сигналов АЭ по медианной частоте в направлении более высоких частот, что указывает на увеличение в сигналах АЭ высокочастотной составляющей. Сравнение распределений импульсов АЭ по пикивой амплитуде для каждого из кластеров в случае отсутствия и наличия внешнего воздействия показало, что в случае внешнего воздействия количество высокоамплитудных низкочастотных сигналов резко сокращается, а как количество высокоамплитудных высокочастотных сигналов увеличивается.



**Рис. 7.** Относительное количество событий АЭ в каждом кластере в случае эксперимента без воздействия (○) и с воздействием слабого электрического поля (□).

## Выводы

Обобщение полученного комплекса экспериментальных результатов позволяет сделать следующий вывод: непрерывное воздействие внешнего электрического поля на деформируемый образец природного твердого кристаллического диэлектрика (гранита) приводит к смене характера деформирования и разрушения с поэтапным формированием и развитием ряда локализованных в объеме образца разрывов (трещин), к дисперсному накоплению в объеме образца относительно большого количества соизмеримых по размеру трещин, коалесценция которых и вызывает ма-кроразрушение. Это различие в характере деформирования и разрушения образцов гранита с внешним воздействием и без него проявляется в изменении ряда ха-рактеристик процесса генерации АЭ: 1 – увеличение угла наклона графика повторяемо-сти для энергий импульсов АЭ; 2 – изменение количества периодов существенной активизации активности акустической эмиссии. Для случая наличия воздействия внешнего слабого электрического поля такие периоды отсутствуют вплоть до раз-рушения; 3 – изменение пространственного расположения источников АЭ в объе-ме образца; 4 – относительное уменьшение количества низкочастотных сигналов АЭ в случае непрерывного воздействия слабого электрического поля и пропорци-ональное увеличение количества средне- и высокочастотных импульсов АЭ; 5 – резкое сокращение низкочастотных высокоамплитудных импульсов АЭ в случае непрерывного внешнего воздействия.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-05-08790).*

## Литература

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // Физика Земли. 2008. № 1. С. 77–80.*
- Боровский Б.В., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. К вопросу о сти-мулировании акустической эмиссии образцов геоматериалов электромагнитными по-лями // Физика Земли. 2011. № 10. С. 71–81.*
- Гаврилов В.А., Журавлев В.И., Морозова Ю.В. О связи эффекта суточной перио-дичности слабых землетрясений с вариациями естественного электромагнитного сверхнизкочастотного излучения // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 4. С. 535–540.*
- Гаврилов В.А., Пантелейев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов элекtro-магнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Зем-ли. 2014. № 1. С. 89–103.*
- Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 5. С. 97–112.*
- Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелейев И.А., Наймарк О.Б. Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических им-пульсов // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. Т. 5. № 4. С. 919–938.*
- Пантелейев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Модель геосреды с дефектами: коллек-тивные эффекты развития несплошностей при формировании потенциальных очагов землетрясений // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. Т. 4. № 1. С. 37–51.*

*Pantaleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B.* Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясения // Физика Земли. 2012. № 6. С. 43–55.

*Chelidze T., Lursmanashvili O.* Electromagnetic and mechanical control of slip: laboratory experiments with slider system // Nonlinear Processes in Geophysics. 2003. V. 10. P. 557–564.

*Gavrilov V.A., Pantaleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V.* Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks // Russian Journal of Earth Sciences. 2013. Т. 13. № 1. С. 1–16.

*Ohnaka M., Mogi K.* Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure // Journal of geophysical research: Solid Earth. 1982. V. 87. B5. P. 3873–3884.

*Pantaleev I., Plekhov O., Pankov I., Evseev A., Naimark O., Asanov V.* Experimental investigation of the spatio-temporal localization of deformation and damage in sylvite specimens under uniaxial tension // Engineering Fracture Mechanics. 2014. Т. 129. С. 38–44.

УДК 550.83

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

*В.А. Зейгарник, В.Н. Ключкин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Описана аппаратура и методика физического моделирования электросейсмического эффекта второго рода в образцах горных пород. Используемые способы возбуждения, измерения и обработки акустических и электрических полей позволяют изучать слабые электросейсмические эффекты. Приведены результаты моделирования на ряде образцов.

Сейсмоэлектрические и электросейсмические эффекты в горных породах дают возможность изучать такие свойства горных пород как литологическая неоднородность, пористость, трещиноватость, насыщенность флюидами, которые не определяются традиционными геофизическими методами [Светов, 2008].

В ОИВТ РАН разработана аппаратура, позволяющая моделировать электросейсмический эффект второго рода – возбуждение в образце горной породы акустического поля при воздействии на образец электрического поля. Для моделирования используются образцы, изготовленные из природных материалов. Размер образцов от 50×50×50 мм до 200×200×200 мм. Экспериментальное моделирование проведено на 72 образцах. Изучению подвергались образцы из известняка, доломита и песчаника. Использовались образцы малой и средней прочности, выдерживающие