

УДК 550.348+ 550.37  
**ОТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В.А. СТЕПАНОВА ПО ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИМ  
ЭФФЕКТАМ В КРИСТАЛЛАХ NaCl К СОВРЕМЕННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ  
ЭЛЕКТРОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ГОРНЫХ  
ПОРОДАХ**

**Богомоллов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С., Мубассарова В.А., Сычев В.Н.,  
Сычева Н.А.**

*Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизстан, [bleom@mail.ru](mailto:bleom@mail.ru)*

Идея невзрывного, вибросейсмического либо электромагнитного инициирования слабых сейсмических событий для ускорения разрядки избыточных напряжений в геосреде и снижения риска катастрофического землетрясения приобретает все большую популярность. Определенный вклад в решение вопросов, тематически связанных с этим замыслом, может внести лабораторное моделирование процессов разрушения материалов земной коры при дополнительных воздействиях импульсов физических полей (так называемых энерговоздействиях). Влияние физических полей (в частности, электроимпульсов и вибраций) на скорость роста микротрещин в образцах горных пород исследовалось в ряде работ при помощи метода акустической эмиссии, АЭ (обзор в [1]). Был выявлен эффект прироста активности АЭ, стимулированного внешними электромагнитными полями [1,2], который свидетельствует об их влиянии на скорость трещинообразование.

Активность АЭ оказалась весьма информативным параметром, отражающим как сам процесс накопления структурных дефектов в нагруженной среде, так и вариации его скорости под влиянием внешних полей. Но не только удобство расчета и визуализации временных зависимостей АЭ при обработке большого объема данных сделали его основным предметом исследования. Сыграло роль то, что именно по вариациям активности прослеживается аналогия между эффектами отклика АЭ на действие физических полей и наведенной сейсмичности (в том числе инициированной электромагнитными импульсами естественной и техногенной природы). Отметим, что наблюдения влияния нестационарных физических полей на разных масштабах: от лабораторного при характерной длине 1-10 см, до натурального – километрового [2-4] взаимно дополняют друг друга.

Влияние электромагнитных полей, ЭМП на деформационные процессы определяется их взаимодействием со структурными дефектами в диэлектрических материалах (в частности, в ионных кристаллах). Это обратный эффект по отношению к увеличению ионной проводимости в процессе пластической деформации (эффект Дьюлаи-Хартли) и появлению электрического потенциала на поверхности деформируемых образцов в отсутствие внешнего электрического поля (эффект Степанова). Интерес к подобной тематике проявлялся уже в работах А.Ф.Иоффе, А.В. Степанова, З. Дьюлаи, Д. Хартли, выполненных в 20-х - 30-х годах прошлого века (обзор в [5]). В дальнейшем было отмечено, что проводимость растёт не во всём объёме кристалла, а только в области полос скольжения, т.е. по месту локализации пластической деформации. В частности, в опытах Руэды [5] был продемонстрирован перенос электрического заряда дислокациями, который реализуется, в отдельных полосах скольжения, по месту избыточной плотности подвижных дислокаций.

Известны также работы, где исследовалось влияние электровоздействий на скорость пластической деформации. Первоначально эффект повышения пластичности в результате облучения ускоренными электронами во время деформации или воздействия импульсным током был обнаружен в кристаллах цинка в 1963 г. Механизм явления сводился к ускоренному движению дислокаций в районе имеющихся и вновь инициируемых источников дислокаций, что и могло быть причиной увеличения пластичности.

В другой серии работ, обобщенных в [6], выполнены исследования влияния электрического и магнитного полей на пластичность и неупругие свойства щелочно-галогенных кристаллов. Показано, что магнитное поле с индукцией выше пороговой и электрическое поле напряженностью порядка 1-10 МВ/м существенно влияют на внутреннее трение и дефект упругих модулей. Взаимосвязь электрических полей обусловленных поляризацией горных пород, с релаксационными процессами, определяющими выравнивание неоднородностей напряжения, убедительно продемонстрирована в [7]. В этой работе рассмотрен случай образцов без пьезоэлектрических свойств находящихся при относительно небольших нагрузках, меньше половины разрушающих.

Высокая чувствительность метода акустической эмиссии позволила обнаружить отклики нагруженных образцов на импульсы ЭМП с электрической напряженностью существенно меньшей, чем в случае [6]. В данном докладе представляются результаты исследований вариаций АЭ образцов различных геоматериалов: гранита, габбро, мрамора, кварцита и каменной соли под воздействием импульсов ЭМП. Представлен материал о влиянии электрических, магнитных, а также скрещенных электрических и магнитных полей на кинетику дефектообразования, отражающуюся в режиме акустической эмиссии (АЭ). Дополнительные воздействия импульсными полями осуществлялись в ходе сеансов при испытаниях образцов на ползучесть на бесшумных реологических прессах с максимальным усилием в 100 тонн. Сигналы акустической эмиссии регистрировались в широком частотном диапазоне от 80 кГц до 2,5 МГц, что позволяло контролировать волновую форму сигналов АЭ.

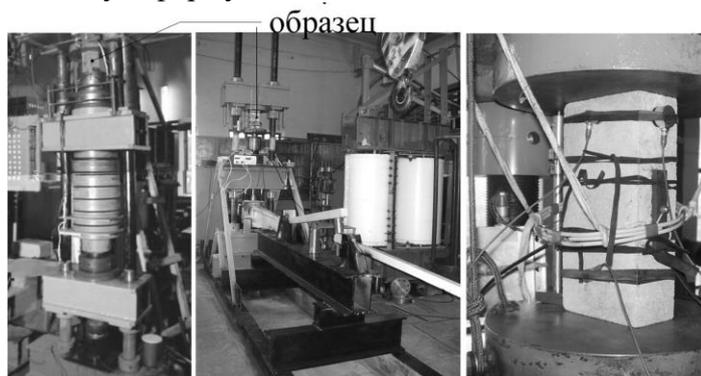


Рис.1. Общий вид пружинного пресса УДИ разработки ВНИИ РАН (слева); рычажно-гравитационного пресса УДИ-Л (в центре) и исследуемого образца с токоподводящими электродами и датчиком АЭ (справа).

Установлен эффект кратковременного прироста активности АЭ, стимулированный внешними воздействиями на полухрупкие и псевдопластичные материалы, находящиеся в условиях одноосного сжатия. Изучены особенности откликов акустической эмиссии, аналогичные эффектам памяти (задержка, последствие, деградация отклика на повторные воздействия). Определен диапазон значений сжимающих напряжений, в котором имеет место эффект кратковременной активации АЭ, не связанной с образованием макроскопических трещин в образце или сколами на его поверхностях. Показано, что при нагрузках 70-95 % от максимальных (для конкретного образца) отдельно взятый отклик не приводит к изменению деформации, свыше  $10^{-5}$ , (т.е. соответствующие изменения размеров образцов меньше микрона).

В качестве примера на рис 2 показан отклик АЭ образца каменной соли на воздействие прямоугольных импульсов с амплитудой напряженности электрического поля  $\sim 1,5$  кВ/м (источник- генератор Г5-54, нагруженный на электроды, закрепленные на свободной поверхности образца). До начала электровоздействия и после спада вызванного всплеска активности поток событий АЭ описывается распределениями Пуассона или (более точно) Пойа. При резкой активации в течение примерно 650 с имеет место отклонение от указанных стандартных распределений, что свидетельствует о неслучайном характере отклика.

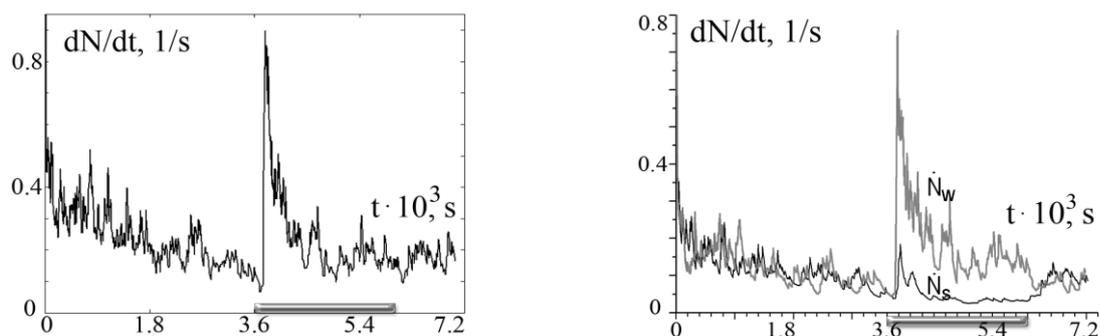


Рис.2. Временные зависимости активности АЭ в сессии с подачей электроимпульсов при постоянной нагрузке. Нагрузка – 067 от разрушающей. Полоса указывает время воздействия импульсов с напряжением - 60 В, длительностью 5 мкс, частотой- 2 кГц. Слева – активность, рассчитанная для всего потока событий, справа - активность по выборкам событий с меньшей ( $N_w$ ) и большей  $N_s$  амплитудами,  $N(t) = N_w(t) + N_s(t)$ .

Обращено внимание на то, что по данным АЭ геоматериалы с различными пьезоэлектрическими свойствами сходным образом реагируют на воздействие электрических полей. Показателен пример сходства откликов образцов кварцита (явный пьезоэлектрик), гранита (пьезоэлектрические модули на несколько порядков меньше, чем у кварцита), мрамора и каменной соли (пьезоэлектрические свойства отсутствуют). Необходимым условием для возникновения отклика на электромагнитные импульсы у материалов без пьезоэлектрических свойств является неоднородность и неизотропность распределения дефектов на стадии дилатантного деформирования. Итогом работы, имеющим практическое значение, является развитие методики неразрушающего контроля неметаллических материалов: демонстрация возможности диагностики зон неупругой деформации (дилатансии) по появлению откликов АЭ на тестирующие электроимпульсы.

Проведенные исследования электрочувствительности АЭ образцов горных пород высветили с еще одной стороны значение идеи А.В. Степанова о важнейшей роли пластической деформации в процессе подготовки разрушения и связанных с ним явлениях взаимодействия различных физических полей.

### Список литературы

1. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
2. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A. et al. AE response of rocks to electric power action as seismic- electric effect manifestation// Annals of Geophysics. 2004. V.47. No 1. P. 65-72.
3. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомоллов Л.М. и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006. №6. С. 22-33.
4. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана// Там же. 1999. № 4-5. С. 152-160.
5. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов// УФН. 1968. Т.96. №1. С. 38-60.
6. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галогенных кристаллов. Новосибирск: Наука. 1990. 120 с.
7. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках //ФТТ. 1997. Т. 39. №7. С. 1202-1204.