

УДК 550.348; 550.37 (575.2) (04)

**АКУСТОЭМИССИОННЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ  
В НАГРУЖЕННЫХ ГЕОМАТЕРИАЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

*А.С. Закупин* – научн. сотр.

*А.А. Авагимов* – докт. физ.-мат. наук

*А.В. Аладьев* – инженер 2 катег.

*Л.М. Богомолов* – канд. физ.-мат. наук

*Б.В. Боровский* – научн. сотр.

*П.В. Ильичев* – зав. лаборат.

*В.Н. Сычев* – научн. сотр.

*Д.С. Мясников* – магистр

---

The influence of steady electromagnetic pulses over rocks loaded by uniaxial compression has been investigated. The temporal dependences of AE activity and AE events accumulation have been plotted for wide-range of compression stress. We have compared (qualitatively and quantitatively) the responses of AEs at various values of compression. The interval of main stresses has been specified, where the effect of electric pulses on AE regime is working inspite the minor value of stress in comparison with the fracture level.

**Введение.** Влияние электроимпульсов на деформацию и акустическую эмиссию (АЭ) образцов горных пород, имитирующих геологическую среду, исследовалось в ряде работ [1–3]. Сопоставление их результатов говорит о том, что отклики на воздействия нестационарных физических полей (так называемые энергвоздействия, ЭВ), как правило, проявлялись в определенном диапазоне значений сжимающего усилия, которое составляло 70–95% от разрушающей нагрузки. Это наблюдение характерно для всех типов применявшихся источников электровоздействия [3]. Однако картина поведения нагруженных образцов геоматериалов при воздействии электромагнитного поля на разных ступенях сжимающего напряжения, составленная по результатам разнородных испытаний (на материалах, с использованием различных источников электроимпульсного воздействия...), все еще неполна. Для

систематичности и восполнения нехватки данных для некоторых диапазонов главного напряжения в ИС РАН проведен специальный методический эксперимент. Испытан образец гранодиорита правильной цилиндрической формы в условиях комнатной температуры и гигроскопической влагонасыщенности. Гранодиорит – материал, являющийся составной частью массивов коры Северного Тянь-Шаня (Бишкекского геодинамического полигона), залегающих на глубинах от 600 м до 5 км, и имеющий физические характеристики, близкие к усредненным характеристикам целых массивов (по скорости распространения упругих волн, диэлектрической проницаемости, влагонасыщаемости и механическим упругим модулям).

В ходе эксперимента главное напряжение (сжатие) увеличивалось ступенчато на одну и ту же величину через равные промежутки времени (сессии), в течение которых

проводились измерения АЭ и параметров макродеформации образца. В каждой экспериментальной сессии, привязанной к одному значению сжимающего напряжения, проводилось воздействие генератором Г5-54 (квазистационарное воздействие) с одними и теми же параметрами электроимпульсов и равными сессионными промежутками времени (время до, после воздействия и время самого воздействия).

**Результаты эксперимента.** Временная зависимость активности АЭ сразу после прироста напряжения сжатия – спадание со временем по гиперболическому закону – обнаруживает аналогию с сейсмическим явлением замедленного убывания активности афтершоков после сильного землетрясения (закон Омори). Действительно, релаксационный процесс высвобождения энергии, полученной образцом при пригрузке и проявляющейся в виде мощного потока АЭ, является смысловым аналогом этого известного закона, описывающего обратную степенную зависимость затухания числа событий-афтершоков, приходящихся на скользящий временной интервал. В обоих случаях эти процессы носят релаксационный характер. Попытка аппроксимации временных зависимостей АЭ выражением из закона Омори подтвердила, что графики на начальных интервалах длиной 3–4 тыс. с следуют гиперболическому ( $\sim 1/t$ ) закону спадания с удовлетворительной точностью.

Анализ графиков активности АЭ применительно к внешнему воздействию проводился различными методами в зависимости от её уровня. Для анализа влияния электроимпульсов наряду с полученными зависимостями активности АЭ использовались также кривые накопления. Для наглядности из временного ряда накопления числа событий вычитался линейный тренд. Благодаря единообразному заданию периодов регистрации и интервалов с модельными ЭВ для всех ступеней нагрузки это не затрудняет сопоставление сессий. Применение нескольких способов анализа данных к внешнему воздействию оправдано ввиду большой разницы активности АЭ в зависимости от

100 событий при 20% от разрушающей – до 10000 при 90%). Отклик активности АЭ на внешнее воздействие, контрастно выделяющийся по отношению к предыстории, отмечен начиная с нагрузки 28 тонн (64% от разрушающей). Длительность задержки – 1200 с, т.е. такого же масштаба, как в предыдущих экспериментах, когда нагрузка была порядка 70% от разрушающей для данного материала. На следующей ступени (нагрузки 32 тонны, 73% от разрушающей) также зарегистрировано проявление активации под влиянием электроимпульсов, но не столь контрастное, как в предшествующей сессии. Это может быть связано с тем, что момент включения источника ЭВ наложился на флуктуацию активности АЭ, так что трудно оценить фоновый уровень активности. Наиболее показательными являются примеры откликов АЭ, которые отмечены при трёх более высоких значениях главного сжимающего напряжения (86%, 91%, 95% от разрушающей нагрузки). На рис. 1 показан результат для нагрузки  $p=40$  т (91%). Как видно из графиков, активность АЭ с некоторой задержкой после начала воздействия увеличивается и достигает максимума, который может характеризовать амплитуду отклика. Затем начинается постепенное снижение активности.

Длительность отклика определяется временным интервалом после начала воздействия, значения активности для которого превышают среднеквадратичное отклонение от среднего уровня, оцененного до начала воздействия. Для каждого из трех значений главного сжимающего напряжения, когда был зафиксирован четкий отклик АЭ, были вычислены следующие параметры потока событий: средняя активность до и после воздействия, время задержки активации, крутизна фронта нарастания, средняя и максимальная амплитуды отклика, время нахождения материала в активированном состоянии (длительность отклика), период последствия при снятии внешних ЭВ (при наличии эффекта последствия). Эти характеристики откликов представлены в таблице.

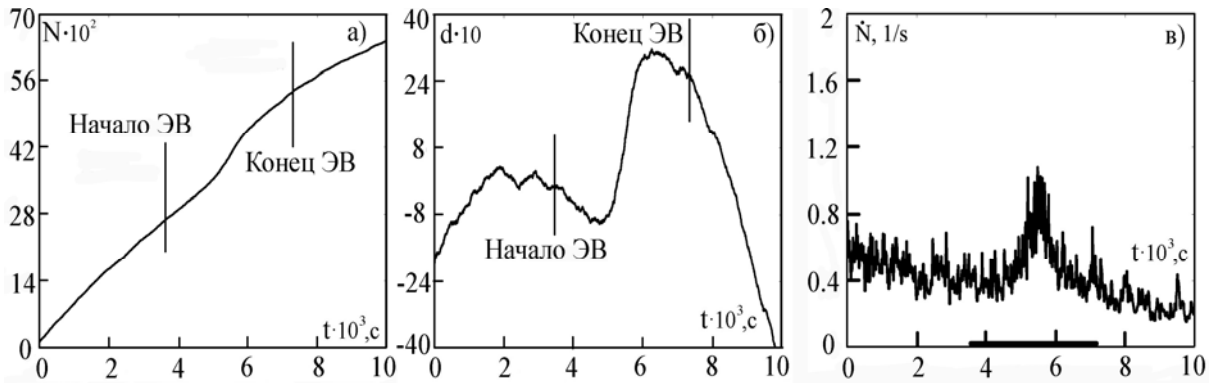


Рис. 1. Временные зависимости: а) число накопленных событий АЭ; б) число событий за вычетом линейного тренда; в) активность АЭ (нагрузка 40 т, 91% от разрушающей нагрузки).

Главное сжимающее напряжение, $\sigma_1$ , МПа	179	188	198
Задержка активации АЭ, с	2000	1000	458
Максимальная активность, 1/с	1,1	1,078	2,17
Длительность отклика, с	1050	1900	1677
Скорость возрастания активности АЭ	0,293	0,277	0,925
Средняя активность до воздействия, 1/с	0,55	0,4	0,7
Средняя активность после воздействия, 1/с	0,4	0,2	0,39

Как свидетельствуют данные таблицы, длительность задержки активации уменьшается; увеличиваются амплитуда отклика и его длительность; увеличивается выделение энергии (релаксация напряжений в условиях внешнего воздействия). Наиболее важно последнее обстоятельство, которому соответствует падение усредненного уровня активности АЭ после прохождения отклика – всплеска, что может являться свидетельством снижения неоднородности распределения напряжений.

С увеличением напряжения материал оказывается более восприимчивым к внешнему воздействию, о чем свидетельствует, например, повышение амплитуды (степени контрастности) откликов. Обращает на себя внимание тот факт, что примерно при этом уровне напряжений происходит переход к дилатансионной стадии деформации, когда объем увеличивается, т.е. имеет место рыхление. Действительно, для испытанного образца гранодиорита при нагрузке 65% от разрушающей, его объем

оказался таким же, как в ненагруженном состоянии (при этом разность между продольной и удвоенной поперечной деформациями  $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$  обращается в нуль). Это демонстрирует рис. 2, где, согласно [4], воспроизведена  $\sigma$ - $\varepsilon$  диаграмма для материала со структурой, механическими свойствами и типом разрушения, сходными с испытанным гранодиоритом. На диаграмме показаны кривые для поперечной и продольной деформаций, а также кривая дилатансии, приближенно оцениваемая как разность  $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$ .

Черная полоса на рис. 2 указывает на диапазон значений главного сжимающего напряжения, для которого в настоящей и предшествующих работах установлен эффект активации АЭ электроимпульсами. Набранная статистика по проведенным экспериментам с различными материалами показывает, что чувствительность материала к ЭВ начинает проявляться, именно начиная с нагрузки, соответствующей началу дилатансии. Примечательно, что, согласно [4], отклики на слабые квазистационарные вибровоздействия,

аналогичные рассматриваемой реакции на включение электроимпульсов, также регистрировались при нагрузках, соответствующих стадии дилатансии. Все это согласуется с выводами работ [5,6], посвященных резервам прочности материалов, где начало стадии дилатансии рассматривалось как фазовый переход.

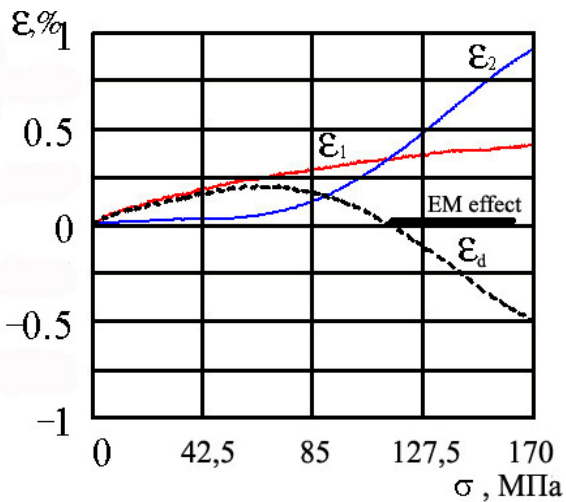


Рис.2. Кривые напряжение-деформация для образца гранита [4]:  $\sigma$  – главное сжимающее напряжение;  $\epsilon_1$  – продольная деформация;  $\epsilon_2$  – поперечная деформация;  $\epsilon_d$  – дилатансия; сплошная черная линия показывает диапазон напряжений, в котором выявлена чувствительность материала к ЭМ-полю.

В диапазоне значений нагрузки, когда материал реагирует на внешние воздействия, нагруженная среда находится в определенном состоянии. Несомненно, что специфичность этого состояния должна быть отражена и на кинетике структурных изменений. На рис. 3 показан график накопления числа событий АЭ в различных измерительных сессиях в течение эксперимента. Точки указывают количество событий АЭ, накопленных в каждой экспериментальной сессии при постоянном значении главного сжимающего напряжения. График показывает, что при нагрузках, превышающих 65% от максимальной (т.е. с началом дилатансии), происходит быстрый рост кривой накопления событий АЭ, отражающих накопление структурных

дефектов. Таким образом, соответствие диапазонов дилатансии и чувствительности режима АЭ к действию физических полей не случайно.

На графике (рис. 3) видно, что основной диапазон нагрузок, в котором наблюдается эффект (80–95%) лежит в области, где процесс дефектообразования носит неустойчивый характер (в терминах синергетики, либо теории солитонов эта часть кривой описывается как N-образность). Важно отметить, что некоторое снижение темпа накопления событий АЭ (числа дефектов) на предразрушающей нагрузке 40 тонн (91% от максимальной) есть не что иное, как акустическое затишье – аналог затишья или паузы сейсмической активности перед землетрясением.

**Обсуждение результатов.** Полученный результат подтверждает представления о наличии диапазона значений главного сжимающего напряжения, при котором в образце создается напряженно-деформированное состояние, благоприятное для взаимодействия внутренних энергетических полей с внешним электромагнитным полем. Именно в этом состоянии возможны проявления нелинейности в форме эффектов изменения деформационного режима. Традиционно в геомеханике и сейсмологии их характеризуют как триггерные, хотя с точки зрения математической теории катастроф и самоорганизованной критичности более точным было бы использовать термин “бифуркация”. Рис. 3 весьма нагляден как демонстрация того, что черты самоорганизации присущи АЭ горных пород, нагруженных на сжатие, а не только металлам при их пластической деформации (общеизвестный пример [7, 8], к которому апеллируют даже в работах по сейсмологии). Необходимыми условиями для того, чтобы эффекты самоорганизации могли иметь место, является открытость системы и наличие в ней диссипации и достаточно сильной нелинейности. Для образца, испытываемого на пружинном прессе, открытость (возможность притока энергии) и диссипативные свойства (вклад пластической деформации) очевидны.

Не столь явным априорно является вклад нелинейности, поскольку смена режима АЭ (т.е. триггерный эффект) наблюдалась и при весьма малых деформациях  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \leq 0,5\%$ ,

согласно рис. 2. Остановимся на вопросе, какого рода нелинейностью, несмотря на малость деформаций, может быть обусловлена N-образность графика на рис. 3, свидетельст-

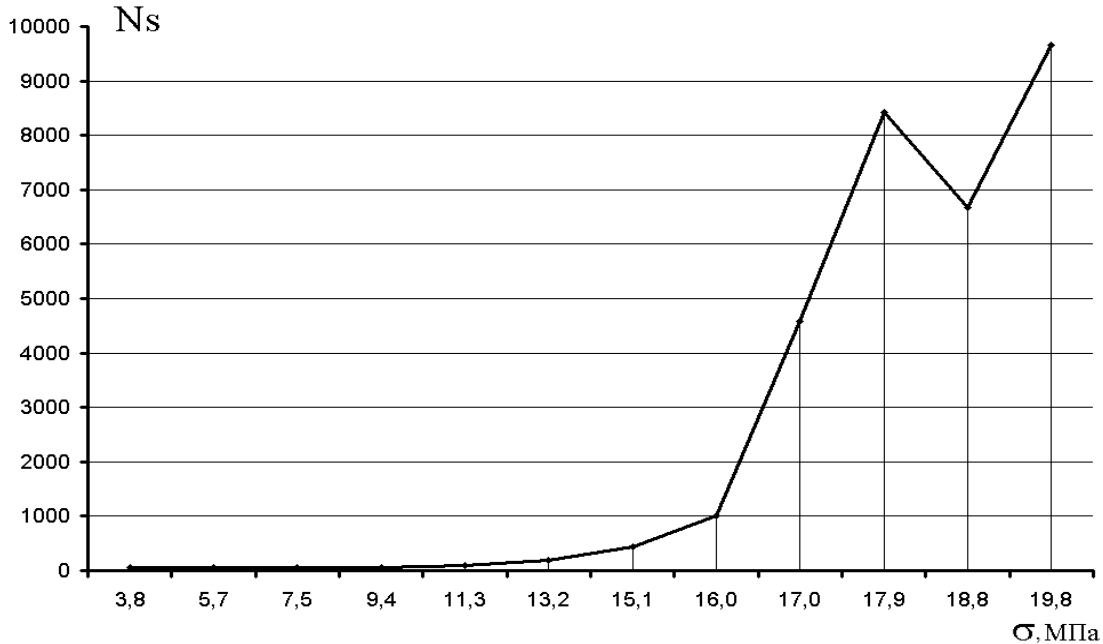


Рис. 3. Количество накопленных дефектов (зарегистрированных событий АЭ) в сессиях при различных сжимающих нагрузках.

вующая о самоорганизации типа фазового перехода [8]. В работах по гидродинамике, нелинейной теории упругости, физической акустике и т.п. выделяют три типа нелинейности [9]. Наиболее часто внимание исследователей сфокусировано на нелинейных эффектах, связанных со “сносовыми” слагаемыми  $\sim(UX)U$  в уравнении движения. Эта нелинейность, не зависящая от физических свойств деформируемой среды и возникающая при дифференцировании вектора скорости  $U$  по координатам (т.е. при переходе от векторов к тензорным компонентам), получила название *геометрической*. Проявления геометрической нелинейности общеизвестны: укрупнение фронта волн, возникновение конвективных ячеек и др. Доказано, что эта нелинейность вносит существенный вклад, когда характерный размер системы больше длины волны [10]. Однако в нашем случае для испытанных

образцов ситуация противоположная – их размеры меньше 10 см, а длина упругих волн на килогерцевых частотах (соответствующих частотам подачи электроимпульсов от генератора Г5-54) порядка нескольких метров.

Нелинейность другого типа, именуемую физической, связывают, в конечном счете, с проявлением ангармонизма межатомного потенциала [11]. При макроскопическом описании этому соответствует формальное разложение внутренней энергии деформированной среды в степенной ряд по инвариантам тензора деформаций с сохранением квадратичных и кубических слагаемых. Коэффициенты при квадратичных членах разложения являются линейными модулями упругости, а при кубических – нелинейными модулями Ландау (модулями третьего порядка) [11]. Отметим, что наличием физической нелинейности (ангармонизмом взаимодействия) обусловлены такие хорошо

известные эффекты, как тепловое расширение и зависимость скорости упругих волн от напряжения  $\sigma$  и температуры и др. Нелинейность этого типа, зависящую от свойств конкретной среды, проще всего учесть, записывая закон Гука с квадратичной добавкой  $\sigma = E (\epsilon + \gamma \epsilon^2)$  (для наглядности ограничиваемся случаем продольных деформаций).

Для однородных аморфных материалов и монокристаллов величины коэффициентов нелинейности  $\gamma$  обычно составляют несколько единиц. Поэтому при деформациях порядка 0,5% и тем более при слабых “триггерных” возмущениях подобная нелинейность не может быть ответственной за самоорганизацию потока сигналов АЭ. Можно ожидать значимого вклада физической нелинейности при откликах среды на гораздо более энергичные воздействия, например, прохождение ударных волн или лазерный нагрев поверхности.

Нелинейность третьего типа обусловлена структурной неоднородностью деформированного материала на микро- и мезоуровне. Недавние исследования (обзор, например, в [9]), доказали, что эта так называемая структурная нелинейность во многих случаях дает вклад, многократно превосходящий геометрическую и физическую нелинейность. Причиной гигантского возрастания нелинейности микрон неоднородных сред является присутствие в их структуре компонент с резко контрастирующими упругими и диссипативными свойствами. При этом размер податливых включений-дефектов может быть мал по сравнению с длиной упругой волны, небольшой может быть и концентрация этих включений. Характерным примером подобных явлений являются трещины, для которых имеется два механизма податливости. Во-первых, возле острия трещины приложенное к образцу напряжение значительно возрастает, и в его окрестности быстрее идут пластические деформации. Там же происходит и трансформация спектра акустических волн. Во-вторых, податливым элементом является полость трещины, полностью или частично заполненная насыщенным паром или

жидкостью. Дилатансия является проявлением повышенной податливости геоматериала, содержащего достаточно большое число трещин. Другим примером неоднородностей, с которыми связана структурная нелинейность, являются межзеренные контакты, поскольку их геометрия (малая площадь касания) предопределяет более легкую сжимаемость, чем для внутризеренного материала [12]. Скопления дислокаций на границах зерен поликристаллов также значительно более податливы, чем окружающие области (в частности, по отношению к тангенциальным нагрузкам). На основе большого числа работ по механике структурно неоднородных сред (трещиноватых, пористых, гранулированных, флюидогазонасыщенных и т.п.) можно сформулировать обобщение, что для таких сред усредненный по макрообъему коэффициент структурной нелинейности  $\gamma_{ef}$  в  $10^2-10^4$  раз больше коэффициента физической нелинейности  $\gamma$ . Таким образом, лишь нелинейность структурного типа является серьезным аргументом для объяснения акустоэмиссионных проявлений самоорганизации, в частности, немонотонности темпа накопления повреждений по графику, приведенному на рис. 3.

С точки зрения разработки основ технологии искусственной разрядки избыточных напряжений подобные N-образные кривые могут быть полезны для оптимального выбора времени воздействия. Сравнение откликов на электроимпульсы при разных нагрузках показывает, что на данном этапе исследований наиболее эффективным представляется период, когда напряжения соответствуют началу спадающего интервала N-образной кривой. Полученные результаты по своему характеру укладываются в представление концепции самоорганизации, что позволяет надеяться на их масштабирование от образцов на естественные для геофизики и сейсмологии размеры.

#### Литература

1. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. Acoustic emission response of rocks to electric power action as

- seismic-electric effect manifestation // *Annals of Geophysics*. – 2004. – V. 47. – No 1. – P. 65–72.
2. *Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С. и др.* Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энергвоздействиях физическими полями // *Проблемы сейсмологии 3-го тысячелетия: Сб.* – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 168–172.
  3. *Закупин А.С., Богомолов Л.М., Аладьев А.В., Боровский Б.В. и др.* Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // *Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Отв. ред. С.В. Гольдин и Ю.Г. Леонов.* – Москва–Бишкек, 2003. – С. 304–324.
  4. *Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. и др.* Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // *Геология и геофизика.* – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1678–1689.
  5. *Адигамов Н.С., Рудаев Я.И.* О самоорганизации структурообразования при деформировании горных пород // *Геодинамика и напряженное состояние пород недр Земли.* – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999. – С. 51–58.
  6. *Шемякин Е.И.* О сдвиговой прочности горных пород // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 1. Математика, механика.* – 2003. – № 3. – С. 76–81.
  7. *Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П.* Нелинейная динамика и проблемы прогноза // *Вестник РАН.* – 2001. – Т. 71. – № 3. – С. 210–232.
  8. *Николис Дж.* Динамика иерархических систем: Эволюционное представление. – М.: Мир, 1989. – 488 с.
  9. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // *УФН.* – 2006. – Т. 176. – № 1. – С. 77–95.
  10. *Руденко О.В., Солуян С.И.* Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
  11. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 430 с.
  12. *Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 424 с.