

УДК 550.34; 681.3 (575.2) (04)

**РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА  
СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ  
ПРИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ  
ПОЛУХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*В.Н. Сычев* – ст. преподаватель

---

New testing routine was developed to reveal triggered effects of rocks straining at constant load due to weak external fields. Particularly, the control of physical experiment run was created under QNX real time operation system. The effect of relatively weak impacts over acoustic emission activity was found.

**Введение.** Методика проведения модельных экспериментов основывается на современных представлениях об эволюции очага землетрясения. Сейсмический процесс является составной частью геотектонических процессов, приводящих к напряженно-деформированному состоянию среды в зоне очага будущего землетрясения. Существует достаточно много доказательств влияния физических полей на процесс диссипации энергии, накапливаемой в сейсмогенерирующих зонах. Этому вопросу посвящены работы [1–4 и др.], где совместно с сейсмологическими данными рассматриваются такие воздействия, как колебания уровня воды в искусственных водохранилищах, подземные ядерные взрывы и сильные удаленные землетрясения, мощные электрические импульсы, влияние разработки месторождений нефти, газа и твердых ископаемых, погодные явления (грозы, смена давлений, осадки), лунно-солнечные приливы в земной коре, изменения скорости вращения Земли и солнечной активности.

Если среда находится в механически устойчивом состоянии, то происходящие в ней процессы реагируют на внешние воздействия в соответствии с принципом Ле Шателье: стремление не выйти из этого равновесного состояния, ослабить эффект внешних воздей-

ствий. Благодаря этим отрицательным связям система обладает относительно невысокой чувствительностью к внешним воздействиям. В ходе геодинамической эволюции этот механизм может себя исчерпать, и тогда система переходит на другой, качественно новый уровень, в новое стационарное состояние. В сложной неравновесной системе с этим переходом связаны уникальные события и флуктуации, способствующие возникновению таких событий, происходит расширение масштабов среды, вовлеченной в процесс, повышение ее чувствительности к внешнему миру. Таким образом, чувствительность сейсмических явлений к внешним воздействиям изменчива во времени и особенно велика перед сильными землетрясениями, в заключительной фазе их подготовки.

Лабораторное физическое моделирование тектонических деформационных процессов, проводимое на образцах горных пород, позволяет решать многие задачи, связанные с геодинамическими и сейсмологическими исследованиями в земной коре. В частности, оправдывает себя моделирование деформационных процессов при исследовании эффектов выделения сейсмической энергии, для которых действие слабых внешних энергетических воздействий (вибраций естественной либо техногенной природы, импульсов электромагнитно-

го поля) на геологическую среду может играть роль триггера. Оригинальность модельных экспериментов, описанию которых посвящена данная работа, определяется сочетанием использования реологической установки, позволяющей обеспечить подобие медленной фазы накопления энергии и быстродействующей системы регистрации сигналов акустической эмиссии для фиксирования быстрой фазы энерговыделения.

Центральное место в проведенных исследованиях занимают измерения, основанные на автоматизации сбора данных с широким применением современной вычислительной техники. Использование компьютеров при проведении экспериментов позволяет повысить точность получаемой информации, увеличить производительность, автоматизировать процесс получения, накопления и обработки экспериментальных данных. Эксплуатация специализированных комплексов позволяет выполнять часть функций по сбору и предварительному хранению информации в устройствах, расположенных в непосредственной близости от испытуемого образца. Применение же новейших разработок в области операционных систем позволяет создавать специализированные комплексы по автоматизации эксперимента в минимальной конфигурации аппаратных средств, управляемые по локальной вычислительной сети.

**Описание рабочей установки.** Для проведения экспериментов по моделированию различных режимов электромагнитного и вибрационного воздействий используется бесшумное прессовое оборудование. Это пружинная реологическая установка для длительных испытаний конструкции А.Н. Ставрогина, ВНИМИ, Санкт-Петербург. Реологическая установка позволяет проводить испытания на ползучесть при одноосном сжатии. Для ступенчатого изменения нагрузки в ходе эксперимента служит 100-тонный гидроцилиндр со специально разработанным приводом. После фиксации нагрузки при помощи упорной гайки постоянство главного сжимающего напряжения обеспечивается за счёт упруго сжатых дисковых пружин в бесшумном режиме.

Измерения величины нагрузки проводились при помощи манометра на рабочем ци-

линдре гидропривода, а также периодическим замером изменений длины пружин с помощью датчика линейных перемещений LVDT. Размеры образцов были подобраны таким образом, чтобы их кажущаяся жесткость при одноосном деформировании (определяемая модулем Юнга и размерами) была в 30–100 раз больше этого значения. При таком соотношении нагружающее устройство обеспечивает слабую отрицательную обратную связь без внешнего управления. Так, например, при быстром, хотя и макроскопически незаметном укорочении образца вследствие спонтанного всплеска активности (что свидетельствует, согласно [5], о возникновении очага – подобласти с критическими параметрами для трещинообразования) нагрузка снижается на несколько процентов. Тем самым учтен известный опыт лаборатории Дж. Байерли и Д. Локнера (USGS, Menlo-park) по проведению испытаний образцов горных пород с "задержанным разрушением" при использовании обратной связи по активности АЭ [6].

Применение быстродействующей АЦП с буферной памятью делает ненужным растяжку процесса, так как регистрирующая аппаратура находится в постоянной готовности и срабатывает по превышению сигналом некоторого порогового значения, задаваемого в дискриминаторе. Используется также возможность АЦП сохранять предысторию сигнала. Таким образом сохраняется сигнал АЭ вместе с шумами на предшествующем интервале времени. Все это в сумме позволяет лучше отслеживать идентификацию откликов АЭ на весьма слабые дополнительные воздействия электроимпульсами.

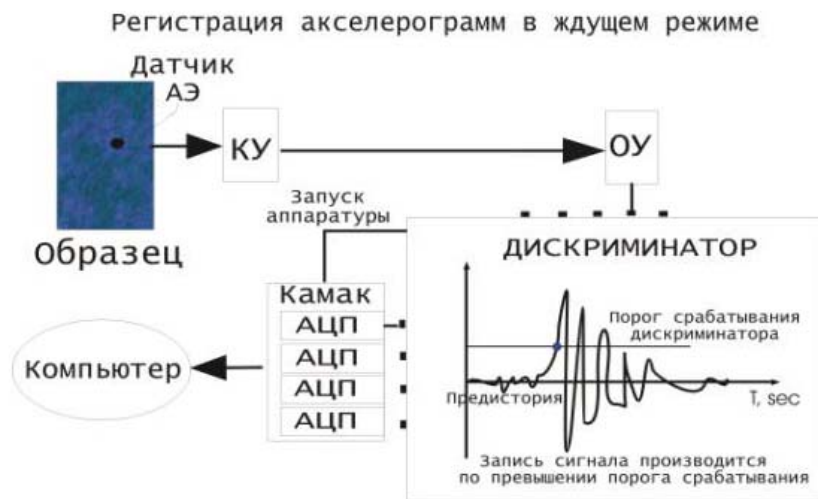
Для испытаний образец устанавливается на нижнюю пятю, в которую встроены датчики акустической эмиссии, конструктивно совмещенные с кабельными усилителями. Сверху образец упирается в верхнюю пятю, а центрирование образца производится за счет сферического шарнира, на который опирается нижняя пятя. В большинстве экспериментов кроме встроженных датчиков АЭ, для регистрации слабых сигналов АЭ применялись также отдельные помехозащищенные датчики, которые крепились на боковые грани образца. Сигнал одного из боковых датчиков (тип SE2000 компании DECI) после усиления и фильтрации

управлял запуском регистрирующей аппаратуры – АЦП, работающими в стандарте КАМАК. Другой датчик, крепящийся к поверхности образца (SH350), позволял исследовать сдвиговые акустические колебания.

Для проведения экспериментов были подобраны различные горные породы с выраженными акусто-эмиссионными свойствами: каменная соль (галит), гранит, гранодиорит, габбро и кварцит. Всего было испытано 19 образцов этих пород (методические особенности приведены в [2]). Также была изготовлена серия специальных песчано-цементных образцов размером 100x120x250 мм<sup>3</sup> с неоднородными

включениями (1–5% по весу) из гранитной крошки.

Методика экспериментов включала в себя проведение экспериментальных сессий при постоянной заданной нагрузке. Сигналы акустической эмиссии регистрировались в широком частотном диапазоне от 80 кГц до 5 МГц. Это позволяет контролировать форму сигналов АЭ. Система регистрации работала в ждущем режиме (рис. 1). Кроме системы сбора акустоэмиссионных данных, была налажена тензометрическая система, которая позволяла регистрировать изменение поперечных размеров образца.



**Экспериментальные сессии при постоянной нагрузке**

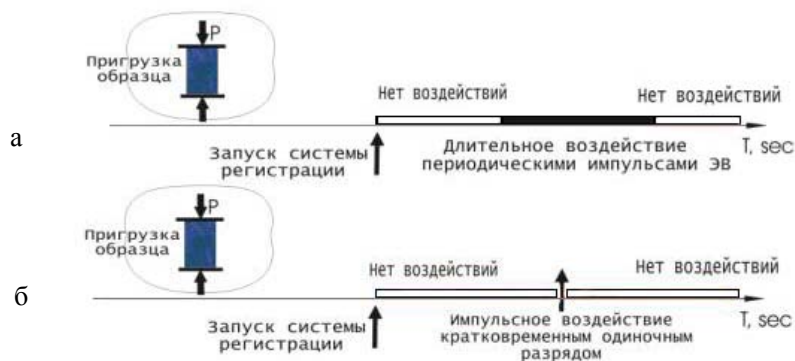


Рис. 1. Схемы регистрации сигналов АЭ и сбора данных при исследовании влияния на АЭ дополнительных воздействий: а – в режиме периодического воздействия, б – при воздействии одиночными электроимпульсами.

В ходе экспериментов использовались два способа управления аппаратурой в стандарте КАМАК:

- связь между крейтом КАМАК и персональным компьютером осуществлялась с помощью контроллера PDC-01, установленного на шину ISA персонального компьютера. Контроллер выполняет функции согласования между шинами ISA и общей шиной СМ ЭВМ типа СМ1420 и предполагает наличие контроллера крейта КК, ранее используемого в ЭВМ СМ1420;
- управление крейтом производилось с помощью контроллера крейта КК-01, разработанного для обеспечения двунаправленного обмена данными между персональным компьютером типа IBM PC и устройствами крейта КАМАК.

В рамках проводимой работы создано программное обеспечение для сбора информации под управлением операционной системы QNX. Использование свободно распространяемой операционной системы QNX позволило отказаться от такого мощного дополнительного источника высокочастотных электромагнитных помех, как монитор, и использовать сетевые возможности управления ходом сбора экспериментальных данных. Программное обеспечение также разработано на языке C++, использован компилятор gcc.

Управление компьютером, осуществляющим сбор экспериментальных данных, происходит удаленно по протоколу telnet. При этом использовались совместно разделяемые ресурсы под управлением NFS, SMB и FTP.

**Результаты.** Полученные результаты могут быть компактно представлены при помощи графиков временной зависимости активности АЭ при дополнительных воздействиях (см. рис. 2–3). Для расчета активности АЭ по экспериментальным данным – файлам акселерограмм, проверенным на отсутствие ложных событий (критерии отбраковки: источник сигнала в образце или вне его, а также соответствие спектральным характеристикам АЭ), проводилась обработка скользящим окном с усреднением времен накопления определенного числа событий.

Установлено, что на 70% испытанных образцов был зарегистрирован эффект активации АЭ электромагнитными импульсами. Триггерный эффект ЭВ обнаружен для всех материалов. Для большинства испытанных образцов (около 85%) отклики АЭ на воздействие электроимпульсов проявлялись на нагрузках, составляющие 70–95% от разрушающей нагрузки. Для однородной серии образцов наилучшая воспроизводимость откликов на однотипные воздействия отмечалась при нагрузках 80–90% от разрушающей.

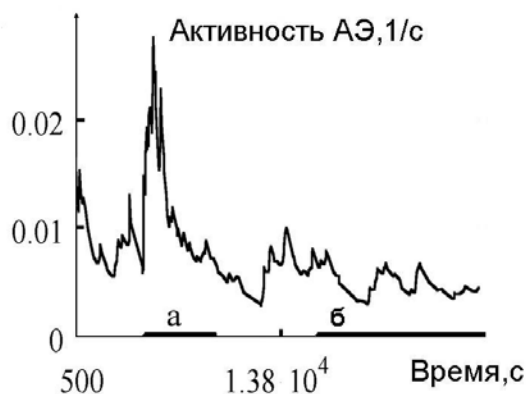


Рис. 2. Активность АЭ бетонного образца. Электро- воздействие генератором Г5-54 в периоды: а) 4800–9600 с; б) 15000–27000 с. Параметры электро- импульсов (частота, длительность, амплитуда): а – 2 кГц, 5 мкс, 60 В; б – 1 кГц, 10 мкс, 60 В; нагрузка 75% от разрушающей.

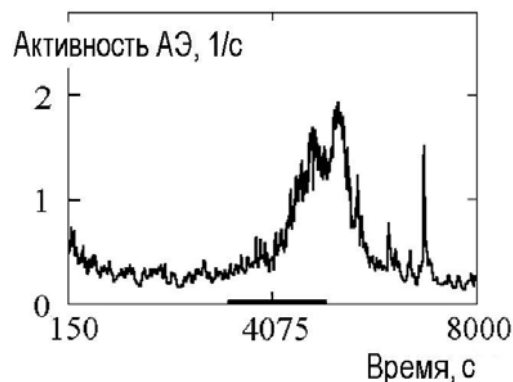


Рис. 3. Активность АЭ образца габбро. Электро- воздействие импульсами генератора Г5-54 (параметры 2 кГц, 30 мкс, 50 В) в период с 3260 по 5070 с, нагрузка 95% от разрушающей.

Активация АЭ наступала в течение 5 мин. после начала воздействия. Быстрый рост АЭ, указывающий на ее переход в новое, активированное состояние, происходил спустя некоторое время после внешнего воздействия. Затем активность АЭ возвращалась к фоновому уровню или (в некоторых случаях) оказывалась ниже среднего. На рис.2 показан триггерный эффект при воздействии однополярных прямоугольных импульсов на активность АЭ бетонного образца с гранитными включениями.

В дополнение к гранитным образцам, представляющих интерес как референтный материал, для которого известно множество работ, в том числе по АЭ (обзор в [8]), рассматривались отклики АЭ образцов габбро (рис. 3). Поскольку это материал, сходный по механическим характеристикам с гранитом Каинда Табылга (Кыргызстан), но не содержащий кварцевых фракций с пьезоэлектрическими свойствами. Отклик АЭ образца габбро (см. рис. 3) по форме оказался аналогичен акустоэмиссионным откликам образцов гранита. В данном случае задержка составила около 1000 с, наблюдалось и последствие в течение такого же промежутка времени.

**Заключение.** Созданная экспериментальная база для исследования влияния физических полей на образцы, находящиеся в напряженно-деформированном состоянии, позволила разработать программное обеспечение нового поколения для автоматизации физического эксперимента, в частности, для акустоэмиссионных измерений. Обнаружена корреляция активности АЭ образцов геоматериалов с воздействием внешнего электромагнитного поля. Эффект зарегистрирован для многих материалов, обладающих различными механическими свойствами и имеющих различный физико-химический состав.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря гранту YG1-2316-BI-02

Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF).

#### Литература

1. *Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В., Челидзе Т.Л.* Экспериментальное изучение иницированной неустойчивой подвижкой // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения. – Т. 11. – М., 1993. – С. 38–47.
2. *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.
3. *Трапезников Ю.А., Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц.* О природе скачкообразных реакций нагруженных образцов на действие микроколебаний // Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. – Алма-Ата, 1997. – С. 167–172.
4. *Николаев А.В.* Наведенная сейсмичность // Природные опасности России. Сейсмические опасности / Под ред. Г.А. Соболева. – М., 2000. – С. 139.
5. *Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С., Томилин Н.Г.* Взаимосвязь пространственной и временной локализации разрушения гетерогенных материалов в рамках двухстадийной модели процесса // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения. – Т. 11. – М., 1993. – С. 9–16.
6. *Lockner D.L., Byerlee J.D., Kuksenko V. et al.* Observation of quasistatic fault growth from acoustic emissions // Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks. – London: Academic Press, 1992. – P. 3–31.
7. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
8. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003.