

УДК 550.34

## АМПЛИТУДНЫЕ СПЕКТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2000 г. Ю. А. Трапезняков, Б. Ц. Манжиков, Л. М. Богомоллов

Научная станция Института высоких температур РАН, Бишкек  
720049 Киргизия

Поступила в редакцию 12.05.97 г.

Методом акустической эмиссии (АЭ) исследованы особенности дефектообразования при ступенчатом нагружении гранитных образцов. Наблюдалось смещение амплитудного спектра АЭ влево в сторону меньших значений во время выдержки образца при постоянной нагрузке после ее очередного быстрого приращения. Предполагается, что амплитуда акустических импульсов пропорциональна размеру образующегося дефекта структуры. Наблюдаемый эффект объясняется релаксацией перенапряжений на структурных неоднородностях, возникающих во время пригрузки образца. Полученные результаты косвенным образом подтверждают гипотезу о возможности малой длительности времени подготовки землетрясения в условиях быстроменяющегося напряженного состояния по сравнению с оценками, полученными на основе традиционных представлений о квазистационарном распределении напряжений в земной коре.

Как долго готовится землетрясение? Принято считать: чем сильнее землетрясение, тем дольше период его подготовки. Основанием для такого заключения служит статистика повторяемости землетрясений и наблюдения за предвестниковыми явлениями [5, 9, 10]. Альтернативная точка зрения допускает, что время подготовки даже сильного землетрясения может быть сравнительно малым [1–4].

Представляется, что некоторую ясность в этом вопросе могли бы внести модельные эксперименты, использующие акустическую эмиссию (АЭ) в качестве лабораторного аналога сейсмического метода для исследования дефектообразования в нагруженных горных породах. Обычно, при нагружении породного образца на прессе, увеличение амплитуды АЭ рассматривается как предвестник его макроразрушения [6, 8].

В настоящей работе рассмотрены изменения амплитудных распределений (спектров) АЭ при одноосном сжатии гранитных образцов в режиме ступенчатого нагружения, при котором нагрузка на образце поддерживается постоянной после очередной пригрузки.

Испытываемые образцы имели форму правильного цилиндра высотой 60 и диаметром 30 мм. Для реализации ступенчатого режима нагружения использован серийный гидравлический пресс, оснащенный специально разработанной реологической пружинной приставкой, позволяющей длительное время поддерживать на образце постоянную нагрузку от 0 до 12 т. Необходимая по величине нагрузка создавалась с помощью гидравлического пресса, затем фиксировалась на

реологической приставке, после чего пресс выключали. В дальнейшем нагрузка на образец сохранялась постоянной за счет сжатых пружин приставки. Применение дополнительного устройства нагружения было обусловлено в основном длительностью эксперимента (до нескольких суток) и минимизацией постоянных шумов, затрудняющих регистрацию АЭ.

В экспериментах принята следующая схема нагружения. Сначала в один прием образец нагружали примерно до половины величины разрушающей нагрузки, что для испытываемой породы составляло 5 т. Далее нагружение проводили ступенчато через 1 или 0.5 т в зависимости от активности АЭ. На заключительном этапе очередное приращение нагрузки на образец могло быть еще меньше (0.1–0.2 т).

После очередной пригрузки в течение некоторого времени регистрировали АЭ. Длительность периода регистрации (от 1 ч до нескольких суток) определялась уровнем активности АЭ и необходимостью иметь статистически представительную выборку объемом  $\geq 64$  событий. В эксперименте для каждого АЭ-события регистрировали амплитуду огибающей акустического сигнала (АС), его длительность и временные интервалы между хронологически последовательными событиями. Аппаратура состояла из первичного пьезопреобразователя, предварительного и основного усилителей, блока формирования амплитуды и длительности, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), счетчика и генератора, предназначенных для измерения длительности и временных интервалов. Основные блоки выполнены в стандарте КАМАК и через контроллер

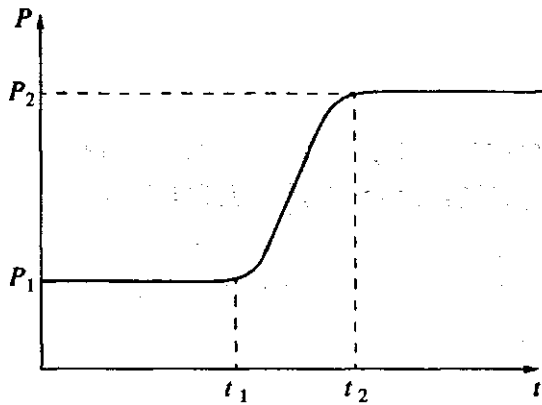


Рис. 1. Изменение нагрузки  $P$  на образец во время цикла нагружения;  $t_1$ ,  $t_2$  – соответственно начальный и завершающий моменты наращивания нагрузки от  $P_1$  до  $P_2$ .

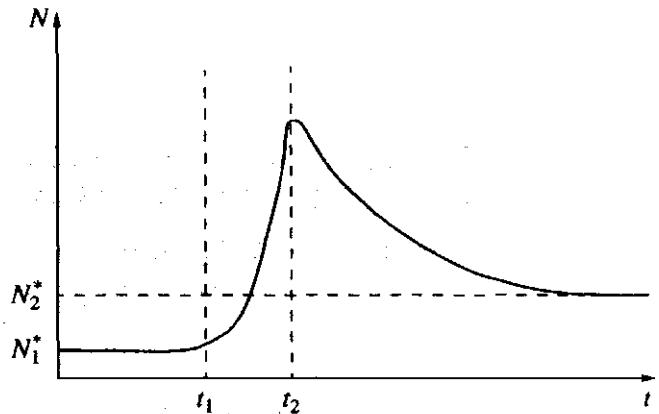


Рис. 2. Изменение активности  $N$  АЭ во время цикла нагружения;  $N_1^*$ ,  $N_2^*$  – стационарные уровни активности АЭ при нагрузках  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

крейта подключались к ЭВМ, где накапливалась и обрабатывалась информация. Суммарный коэффициент передачи измерительного тракта 8000. АЦП позволял измерить амплитуду сигналов с точностью 10 мВ в диапазоне 0–5 В, длительность измерялась с точностью до 1 мкс, время между событиями – с точностью до 1 мс.

Программная обработка исходных данных для построения амплитудных спектров, т.е. распределения числа АС по амплитуде, заключалась в сортировке событий по амплитуде и накоплении числа событий, имеющих одинаковую амплитуду, в последовательных ячейках памяти компьютера, порядковый номер которых совпадает с показанием АЦП. Результирующее распределение отражает вероятность возникновения АЭ-события данной амплитуды. Оно соответствует распределению возникающих дефектов по масштабу и прочности материала.

На рис. 1 представлен типичный график изменения нагрузки на образец во время очередной пригрузки, которой придерживались в экспериментах. Данному изменению нагрузки на образец соответствовало изменение активности АЭ (рис. 2).

Очередная пригрузка образца вызывает увеличение скорости накопления (активности) АЭ, которая после фиксации нагрузки экспоненциально уменьшается до некоторого значения. Указанные результаты обычны для подобных экспериментов [6, 8] и приведены здесь для лучшего понимания постановки опытов, а также новых явлений, описанных далее.

Отметим, что непостоянство активности АЭ при фиксированной нагрузке и ее чувствительность к быстрой пригрузке свидетельствуют о том, что скорость пластического деформирования и ползучести определяется не только усредненным напряжением, но и скоростью нагружения. Проводя аналогию со свойствами диссипа-

тивных, термодинамически незамкнутых систем [11], можно предположить, что ход этих неустановившихся процессов регулируется балансом скорости накачки энергии в образец (т.е. скоростью нагружения) и скоростью диссипации энергии.

Анализ распределений количеств событий АЭ по амплитуде для последовательных во времени выборок показывает, что приращение нагрузки вызывает не только увеличение активности АЭ, но и возрастание амплитуды сигналов, которая постепенно уменьшается после стабилизации нагрузки. На рис. 3 показаны распределения количеств событий АЭ по амплитуде (амплитудные спектры) для четырех выборок объемом 64 события, полученные при нагрузке 11.8 т. Образец находился под этой нагрузкой 4 сут, после чего разрушился.

Видно, что форма распределений не остается постоянной, в частности положение максимума на приведенных графиках с течением времени смещается влево, в сторону меньших амплитуд, и возрастает со временем выдержки образца при данной нагрузке, достигая 5 мкВ в пересчете ко входу преусилителя.

Наблюдаемое смещение максимума спектра происходит при каждом приращении нагрузки на образец. По-видимому, оно отражает изменение кинетики деформирования, происходящее при ступенчатом повышении нагрузки, что можно объяснить следующим образом. Со временем в материале, находящемся под постоянной нагрузкой, если она не слишком высока, развиваются деформации ползучести, характерные для установившегося режима. АЭ в этом случае характеризуется малым количеством слабоэнергетических событий. Быстрое увеличение нагрузки нарушает состояние установившейся ползучести материала при предыдущем уровне нагрузки, что проявляется в виде повышения активности АЭ и

увеличения числа высокоамплитудных сигналов. После стабилизации нагрузки материал вновь стремится обрести установившееся состояние, которое, однако, должно несколько отличаться от предыдущего некоторым повышением активности АЭ. Увеличение числа событий с большими амплитудами (т.е. событий с более высокой энергией) во время активного нагружения свидетельствует об образовании укрупненных дефектов или разрушении более напряженных областей материала. Последняя из указанных возможностей наиболее вероятна в этот период, если нагружение производится достаточно быстро и скорость нагружения превышает скорость релаксации напряжений в материале. При этом возможна концентрация напряжений на жестких структурных неоднородностях, которые либо изначально содержались в материале, либо образовались в процессе деформирования при быстром увеличении нагрузки. По мере разрушения таких мест в образце при данной нагрузке число высокоамплитудных событий АЭ уменьшается, что отражается на форме амплитудного спектра и в смещении влево его максимума. Со временем процесс деформирования приобретает установившуюся форму, характерную для крипа (установившейся ползучести).

Очередная пригрузка, происходящая быстрее скорости релаксации напряжений в образце, вызывает увеличение туда потока энергии и способствует концентрации напряжений на жестких структурных неоднородностях, где процессы деформирования или разрушения протекают более интенсивно по сравнению с остальным объемом, что проявляется в повышении активности и увеличении амплитуд АЭ. С течением времени число концентраторов уменьшается за счет разрушения и пластического деформирования. Нагрузка распределяется все более равномерно по объему образца, при этом активными участниками деформационных процессов остаются менее прочные структурные элементы. Если принять, что акустический сигнал соответствует одному акту структурной перестройки, который происходит при достижении определенного напряжения, а число более прочных структурных элементов всегда меньше числа менее прочных, то уменьшение числа концентраторов должно отразиться на форме амплитудного спектра АЭ. Допустим, что распределение по прочности структурных элементов имеет вид, показанный на рис. 4. Тогда число активных элементов, участвующих в процессе пластического деформирования, пропорционально площади заштрихованного участка.

Очевидно, что при большем напряжении в процессе неупругого, пластического деформирования принимает участие большее число структурных элементов, чем при меньшем, за счет вовлечения в процесс более прочных элементов.

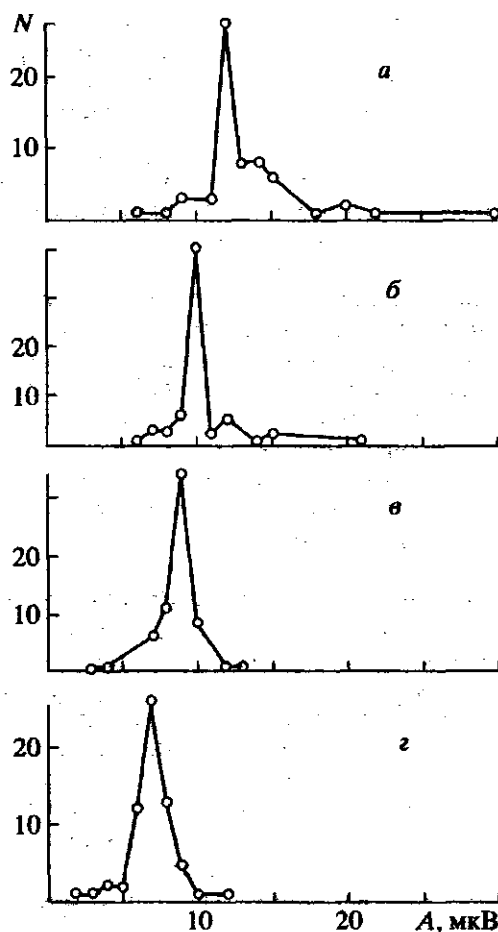


Рис. 3. Распределение количества  $N$  событий АЭ по амплитуде при одноосном сжатии гранитного образца с постоянной нагрузкой 11,8 т: а – через 20 мин от начала цикла нагружения; б – через 3 ч; в – через 6 ч; з – через 25 ч.

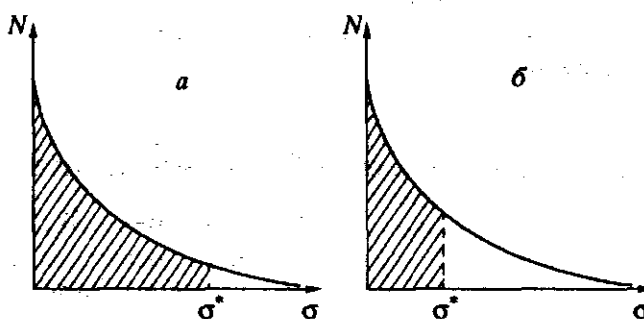


Рис. 4. Распределение по прочности структурных элементов – концентраторов напряжений. Заштрихованная область соответствует доле элементов с прочностью меньше  $\sigma^*$ , участвующих в пластическом деформировании в данный момент времени: а – при переходном процессе после пригрузки; б – в режиме крипа при постоянной нагрузке. Выбывание наиболее нагруженных элементов из числа источников АЭ при релаксации неоднородности напряжения соответствует смещению границы  $\sigma^*$  влево.

Если дифференциальное напряжение на структурных элементах уменьшается, например благодаря релаксации, то число активных элементов также уменьшается за счет исключения из процесса более прочных элементов.

В связи с этим рассмотрим различие между обычными, имеющими длительный период подготовки, и "быстрыми" землетрясениями. По-видимому, землетрясения, имеющие длительный подготовительный период, реализуются при квазистатическом напряженном состоянии, когда изменения в среде, связанные с накоплением дефектов и их укрупнением, происходят достаточно медленно, постепенно проявляясь в виде предвестников. В энергетическом балансе этому соответствуют относительно небольшое превышение скорости поступления энергии в среду вследствие тектонических процессов над скоростью диссипации энергии и, как следствие, низкий темп накопления сейсмической энергии. В альтернативном случае, связанном с быстрыми изменениями напряженного состояния, ведущая роль в подготовке землетрясения принадлежит концентрации напряжений на структурных неоднородностях, возникающей вследствие локального нарушения баланса скоростей накачки и релаксации напряжений в земной коре. Необходимая для этого большая скорость "накачки" энергии может обеспечиваться центробежными силами, возникающими при вариациях угловой скорости вращения Земли [3, 7].

Полученные результаты могут быть полезны и для понимания причин временных вариаций наклона графика повторяемости, представляющего собой энергетический спектр сейсмических событий в двойных логарифмических координатах. Вероятно, эти вариации также обусловлены относительно быстрыми изменениями напряженного состояния земной коры, определяющими сейсмичность конкретной территории в данный отрезок времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольхин А.М., Брагин В.Д., Zubovich A.B. и др. Проявление геодинамических процессов в географических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.
2. Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А. и др. О выявлении трех компонент в сейсмической активности Земли // Физика Земли. 1994. № 10. С. 23–32.
3. Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А. и др. О корреляции графиков угловой скорости вращения Земли и модуля ее временной производной с частотой землетрясений в зависимости от их магнитуды // Физика Земли. 1994. № 10. С. 33–38.
4. Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли // Докл. РАН. Геофизика. 1994. Т. 338. № 4. С. 525–527.
5. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
6. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.
7. Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.М. Напряженное состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. 1987. № 1. С. 3–24.
8. Манжиков Б.Ц., Мансуров В.А., Куксенко В.С., Савельев В.Н. Связь между накоплением микротрещин и макродеформацией при одноосном сжатии горных пород // Физика и механика разрушения горных пород. Фрунзе: Илим, 1983. С. 77–84.
9. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
10. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Физические процессы подготовки и развития очага землетрясения // Всесоюз. симпозиум по сейсмическому режиму. Кишинев, 1971.
11. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 513 с.

## Amplitude Spectra of Acoustic Emission Arising from Stepwise Loading of Rocks

Yu. A. Trapeznikov, B. Ts. Manzhikov, L. M. Bogomolov

Research Station, Institute of High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Bishkek, 720049, Kirgizstan

The method of acoustic emission (AE) was used to study defect generation during stepwise loading of granite specimens. The AE amplitude spectrum was found to shift to the left toward smaller values when a specimen was kept under a constant load following a rapid increment of the load. It is supposed that the amplitude of acoustic pulses is proportional to the length of the structural defect being generated. The observed effect can be explained by overstresses being released at structural heterogeneities that had been caused by the increment. These results provide indirect evidence of the hypothesis stating that the precursory period of an earthquake can be very short when the medium is under rapidly varying stresses compared with the estimates based on the traditional concept of a quasistationary distribution of crustal stress.