

СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Б. Ц. Манжиков, Л. М. Богомолов, П. В. Ильичев, В. Н. Сычев

Научная станция Объединенного института высоких температур РАН, 720049, Бишкек, Киргизия

Исследовалась тонкая структура импульсов акустической и электромагнитной эмиссии, регистрируемой при одноосном сжатии образцов горных пород на стадии их дилатансионного деформирования. Выявлены четыре типа сигналов, отличающихся по частоте и длительности. Предполагается, что сигналам первого типа соответствуют образования трещин отрыва, второго — трещин сдвига, низкочастотным сигналам третьего типа — колебания конструктивных элементов нагружающего устройства. Четвертый тип сигналов отнесен к импульсной электромагнитной эмиссии, обусловленной выходом заряженных дислокаций на границу зерен в минералах с ионным типом связей, входящих в состав гранита.

Акустическая эмиссия, электромагнитное излучение, горная порода, постоянная нагрузка, трещина, отрыв, сдвиг, дислокация, заряд, ионная связь, переходное излучение.

STRUCTURE OF ACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC EMISSION SIGNALS ON AXIAL COMPRESSION OF ROCK SPECIMENS

B. Ts. Manzhikov, L. M. Bogomolov, P. V. Il'ichev, and V. N. Sychev

Study was given to a thin structure of pulses of acoustic and electromagnetic emission recorded on axial compression of specimens of rocks at the stage of their dilatation deformation. Four types of signals have been distinguished in frequency and duration. It is supposed that the type I signals account for the formation of detachment fractures; the type II signals, of shear fractures; and the low-frequency type III signals correspond to vibrations of constructive elements of the loading device. The type IV signals are referred to as pulse electromagnetic emission caused by charged dislocations coming to a grain boundary in minerals with ionic bonds, components of granite.

Acoustic emission, electromagnetic radiation, rock, constant load, fracture, detachment, shear, dislocation, charge, ionic bond, transient radiation

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных работ, посвященных акустической эмиссии (АЭ) и электромагнитному излучению (ЭМИ), сопровождающих деформирование и разрушение материалов и конструкций, выделяются две группы исследований. Первая объединяет большинство работ статистического характера по исследованию потоков АЭ и ЭМИ событий. Вторая, сравнительно немногочисленная — структурное направление исследований, основная цель которого состоит в изучении тонкой структуры АЭ и ЭМ излучения и его связи с параметрами источника (дислокационными процессами, фазовыми превращениями и трещинообразованием) [1, 2].

Исследование структуры акустической и электромагнитной эмиссии, основанное на изучении формы сигналов, имеет большое значение прежде всего для выявления физической природы источников излучения. Структурные исследования также позволяют получить важную информацию и о кинетике процесса дефектообразования в нагруженных телах. Например, появление в спектре акустических сигналов второго максимума на более низкой частоте, чем основной, означает переход трещинообразования от стадии диффузного накопления дефектов к их укрупнению и кластеризации [3]. Опыт показывает, что совместный анализ статистических и структурных данных АЭ позволяет получить более достоверные результаты и облегчает их интерпретацию. Особенно это относится к практическим приложениям метода АЭ для неразрушающего контроля материалов и конструкций при сочетании разнородных материалов и сложного напряженно-деформируемого состояния.

Большинство работ второй группы посвящены исследованию искусственных конструкционных материалов, таких как металлы, бетон, полимеры, композиты. Структура АЭ и ЭМИ горных пород исследована в меньшей степени [4—9].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Данная работа была выполнена с целью выявления основных типов и структуры АЭ и ЭМИ при одноосном сжатии горных пород постоянной нагрузкой. Нагрузению подвергались гранитные образцы правильной цилиндрической формы (высота 60 мм, диаметр 30 мм) из месторождения Каинда Киргизии; испытаны четыре однотипных образца. Постоянство нагрузки в течение длительного времени обеспечивалось с помощью пружинной реологической приставки к стандартному

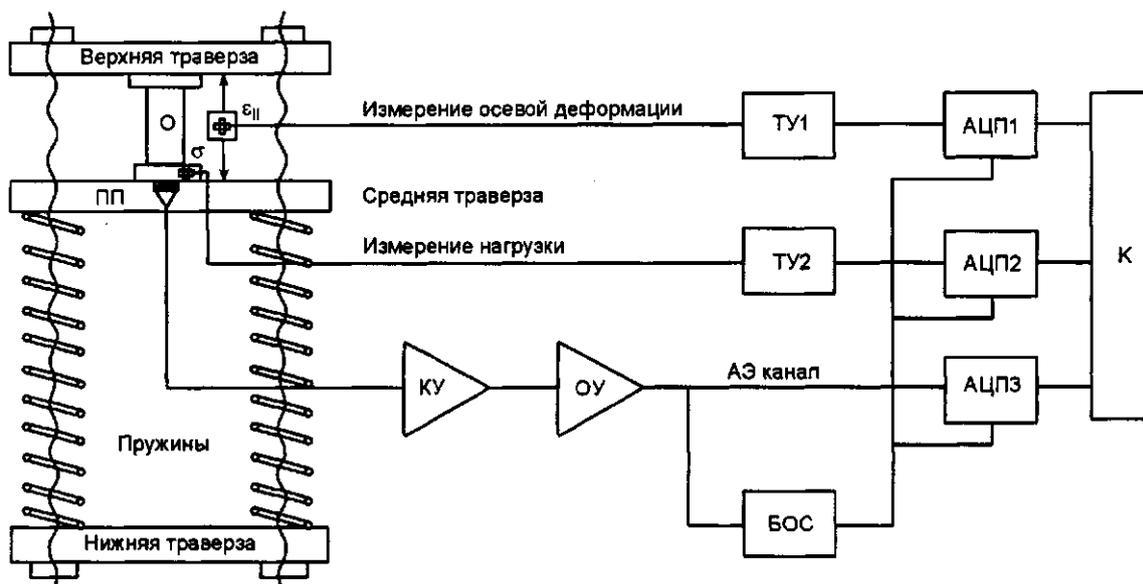


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

О — образец, ПП — приемный преобразователь АЭ, σ — динамометр, ϵ_{11} — тензометр осевой деформации, КУ — кабельный усилитель, ОУ — основной усилитель, БОС — блок аналоговой обработки сигнала, ТУ1, ТУ2 — тензометрические усилители, АЦП1—АЦП3 — аналого-цифровые преобразователи, К — компьютер.

гидравлическому прессу, который использовался для ступенчатого изменения нагрузки в ходе эксперимента. Продолжительность выдержки при каждом значении нагрузки определялась временем, необходимым для регистрации достаточного числа эмиссионных событий, и составляла в среднем 4 ч. Поскольку при малых нагрузках активность АЭ была низкой, образец нагружался сразу до 4 т, а затем ступенчато через 1 т. Максимальная нагрузка на образце, при которой произошло его разрушение, составила 11 т. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Регистрирующий тракт АЭ включал: широкополосный (0,01—2 МГц) демпфированный пьезо-преобразователь, кабельный усилитель, основной усилитель, АЦП, схему запуска, компьютер. Датчик АЭ, работающий в режиме акселерометра, установлен соосно образцу на средней подвижной траверзе реологической приставки. Преимуществами такого расположения датчика АЭ по сравнению с креплением к боковой поверхности образца является: 1) возможность испытания серии однотипных образцов с единовременным контролем АЭ; 2) хорошая экранировка датчика от электромагнитных помех. АЧХ приемного тракта близка к линейной в диапазоне 0,01—1 МГц. Общий коэффициент усиления ~ 2000 . АЦП типа ФК4225 — 10-разрядный, с буферной памятью на 4096 отсчетов, время преобразования 1 мкс. Частота дискретизации во всех случаях была 1 МГц. Наличие буферной памяти позволило избежать потерь начальной фазы событий при их регистрации. Аппаратура работала в ждущем режиме; одновременно с регистрацией АЭ проводились тензометрические измерения. Трехканальная тензометрическая аппаратура позволяла регистрировать изменения нагрузки, осевой и радиальной деформации образца при образовании или подрастании структурных дефектов. На рис. 2 показан внешний вид породного образца с тензометром радиальной деформации. Тензометр для измерения радиальной деформации образца представляет собой упругий элемент в виде стального кольца с четырьмя наклеенными проволочными тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме. Тензометр крепится к образцу с помощью двух винтов, упирающихся с небольшим усилием в подпятники, наклеенные диаметрально противоположно в средней части образца. Подпятники представляют собой металлические пластинки с небольшими углублениями для фиксации винтов. Тензометр для измерения осевой деформации образца имеет упругие элементы в виде двух балочек равного сопротивления, на которые наклеены четыре тензорезистора, соединенные по мостовой схеме. Измерительная база осевого тензометра равна высоте образца. Упругим элементом динамометра служит верхняя траверза установки, представляющая собой массивную стальную мембрану, на которой наклеены четыре тензорезистора, соединенные по мостовой схеме. Тарировка тензометрических каналов производилась с помощью микрометра и образцового динамометра. Разрешающая способность тензометрических каналов к смещению при изменении длины измерительной базы составляла около 2 мкм. Это соответствовало изменению нагрузки на $\sim 2Н$.

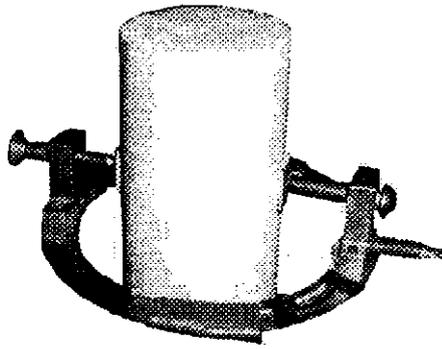


Рис. 2. Внешний вид породного образца с тензOMETром радиальной деформации (на схеме рис. 1 не показан).

обработки сигнала БОС-3 [10]. Регистрация и накопление экспериментальных данных производились с помощью компьютера.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рассматриваемом эксперименте были зарегистрированы 352 события. Характерные примеры акселерограмм приведены на рис. 3, а на рис. 4 показаны частотные спектры этих сигналов. Сигналы АЭ по их спектрам и корреляции с тензометрическими сигналами, которые регистрировались синхронно, можно разделить на 4 типа (см. рис. 3 и 4). Сигналы первых трех типов (см. рис. 3, *a—в*, 4, *a—в*) не имеют корреляции с тензометрическими сигналами. В этом состоит их отличие от сигналов четвертого, особого типа (см. рис. 3, *г*, 4, *г*). Высокую степень корреляции (свыше 90 %) акселерограмм АЭ этого типа и тензометрических сигналов иллюстрирует рис. 5.

Доля высокочастотных АЭ от общего числа акселерограмм составляет 76 %, среднечастотных — 7 %, низкочастотных — 3 %, а сигналов четвертого типа — 13 %. На четырех акселерограммах (1 %) зафиксированы парные импульсы АЭ (по два события), один из которых первого, а другой — второго типов. Поскольку АЭ высокочастотного типа составляют большинство, с ними естественно сопоставлять „события“, подсчет числа которых обычно ведется при статистических исследованиях АЭ. Отметим, что спектр высокочастотных АЭ (см. рис. 4, *a*) содержит частоты более высокие, чем частота собственных колебаний образца, $\omega \sim 2 \cdot 10^5$ 1/с. Амплитуды сигналов первого и второго типов варьировались в широких пределах, третьего и четвертого — имели небольшую амплитуду. Закономерности в следовании сигналов первых трех типов не выявлено. Большинство сигналов четвертого типа зарегистрированы на фоне относительного затишья, когда активность АЭ была ниже среднего уровня для

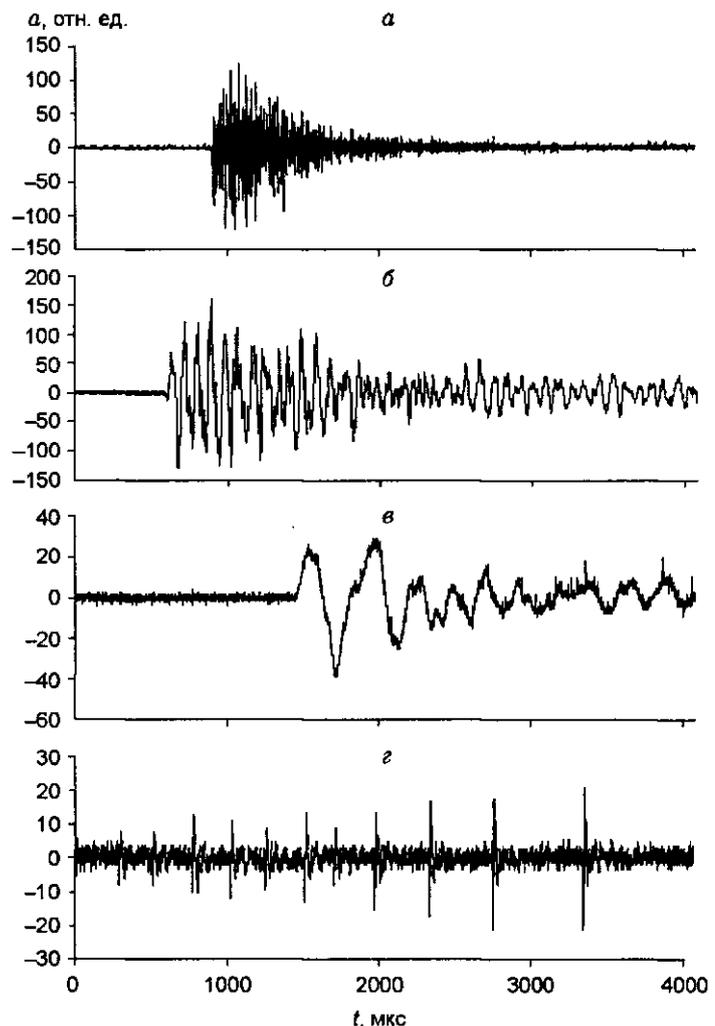


Рис. 3. Разновидности зарегистрированных сигналов:

a — АЭ высокочастотный, *б* — АЭ среднечастотный, *в* — АЭ низкочастотный, *г* — электромагнитные импульсы. Цифры на осях ординат являются показаниями АЦП типа ФК4225, равными величинам напряжений на выходе измерительного канала АЭ.

Рис. 4. Спектральная плотность амплитуды сигналов:

a — АЭ высокочастотного; *b* — АЭ среднечастотного; *в* — АЭ низкочастотного; *г* — электромагнитного импульса.

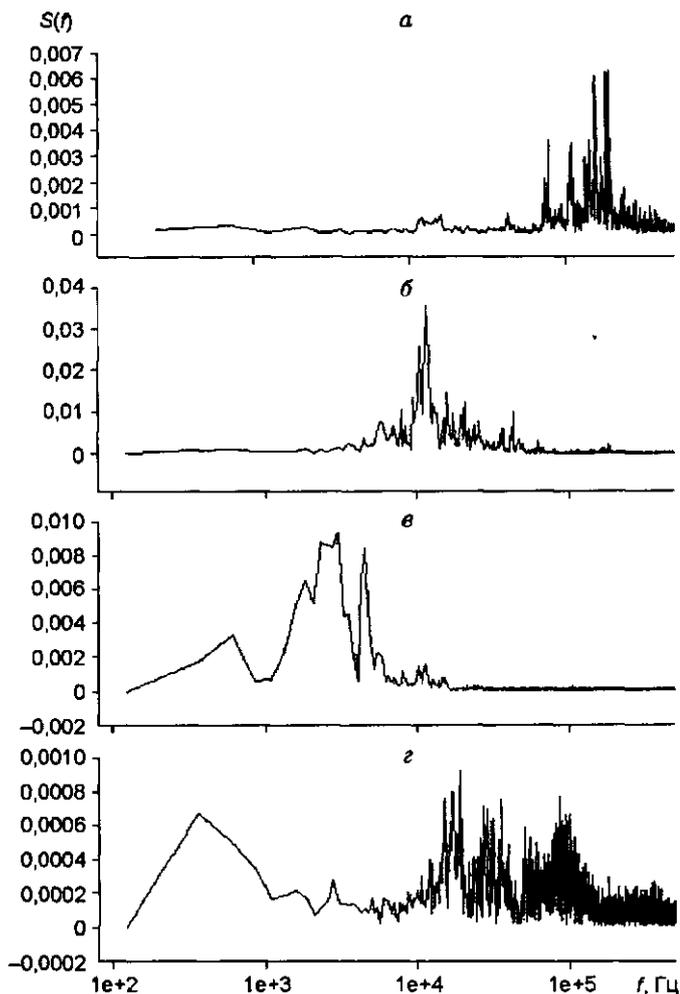
данной нагрузки. Спектры сигналов первого и четвертого типов имели хорошую воспроизводимость, а у сигналов второго и третьего типов она была несколько хуже.

Для сигналов четвертого типа время прихода импульсов и длительность фронтов нарастания сигналов (фронтов первых вступлений) оказываются практически одинаковыми по АЭ и тензOMETрическим каналам (см. рис. 5). В отсутствие взаимного влияния каналов наиболее вероятной причиной такой синхронности прихода сигналов по разным каналам регистрации является их электромагнитная природа, а источниками могли служить излучение из образца или помеха. Ниже рассмотрим обе возможности. Для проверки предположения об электромагнитной природе сигналов четвертого типа вход канала радиальной деформации был переключен на другой датчик такой же конструкции, как и на рис. 2, расположенный неподалеку от образца, но не имеющий механического контакта с ним. Но и после этого по данному каналу регистрировались сигналы, аналогичные показанным на рис. 5, г. Выключение электропитания тензOMETрических каналов не приводило к исчезновению сигналов четвертого типа на канале измерения АЭ.

Если предположить, что имеем дело с наводкой, то форма сигнала не должна зависеть от материала образца. Однако в контрольном эксперименте при нагружении стального образца с такими же размерами, как у гранитного, сигналов первого, второго и четвертого типов не выявлено; были зарегистрированы лишь несколько сигналов третьего типа. Это косвенно подтверждает, что сигналы, проявляющиеся на всех измерительных каналах как сигнал типа 4, испускаются образцом. Отметим, что показанный на рис. 2 тензOMETрический датчик мог играть роль емкостного датчика ЭМИ (наподобие емкостного датчика из проводящих пластин, описанного в [9]), поэтому регистрация сигналов ЭМИ из нагруженного образца неудивительна. Разумеется, косвенные проверки не могут заменить исследование характеристик ЭМИ специализированными датчиками. Авторы надеются выполнить эту работу в дальнейшем.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие в общем потоке нескольких типов сигналов является одним из проявлений стохастической природы эмиссионных процессов, характерных для деформирования и разрушения таких резко гетерогенных материалов, как горные породы. Результирующий поток событий содержит вклад от различных источников, которые могут возникать как в различных минералах, слагающих породу, так и отличаться по своему типу, соответствующему трещинам отрыва или сдвига, межзеренному скольжению и дислокационным процессам. В силу этого регистрируется неодинаковое число сигналов различного типа, с разным временем ожидания. Это можно объяснить различием в величинах энергий активации образования дефектов. В частности, для сигналов первого типа она на $\sim 0,15$ эВ меньше, чем для сигналов второго типа, которые регистрировались в 10 раз реже, чем первые (оценка получена из основного уравнения кинетической концепции прочности). Очевидно, что для идентификации образующихся дефектов по форме сигналов АЭ необходимы детальные исследования. Имеющиеся данные позволяют пока обсуждать лишь некоторые моменты во взаимосвязи структуры эмиссионных сигналов и природы их источников.



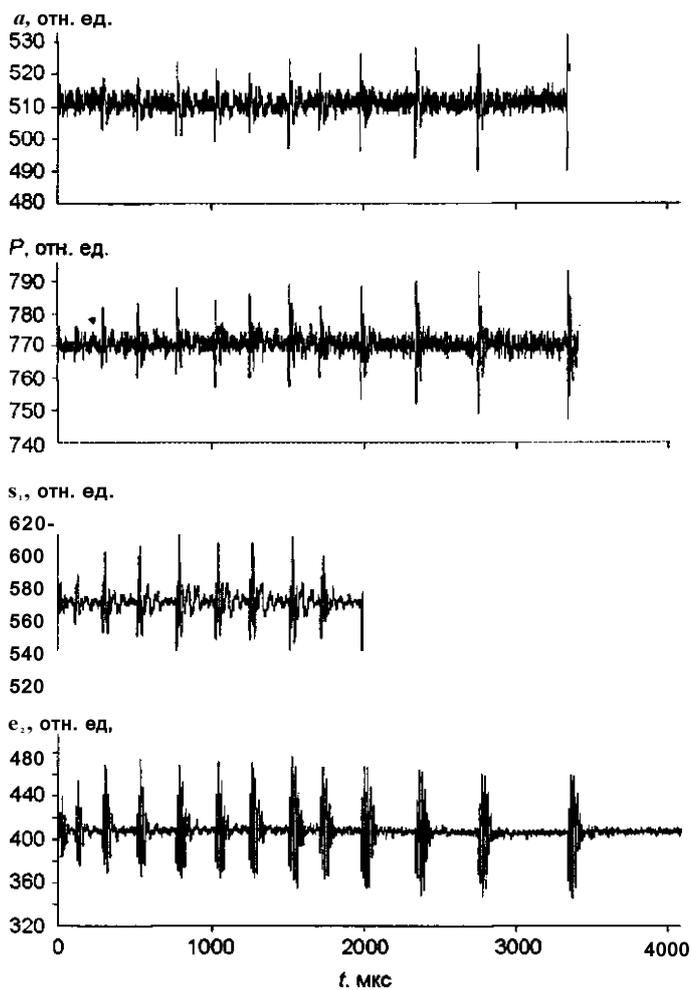


Рис. 5. Сигналы изменения нагрузки (P), продольной ($\epsilon^{\wedge} \text{ И}$ радиальной (ϵ .) деформаций, зарегистрированные синхронно с сигналом АЭ четвертого типа.

Цифры на осях ординат являются показаниями АЦП, равными напряжениям на выходах измерительных каналов АЭ, нагрузки P , деформаций ϵ и ϵ_z .

Оценим размеры трещин, образование или подрастание которых сопровождается АЭ и ЭМИ. Согласно имеющимся представлениям, продолжительность этих процессов совпадает с длительностью фронта при первом вступлении соответствующих сигналов [5, 6]. Средняя скорость роста докритической трещины составляет 1–5 % скорости продольных волн [3, 11], что для гранита порядка 100 м/с. Длительность фронта первого вступления P -волн для зарегистрированных сигналов, первого типа составляет ~5 мкс, для второго — 35 мкс, для третьего — 100 мкс. Нетрудно подсчитать, что сигналам первого типа соответствуют размеры источников 0,1–0,5 мм, сигналам второго типа — 1–3 мм. Полученные оценки согласуются с данными из работы [11], где источник АЭ рассматривался как движущаяся дислокация, а также с результатами, изложенными в [3, 5]. Возникновение источников с более крупными размерами можно интерпретировать на основе двухстадийной модели разрушения, используя термодинамический подход к кинетике трещинообразования [12]. Со-

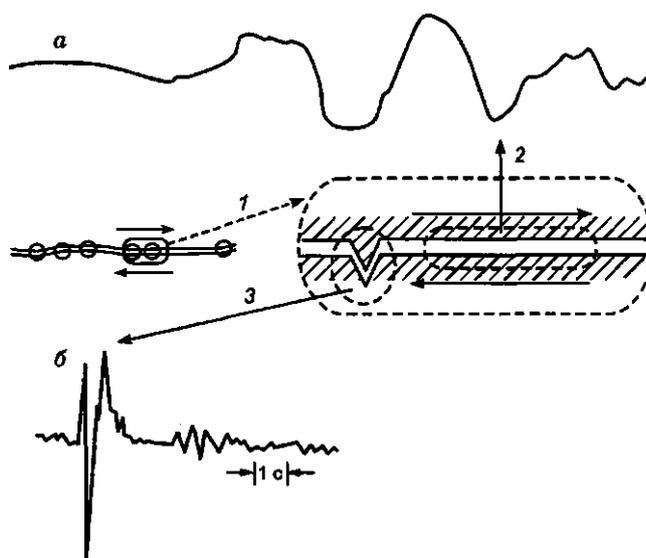
гласно [12], на начальной стадии разрушения по мере приближения концентрационного параметра микротрещин к критическому значению становится все более вероятным образование ассоциаций микротрещин. При образовании новых или слиянии имеющихся трещин возбуждаемые волны взаимодействуют со всеми трещинами в ассоциации. В результате формируется сигнал АЭ с замедленным фронтом нарастания и меньшими характерными частотами, которые соответствуют источнику с мезоскопическими размерами. Достаточно большая продолжительность сеанса наблюдений позволила регистрировать такие сигналы.

Расчеты показали, что низкочастотные сигналы третьего типа, имеющие максимум спектральной плотности на частоте ~3 кГц, совпадают по частоте с собственными колебаниями конструктивных элементов реологической приставки. Альтернативное объяснение природы средне- и низкочастотных сигналов может быть основано на идее, изложенной в монографии Н. В. Шебалина [13]. В ней приводятся примеры записей сигналов разных типов от компактно расположенных источников, представляющих собой афтершоки Кумдагского землетрясения 1983 г. (рис. 6). Возникновение подобных сигналов объяснялось возможностью „быстрого“ или „медленного“ проскальзывания по разлому. Не исключено, что аналогичный эффект может иметь место и в образце при межзеренных подвижках, которым соответствуют сигналы второго или третьего типов.

Обсудим соответствие параметров сигналов типа 4 с результатами исследования ЭМИ образцов горных пород другими авторами. Согласно [9], максимум спектральной плотности сигналов ЭМИ дают гармоники с частотами порядка 1 кГц. В процессе деформирования положение спектрального максимума сдвигается, следуя S-образной поверхности процесса разрушения. В частности, ближе к концу первой стадии разрушения происходит сдвиг максимума в сторону более высоких частот и малых амплитуд. Спектр сигналов четвертого типа (см. рис. 4,г) имеет два максимума, один из которых (с частотой ниже 1 кГц) обусловлен характерной длительностью промежутков между импульсами, а другой, лежащий в диапазоне частот 15–25 кГц, — формой самих импульсов. Нужно отметить, что в эксперименте регистрировались не только групповые ЭМИ (см. рис. 3,г), но и

Рис. 6. Примеры сейсмограмм афтершоков Кумдагского землетрясения, 1983 г. (из [13], с. 488):

a — „мягкий” афтершок 18.04.83, *M*-5,3; *б* — „жесткий” афтершок 22.03.83, *M*-4,4; 1 — магистральная трещина и эпицентры афтершоков; 2 — медленное проскальзывание; 3 — срыв зацепа. Вертикальные линии между стрелками — масштаб времени 1 с.



одиночные импульсы. По форме одиночные импульсы практически не отличались от групповых. С учетом всего этого становятся понятными те обстоятельства, при которых эффекты ЭМИ проявились в экспериментах, задуманных изначально с другой целью. При емкостной связи с измерительным трактом легче улавливаются сигналы ЭМИ с повышенной частотой, а условия их появления сложились как раз тогда, когда регистрировалось сравнительно мало обычных АЭ сигналов.

Возникновение ЭМИ чаще всего объясняют разделением зарядов при трещинообразовании [9]. В нашем случае ЭМИ не сопровождалось импульсами АЭ типа 1, характерными для образования микротрещин. В этих условиях представляется правдоподобным связывать ЭМИ с дислокационными процессами. Наблюдаемое смещение спектрального максимума в сторону меньших амплитуд и больших частот означает переход к меньшей энергетике излучаемых сигналов, что соответствует ходу 5-поверхности процесса разрушения. При замедлении трещинообразования на данном участке характеристической 5-поверхности значимыми могут оказаться структурные дефекты более низкого, чем микротрещины, уровня иерархии, т. е. дислокации.

В состав исследуемых гранитных образцов входят минералы с ионным типом связи. Имеется экспериментальное подтверждение дислокационного переноса зарядов в ионных диэлектриках, в частности, фельдшпатитах [7, 8]. Направление скольжения дислокаций в ионных структурах совпадает с направлением, вдоль которого располагаются заряды одного знака, и заряд дислокации может переноситься через диэлектрик при ее скольжении. Как известно, выход дислокации на границу зерна сопровождается заметным акустическим импульсом, связанным с переходным излучением (эффект Эренфеста—Иоффе). Если дислокация заряжена, то ее выход на границу зерна должен сопровождаться, кроме того, и электромагнитным излучением.

Представляется, что групповые ЭМИ обусловлены выходом на границу зерна или поверхность образца стенки заряженных дислокаций. Некоторое увеличение интервала следования между импульсами в группе, которое заметно на осциллограмме, можно объяснить локальной разгрузкой материала в месте выхода дислокаций, что замедляет движение последующих. Увеличение интервала может происходить также за счет неравномерного расположения дислокаций в плоскости скольжения.

ВЫВОДЫ

Выявлены четыре типа эмиссионных сигналов, сопровождающих дефектообразование при одноосном сжатии гранитных образцов постоянной нагрузкой. Проведенный анализ позволяет идентифицировать сигналы одного из них как импульсное электромагнитное излучение, вызванное выходом заряженных дислокаций на границу зерна в минералах с ионным типом связей.

Исследование осуществлено частично благодаря гранту № YG1-2082 Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (АФГИР).

ЛИТЕРАТУРА

1. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М., Изд-во стандартов, 1976, 272 с.
2. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику: Учебное пособие. М., Наука, 1984, 400 с.
3. Виноградов С. Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М., Наука, 1989, 177 с.
4. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.

5. Виноградов С. Д. Упругие волны, излучаемые трещиной отрыва и сдвиговой подвижкой по готовому разлому // Исследования по физике землетрясений. М., Наука, 1976, с. 67—74.
6. Фролов Д. И., Килькеев Р. Ш., Куксенко В. С., Новиков С. В. Связь между параметрами акустических сигналов и размерами разрывов сплошности при разрушении гетерогенных материалов // Механика композитных материалов, 1980, № 5, с. 907—911.
7. Шевцов Г. И., Соболев Г. А., Шевцова И. Н. Электризация полевых шпатов при их деформации и разрушении // Физика Земли, 1984, № 8, с. 97—105.
8. Шевцова И. Н. Заряжение дислокаций при деформировании кристаллов с ионным типом связи // Там же, с. 106—112.
9. Курленя М. И., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. И. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000, 232 с.
10. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике. М., Атомиздат, 1980, 216 с.
11. Москвина А. Г. Поле смещений упругих волн, создаваемых расширяющейся дислокацией // Физика Земли, 1969, № 6, с. 3—10.
12. Петров В. А. Термодинамический подход к микромеханике разрушения твердых тел // ФТТ, 1983, т. 25, вып. 10, с. 80—83.
13. Шебалин Н. В. Сильные землетрясения. М., Изд-во Академии горных наук, 1997, 542 с.

*Поступила в редакцию 28 ноября 2000 г.,
после доработки — 2 апреля 2001 г.*