

ОТКЛИКИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ СЖИМАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2006 г. А. С. Закупин, А. А. Авагимов, Л. М. Богомолов

Научная станция Российской академии наук, г. Бишкек

Поступила в редакцию 30.01.2006 г.

Исследовано влияние квазистационарных электромагнитных импульсов на образцы горных пород нагруженных одноосной сжимающей нагрузкой. Построены и проанализированы временные зависимости накопления событий и активности акустической эмиссии (АЭ) в широком диапазоне величин главного сжимающего напряжения. Проведено качественное и количественное сопоставление откликов АЭ на внешнее воздействие при различных сжимающих напряжениях. Выделен диапазон главных напряжений (заведомо меньших разрушающего уровня), в котором воздействие электроимпульсов на режим АЭ оказывается достаточно эффективным.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, отклик, энерговоздействие.

PACS: 91.60.Lj

ВВЕДЕНИЕ

Влияние электроимпульсов на деформацию и акустическую эмиссию нагруженных образцов горных пород, имитирующих геологическую среду, исследовалось в ряде работ [Соболев, 2003; Авагимов, 2003; Аладьев, 2003; Bogomolov, 2004; Sobolev, 2000]. Сопоставление их результатов свидетельствует, что отклики на воздействия физических полей, т.е. энерговоздействия (ЭВ), для которых пондеромоторные силы ничтожны по сравнению с механическим сжатием, как правило, проявлялись в диапазоне значений нагрузок, порядка 70–95% от разрушающей. В серии экспериментов, проведенных в ИС РАН, подтверждено, что этот диапазон характерен для всех применявшихся источников дополнительного воздействия [Закупин, 2003]. Однако зависимость эффекта отклика АЭ на электроимпульсы от действующей на образец сжимающей нагрузки, пока не исследована во всем диапазоне нагрузок. Это обусловлено выбором методики – в большинстве предыдущих экспериментов регулярная регистрация АЭ в сессиях с ЭВ начиналась с нагрузок, превышающих 50% от разрушающей, поскольку на меньших нагрузках большинство горных пород (материалов с высокой прочностью) имеют низкий уровень акустоэмиссионной активности. Небольшое количество экспериментальных сессий с ЭВ на нагрузках ниже 50%, не выявили откликов АЭ на внешнее воздействие. На более высоких нагрузках проведено достаточное количество измерений, чтобы говорить о статистической достоверности эффекта отклика. Недостаточное количество

данных затрудняет обобщение результатов лабораторного моделирования эффектов физических полей. Вопрос о масштабировании эффекта эмиссионного отклика, представляющий наибольший интерес с точки зрения возможности управления выделением сейсмической энергии, остается дискуссионным, по крайней мере, по мнению некоторых специалистов [Гуфельд, 2005].

Для выявления характерных особенностей влияния внешнего электрического поля на нагруженные образцы гетерогенных материалов в широком диапазоне главного сжимающего напряжения в ИС РАН проведен эксперимент на образце гранодиорита. Гранодиорит – горная порода, которая является составной частью массивов коры Северного Тянь-Шаня (Бишкекского геодинамического полигона), залегающих на глубинах от 600 м до 5 км и имеет физические характеристики, близкие к усредненным характеристикам целых массивов (по скорости распространения упругих волн, диэлектрической проницаемости, влагонасыщенности и механическим упругим модулям). При выборе также принято во внимание то, что именно на материалах этого класса (гранодиоритах и гранитах) в предыдущей серии экспериментов была отмечена хорошая воспроизводимость эффекта [Закупин, 2003].

Основная цель эксперимента – изучить особенности деформирования выбранного геоматериала и кинетику трещинообразования (по данным АЭ) в условиях квазистатического нагружения (до разрушения) в присутствии импульсного электрического поля.



Рис. 1. Диаграмма нагружения образца.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментов использовалась пружинная реологическая установка для длительных испытаний (УДИ) с максимальным усилием сжатия 100 тонн [Ставрогин, 1985]. Эксперименты проведены в условиях постоянной заданной нагрузки, имеющей разный уровень относительно предела прочности. Применение пружинного пресса обеспечивало бесшумный (безвибрационный) режим нагружения. Начиная с известной работы [Садовский, 1981], подобная методика неоднократно демонстрировала свою эффективность для изучения влияния динамических факторов, в частности вибровоздействий, на деформирование геоматериалов [Аладьев, 2003; Богомоллов, 2001; Трапезников, 1997]. Для акустоэмиссионных измерений использовался широкополосный аппаратный комплекс (частотный диапазон от 80 кГц до 5 МГц). В эксперименте также контролировалась нагрузка и продольная компонента деформации. Тензометрические каналы были настроены на измерения в килогерцовом диапазоне частот для определения вариаций компонент деформации при включении источников электромагнитных импульсов. В то же время их чувствительность пришлось ограничить, чтобы исключить помехи от этих же импульсов. Более подробная информация о нагружающем устройстве и системы регистрации и сбора данных изложена в [Закупин, 2003]. В соответствии с целью работы был испытан образец гранодиорита правильной цилиндрической формы (высота $h = 132$ мм, диаметр $d = 53$ мм). Эксперимент проводился при комнатной температуре и влажности. В ходе эксперимента значение главного сжимающего напряжения изменялось дискретно с равными значениями пригрузки. В каждой экспериментальной сессии, привязанной к одному значению сжимающего напряжения, проводилось электровоздействие – на электроды, закрепленные на свободных поверхностях образца, подавалось напряжение от генератора прямоугольных импульсов Г5-54. Параметры импульсов во всех сессиях

были одни и те же: амплитуда напряжения 35 В; длительность 20 мкс; частота следования 2.2 кГц; длительность переднего и заднего фронтов – не более 0.15 мкс. При этом обеспечивалась небольшая скважность импульсов. К примеру, для частоты 2.2 кГц, на которой были проведены сеансы ЭВ, периодичность была примерно 450 мкс. Важным свойством генератора Г5-54 является высокая точность повторения формы импульсов, включая воспроизводимость крутого фронта нарастания, независимо от изменения импеданса нагрузки. Это определяет удобство его использования в экспериментах по моделированию энерговоздействий, в особенности для исследования откликов акустической эмиссии, следующих с задержкой после начала ЭВ. Выбор генератора Г5-54 в качестве источника квазипериодических электроимпульсов обусловлен также следующими соображениями. Лабораторный эксперимент источника электроимпульсов подобной формы отождествлялся с натурными экспериментами, которые фактически состоялись в период использования геофизических МГД-генераторов на Гармском и Бишкекском полигонах [Тарасов, 1997; 2001].

На рис. 1 приведена диаграмма нагружения образца, на которой стрелками указано 12 экспериментальных сессий. Длительность каждой сессии 4 часа. Каждая экспериментальная сессия состояла из следующих четырех интервалов длительностью по часу: время ожидания после пригрузки, регистрация без ЭВ, воздействие электроимпульсами, регистрация без ЭВ.

Анализ полученных данных проводился на основе выделения откликов АЭ, проявляющихся в изменении акустоэмиссионного режима. Для этого проводилась регуляризация временных рядов накопления событий АЭ по выборке из 9 последовательных событий. Активность АЭ вычислялась путем обработки выборки скользящим окном с последующим усреднением. В результате были получены временные зависимости активности АЭ.

На рис. 2 показан типичный ход активности АЭ нагруженного образца гранита после прироста сжимающего напряжения (в отсутствие прочих возмущений). На графике отчетливо выделяются два участка: первый, круто спадающий, как раз связан с переходными процессами после пригрузки, а второй характеризуется сравнительно медленным уменьшением усредненной активности, т.е. плавным трендом. Отметим, что для большинства испытанных горных пород и композитных материалов время резкого спада АЭ, т.е. длительность релаксации (переходных процессов), не превышало 30–60 минут. После завершения переходных процессов, на втором участке графика активности кратковременные вариации

можно рассматривать относительно среднего (фонового) уровня.

Для интерпретации хода активности на начальном временном интервале целесообразно провести аналогию с сейсмичностью. Релаксационный процесс высвобождения энергии, полученной образцом при пригрузке, и проявляющийся в виде мощного потока АЭ является естественным аналогом с известной в сейсмологии афтершоковой активности, описываемой законом Омори. На аналогию закона спада возбужденной акустической эмиссии (упругим импульсом) и упомянутого закона Омори обращено внимание в монографии [Соболев, 2003]. В обоих случаях эти процессы носят затухающий характер. Попытка аппроксимации временных зависимостей АЭ спадающей степенной зависимостью подтвердила, что ход графиков на начальных интервалах длиной 3–4 тысячи соответствует закону Омори с удовлетворительной точностью. Если при анализе кривых активности устранять из рассмотрения первый час наблюдения, то для усредненной активности временная зависимость может быть сведена к линейному тренду или вообще к квазистационарному уровню. С учетом этого в экспериментах, нацеленных на исследование эффектов дополнительных внешних возмущений, измерительные сессии начинались спустя час после пригрузки. Для анализа влияния электроимпульсов наряду с полученными зависимостями активности использовались также кривые накопления. Для наглядности из временного ряда накопления числа событий вычитался линейный тренд, что стало возможным благодаря вышеуказанному выбору времени модельных ЭВ и периодов регистрации АЭ. Применение нескольких способов анализа данных применительно к внешнему воздействию оправдано важно ввиду большой разницы активности АЭ в зависимости от уровня главного сжимающего напряжения (от 100 событий при 20% от разрушения до 10000 при 90%). Так из-за низкой активности на малых нагрузках при анализе результатов предпочтительнее рассматривать графики накопления событий, а не сглаженные кривые активности АЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего было проведено 12 экспериментальных сессий. Данные прошлых экспериментов показывали, что для гранодиорита обычной комнатной влажности отклики на воздействие электроимпульсов наблюдались на нагрузках выше 75% от разрушающей. Это было подтверждено и в данном эксперименте – на нагрузках до 65% от разрушающей откликов на ЭВ не было обнаружено. Характерные графики для этого диапазона напряжений одноосного сжатия приведены на рис. 3

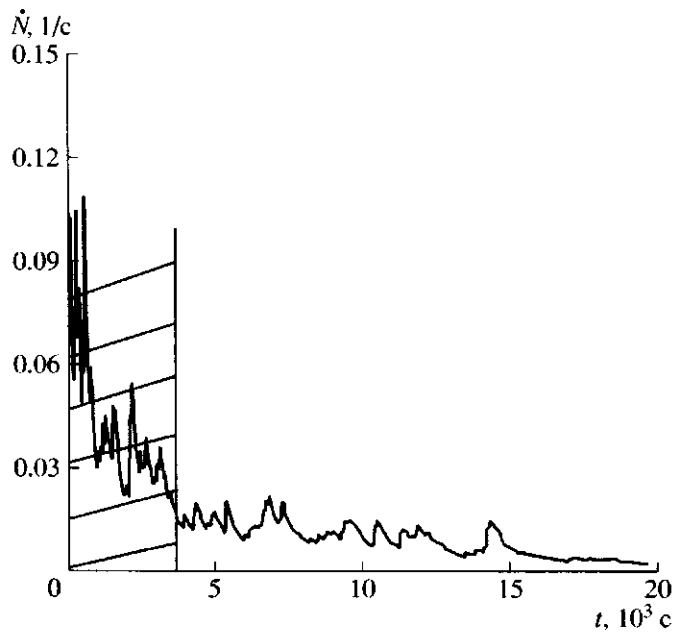


Рис. 2. Типичная временная зависимость активности АЭ. Штрихован участок, соответствующий релаксации после пригрузки (переходным процессам).

(на примере кривых, полученных в сессии при нагрузке 8 т).

Как видно из графиков, изменений в режиме АЭ, однозначно указывающих на наличие отклика на ЭВ не наблюдается. Тем не менее, и для таких нагрузок на графиках можно усмотреть вариации, которые потенциально связаны со слабыми проявлениями (т.е. “следами”) внешнего влияния. Так, например, по графикам (рис. 3а, 3б) можно различить небольшую активацию АЭ. Однако прирост скорости накопления имеет место с большой задержкой (3000 с) относительно начала воздействия и отождествлять его с эффектом электромагнитных импульсов преждевременно. Действительно, специальный методический эксперимент, требующий значительного времени, проведен лишь на одном образце, а методика сепарации откликов среди спонтанных возмущений активности АЭ была ранее отлажена для диапазона нагрузок, превышающего 60% от разрушения. В тех случаях уровень активности АЭ был выше, что позволяло собрать и оценить статистику данных по спонтанным флуктуациям и откликам на ЭВ.

Первый несомненный отклик активности АЭ на воздействие электроимпульсов отмечен на нагрузке 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 (нагрузка 32 т, 73% от разрушения) ход графика активности АЭ в сессии с электроимпульсами также может рас-

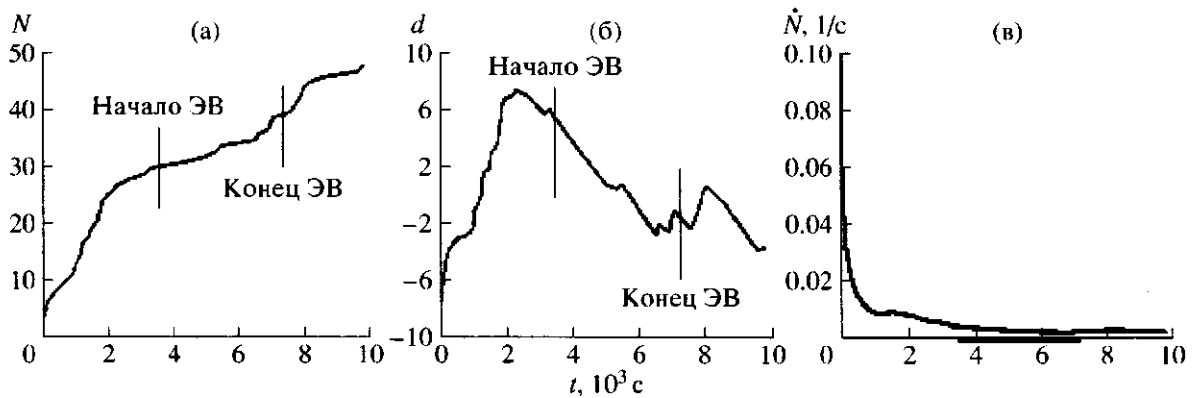


Рис. 3. Временные зависимости: (а) – числа накопленных событий АЭ; (б) – число событий за вычетом линейного тренда; (в) – активности АЭ (нагрузка 8 т, 18% от разрушения).

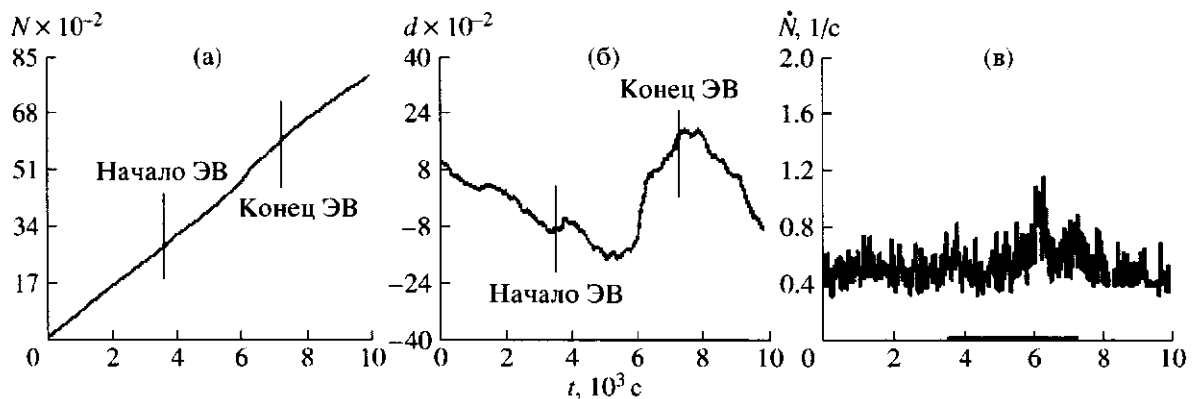


Рис. 4. Временные зависимости: (а) – числа накопленных событий АЭ; (б) – число событий за вычетом линейного тренда; (в) – активность АЭ (нагрузка 38 т, 86% от разрушения).

смагиваться в качестве кандидата на наличие отклика. В этой сессии момент включения источника наложился на кратковременный спонтанный прирост активности (флуктуацию, превышающую среднее квадратичное отклонение), а “фоновый” уровень активности до ЭВ не выделяется. Это вынуждает интерпретировать ход графиков активности и числа накопленных событий на данной нагрузке отдельно от остальных случаев, когда наличие или отсутствие откликов определялось относительно усредненного значения, которое экстраполируется на период ЭВ. На двух последующих ступенях нагружения (вплоть до 82% от разрушающей нагрузки) ситуация с изменениями режима АЭ после воздействия оказалась аналогичной случаю рис. 3: зрительно следы эффекта отмечены, но они незначительны и математическая обработка не может подтвердить их статистическую достоверность.

Четкий отклик режима акустической эмиссии был отмечен на трех значениях главного сжимающего напряжения (86%, 91%, 95% от разрушающей нагрузки). Кривые накопления и активности для этих нагрузок показаны на рис. 4 – рис. 6.

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, несмотря на продолжающееся воздействие. Согласно [Закупин, 2003] отклики с таким временным профилем классифицируются как отклики первого типа. В предыдущих работах такие отклики наблюдались в довольно широком диапазоне нагрузок 70–90% от разрушения. Отметим, что для вибровоздействий характерны отклики АЭ второго типа, имеющие платоподобный профиль (“ступенька”), который спадает уже после завершения ЭВ [Богомолов, 2001].

С увеличением напряжения материал оказывается более восприимчивым к внешнему воздействию. Об этом свидетельствует повышение амплитуды (степени контрастности) откликов, а также следующее наблюдение, соответствующее нагрузке 42 т (95% от разрушения), максимальной для излагаемой серии экспериментов. На этой нагрузке время воздействия еще раз (как и при 32 тоннах) наложилось на спонтанную активацию.

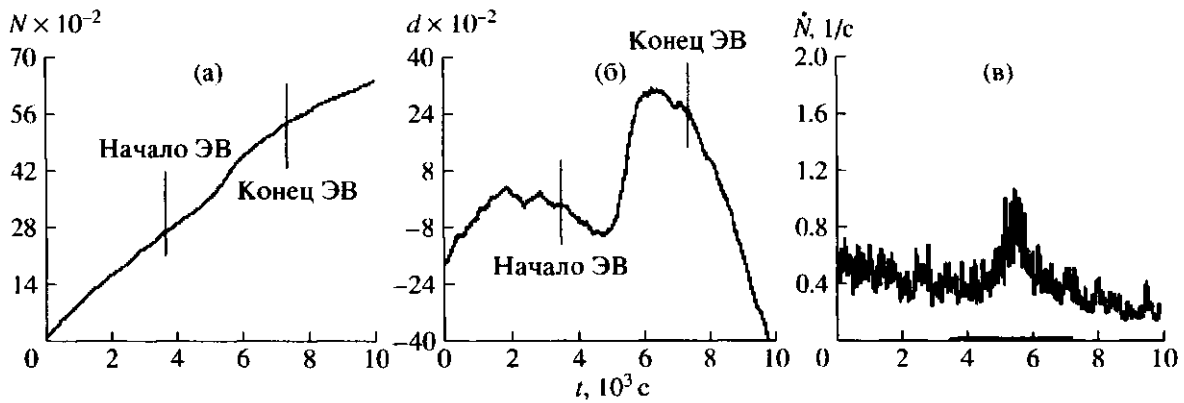


Рис. 5. Временные зависимости: (а) – числа накопленных событий АЭ; (б) – число событий за вычетом линейного тренда; (в) – активность АЭ (нагрузка 40 т, 91% от разрушения).

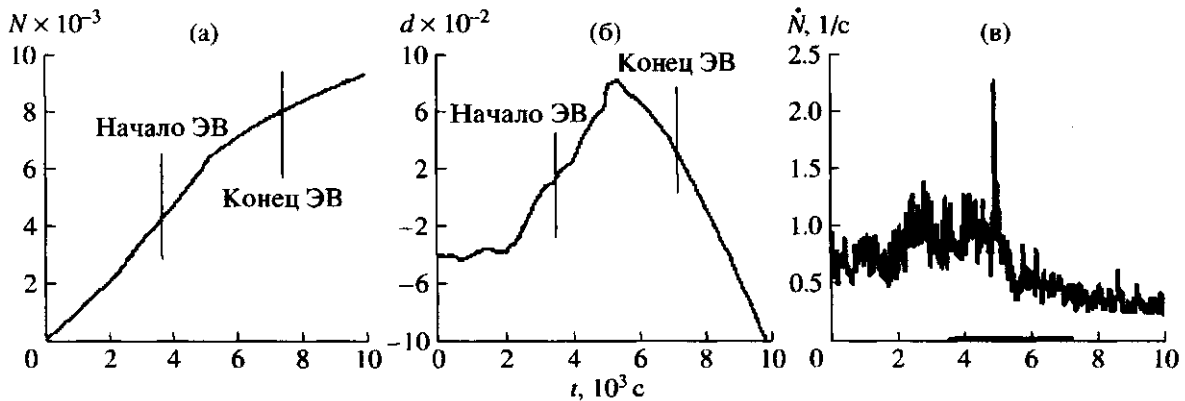


Рис. 6. Временные зависимости: (а) – числа накопленных событий АЭ; (б) – число событий за вычетом линейного тренда; (в) – активность АЭ (нагрузка 42 т, 95% от разрушения).

цию АЭ. Всплеск активности под влиянием ЭВ заметно превзошел по величине спонтанный прирост, хотя и был непродолжительным (чего не было при 32-тонной нагрузке). Кратковременность отклика и последующее резкое падение активности АЭ (практически до нуля) после окончания воздействия являются комбинированным эффектом естественной и инициированной АЭ, что способствовало частичной разрядке неоднородности напряжения в локальной области очага.

К сожалению, в проведенном эксперименте измерительная система не позволила определять координаты источников АЭ с достаточной точностью. Можно лишь предполагать, что в данном случае имел место переход [Журков, 1977] от первой (диффузной) ко второй (очаговой) стадии разрушения, а приток энергии от внешнего электрического поля внес вклад в кинетику этого процесса. По временным зависимостям, представленным на рис. 4 – рис. 6, рассчитывались параметры потока событий АЭ, характеризующие акустоэмиссионные отклики: средняя активность до и после воздействия, время задержки активации, крутизна

фронта нарастания, средняя и максимальная амплитуды отклика, время нахождения материала в активированном состоянии. В таблице приведены значения этих параметров для откликов, полученных на трех “соседних” значениях сжимающего напряжения, соответствующих графикам на рис. 4 – рис. 6.

Таблица

Главное сжимающее напряжение, σ_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

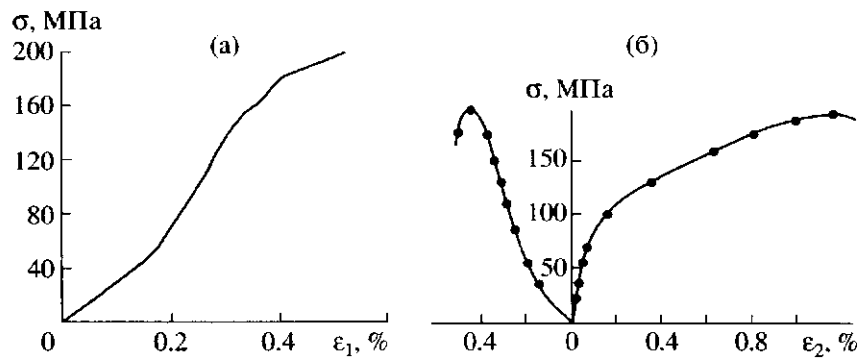


Рис. 7. Диаграмма деформирования: (а) – образца гранодиорита, исследованного в данной работе; (б) – образца гранита (по данным [Мансуров, 1990]); σ – главное сжимающее напряжение, ϵ_1 , ϵ_2 – соответственно продольная и поперечная деформация.

Данные из таблицы показывают, что с увеличением нагрузки уменьшается задержка эффекта. Значения остальных параметров меняются не монотонно. При этом длительность отклика на второй ступени выросла (на обеих ступенях амплитуды откликов оказались сопоставимы, после удаления линейных трендов прирост активности на рис. 4б, рис. 5б можно оценить величиной порядка 10%). Для третьей ступени наличие спонтанного всплеска активности препятствует сравнению амплитуды и длительности с первыми двумя. Отношение средней активности до воздействия к ней же после воздействия возрастает. Этому отношению соответствует релаксация состояния материала. Некоторое “успокоение” среды можно связывать

со снижением неоднородности распределения напряжений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для обсуждения результатов эксперимента, одной из целей которого являлось определение роли главного сжимающего напряжения в эффектах электрического поля в нагруженных образцах горных пород, попробуем их сопоставить с результатами известных экспериментов на одноосное сжатие горных пород. На рис. 7а показана σ - ϵ характеристика для образца гранодиорита, на котором проведен данный методический эксперимент. По угловому коэффициенту σ - ϵ графика определен статический модуль упругости $E \approx 10^{10}$ Н/м².

Принципиальность роли дилатансии в деформационных процессах в сейсмогенерирующих зонах (так называемая подготовка землетрясений) обсуждалась во многих работах [Райс, 1982; Гольдин, 1998]. Для анализа поперечной σ - ϵ зависимости и дилатансии можно попытаться использовать результаты экспериментов по разрушению образцов горных пород, проведенные в ИФиМГП НАН КР [Мансуров, 1990; Манжиков, 1983]. Обратимся к данным, полученным для материала со структурой, механическими свойствами и типом разрушения сходными с испытанным гранодиоритом. На рис. 7б показаны σ - ϵ характеристика для продольной и поперечной деформации образца гранита Каинда (Киргизия) с примерно таким же модулем упругости как у образца-участника вышеописанного методического эксперимента. Отметим, что сравнительно недавно на образцах этой серии были проведены эксперименты по изучению влияния слабых вибраций на акустическую эмиссию и скорость деформации [Богомолов, 2001; Трапезников, 1997]. Из графика на рис. 7б видно, что нелинейность поперечной деформации начинает проявляться уже с уровня напряжений близких к 50–60% от разрушающих. Это определяет пе-

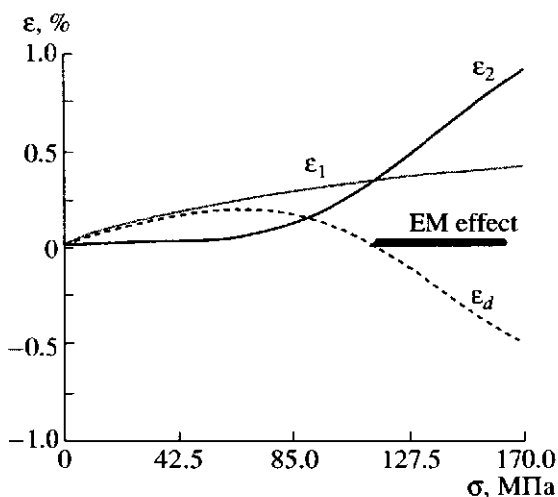


Рис. 8. Кривые напряжение-деформация для образца гранита: σ – главное сжимающее напряжение, ϵ_1 – продольная деформация, ϵ_2 – поперечная деформация, ϵ_d – дилатансия; сплошная черная линия показывает диапазон напряжений, в котором материал проявляет чувствительность к электрическому полю по данным экспериментов.

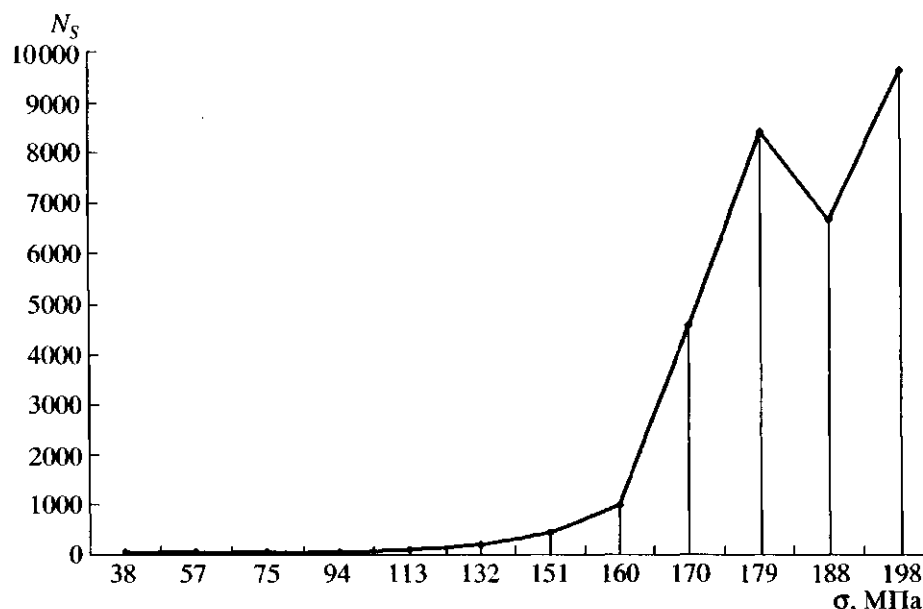


Рис. 9. Количество накопленных дефектов (зарегистрированных событий АЭ) по сессиям.

реход к дилатансионной стадии деформации (когда объем увеличивается, т.е. имеет место рыхление) при дальнейшем увеличении напряжения сжатия. На рис. 8 приведена построенная в других осях диаграмма σ - ϵ для того же гранита, на которой показаны кривые для поперечной и продольной деформаций, а также кривая дилатансии, приближенно оцениваемая как разность $\epsilon_1 - 2\epsilon_2$.

Из графика следует, что переход материала в стадию дилатансии происходит на нагрузке 65% от разрушающей. При этом значении нагрузки объем образца такой же, как в ненагруженном состоянии (при этом разность между продольной и удвоенной поперечной деформациями $\epsilon_1 - 2\epsilon_2$ обращается в нуль). На рис. 8 также показан диапазон одноосных сжимающих нагрузок, для которого в настоящей и предшествующих работах установлен эффект активации АЭ электроимпульсами. В предыдущем разделе отмечалось, что наименьшая величина главного напряжения, при котором зарегистрировано появление отклика на ЭВ, составляет 64% от напряжения разрушения испытанного образца. По проведенным оценкам дилатансии (с учетом их погрешности, обусловленной неоднородностью деформации образца) можно предполагать, что чувствительность материала к внешним воздействиям электрического поля начинает проявляться начиная с нагрузки, соответствующей началу дилатансии. К такому же положению можно прийти и на основе следствий работ [Адигамов, 1996; Шемякин, 2003], посвященным резервам прочности материалов. Примечательно, что для гранитных образцов отклики акустической эмиссии на слабые квазистационарные вибро-воздействия, аналогичные рассматриваемой реак-

ции на включение электроимпульсов, также регистрировались при нагрузках, соответствующих стадии дилатансии [Богомолов, 2001]. Таким образом, помимо изложенного эксперимента, имеются и другие (косвенные) свидетельства соответствия диапазонов дилатансии и чувствительности режима АЭ к действию физических полей.

Используя вышеизложенную информацию о деформационном состоянии, рассмотрим более детально ход накопления повреждений среды (образования и развития дефектов) в течении всего эксперимента. На рис. 9 показана зависимость количества событий АЭ, зарегистрированных в каждой экспериментальной сессии, от величины сжимающего напряжения, при котором проводилась эта сессия. Каждая из 11 точек соответствует своей трехчасовой сессии при постоянном сжатии. Анализируя форму графика можно выделить несколько стадий: до 151 МПа в течении 6 сессий было накоплено 496 событий (столько же в одной 7 сессии), накопление равномерное по всем нагрузкам. Вторая стадия характеризуется быстрым ростом кривой накопления (10% прироста нагрузки соответствует 100-кратному увеличению АЭ-сигналов в сессии). Третья стадия нестабильна, есть точки как небольшого увеличения, так и снижения. Примечательно, что уровень нагрузки соответствующей началу быстрого роста кривой составляет 65% от максимальной. На том же графике видно, что основной диапазон нагрузок, в котором наблюдается эффект электрического поля (80–95%) лежит в области, где процесс дефектообразования носит неустойчивый характер. Указанные особенности вполне соответствуют представлениям о разрушении геоматериалов

по данным АЭ, описанным в ранних работах [Журков, 1977; Соболев, 2003].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В подтверждение предыдущих результатов в работе определен диапазон значений главного сжимающего напряжения, в котором влияние внешнего электрического поля на активность АЭ проявляется при самых “неблагоприятных” условиях наблюдения – при испытаниях образцов на пружинных установках. В найденном диапазоне эффект электрочувствительности геоматериала реализуется в виде откликов АЭ, которые по своим характеристикам легко выделяемы по отношению к тренду. Количественные оценки откликов в рассматриваемом диапазоне позволили выявить изменения их основных параметров в зависимости от значения главного сжимающего напряжения.

Для интерпретации полученного диапазона проведен анализ кривых повреждаемости образца и σ - ϵ характеристики испытанного материала. Показано, что процесс накопления дефектов в материале носит как стационарный, устойчивый характер (нагрузки меньше 64% от разрушающей), так и с наличием быстроменяющихся фаз (немонотонный участок на интегральном графике $N_s(\sigma)$, см. рис. 9.) С точки зрения физического моделирования эффектов, имеющих отношение к вопросу о возможности искусственной разрядки избыточных напряжений в геологической среде и, как следствие, управления сейсмическим процессом, подобные кривые могут быть полезны для оптимизации времени энерговоздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. Методические аспекты исследования структуры вызванной сейсмичности, индуцированной МГД-импульсами. Научные труды ИТЭС ОИВТ РАН / Ред. Фортов В.Е. М.: ОИВТ РАН. 2003. Вып. 5. С. 175–183.
- Адигамов Н.С., Рудаев Я.И., Тютюкин Г.В. Уравнение состояния, учитывающее предразрушение материала. Матер. 1-го Респ. съезда по теоретической и прикладной механике, ч. 2. Алматы. 1996. С. 162–169.
- Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С. и др. Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энерговоздействиях физическими полями. Проблемы сейсмологии 3-его тысячелетия. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2003. С. 168–172.
- 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.
- Гольдин С.В. Физика живой Земли. Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1 / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука. 2003. С. 17–36.
- Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Собисевич А.Л. Управление сейсмическим процессом: реальность и проблемы. Геофизика XXI столетия: 2003–2004 годы. Сб. тр. 5 и 6 геофизических Чтений им. В.В. Федынского. Тверь: Изд-во ГЕРС. 2005. С. 97–104.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1977. № 6. С. 8–13.
- Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов. Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Под ред. Леонова Ю.Г. и Гольдина С.В. Москва–Бишкек: 2003. С. 304–324.
- 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.
- Мансуров В.А. Прогнозирование разрушения горных пород. Фрунзе: Илим. 1990. 240 с.
- Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир. 1982. 127 с.
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматулаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 6. С. 32–42.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В., Челидзе Т.Л. Экспериментальное изучение инициированной неустойчивой подвижки. Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения. М.: ИФЗ РАН. 1993. Вып. 1. С. 38–47.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра. 1985. 271 с.
- Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542–545.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1641–1649.
- 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.
- Шемякин Е.И. О сдвиговой прочности горных пород // Вестник Моск. Ун-та, сер. 1. Математика, механика. 2003. № 3. С. 76–81.
- Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Zakupin A.S. et al. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. № 1. P. 65–72.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. Initiating acoustic emission with electric action. Proc. 27-th General Assembly of the European Seismological Soc. (ESC). Lissabon, Portugal. September 10–15. 2000.