

УДК 550.348; 550.37

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

© 2006 г. А. С. Закупин, А. В. Аладьев, Л. М. Богомолов, Б. В. Боровский,
П. В. Ильичев, В. Н. Сычев, Н. А. Сычева

Научная станция РАН, Бишкек, 720049, Бишкек, ИС РАН, Киргизия

Поступила в редакцию 09.06.2003 г.

Показано наличие корреляции активности акустической эмиссии (АЭ) образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть при одноосном сжатии, с воздействием внешнего электромагнитного поля. Обнаружен эффект отклика активности АЭ различных горных пород и искусственных гетерогенных материалах на действие электрических токовых импульсов с напряжением десятки – сотни вольт. Отмечено определяющее значение крутизны фронтов электроимпульсов для наличия корреляций. Определен диапазон значений сжимающих напряжений, в котором имеет место эффект. Выявлены различные моды отклика АЭ в зависимости от величины нагрузки и параметров источника электромагнитных импульсов. Проведено качественное сопоставление полученных результатов с результатами ранее опубликованных работ по электропластике и магнитопластике нагруженных геоматериалов и смежным вопросам.

ВВЕДЕНИЕ

Триггерное влияние вибраций на акустическую эмиссию (АЭ) нагруженных породных образцов уже хорошо известно [2, 19, 27]. Триггерный эффект реализуется вследствие активизации микротрещинообразования, двойникования или других дислокационных процессов, происходящих на микро- и мезоструктурных уровнях под влиянием вибраций. Макроскопически это проявляется как “виброупругость” [15], то есть некоторое увеличение скорости неупругой деформации, зачастую на стадии дилатансии [2, 19]. Наличие триггерного эффекта весьма слабых вибраций свидетельствует о принципиальной возможности активного вибросейсмического воздействия на напряженное состояние отдельных участков земной коры с целью разрядки избыточных тектонических напряжений и изменения их сейсмического режима [16, 18].

Недавние публикации [1, 30] указывают, что воздействие электромагнитного поля в некоторых случаях также может вызывать изменение темпа дефектообразования либо мезоструктурных процессов, проявляющихся как АЭ. Интерес к подобной тематике проявлялся и в более ранних работах, где рассматривалась взаимосвязь электромагнитных полей с деформационными процессами. В [29] изложены наиболее значимые результаты исследований электрических эффектов при пластической деформации ионных кристаллов, у которых пьезоэффект отсутствует. Так, в экспериментах Дьюлаи и Хартли было отмечено увеличение проводимости кристаллов каменной соли

при их пластической деформации в 10–100 раз в зависимости от величины нагрузки. Различными исследователями было отмечено важное обстоятельство: проводимость растет не во всем объеме кристалла, а только в области полос скольжения, то есть в месте локализации пластической деформации. Как показали опыты Руэды [32], в этом случае эффект связан с переносом заряда дислокациями. Прежде всего, подобный электроперенос реализуется в отдельных полосах скольжения, где имеется избыток подвижных дислокаций.

Известны работы, где исследовалось влияние различных внешних воздействий на механизмы пластической деформации. Для металлов эффект повышения пластичности в результате облучения ускоренными электронами во время деформации или воздействия импульсным током (электропластический эффект) хорошо известен. Электропластический эффект, обнаруженный на кристаллах цинка в 1963 г., можно считать прообразом энерговоздействий на деформационный процесс. При объяснении полученных данных авторы [25] исходили из предположения, что облучение кристаллов во время деформации интенсифицирует деятельность уже имеющихся источников дислокаций и, возможно, способствует началу работы новых источников. Механизм явления связывался с ускорением движения дислокаций в районе источников, что и могло быть причиной интенсификации их деятельности. Электрический ток, как и облучение, также приводит к изменению направленных сил, действующих на дислокации. В [22, 26] описано исследование влияния импульс-

ного тока на ползучесть монокристаллов цинка. Импульсный ток оказывает наибольшее действие на пластическую деформацию в том случае, когда к приходу каждого из последующих импульсов успевают появляться неравновесные группы дислокаций. В других работах, например [28], проводились исследования влияния магнитного поля на пластичность и неупругие свойства кристаллов LiF. Было показано, что магнитное поле существенно влияет на такие неупругие свойства кристаллов, как внутреннее трение и дефект упругих модулей, а также выявлено пороговое значение индукции магнитного поля, при котором обнаруживается его влияние на неупругость щелочно-галлоидных кристаллов (существенное влияние на пороговое значение индукции оказывает состав примесей). Взаимосвязь электрических полей, обусловленных поляризацией горных пород, с релаксационными процессами, определяющими выравнивание неоднородностей напряжения, убедительно продемонстрирована в [10]. В этой работе рассмотрен случай небольших (меньше половины разрушающих) нагрузок, для которых механизм переноса заряда на примесных атомах или вакансиях более вероятен, чем дислокационный электроперенос.

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что электромагнитное поле оказывает определенное влияние на ход неупругого деформирования горных пород в самом разном масштабе, в том числе на напряженно-деформированное состояние геологических структур земной коры. Эта тема затрагивает вопрос о перспективе управления сейсмичностью при помощи технологических энергетических воздействий (ЭВ) [2, 23]. Пионерские данные о влиянии на региональный режим микросейсмичности мощных электромагнитных импульсов, которые создавались импульсными магнитогидродинамическими (МГД) генераторами при проведении электроразведки в районах Бишкекского и Гармского прогностических полигонов (ОИФЗ, ОИВТ РАН) были получены в [23, 24]. Как отмечают авторы [1], электромагнитное воздействие на геологическую среду на основе мощных электрических импульсов – новый аспект в исследовании ее свойств, определяющих ход процессов в очагах землетрясений.

Интересные результаты взаимосвязи АЭ образцов геоматериалов с их электрической поляризацией при наложении электромагнитного поля были получены при испытании этих образцов на прессах [1]. В лабораторных экспериментах акустическая эмиссия рассматривается как модель реального сейсмического процесса в нагруженной и энергонасыщенной среде, статистически самоподобного в широком диапазоне масштабов [5, 18, 20].

Хотя, согласно [1], имеются примеры возрастания АЭ под влиянием электрических импульсов, отмечено, что математическая обработка результатов свидетельствует не столько об эффекте ЭВ в чистом виде, сколько о тенденции к такому эффекту. При изучении энергвоздействий на геологическую среду [1], в ИС РАН проведен цикл экспериментов, включающих испытания на ползучесть образцов геоматериалов при дополнительном воздействии различных физических полей. В [30] отмечено, что триггерный эффект электромагнитных импульсов может быть выделен на фоне спонтанных флуктуаций активности АЭ. Данная статья посвящена систематическому исследованию откликов АЭ образцов различных геоматериалов на электрические импульсы (модельные энергвоздействия) при фиксированной нагрузке.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на пружинной реологической установке УДИ [21] с максимальным усилием сжатия 100 тонн (рис.1).

Для ступенчатого изменения нагрузки в ходе эксперимента использовался 100-тонный гидроцилиндр с ручным приводом. После фиксации выбранного значения нагрузки при помощи упорной гайки постоянство главного сжимающего напряжения обеспечивается за счет упруго сжатых дисковых пружин в бесшумном режиме. Измерения величины нагрузки проводились при помощи манометра на рабочем цилиндре гидропривода, а также периодическим замером изменений длины пружин с помощью датчика линейных перемещений LVDT. Для пересчета укорочения пружин на величину сжимающей нагрузки, действующей на образец, использовалась калибровочная кривая, описывающая зависимость сокращения длины пружины от развиваемого прессом усилия. Калибровка проводилась перед началом каждой серии испытаний при той же температуре воздуха, что и в течение последующих экспериментов (суточные колебания температуры в помещении, где установлены УДИ, не превышали 2°). Согласно результатам калибровки эффективная жесткость на линейном участке калибровочной кривой составляла около 610 кгс/мм. 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, к примеру, при быстром, хотя и макроскопически заметном укорочении образца вследствие спонтанного всплеска активности (что свидетельствует, согласно [7], о возникновении очага – подобласти с критическими параметрами для трещинообразова-

ния) нагрузка снижается на несколько процентов. Вследствие этого процесс подготовки разрушения (накопление повреждений) оказывается растянутым во времени. Из опыта лаборатории Дж. Байерли и Д. Локнера (Геологическая служба США) [31], где при испытаниях образцов горных пород применялась обратная связь по параметрам АЭ для ограничения скорости деформирования известно, что задержка разрушения снижает требования к быстродействию системы регистрации АЭ. Отмеченная особенность установок УДИ облегчает фильтрацию сигналов АЭ для выделения изучаемых быстрых изменений (“всплесков”) активности АЭ, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния, в частности из-за возможного триггерного влияния электромагнитных импульсов среди высокочастотных помех.

Образец устанавливается на нижнюю пяту, в которую встроены датчики акустической эмиссии, конструктивно совмещенные с кабельными усилителями. Система из пяти нижних датчиков предназначена для локации источников АЭ. Разрешающая способность системы, по расчетным оценкам, была не более миллиметра. В большинстве экспериментов, кроме встроенных 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, работающей в стандарте КАМАК. Другой датчик, крепящийся к поверхности образца (SH350), позволял исследовать сдвиговые акустические колебания.

С учетом ранее полученных результатов были подобраны следующие горные породы с выраженными акусто-эмиссионными свойствами: каменная соль (галит), гранит, гранодиорит, габбро и кварцит. Из этих материалов для экспериментов были изготовлены образцы правильной формы (таблица). Также была изготовлена серия песчано-цементных образцов размером $100 \times 120 \times 250$ мм³ с неоднородными включениями из гранитной крошки диаметром около 1 мм (1–5 % от веса образца). Приготовленные таким образом образцы имеют более высокую электропроводность по сравнению с сухими породными образцами. Использование искусственных образцов наряду с горными породами позволило сравнить модельные электровоздействия на материалы с сильно различающейся электропроводностью. Это важно ввиду большого разброса проводимости для различных слоев земной коры.

Методика экспериментов включала в себя проведение экспериментальных сессий, как правило, привязанных к ступеням нагружения. Сигналы акустической эмиссии регистрировались в

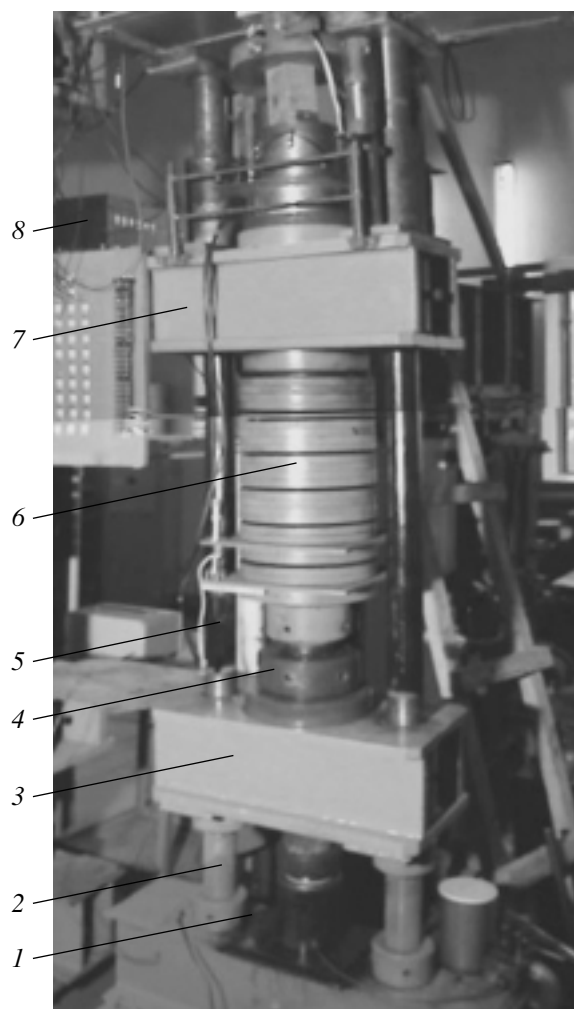


Рис. 1. Общий вид установки для длительных испытаний (1 – гидравлический домкрат, 2, 5 – опорная стойка, 3 – нижняя траверса, 4 – фиксирующая гайка, 6 – пружины, 7 – верхняя траверса, 8 – блок усилителей).

широком частотном диапазоне – от 80 кГц до 5 МГц. Это позволяло контролировать форму сигналов АЭ. Система регистрации работала в ждущем режиме (рис. 2а). Кроме акустоэмиссионных данных регистрировались изменения поперечных размеров образца, а также изменения главного сжимающего напряжения.

Дополнительные электрические воздействия осуществлялись в ходе экспериментальных сессий. Сразу после увеличения и фиксации нагрузки образцу отводилось определенное время для релаксации переходных процессов, связанных с неравномерностью пригрузки и краевыми эффектами (поверхностное выкрашивание и др.). Когда проявления переходных процессов в потоке акустоэмиссионных сигналов достигали уровня естественного шума, начиналась измерительная сессия с непрерывной регистрацией АЭ.

Характеристика испытанных образцов

№	Материал и месторождение	Идент. №	Высота, мм	Диаметр/поперечные размеры, мм	Количество сессий с ЭВ	
					Сеансы Г5-54	Импульсы
1	Гранит серый (Табылга, Киргизия)	5	80	Ø40	0	11
2	Гранит серый (Табылга, Киргизия)	6	80	Ø40	4	1
3	Гранит (Уестерли, США)	7	80	Ø40	11	0
4	Гранодиорит (Аламедин, Киргизия)	1	107	Ø52	5	0
5	Гранодиорит (Аламедин, Киргизия)	3	107	Ø52	7	2
6	Галит (Токтогул, Киргизия)	1	120	Ø60	5	0
7	Галит (Токтогул, Киргизия)	2	120	Ø60	4	6
8	Кварцит (Ат-Баши, Киргизия)	1	90	50 × 55	5	2
9	Кварцит (Ат-Баши, Киргизия)	3	90	50 × 55	0	3
10	Габбро (Каинда, Киргизия)	3	51	19 × 29	3	1

Количество измерительных каналов АЭ определялось в зависимости от задач текущего эксперимента. Например, для решения задач локализации дефектов использовалось не менее 6 каналов (сигналы с пяти датчиков, встроенных в нижнюю опору, и одного бокового). Для достижения максимального быстродействия количество используемых каналов сокращалось до минимума для уменьшения объема выходных файлов данных, записываемых на жесткий диск компьютера.

После завершения переходных процессов и автоматической оценки фонового уровня активности АЭ включался источник ЭВ и на образец подавались электроимпульсы. На рис. 2б, который иллюстрирует хронологию экспериментальных измерительных сессий, показаны два основных типа экспериментальных сессий с дополнительными ЭВ. Остальные реализации энерговоздействий, имевшие место в некоторых сессиях, являлись производными от этих двух типов, или их комбинацией. Как видно из рис. 2б, механически нагруженный образец подвергался дополнительному воздействию в квазистационарном режиме, когда источник ЭВ возбуждал периодические импульсы или в режиме одиночных ЭВ кратковременным электрическим разрядом. Длительность воздействия варьировалась в широких пределах: от 30 минут до нескольких часов для длительных периодических воздействий и от миллисекунды до нескольких секунд при разовых воздействиях. Использовались следующие модельные источники дополнительных энергетических воздействий:

1) генератор импульсов Г5-54, выдающий прямоугольные импульсы, с амплитудой, близкой к 50 В, длительностью импульса порядка 5–10 микросекунд, частота изменялась в пределах от 1 до 3 кГц;

2) 10 кВ индукционный искровой генератор (без контроля формы импульса);

3) Конденсаторный разрядник, создающий электрические импульсы с крутизной фронта порядка 1 микросекунды и пиковым напряжением порядка 1 кВ.

Применение различных источников ЭВ и варьирование их параметрами при изучении откликов АЭ одного и того же образца стало возможным благодаря проведению испытаний на ползучесть на пружинной установке УДИ в бесшумном режиме.

На рис. 2в, в качестве примера, показана характерная диаграмма нагружения образца с указанными экспериментальными сессиями и сеансами ЭВ. Эта диаграмма построена для образца габбро, на ней отмечены семь ступеней нагружения, из которых две (№5, 7) с проведением регистрации АЭ. Эксперимент с внешним ЭВ проводился только на седьмой ступени нагружения, так как на пятой активность АЭ оказалась очень низкой. Всего в течение седьмой ступени было проведено четыре эксперимента с дополнительными ЭВ. Источниками служили генератор Г5-54 и индукционный разрядник. Общая длительность регистрационной сессии – 11 ч., длительность сеансов с ЭВ (Г5-54) соответственно: 30, 60 и 40 мин. В таблице для каждого образца указаны общее число сеансов с ЭВ, в том числе для квазипериодических и импульсных.

Данные эксперименты дополняют опыты, проведенные в геофизической обсерватории Борок на прессе Инова [1, 20], особенностью которого является сервоуправляемый режим нагружения, исключаяющий постоянство нагрузки [20]. Модельные источники ЭВ 1 – 3 создают электрическое и магнитное поля значительно слабее полей, примененных в [22, 26, 28, 29], посвященных исследованиям по электропластике и магнитопластике. Исключительно высокая чувствительность АЭ к неупругим деформационным процессам поз-

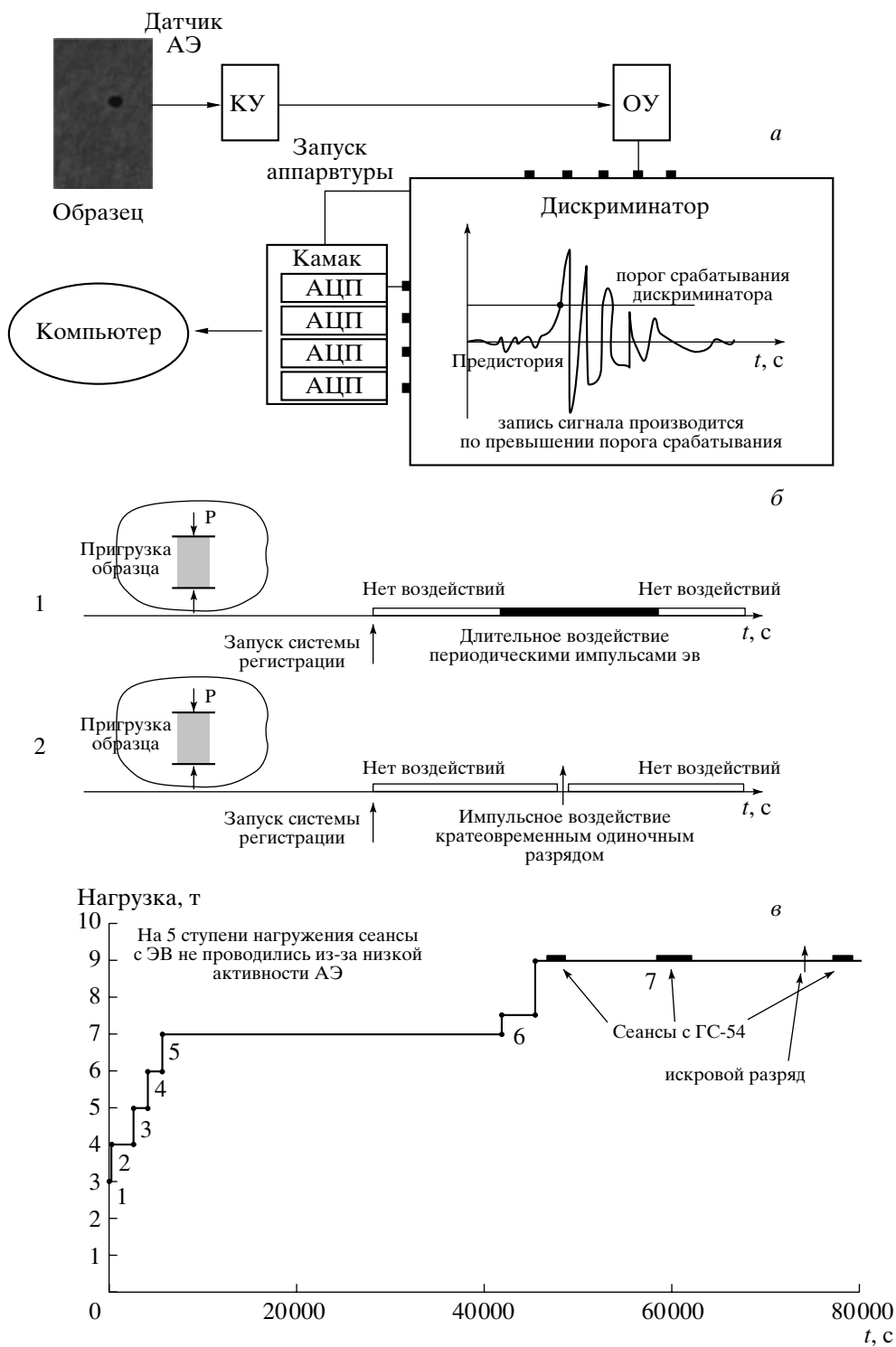


Рис. 2. Схема сбора данных при испытаниях образцов с дополнительными ЭВ.

а – регистрация акселерограмм (сигналов АЭ) в ждущем режиме; б – экспериментальные сессии при постоянной нагрузке в режимах периодического воздействия (1) и воздействия одиночными электроимпульсами (2); в – характерная диаграмма нагружения.

волила исследовать реакцию геоматериалов на весьма слабые воздействия, соответствующие сравнительно небольшой энергетике техногенных

(а в перспективе и технологических) воздействий на геологическую среду по сравнению с тектоническими процессами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные результаты могут быть представлены в наиболее информативной форме при помощи графиков временной зависимости активности АЭ. 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 определенной числа событий. Оцениваемая таким образом активность событий АЭ для нагруженных образцов по своему смыслу соответствует стандартному параметру “активность АЭ событий”, который представлен (наряду с амплитудой и длительностью) в большинстве аппаратных средств для технологических применений АЭ [4, 6].

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

Активация АЭ наступала в течение 5 минут 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. 3а показан триггерный эффект при воздействии однополярных прямоугольных импульсов на активность АЭ бетонного образца с гранитными включениями.

Примечательные результаты получены для образцов галита. Рис. 3б демонстрирует, что уровень активности АЭ, возросший вследствие электровоздействия, сохраняется в течение сессии с включенным генератором Г5–54. Плавное снижение уровня активности АЭ после выключения генератора представляет собой последствие. Все это аналогично проявлению виброэффектов, обладающих, согласно [2, 19, 27], задержкой активации АЭ и последствием. Так как галит – материал с высоким удельным сопротивлением, полученные результаты свидетельствуют о том, что эффекты и поляризации и проводимости играют существенную роль при дополнительных энергетических воздействиях. Это подтвердилось в контрольном эксперименте, когда токоподводящие электроды были изолированы от поверхно-

сти образца тонкой фторопластовой лентой. Постоянство амплитуды и формы импульсов генератора обеспечивалось шунтированием разрядной цепи 600 -омным резистором. При бесконтактном электровоздействии задержанный отклик (прирост АЭ) образца галита оказался значительно слабее, чем в случае, показанном на рис. 3б. При этом в самом начале сеанса ЭВ, то есть перед активизацией, имел место спад АЭ активности, более выраженный, чем в случае гальванического контакта электродов.

Задержка откликов АЭ на электрические импульсы варьировалась в широких пределах: от 50–100 секунд (кратковременная реакция) до нескольких тысяч секунд (длительная задержка). Рис. 3в демонстрирует пример четкого отклика (десятикратное возрастание активности АЭ) при небольших задержках после включения генератора прямоугольных импульсов. Возможную причину разброса длительности задержки обсудим в следующем разделе. Уместно, однако, упомянуть, что этот вопрос связан с наличием спонтанной активации АЭ, один из всплесков которой виден на рис. 3в до сеанса ЭВ. Обобщение результатов свидетельствует, что для гранитных образцов длительные задержки характерны при нагрузках порядка 80 – 85 % от разрушающих, а кратковременная реакция – при нагрузках больше или порядка 90 % максимума.

В дополнение к образцам разнотерной породы (граниты) рассматривались отклики АЭ образцов габбро (рис. 3г) и кварцита (рис. 3д). Габбро был выбран как материал, сходный по своим механическим характеристикам с гранитом Табылга, но не содержащий фракций с пьезоэлектрическими свойствами. Для контраста проводился эксперимент с образцом кварцита. Как видно из рис. 3г, отклик АЭ образца габбро по форме оказался аналогичен акустоэмиссионным откликам образцов галита и гранита Уестерли. В данном случае задержка составила около 1000 секунд, имело место и последствие в течение такого же промежутка времени. На обоих рисунках (рис. 3в и г), наряду с откликами, наблюдаются всплески спонтанной активации АЭ. Подобные спонтанные всплески наблюдались на различных материалах. В отсутствие ЭВ время математического ожидания всплесков (оцененное по контрольным образцам) менялось от 4 до 6 тысяч секунд в зависимости от уровня нагрузки и времени после ее ступенчатого увеличения. Учитывая частотность спонтанных всплесков и количество сеансов ЭВ, лишь небольшая часть вариаций АЭ активности при проведении ЭВ может быть отнесена к спонтанной активации, случайно совпадающей со временем дополнительного воздействия. К примеру, графики активности АЭ, показанные на рис. 3а и б, были получены в измерительных сессиях, в течение которых до ЭВ не наблюдалось всплесков

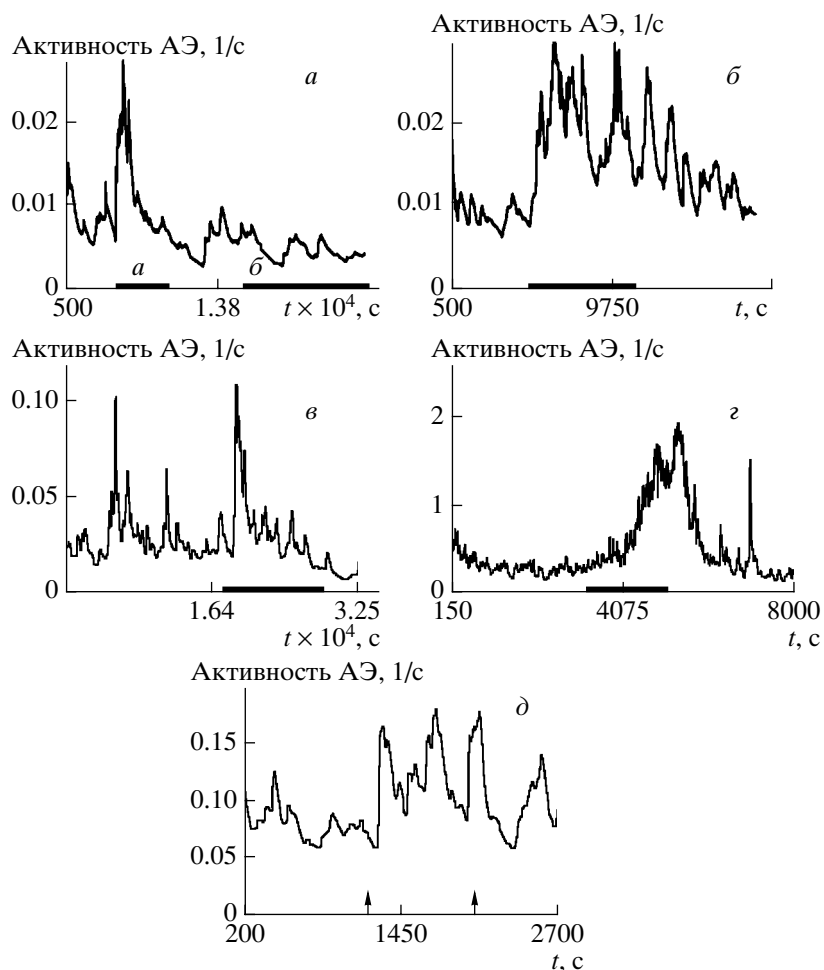


Рис. 3. Активность АЭ образцов разного состава.

a – бетон: электровоздействия генератором Г5–54 в периоды: *a* – 4800–9600 с; *б* – 15000–27000 с. Параметры электроимпульсов (частота, длительность, амплитуда): *a* – 2 кГц, 5 мкс, 60 В; *б* – 1 кГц, 10 мкс, 60 В. (нагрузка – 75% от разрушающей); *б* – галит: электровоздействие генератором Г5–54 в период: 4800–10800 с. Параметры электроимпульсов (частота, длительность, амплитуда): 2 кГц, 5 мкс, 60 В. (нагрузка – 85% от разрушающей); *в* – гранит Уэстерли: электровоздействие импульсами генератора Г5–54 с параметрами 2 кГц, 40 мкс, 60 В. Период ЭВ: 17900–28700 с. (нагрузка – 87% от разрушающей); Г – габбро: параметры Г5–54: 2 кГц, 30 мкс, 50 В, период: 3260–5070 с. (нагрузка – 95% от разрушающей); *д* – кварцит: электровоздействие искровым индукционным разрядником (амплитуда не менее 3 кВ) в периоды: 1200, 2050 с. (нагрузка – 50% от разрушающей).

АЭ, превышающих дисперсию. В ряде случаев не составляет труда различить спонтанный всплеск активности АЭ и вынужденный отклик на ЭВ. В частности, на рис. 3б видно, что амплитуда спонтанных всплесков значительно меньше отклика. Для образца габбро (рис. 3г) спонтанный всплеск АЭ четко выделяется меньшей длительностью и амплитудой.

Как было отмечено выше, акустоэмиссионная активность является аналогом сейсмической активности реальной геосреды. На натурном уровне спонтанные всплески сейсмичности на территории Тянь-Шаня неоднократно регистрировались сетью KNET [13]. В 2000 – 2002 гг. на Бишкекском геодинамическом полигоне в специальном режиме проводились глубинные зондиро-

вания земной коры [3], которые могут рассматриваться как ЭВ. На рис. 4 показан пример спонтанного всплеска сейсмической активности (до ЭВ с 9 по 13 день) и ее отклика (вынужденного всплеска) на внешнее воздействие (после ЭВ, с 23 по 29 день). Отмечено, что на разных масштабных уровнях спонтанные всплески имеют характерные сходства по длительности и амплитуде.

В заключение этого раздела приведем еще пример отклика образца кварцита (материала с пьезоэлектрическими свойствами) на одиночные импульсы напряжения (~3 кВ амплитуда). График активности АЭ образца кварцита показан на рис. 3д. Образец кварцита изначально имел трещиноватую структуру, и в ходе его деформирования наблюдалось много сколов, что отобража-

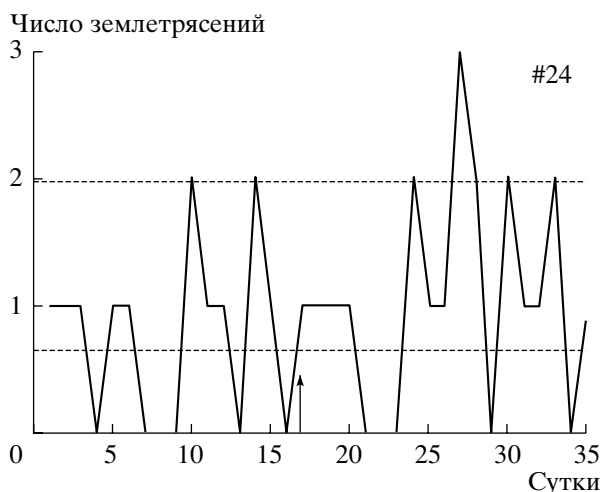


Рис. 4. Пример распределения суточного количества землетрясений, зарегистрированных на Бишкекском геодинамическом полигоне по данным KNET в период экспериментальных электроразрядов. Стрелкой отмечен день дополнительного энергетического воздействия. Пунктиром показана дисперсия, определенная по первым 17 суткам до ЭВ, и ее утроенное значение.

лось в виде спонтанных всплесков активности АЭ. Высокая активность трещиноватого образца позволила проводить ЭВ в экспериментальных сессиях при нагрузке порядка 40% от разрушающей. Из графика видно, что отклик представляет собой резкое увеличение АЭ с небольшой задержкой порядка 50 секунд. Эта особенность может быть обусловлена трещиноватостью материала с выраженными пьезоэлектрическими свойствами. В ходе сессии с ЭВ наблюдались сколы вскоре после одного или нескольких всплесков АЭ, вызванных, в частности, электроимпульсами. Рис. 3д является примером такого случая. Сопоставление откликов активности АЭ образцов кварцита, галита и гранита свидетельствует об общих чертах влияния ЭВ. Объяснение такого влияния не удастся свести ни к обратному пьезоэффекту, ни к обратному сейсмоэлектрическому эффекту.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущем разделе показано, что для всей подборки материалов отклики на ЭВ, как правило, проявлялись в определенном диапазоне значений сжимающего усилия, которое составляло 80–95% от разрушающей нагрузки. Это наблюдение характерно для всех трех типов применявшихся источников электровоздействия. Анализ экспериментальных данных указывает, что действие электромагнитного поля на напряженные структуры имеет различный характер в зависимости от источника ЭВ, материала образца, величины нагрузки, длительности выдержки при этой нагрузке. Сочетание этих факторов предопределяет вид

отклика на электрический импульс и, частично, характерный диапазон изменения параметров отклика. Обобщая проявления электромагнитного поля при различных условиях воздействия в нагруженной среде, можно выделить два типа откликов на ЭВ [30]. Первый тип соответствует кратковременному увеличению активности. В этом случае активационный фронт достаточно резкий. Обычно такие отклики наблюдались при относительно небольших напряжениях сжатия, приложенного к образцу. При проведении повторного электромагнитного воздействия на той же нагрузке отклики такого типа ослабевают: регистрировались лишь совсем слабые отклики, демонстрирующие пороговые признаки эффекта, либо отклики не наблюдались вообще. Второй тип откликов, наблюдаемый при приближении нагрузки к максимальной, может быть охарактеризован устойчивым повышенным уровнем активности АЭ. В этом случае повышенный уровень активности остается квазистационарным в течение длительного времени после электровоздействия. Затем, если нет повторных воздействий, он постепенно падает до исходного уровня, то есть имеет место последствие. Как правило, отклики второго типа обнаруживаются при значительных нагрузках (вблизи разрушения).

Проведенный анализ показал, что на пяти образцах был отмечен отклик первого типа (кварцит, бетон, два гранитных и один гранодиоритный), а в двух из них он наблюдался более одного раза (разные нагрузки в пределах менее 80% от разрушающей: гранодиорит – четыре раза и гранит – два раза). Отклик второго типа фиксировался на пяти образцах (кварцит, соль, три из гранита) при нагрузках более 85% от максимума.

Характерно, что отклики второго типа проявлялись только при длительном воздействии прямоугольными импульсами Г5–54, а отклики первого типа регистрировались и при периодическом ЭВ (с использованием Г5–54), и в режиме одиночного ЭВ (конденсаторно-тиристорный либо искровой источник ЭВ). Возможно, что кратковременное (импульсное) воздействие при умеренных сжимающих нагрузках влияет, в первую очередь, на дефектообразование в приповерхностных зонах (в частности возле электродов). Возврат активности АЭ к фоновому уровню или даже несколько ниже после кратковременного отклика-активизации может соответствовать отсутствию очагов с повышенной концентрацией дефектов внутри образца, то есть неизменности концентрационного параметра накопления микротрещин, фигурирующего в двухстадийной модели разрушения [7, 8, 11]. Визуально небольшие заколы и выкрашивания, не влияющие на параметры макродеформации образца, отмечались в сеансах с ЭВ чаще, чем при обычном нагружении.

Сопоставление откликов первого и второго типов по их продолжительности и крутизне фронта нарастания, а также диапазона нагрузок, при которых они проявляются, указывает на то, что, в отличие от откликов первого типа, второй тип откликов соответствует структурным изменениям в материале образца и связан с возможным переходом нагруженной среды в новое метастабильное состояние. Электромагнитное поле может инициировать движение дислокаций и, тем самым, способствовать релаксации неоднородности напряжений. Следствием этого, по-видимому, является задержка образования макродефектов на второй стадии разрушения. Отражением диффузного, более однородного, характера накопления микротрещин в сеансах ЭВ с использованием Г5–54 является большая регулярность АЭ по сравнению со случаем испытаний без ЭВ. Похожая регуляризация хода АЭ наблюдалась при длительном воздействии слабых низкочастотных вибраций на нагруженные гранитные образцы [2].

Как уже было описано в предыдущем разделе, в ходе экспериментальных сессий наблюдались спонтанные всплески активности АЭ, иногда затрудняющие однозначную идентификацию откликов на ЭВ. В результате проведенной серии экспериментов были найдены феноменологические признаки, по которым спонтанный всплеск в большинстве случаев можно отличить от вынужденной активации. Наиболее важными из признаков являются кратковременность и более резкий фронт нарастания по сравнению с наблюдаемыми при той же самой нагрузке откликами второго типа. Однако при наложении стартового момента ЭВ, потенциально вызывающего активацию, на спонтанный всплеск АЭ ситуация становится нетривиальной. Перед ее обсуждением отметим, что теоретически (то есть по своей природе) спонтанная активизация ничем, кроме предыстории, не отличается от отклика на ЭВ первого типа. Реализация и того и другого осуществляется лавинообразным развитием микротрещин в локализованном очаге, что не приводит к макроразрушению образца благодаря малым размерам очага или стабилизации за счет блочной “зернистой” структуры. Лавинообразный рост дефектов подготавливается кинетикой более мелких дефектов. Определенную роль в этом могут играть дефекты нижних иерархических уровней: дислокации, вакансии, межузельные атомы и т.п., на движение которых влияет электрическое поле [10, 17]. В одном случае (перед спонтанным всплеском) подготовительный процесс эволюции дефектов низшего уровня иерархии идет автономно, в другом – под влиянием электромагнитного поля. Гипотетически наложение спонтанных и вынужденных активаций может реализовываться следующим образом: материал находится в определенном напряженно-деформированном состоянии,

при котором на данный момент времени должно начаться дефектообразование в очаге локализованных деформаций. Когда с этим моментом совпадает наложение внешнего электромагнитного поля, подготовленная очаговая зона обрабатывается по обычной схеме, однако, кроме того, ЭВ инициирует еще и дополнительные зоны. При этом эффективный объем очага несколько возрастает, что влияет на характеристики наблюдаемого отклика АЭ, то есть становится выше амплитуда и увеличивается продолжительность отклика на ЭВ. Можно попытаться сопоставить подобный сценарий с развитой в [12] концепцией S-поверхности процесса разрушения. В этой концепции внимание обращено на то, что в координатах: время – спектральная частота – амплитуда сигналов акустической или электромагнитной эмиссии, процессу подготовки разрушения соответствует характеристическая поверхность, проекция которой на координатную плоскость время – спектральная частота представляет S-образную кривую (диаграмму), состоящую из трех ветвей. Согласно [12], ветви S-характеристики описывают следующие последовательные стадии процесса разрушения: накопление микротрещин (I), ветвление трещин (II) и лавинное разрушение (III). При перемещении со временем вдоль ветви I (что соответствует эволюции процесса) эмиссионные сигналы характеризуются возрастанием доли низкочастотных и крупноамплитудных событий [12], а вдоль ветви II – увеличением вклада высокочастотных и малоамплитудных сигналов. При переходе от ветви II к ветви III формируется магистральная трещина и нарушается сплошность образца. Отметим также смысловое соответствие ветви и первой стадии (диффузного накопления дефектов) в известной двухстадийной модели разрушения [9, 11]. Возрастание амплитуды и длительности сигналов АЭ в случае больших всплесков, инициированных действием электромагнитных импульсов на подкритические объемы – “неоднородности” и их окружение, может быть свидетельством задержки смещения процесса разрушения на микроуровне с ветви I на ветвь II S-характеристики. При этом дислокационные процессы могут продолжать вносить вклад в диссипацию энергии и релаксацию напряжений в местах их концентрации (альтернатива ветвлению трещин).

Для косвенной проверки реалистичности некоторых моментов указанного сценария, рассматривалась форма сигналов АЭ, зарегистрированных после включения источника ЭА, но незадолго до отклика. Так, например, при визуальном контроле формы сигналов АЭ образца габбро в ходе сеанса ЭВ было отмечено значительное количество сигналов АЭ с формой акселерационного типа [9]. На рис. 5а, б показаны, соответственно, сигналы АЭ акселерационного и релаксационного типов, зарегистрированные в этом сеансе.

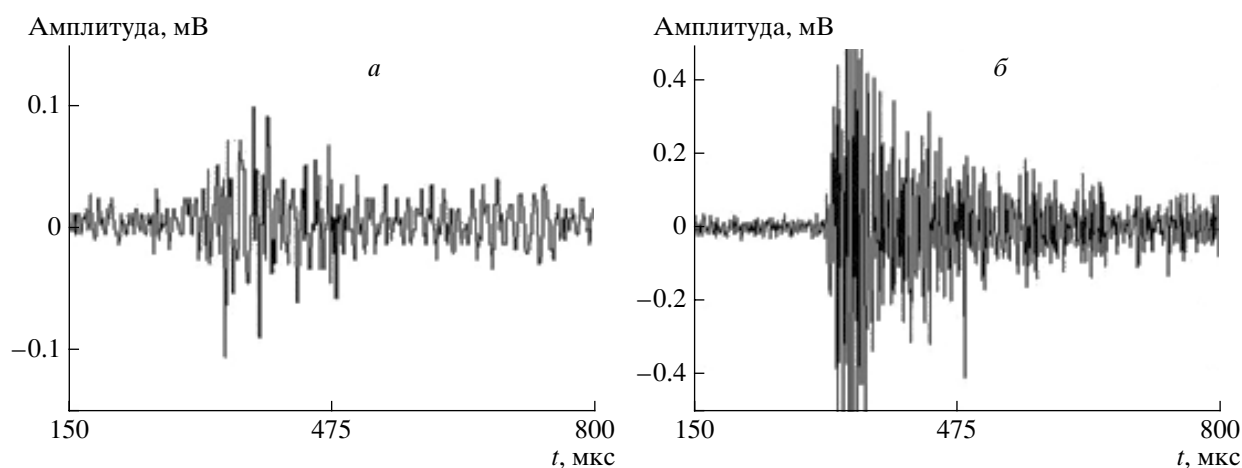


Рис. 5. События АЭ, зарегистрированные в ходе эксперимента с образцом габбро: а – акселерационного типа; б – релаксационного типа.

Поскольку акселерационные сигналы с плавно нарастающим участком огибающей (5а) указывают на дислокационные процессы, реализующие пластическое деформирование образца (но идущие медленнее трещинообразования), то можно предполагать, что в процессе электровоздействия на деформированную структуру образца имеет место инициирование подвижности дислокаций.

Результаты, полученные для образцов с самыми разными реологическими свойствами, свидетельствуют о прямой связи между неупругими деформационными процессами в нагруженных геоматериалах и дополнительным воздействием электромагнитными импульсами. Дальнейшие исследования являются многообещающими в связи с перспективой разработки основ технологии искусственной разрядки избыточных напряжений в геологической среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружена корреляция активности АЭ образцов геоматериалов с воздействием внешнего электромагнитного поля. В экспериментах использовались образцы, изготовленные из различных геоматериалов, а также искусственные материалы, моделирующие геологическую среду. Это позволяет сделать выводы об общности эффекта для широкого класса образцов, представляющих разнообразные по физико-химическому составу, реологическим и прочностным свойствам материалы. В работе было отмечено, что отклики АЭ наблюдаются в определенном диапазоне значений сжимающей нагрузки. Продемонстрированы примеры откликов, полученных на образцах гранита, габбро, соли, кварцита и бетона. Анализ экспериментальных данных позволил выделить следующие основные факторы, от которых зависят характеристики отклика: главное сжимаю-

щее напряжение, время от последнего изменения нагрузки, вид испытываемого материала, а также электрические параметры источника ЭВ. Было выделено два типа откликов на ЭВ, наблюдавшихся даже для одного и того же образца. Диапазоны нагрузок для первого и второго типов откликов соответственно лежат в пределах 75–85%, 80–95% от разрушающей нагрузки. Важным результатом работы является демонстрация аналогии откликов второго типа и откликов на вибрационное воздействие, которые анализировались в [2, 19, 27]. Рассмотрены характеристики откликов АЭ на электровоздействие, на основе которых их можно отличить от естественных спонтанных всплесков активности АЭ. Вместе с тем, замечено, что кратковременная спонтанная активация является неотъемлемым свойством среды вблизи порога потери устойчивости. Именно в этих условиях, зачастую определяемых как “самоорганизованная критичность” [14], отчетливо проявляется повышенная электрочувствительность режима АЭ.

2. На основе анализа всего комплекса экспериментальных данных рассмотрены возможные механизмы эффекта в свете современных концепций механики сплошных сред. Сделан предварительный вывод о том, что объяснение триггерного эффекта ЭВ возможно на пути синтеза парадигмы пластичности гетерогенных материалов (включаящей электро- и магнитопластику) и парадигмы хрупкого разрушения (где фигурируют прямые и обратные трибоэлектрические эффекты, влияющие на рост трещин)

Авторы благодарны: Б.Ц. Манжикову, Н.С. Адигамову и А.Я. Попову за неоднократные обсуждения методических вопросов и информацию о воздействии на АЭ гранитных образцов магнитным полем

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря гранту № YG1-2316-VI-02 Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (АФГИР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Пономарев А.В., Соболев Г.А.* Некоторые вопросы изменения состояния геологической среды при электромагнитном воздействии импульсами МГД-генератора // Научные труды ИТЭС ОИВТ РАН. Вып. 3. 2000. С. 217–224.
2. *Богомолов Л.М., Манжииков 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. *Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Кузьмиченко А.В., и др.* О взаимосвязи слабой сейсмичности с электровоздействиями на Бишкекском геодинамическом полигоне / Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений, Докл. 2-го Казахстанско-Японского семинара, Алматы-Эверо, 2003. С. 195–204.
4. Акустическая эмиссия и ее применения для неразрушающего контроля в ядерной энергетике // Под ред. К.Б. Вакара, М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
5. *Виноградов С.Д.* Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений, М.: Наука, 1989. 177 с.
6. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976, 272 с.
7. *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. М.: ИФЗ РАН, 1993. Т. 11. С. 9–16.
8. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н. и др.* К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–16.
9. *Иванов В.И., Белов В.М.* Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
10. *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В.* Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках // ФТТ. 1997. Т. 39. № 7. С. 1202–1204.
11. *Куксенко В.С.* Модель перехода от микро- к макро-разрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. Л.: Наука. 1986. С. 36–41.
12. *Курленя М.И., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковичкая Г.И.* Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2000. 232 с.
13. Киргизская сейсмологическая сеть KNET, интернет-сайт научной станции ОИВТ РАН, <http://www.gdir.ru/seis/russian/knetmap.html>
14. *Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П.* Нелинейная динамика и проблемы прогноза // Вестник РАН. 2001. Т. 71. № 3. С. 210–232.
15. *Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузибаев З.* Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // Физика Земли. 1991. № 12. С. 69–72.
16. *Николаев А.В.* Наведенная сейсмичность // Природные опасности России. Сейсмические опасности. М.: Крук, 2000. С. 139–164.
17. *Новик А., Берри Б.* Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975. 417 с.
18. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
19. *Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В., Челидзе Т.Л.* Экспериментальное изучение инициированной неустойчивой подвижкой // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения, М.: ИФЗ РАН, 1993. Т. 11. С. 38–47.
20. *Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., и др.* Возбуждение акустической эмиссии упругими импульсами // Интернет-сайт Геофизической обсерватории “Борок”, http://www.brk.adm.yar.ru/russian/1_512/text/impdor.htm
21. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
22. *Стащенко В.И., Троицкий О.А.* Влияние частоты импульсного тока и внешнего механического напряжения на скорость ползучести кристаллов // Физика металлов и металловедение. 1982. Т. 53. С. 180–184.
23. *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.
24. *Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–164.
25. *Троицкий О.А., Лихтман В.И.* Об анизотропии действия электронного и γ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148. С. 332–334.
26. *Троицкий О.А., Спицын В.И., Стащенко В.И.* Влияние основных параметров тока на величину электронно-пластического эффекта // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256. С. 1134–1137.
27. *Трапезников Ю.А., Богомолов Л.М., Манжииков Б.Ц.* О природе скачкообразных реакций нагруженных образцов на действие микроколебаний // Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. Алма-Ата: Ин-т сейсмологии МОН РК. 1997. С. 167–172.
28. *Тянунина Н.А.* Влияние магнитного поля на дислокационную неупругость и пластичность кристаллов LiF с различными примесями // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 1. С. 95–100.

29. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // УФН. 1968. Т. 96. № 1. С. 38–60.
30. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A. et al. AE Response of Rocks to Electric power Action as Seismic-Electric Effect Manifestation // In: Magnetic, Electric and Electromagnetic Methods in Seismology and Volcanology, Proc. III Int. Workshop (MEEMSV-2002), Moscow, 2002. P. 99–102.
31. 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.
32. Rueda F. On the charge flow during plastic deformation in rock salt // Phil. Mag. 1963. V.8, № 85. P. 29–42.

Dybanic Polarization And Acoustic Emission from Specimens of Geomaterials Under Uniaxial Compression

**A. S. Zakupin, A. V. Aladiev, L. M. Bogomolov, B. V. Borovskii,
P. V. Il'ichev, V. N. Sychev, N. A. Sucheva**

*Science Station, United Institute of High Temperatures, Russian Academy of Sciences (IHTRAS),
7200049, Bishkek, Kirgizia*

It is shown that the acoustic emission from specimens of geomaterials tested for creep under uniaxial compression correlates with the external geomagnetic field. Emission in various rocks and man-made heterogeneous materials is found to respond to the action of electric current pulses at voltages of a few tens to a few hundreds of volts. The steepness of the correlation. We determined the range of compressive stress where the effect can be observed. Different modes of emission response in relation to load magnitude and to parameters of the source of electromagnetic pulses have been identified. We have compared in a qualitative manner our results with those of previous published studies in the electroplastics and magnetoplastics of geomaterials under load and in adjacent topics.