

УДК 548.4, 53.097, 534.221, 550.348

К ВОПРОСУ О СТИМУЛИРОВАНИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

© 2011 г. Б. В. Боровский¹, Л. М. Богомолов², А. С. Закупин¹, В. А. Мубассарова¹

¹Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

Поступила в редакцию 01.12.2010 г.

Изложены результаты исследования влияния на процесс трещинообразования в нагруженных гетерогенных материалах (горных породах) комбинированных воздействий электромагнитных полей, генерируемых двумя независимыми источниками. Интерес к такой постановке экспериментов определяется тем, что в реальных условиях сочетание нескольких полей, являющихся потенциальными триггерами сейсмической активности, — скорее правило, чем исключение. Показано на примерах, что при комбинированном воздействии скрещенных электрического и магнитного полей триггерный эффект прироста активности может происходить при меньшей напряженности электрического поля по сравнению со случаем простого электровоздействия.

ВВЕДЕНИЕ

Идея невзрывного, вибросейсмического либо электромагнитного инициирования слабых сейсмических событий для ускорения разрядки избыточных напряжений в геофизической среде и снижения риска катастрофического землетрясения приобретает все большую популярность. Определенный вклад в решение вопросов, тематически связанных с этим замыслом, вносят эксперименты на образцах, в которых моделируется процесс разрушения нагруженных геоматериалов при дополнительных воздействиях импульсов физических полей, так называемых энерговоздействий, (ЭВ). Влияние физических полей (электроимпульсов, магнитного поля и вибраций) на скорость роста микротрещин в образцах горных пород исследовалось в ряде работ при помощи метода акустической эмиссии (АЭ), обзор приведен в монографии [Соболев, Пономарев 2003]). Был выявлен эффект прироста активности АЭ, стимулированного внешними электромагнитными полями, который может свидетельствовать об их влиянии на скорость трещинообразования [Авагимов и др., 2003; 2006; Bogomolov et al, 2004; Закупин и др., 2006]. В большинстве случаев активность АЭ при откликах на воздействие электроимпульсов увеличивалась не более чем на 15–20%, причем прирост имел кратковременный характер.

Ранее в работах [Аладьев и др., 2003; Авагимов и др., 2006] было продемонстрировано, что совместное воздействие электрических импульсов и вибраций стимулирует АЭ (рост микротрещин) более эффективно по сравнению с каждым видом воздействия в отдельности. Это проявлялось в значительном приращении активности АЭ, [Авагимов и др., 2006], а в некоторых случаях — в сокращении времени задержки [Аладьев и др., 2003]. По

результатам указанных работ электровибровоздействие может считаться одним из способов оптимизации внешних воздействий для контроля режима высвобождения энергии в акустоэмиссионных событиях (при лабораторном моделировании воздействий физических полей на земную кору).

В настоящей работе продолжен анализ условий, при которых отклики активности АЭ с большой амплитудой могут возбуждаться в отсутствие вибраций, под влиянием других физических полей. Для этого проведена специальная серия экспериментов с дополнительным воздействием нескольких источников электромагнитного поля на образцы, испытываемые на ползучесть при постоянном сжатии. Было реализовано два варианта комбинированных воздействий. Первый вариант — воздействие скрещенными электрическим и магнитным полями, при котором поток энергии (вектор Умова—Пойнтинга) направлен внутрь образца. В этом случае энерговыход в единицу объема образца-диэлектрика (гранит и т.п.) существенно больше, чем в предшествующих экспериментах [Bogomolov et al., 2004; Закупин и др., 2006], и такое дополнительное воздействие представляет интерес в связи с вопросом об амплитуде стимулированного прироста активности АЭ. Второй вариант — сочетание нескольких источников электрического поля с различными параметрами импульсов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы материалы экспериментов по нагружению образцов горных пород с дополнительным воздействием электромагнитных полей и вибраций, проведенных в Научной Станции РАН в г. Бишкеке. Образцы испытывались на ползучесть

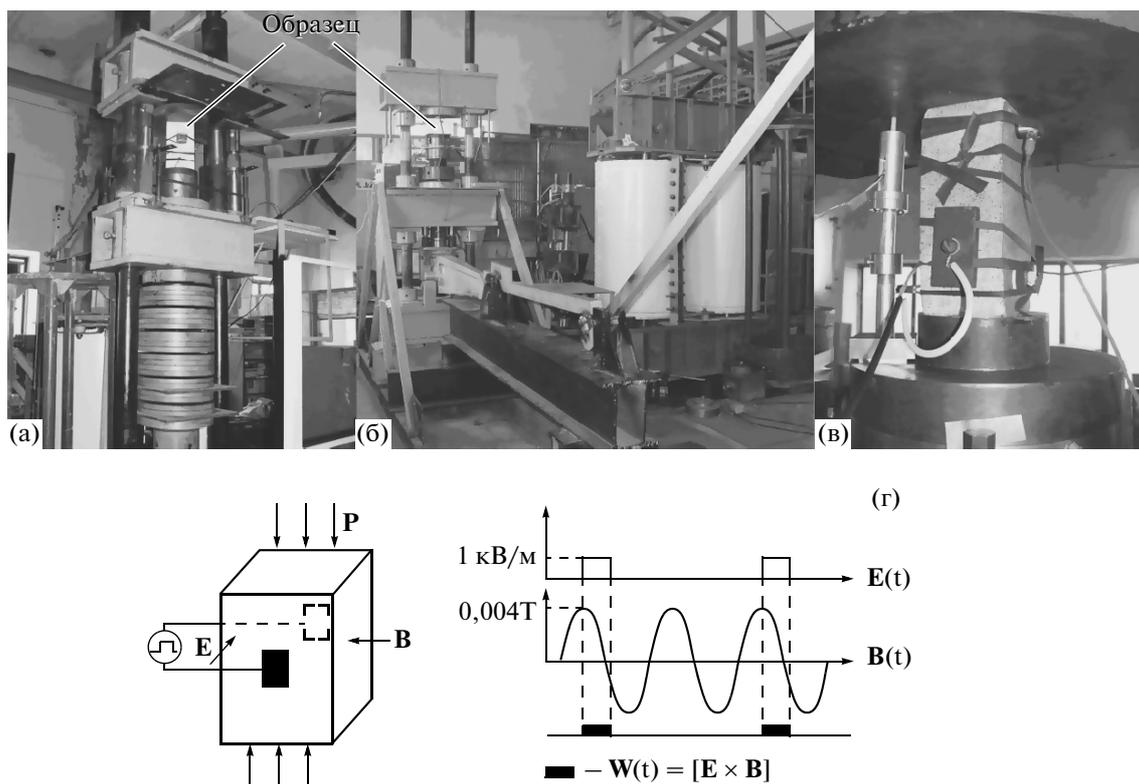


Рис. 1. Общий вид пружинного пресса УДИ (а); рычажно-гравитационного пресса УДИ-Л (б); исследуемого образца с токоподводящими электродами и датчиком АЭ (в); (г) – схема эксперимента с воздействием скрещенных полей: слева – геометрия: направление сжимающего усилия (вертикальное), электрического E - и магнитного B -полей; справа – синхронизация периодических электрических импульсов (Г5-54) с импульсами генератора, нагружающего магнитную катушку.

при постоянной сжатии при помощи пружинного пресса УДИ с максимальным усилием 100 тонн (установка длительных испытаний; ВНИМИ, С-Петербург) и рычажного пресса УДИ-Л (модификации УДИ, усилие сжатия 40 тонн). Фотографии установок и испытываемого образца показаны на рис. 1. Дополнительные воздействия физических полей проводились во время измерительных сеансов, в течение которых образцы находились при фиксированном уровне сжимающей нагрузки. Воздействие электрическими импульсами осуществлялось при подаче на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца, напряжения от генераторов прямоугольных импульсов Г5-54 и Г6-28 с амплитудой до 50 В. Также в качестве источника использовался конденсаторный разрядник с амплитудой импульсного напряжения до 800 В. Воздействие скрещенным электрическим и магнитным полями осуществлялось при включении, наряду с источниками электрического поля, генератора Г3-33, нагруженного на магнитную катушку, расположенную у боковой поверхности образца (рис. 1г). При максимальной мощности генератора Г3-33 амплитуда индукции магнитного поля вдоль оси катушки была около 0.004 Т. Синхронизацию фаз сигналов генератора прямоугольных электриче-

ских импульсов и генератора возбуждения магнитного поля обеспечивало специальное синхронизирующее устройство. Благодаря этому выдерживалось постоянство направления вектора потока энергии (Умова–Пойнтинга) в течение эксперимента с воздействием скрещенных полей. В некоторых экспериментах воздействие скрещенными полями было организовано при подаче на электроды серии импульсов от конденсаторного разрядника при включенном магнитном поле. При импульсном ($E \times B$) воздействии синхронизации разрядов с фазой магнитного поля не проводилась в расчете на то, что примерно в половине случаев разрядов направление электрического и магнитного поля будет соответствовать потоку энергии в образец. При этом предполагалось, что отсутствие вклада разрядов с другим направлением E или B может компенсироваться за счет большой амплитуды поля E при “благоприятных” для эффекта импульсах.

Сигналы акустической эмиссии регистрировались широкополосными пьезодатчиками SE2MEG-P (фирмы DECI, США), выходное напряжение которых можно считать пропорциональным амплитуде колебаний давления в частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц. Регистрация проводи-

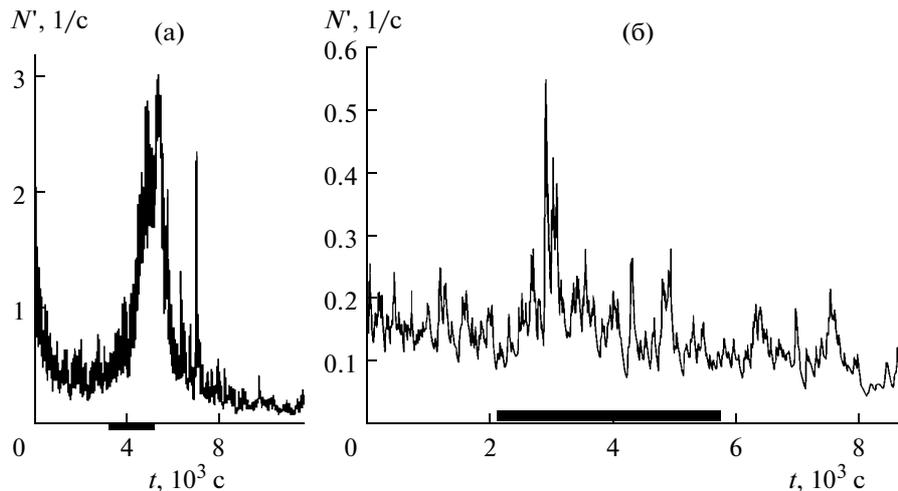


Рис. 2. Графики активности АЭ образцов габбро (а) при нагрузке около 95% от разрушающей и гранита Уэстерли (б) при уровне нагрузки 85%. Интервал воздействия импульсов генератора Г5-54 обозначен темной полосой. Параметры импульсов составляли: в случае (а) — амплитуда 55 В, длительность 70 мкс, частота—2 кГц; в случае (б) — амплитуда 50 В, длительность 30 мкс, частота — 2 кГц.

лась с записью волновых форм сигналов. Аппаратура работала в ждущем режиме, запуск осуществлялся по превышению сигнала на выходе измерительного канала АЭ заданного порогового значения. Для исключения ложных срабатываний уровень дискриминации выбирался в 1.5 выше, чем среднеквадратичный уровень входного шума канала. Сигналы оцифровывались быстродействующими АЦП, выполненными в стандарте САМАС, и записывались на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме. Подробное описание постановки эксперимента и методики широкополосных измерений АЭ приведено в [Закупин и др., 2006].

В качестве исходных данных для анализа принимались записи волновых форм сигналов АЭ, зарегистрированных в сеансах с дополнительными воздействиями. По этим данным для каждого сигнала рассчитывались основные параметры, несущие информацию об источниках: амплитуда, длительность огибающей и энергия сигналов. Далее строились временные зависимости этих параметров. По графикам активности выделялись интервалы с нарушением спадающего или квазистационарного тренда. В случаях, когда вариации следовали после начала внешних воздействий, они считались откликами. Для интервалов времени, в течение которых проявили себя отклики активности АЭ, рассматривались особенности временных зависимостей других параметров АЭ (селективной активности, энергии и длительности сигналов АЭ). Оценки изменений этих параметров носят предварительный характер, и приводятся как дополнение к материалу о вариациях активности.

Поясним на примере данных для образца габбро переход от начального временного интервала, играющего роль предыстории, к представляющему наи-

больший интерес интервалу с откликом (рис. 2). На начальном интервале графика (рис. 2а; до 400 с) выделяются два участка: первый, крутоспадающий, как раз связан с переходными процессами после пригрузки, а второй характеризуется сравнительно плавной зависимостью усредненной активности. Для интерпретации хода активности в самом начале измерений после пригрузки естественно провести аналогию с афтершоковой активностью, описываемой законом Омори. В обоих случаях эти процессы носят затухающий характер. В монографии [Соболев, Пономарев, 2003] обращено внимание на сходство временных зависимостей убывания активности АЭ при релаксации после пригрузки или удара и спада активности афтершоков по гиперболическому закону. Аппроксимация временных зависимостей АЭ на начальных интервалах подтвердила, что они достаточно точно следуют гиперболическому закону спада $N'(t) = a/(r + t)^n$, где коэффициенты a и n определяют спадающий тренд на больших временах, а параметр r — ограниченность значений активности в начальные моменты. Если при анализе кривых активности, полученных при не слишком высоких нагрузках (менее 90% от максимума для данного образца), устранять из рассмотрения первый час наблюдения, то для усредненной активности временная зависимость может быть сведена к линейному тренду или просто к квазистационарному уровню. Как демонстрирует рис. 2б, графики активности АЭ описывают флуктуации и по завершении переходных процессов после пригрузки. Величина среднеквадратичного отклонения от среднего уровня и характерная длительность флуктуаций определяют порог обнаружения вариаций активности, которые можно связывать с внешними воздействиями. Представленные на рис. 2а, 2б результаты из работ [Заку-

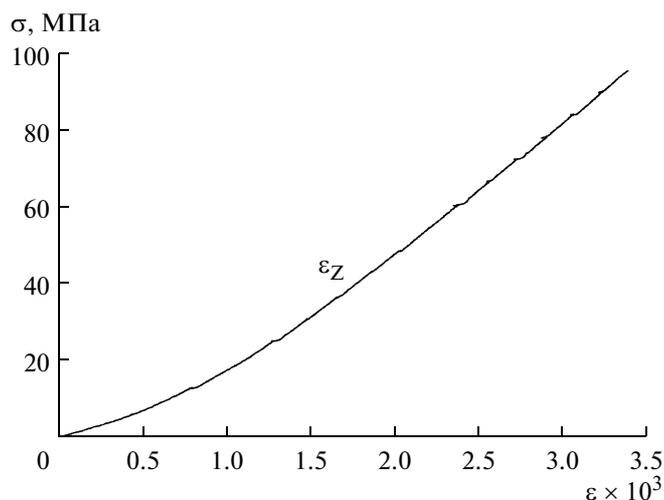


Рис. 3. Нагрузочные кривые для образца гранита Уэстерли: ϵ_z – продольная деформация, σ – напряжение сжатия.

пин и др., 2006; Bogomolov et al., 2004; Ильичев и др., 2006] могут служить примером такой вариации – откликом на воздействие электрических импульсов, – существенно превосходящей среднеквадратичное отклонение от уровня фона и длительность флуктуаций.

Знание временной зависимости усредненной активности АЭ в случае отсутствия внешних воздействий позволяет распознать вариации, являющиеся откликами на дополнительные внешние воздействия, по небольшой статистике экспериментов. В отдельных случаях значимым может оказаться результат, полученный даже для одного образца референтного материала с априорно известными свойствами.

Для исследования вопроса о пределах самоподобия в процессе деструкции среды вообще и, в частности, при откликах на ЭВ для потока акустоэмиссионных сигналов проводилась сортировка слабых и сильных событий АЭ с помощью программы амплитудной дискриминации, причем порог выбирался с учетом особенностей эксперимента (общего количества событий, реального значения порога дискриминатора и т.п.) По полученным временным распределениям сигналов АЭ в определенных полосах строились графики активности относительно слабых N'_1 и сильных событий N'_2 или, кратко, селективные активности. Зависимости активностей АЭ с сепарацией по амплитудам характеризуют важное свойство откликов на внешние воздействия – происходит или нет сокращение числа сильных событий при возрастании числа слабых. На ранее анализированных графиках общей активности АЭ [Закупин и др., 2006] эта деталь была неразличима.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ниже представлены результаты регистрации акустической эмиссии образцов гранита Уэстерли (США) при разных уровнях сжимающего напряжения. Материал был предоставлен координатором совместного проекта НС РАН в г. Бишкеке и Университета Брауна, Провиденс, США, осуществленного в 2000–2002 гг. при поддержке фонда АФГИР (CRDF). Образцы, имеющие форму прямоугольных параллелепипедов, были изготовлены из блоков специально для экспериментов на установках УДИ и УДИ-Л. Хотя механические свойства гранита Уэстерли хорошо известны (он часто использовался как референтный материал [Lockner et al., 1992; Moore, Lockner, 1995; Bogomolov, Zakupin, 2008]), но ввиду возможного остаточного влияния обработки для одного из образцов была получена σ – ϵ характеристика (рис. 3). При воздействиях физических полей изменения деформации не были обнаружены, по-видимому, из-за ограниченной разрешающей способности (~ 1 мкм).

На рис. 4 представлены результаты обработки данных АЭ образца гранита Уэстерли, находящегося под нагрузкой на уровне 45% от разрушения. Магнитное поле (черная линия) возбуждалось в течение 9360 с (2 ч 36 мин). В этот период время от времени проводились конденсаторные разряды с амплитудой напряжения до 800 В (стрелки), подаваемого на электроды. На данном уровне главного напряжения комбинированное воздействие не оказало значительного влияния на активность АЭ. Действительно, рис. 4а демонстрирует лишь спад активности АЭ от момента начала регистрации сразу после загрузки. Тренд графика на рис. 4а аппроксимируется гиперболическим законом. А вот на графиках длительности и энергии (рис. 4в, 4г) прослеживаются изменения: через 2400 секунд после включения магнитного поля средний уровень длительности и энергии сигналов АЭ уменьшился соответственно в 1.5 и 4.5 раза. Последующее включение электроимпульсов, при котором реализовано воздействие скрещенными полями, привело к тому, что уменьшение этих величин сменилось на возрастание (средняя энергия) и квазистационарный уровень (длительность огибающей).

На графиках селективных активностей (рис. 4б) в течение периода воздействия магнитного поля и электроимпульсов наблюдается небольшое “рассогласование”: попеременное увеличение количества то сильных (серая линия), то слабых (черная пунктирная линия) событий. Рассмотрим ход графиков более детально. При воздействии только магнитным полем происходит, с задержкой, прирост активности слабых событий в противофазе с изменением активности сильных. После подачи электроимпульсов в течение некоторого времени усредненные селективные активности изменяются синхронно. Вслед за этим имеет место несколько эпизодов незначитель-

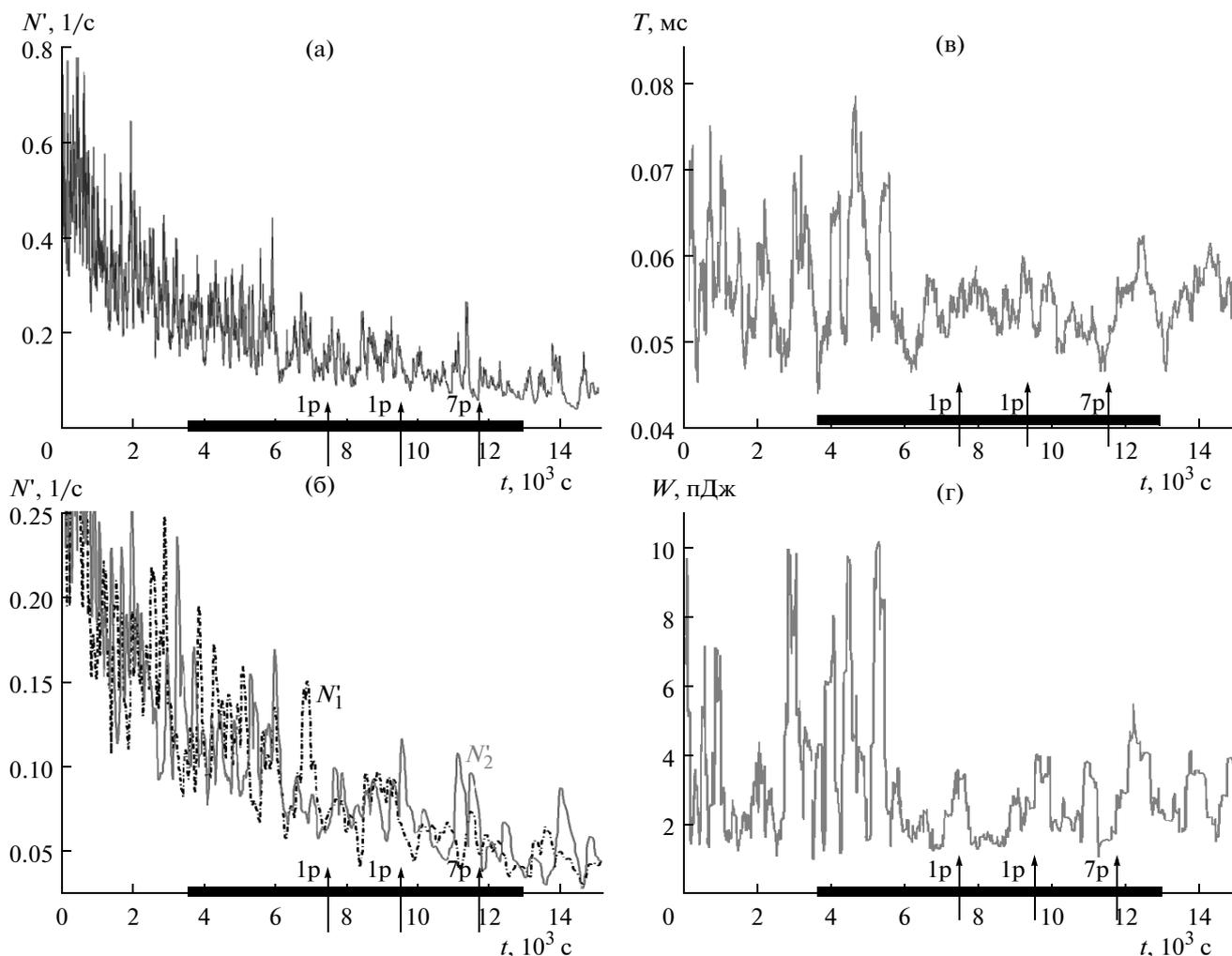


Рис. 4. Временные зависимости параметров потока сигналов АЭ образца гранита Уэстерли, зарегистрированных при нагрузке 45% от разрушения: общая (обычная) активность (а); активность с селекцией на группы сильных, N_2' (серая линия), и слабых, N_1' (черная пунктирная линия) событий (б); длительность огибающей сигналов АЭ (в); энергии сигналов АЭ (г). Стрелки – моменты подачи электрических импульсов 800 В от конденсаторного устройства. Первые две стрелки (7440 с, 9540 с) – единичные импульсы, третья стрелка (11760 с) – серия из семи разрядов в течение 60 с. Черная полоса – период возбуждения магнитного поля генератором ГЗ-33 и катушкой, частота 4кГц.

ного рассогласования хода графиков, в течение 1850 секунд.

На рис. 5 приведены зависимости параметров потока событий АЭ в эксперименте, когда главная нагрузка составляла около 65% от разрушения. На этой ступени нагружения проведено воздействие прямоугольными импульсами генератора Г6-28 с амплитудой напряжения 20 В, включенного в течение 9110 с, а также серией 800 вольтовых импульсов конденсаторного разрядника. Общая активность АЭ (рис. 5а) после пригрузки снижается до уровня, который можно рассматривать как фоновый. Через 1700 с начала подачи импульсов Г6-28 происходит краткий прирост активности. После подачи первого 800-вольтового импульса (6900 с) прирост активности был более длительным (примерно 350 с). Затем

на 10620 и на 11220 секунде соответственно на образец были поданы серии из трех 800 В разрядов, каждая в течение 25 с.

Изменения длительности и энергии сигналов (рис. 5в, 5г соответственно) в течение сеанса с низковольтными импульсами до первого 800 В разряда заключаются в постепенном уменьшении длительности и увеличении энергии. При подаче первого импульса конденсаторного разрядника значение энергии сигналов АЭ увеличивается в 4 раза, а на графике длительности наблюдается сначала небольшой прирост, а потом резкий спад. Далее на графиках увеличение длительности сигналов сопровождается уменьшением их энергии. После второго импульса конденсаторного разрядника длительность и энергия событий изменяются “синфазно”, а следом

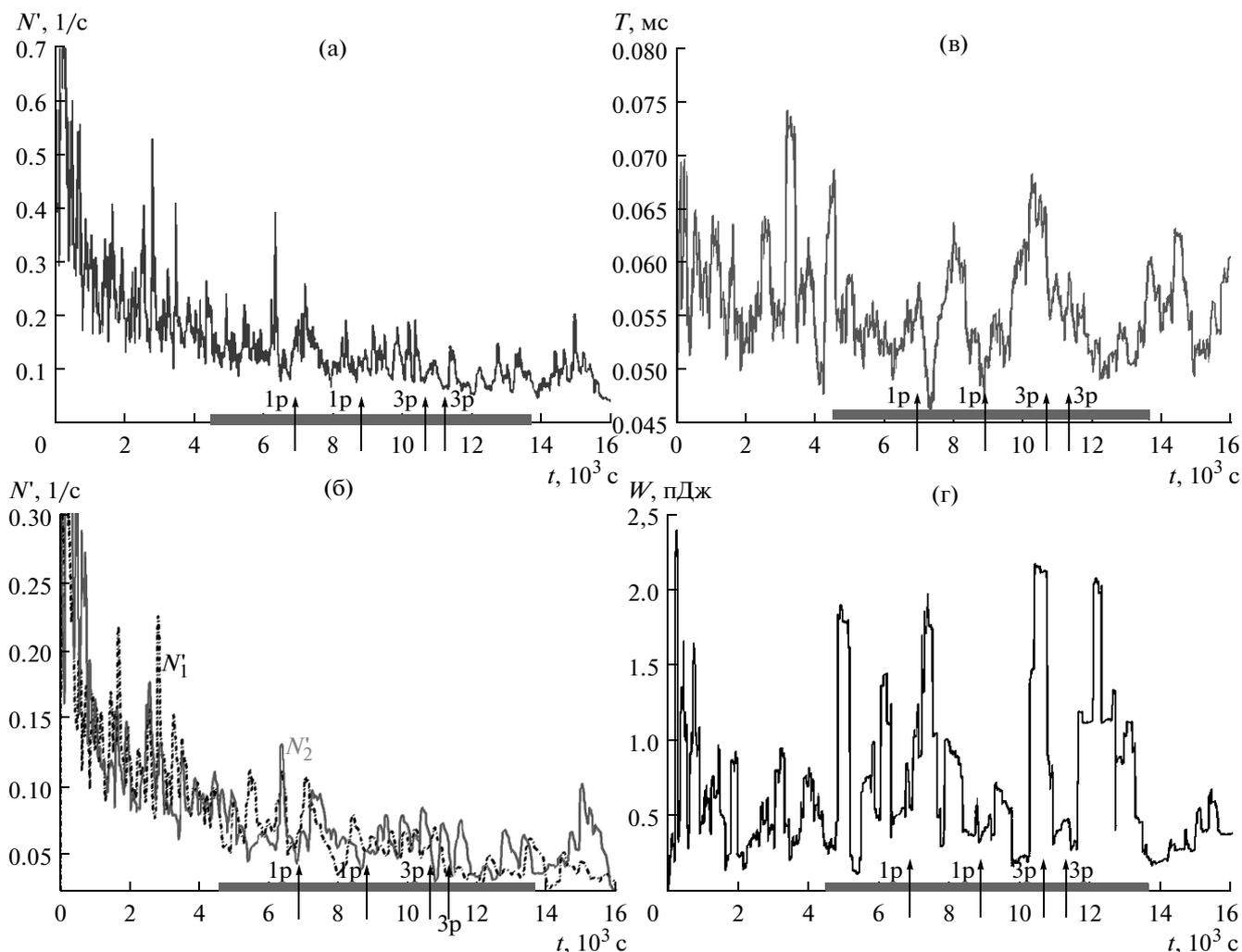


Рис. 5. Данные акустической эмиссии образца гранита Уэстерли при нагрузке 65 % от разрушения: (а) – активность по всем зарегистрированным сигналам АЭ; (б) – селективные активности сильных (серая линия) и слабых (черная пунктирная линия) событий; (в) – длительность сигналов АЭ; (г) – энергия сигналов АЭ. Источники электрических импульсов – генератор Г6-28 (серая линия) и конденсаторное разрядное устройство (стрелки), амплитуда 800 В. Первые две стрелки (6900 с, 8820 с) – единичные разряды, вторые две стрелки (10620 с, 11220 с) – серии из 3-х электроимпульсов, в течение 25 с. Параметры применяемых двуполярных импульсов Г6-28: амплитуда 20В; частота 2 кГц.

за последней серией разрядов вновь наблюдаются противофазные вариации этих параметров. Зависимость селективных активностей (рис. 5б) показывает, что с момента воздействия импульсами 20 В активность сильных событий уменьшается при незначительном росте слабых. А прирост активности на 6200 с обеспечивается в большей степени сигналами относительно больших амплитуд. Увеличение общей активности, стимулированное первым разрядом (6900 с, рис. 5а), обусловлено активацией слабых событий АЭ. По графикам на рис. 5б, можно заметить, что после воздействий разрядами (800 В) усредненные селективные активности изменяются практически синфазно.

На следующей ступени нагрузки (70% от разрушения) произошел значительный рост фоновой ак-

тивности АЭ, примерно в 6 раз (рис. 6а). При этом отклик на комбинированное воздействие магнитным полем и 800-вольтовыми разрядами наступил со значительной задержкой во времени – 2040 с (рис. 6а). Стоит отметить, что отклики на серию из трех (6600 с) разрядов и серию из пяти (7800 с) разрядов, хотя и различимы на фоновом уровне активности, но невелики по амплитуде прироста, и поэтому можно усмотреть в наступающем с задержкой крупном всплеске активности именно реакцию среды на комбинированное воздействие. Графики на рис. 6в, 6г указывают, что энергия и длительность сигналов АЭ меняются “синфазно”, и в период комбинированного воздействия наблюдается возрастание этих параметров. При рассмотрении селективных активностей (рис. 6б) можно отметить сходство времен-

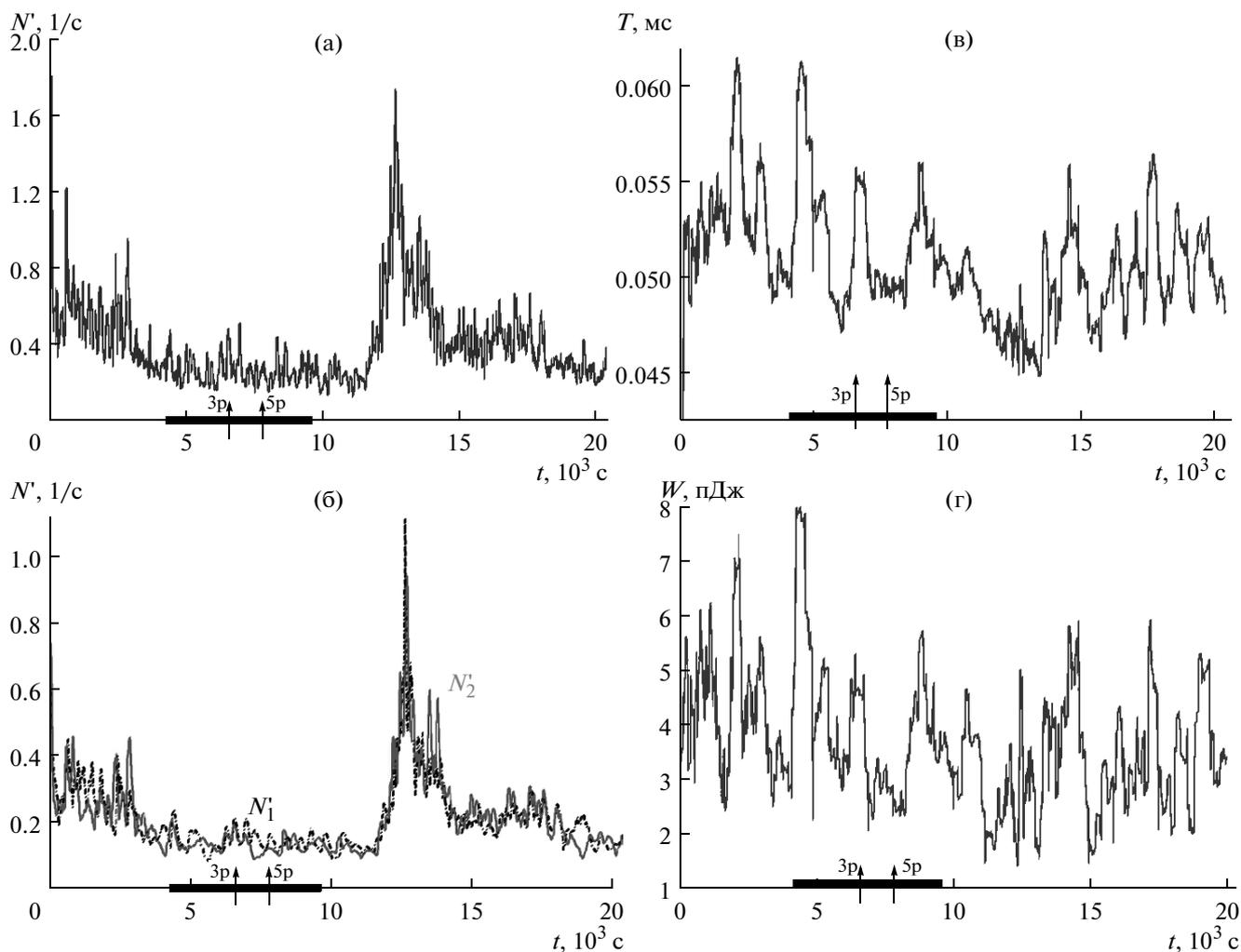


Рис. 6. Данные акустической эмиссии образца гранита Уэстерли при нагрузке 70 % от разрушения: (а) – активность по всем зарегистрированным сигналам АЭ; (б) – селективные активности сильных (серая линия) и слабых (черная пунктирная линия) событий; (в) – длительность сигналов АЭ; (г) – энергия сигналов АЭ. Черная полоса – период возбуждения магнитного поля генератором ГЗ-33 и катушкой, частота 8 кГц. Стрелки – моменты подачи электрических импульсов 800 В от конденсаторного устройства: первая стрелка (6600 с) – серия из 3-х разрядов в течение 25 с, вторая стрелка (7800 с) – серия из 5 разрядов в течение 40 с.

ных зависимостей активности сильных и слабых событий.

На рис. 7 представлены временные зависимости параметров АЭ при нагрузке 80% от разрушения, в ходе эксперимента проводились воздействия электроимпульсами 20 В и 800 В и магнитным полем. Магнитное поле было включено через 1200 с после пригрузки и действовало в течение 10 200 с. Во время действия магнитного поля на образец были поданы одиночные электрические импульсы 800 В конденсаторного разрядника. Затем, через 3000 с вслед за последним разрядом на образец подавались двадцативольтовые прямоугольные импульсы генератора Гб-28, причем воздействие этими импульсами продолжалось в течение часа после выключения магнитного поля. Комбинированное воздействие магнитного поля и 800 В импульсов в период, когда

происходил релаксационный спад активности после пригрузки, не вызвало различного отклика. Активация наступила после воздействия скрещенными магнитным и электрическим полями, что отражено на графике активности на рис. 7а. В период увеличения активности (11800–12200 с) по графикам длительности и энергии сигналов АЭ (рис. 7в, 7г) прослеживается также прирост значений, но эти изменения по амплитуде не превышают пиковые значения в другие периоды. Перед приростом активности, в течение 10600–11600 с графики длительности и энергии описывают спадающий тренд. Такой ход графиков отмечается только на указанном интервале. В данном эксперименте, как и на предыдущей ступени нагрузки, изменения селективных активностей происходят преимущественно синфазно (рис. 7б). Заметное рассогласование хода графика

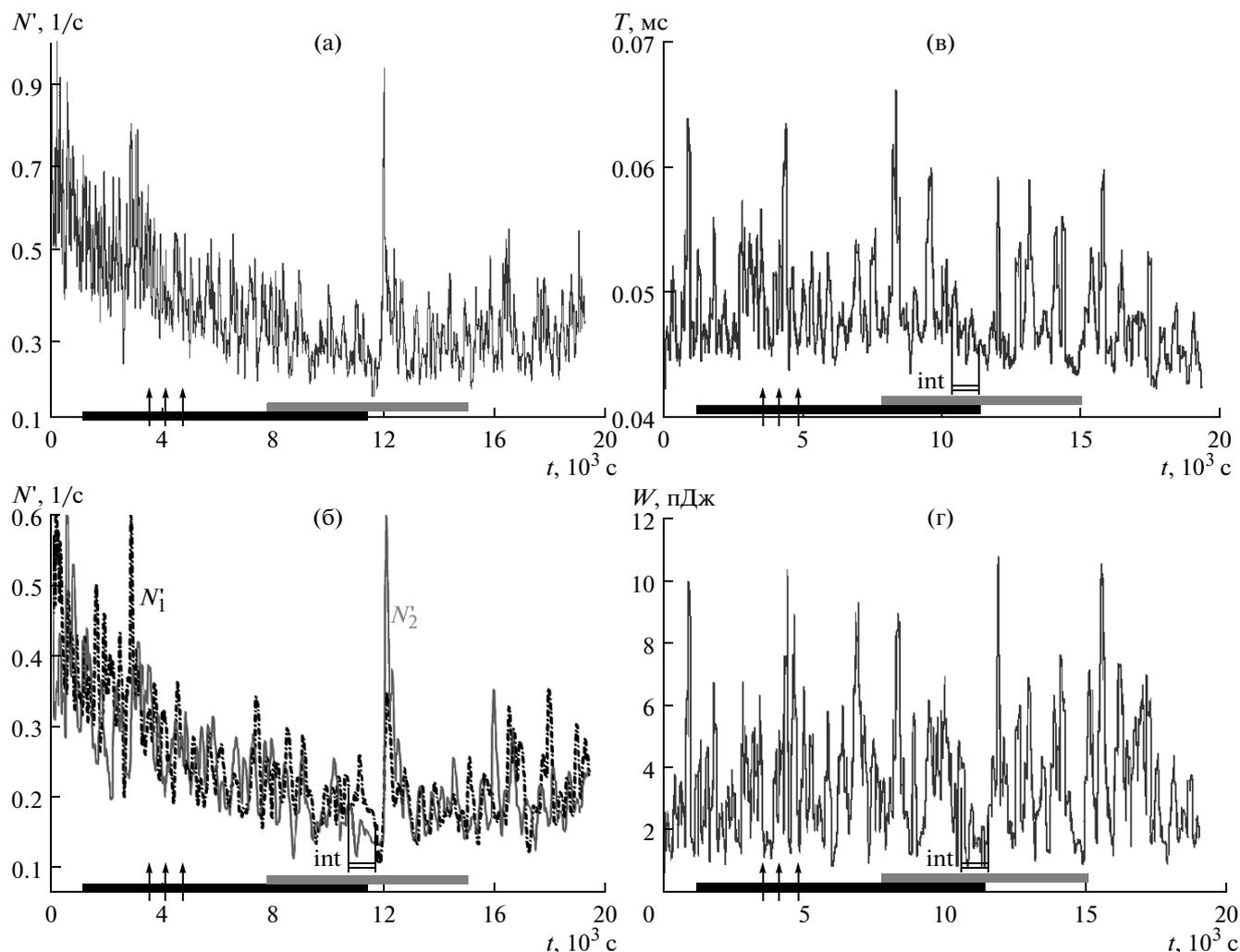


Рис. 7. Временные зависимости параметров потока сигналов АЭ образца гранита Уэстерли, зарегистрированных при нагрузке 80% от разрушения: общая (обычная) активность (а); активность с селекцией на группы сильных, N'_2 (серая линия), и слабых, N'_1 (черная пунктирная линия) событий (б); длительность огибающей сигналов АЭ (в); энергии сигналов АЭ (г). Стрелки – моменты подачи единичных электрических импульсов 800 В от конденсаторного устройства. Параметры генератора электрических импульсов Г6-28 (серая полоса снизу – период действия) частота 2.9 кГц, амплитуда 20В. Черная полоса снизу – период возбуждения магнитного поля с частотой 4 кГц.

ков имеет место в том же интервале перед нарастанием активности (10600–11600 с), причем увеличивается активность слабых событий N'_1 , при некотором уменьшении активности сильных N'_2 .

В эксперименте при нагрузке 85% от разрушения первым было проведено тестовое механическое воздействие в форме небольшой добавки осевого сжатия (порядка 1–2% от главной нагрузки). Через 1500 с после тестовой пригрузки осуществлено воздействие на материал образца скрещенными электрическим и магнитным полями, причем источники этих полей включались и выключались одновременно. На рис. 8, где представлены временные зависимости параметров АЭ, стрелкой $\uparrow P$ указано время механического воздействия, а серой полосой – интервал ($E \times B$) воздействия. Как демонстрирует

рис. 8а, за резким всплеском активности после тестовой пригрузки следует ее спад к новому квазистационарному уровню, соответствующему измененному значению нагрузки. Максимальное значение активности (амплитуда отклика) – около 8.5 с^{-1} , а длительность интервала со всплеском активности при механическом воздействии была менее 150 с.

При воздействии скрещенными полями активность АЭ возросла примерно в 3 раза за время менее минуты от момента включения источников. В отличие от описанных выше случаев (рис. 4–рис. 7) отклик был длительным (1765 с), и имело место последствие – возросший уровень активности АЭ сохранялся и после выключения внешних полей. Для этого отклика максимальное значение актив-

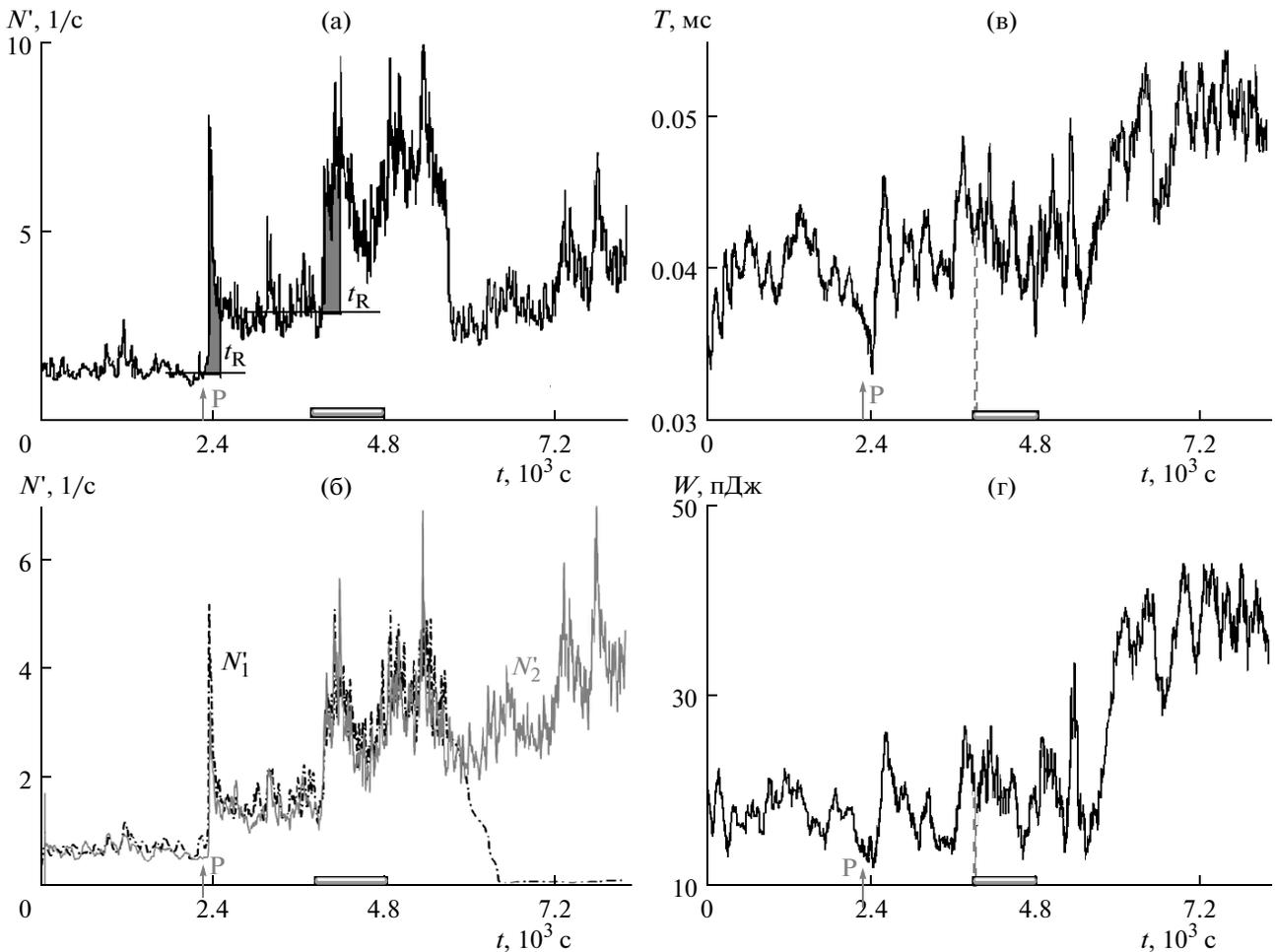


Рис. 8. Временные зависимости параметров сигналов АЭ того же образца при нагрузке 85% от разрушения в эксперименте с тестовой пригрузкой (P) и воздействием скрещенных полей (серая линия): (а) – активность всех зарегистрированных в эксперименте сигналов; (б) – активность с селекцией на группы сильных, N_2' (серая линия), и слабых, N_1' (черная пунктирная линия) событий; (в) – длительность огибающей сигналов АЭ; (г) – энергии сигналов АЭ. Параметры электрических импульсов Г5-54: амплитуда 50 В, частота 3 кГц, длительность 50 мкс, частота возбуждаемого магнитного поля 6 кГц.

ности ($\sim 9.7 \text{ c}^{-1}$) оказалось больше, чем для отклика на механическое воздействие.

Для сравнения откликов АЭ на тестовую пригрузку и на воздействие скрещенных полей помимо длительности вариации и максимальной активности можно рассматривать такой параметр, как число инициированных событий. Для оценки этого параметра стационарный уровень активности перед воздействием, N_0' экстраполировался на интервал времени с возросшей активностью, t_R , и из всего числа событий, произошедших за время t_R , вычиталось ожидаемое накопление, т.е. произведение $N_0' t_R$. На рис. 8а дано графическое представление рассматриваемого параметра – площадь между кривой $N'(t)$ и линией экстраполяции $N'(t) = N_0'$. При механическом воздействии в течение времени t_R (рис. 8а) было инициировано 280 ± 2 события. При воздействии

скрещенных полей прирост количества событий (сверх ожидаемого накопления) за такой же промежуток времени $t_R \approx 150 \text{ c}$, отсчитываемый от начала отклика, оценивается как 600 ± 10 . Точность оценки ограничена примерно 0.5 секундной неопределенностью времени включения генератора. Отношение количества инициированных событий при $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ воздействию к аналогичному показателю при механическом нагружении получилось порядка 2. Если взять полные времена откликов, то это число увеличится в несколько раз, так как отклик на воздействие скрещенных полей значительно продолжительней, чем на тестовую пригрузку. В связи с этим результатом стоит отметить, что вклад энергии в образец при тестовой пригрузке более чем в 20 раз превосходит энерговклад при воздействии скрещенных полей (согласно расчетов [Bogomolov, Zakupin, 2008; Zakupin et al., 2009]).

Изменения параметров АЭ при внешних воздействиях (пояснения в тексте)

Вид воздействий, источники	Уровень нагрузки, рисунок	Отклик активн.	Изменение длит., T	Изменение энергии, W	Примеч.
($E \times B$) воздействие: Магнитное поле и единичные разряды конденсатора (800 В)	45%, рис. 4	–	+	+	Эпизоды рассогласования селективных активностей
Биелектрическое возд.: Периодические имп.(20 В) и единичные разряды (800 В)	65%, рис. 5	+	+	+	
($E \times B$) воздействие: Магнитное поле и единичные разряды конденсатора (800 В)	70%, рис. 6	+	–	–	Длительная задержка отклика
($E \times B$) воздействие: Магнитное поле и разряды конденсатора (800 В)	80%, рис. 7	–	–	–	
($E \times B$) воздействие: Магнитное поле и периодич. имп. (20 В)	80%, рис. 7	C+	+	+	Рассогласование селективных активностей перед откликом
Механическое воздействие	85%, рис. 8	C+	+	+	
($E \times B$) воздействие: Магнитное поле и периодич. имп. (20 В)	85%, рис. 8	C+	+	+	Рассогласование после отклика

На рис. 8в, 8г представлены зависимости длительности и энергии сигналов АЭ в эксперименте с механическим и ($E \times B$) воздействием. Обращает на себя внимание однотипное изменение хода графиков после увеличения сжимающей нагрузки и в начальный период воздействия скрещенных полей. В обоих случаях значения длительности и энергии сигналов АЭ возрастают (как показано на рис. 8в, 8г). Тенденция изменения энергии и длительности сигналов после ($E \times B$) воздействия согласуется с распределением активности сигналов по амплитуде (рис. 8б).

Как видно из графиков, на начальном этапе до тестовой пригрузки, после нее и во время воздействия скрещенными электрическим и магнитным полями активности слабых и сильных событий изменяются “синфазно”. Другая картина наблюдается в интервале после 6200 с, когда общая активность (рис. 8а) начинает расти: активность слабых событий падает практически до нуля, а активность сильных событий не только остается на прежнем уровне, но и увеличивается до 8 событий в секунду.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты, представленные на рис. 4–рис. 8, важно подчеркнуть наличие откликов активности АЭ при сравнительно низкой амплитуде электрической напряженности (20 В импульсы генератора Г6-28). В предыдущих экспериментах с воздействием одного только элект-

рического поля [Закупин и др., 2006; Bogomolov et al., 2004] не было обнаружено откликов АЭ образцов гранитов при тех же параметрах электроимпульсов и в том же диапазоне сжимающих нагрузок. Для сравнения различных комбинированных воздействий в таблице 1 собраны сведения о наличии (+) либо отсутствии (–) вариаций параметров АЭ в рассмотренных выше экспериментах. Наличие значимых вариаций на графиках длительности и энергии определялось по тем же признакам, что и для активности (см. раздел “Методика исследования”). Вариации, подобные отклику активности на механическое воздействие (рис. 8а) или превосходящие его по амплитуде и длительности, считались существенными или высокозначимыми (C+). Отклик, который произошел с большой задержкой (примерно 6000 с после начала комбинированного воздействия, рис. 6), не отнесен к высокозначимым. В это время источники полей были уже отключены, и отклик вряд ли позволяет однозначно оценивать внешнее воздействие (альтернативная гипотеза может связывать его с прекращением воздействия).

Сводка результатов в таблице показывает, что среди использованных комбинированных воздействий только подача стационарных электроимпульсов, синхронизированных с переменным магнитным полем, оказала существенное влияние на прирост активности АЭ.

Обнаружение прироста активности АЭ при воздействии скрещенных электрического и магнитного полей (синхронизированных по фазе и направлен-

ных ортогонально друг другу), который превышает по амплитуде отклик на небольшую механическую пригрузку (1–2% от напряжения одноосного сжатия) можно считать основным результатом проведенных экспериментов. При откликах на ($E \times B$) воздействия изменения активности слабых и сильных событий происходят пропорционально друг другу (синфазно). Но требуются дополнительные исследования для проверки, имеет ли место такой же эффект скрещенных полей для других значений нагрузки и других материалов образцов (помимо описанных в [Zakupin et al., 2009] и в данной работе). Авторы намерены посвятить этому следующую работу. В завершение стоит отметить, что величина прироста активности АЭ при отклике на внешние воздействия, включая случай скрещенных полей, зависит не только от характеристик источников, но и от состояния материала испытываемых образцов. В предыдущих экспериментах [Закупин и др., 2006; Bogomolov et al., 2004] при воздействии одних только электрических импульсов в нескольких случаях регистрировались отклики с существенным (в несколько раз и более) приростом активности АЭ. Примером может быть приведенный на рис. 2 результат – активация АЭ образцов габбро и гранита под влиянием электроимпульсов с амплитудой ~50 В, т.е. выше, чем в случае рис. 7, рис. 8. Этот пример свидетельствует, что для формирования отклика АЭ фактор комбинированного воздействия электроимпульсов различной амплитуды важен в меньшей степени, чем напряженность электрического поля.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря поддержке по грантам РФФИ № 10-05-00231-а, 09-05-00687а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н.* О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энерговоздействии // *Физика Земли*. 2006. № 10. С. 36–42.
- 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.
- Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В.* и др. Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть при энерговоздействиях физическими полями. Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2003. С. 168–172.
- Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М.* и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 6. С. 22–33.
- Ильичев П.В., Закупина Г.С., Мубассарова В.А.* и др. Локация источников АЭ в экспериментах по моделированию энерговоздействий на геологическую среду как проблема информационных технологий. Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2006. Т. 6. С. 128–136.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. С. 270.
- Bogomolov L., Zakupin A.* Do electromagnetic pulses induce the relaxation or activation of microcracking rate in loaded rocks? (acoustic emission based study) // *Solid State Phenomena*. 2008. V. 137. P. 199–208.
- 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.
- 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.
- Moore D., Lockner D.* The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite // *J. Struct. Geol.* 1995. V. 17. P. 95–114.
- Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Sycheva N.A.* The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded rock specimens. *Materials Science and Engineering, A*. 2009. V. 521–522. P. 401–404.