

УДК 539.3, 550.34, 620.17

О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов

Л.М. Богомолов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 693022, Россия

Работа посвящена вопросу о влиянии импульсных электромагнитных полей (по сути, одного из экзогенных факторов) на режим накопления микро- и мезодефектов в образцах горных пород, находящихся в состоянии одноосного сжатия при постоянной нагрузке. Рассматривается случай относительно слабых полей, представляющий интерес в связи с проблемой наведенной и триггерной сейсмичности. Изложены новые результаты о вариациях активности акустической эмиссии образцов геоматериалов под влиянием электрических импульсов, отражающих кратковременный прирост числа актов возникновения и удлинения микротрещин. Подход предшествующих работ, где был обнаружен этот эффект, дополнен анализом селективных активностей (для выборок низко- и крупноамплитудных сигналов), а также энергетической эффективности внешнего триггерного воздействия. Предложена модель, связывающая механизм воздействия электроимпульсов на скорость трещинообразования в нагруженных образцах геоматериалов с первичным возбуждением в них низкочастотных вибраций вследствие нелинейного резонансного взаимодействия электромагнитных волн, аналогичного эффекту вынужденного рассеяния Бриллюэна. Модель устанавливает соотношение между амплитудой электрических импульсов и параметрами материала образца, необходимое для появления акустоэмиссионного отклика при постоянной нагрузке и отсутствии макроразрушения. Модель объясняет нетривиальный факт сходства откликов образцов со значительно отличающимися свойствами.

Ключевые слова: образцы геоматериалов, одноосное сжатие, микротрещины, акустическая эмиссия, отклик активности акустической эмиссии, электромагнитное поле, импульсное воздействие, вибрации, триггерное влияние

Electromagnetic effect on microcrack kinetics and electro-induced variations in acoustic emission of rocks

L.M. Bogomolov

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia

The paper studies the effect of pulsed electromagnetic fields (as one of the exogenous factors) on the mode of micro- and mesodefect accumulation in rock samples under constant uniaxial compression. The case under consideration is relatively weak fields that are of interest in induced and triggered seismicity. Fresh data are reported on the variation in acoustic emission of geomaterials exposed to electrical pulses that reflects the short-term increment in events of microcrack nucleation and elongation. The approach used in the previous works in which the effect was revealed is supplemented with analysis of selective activities (low- and high-amplitude signal samples), and energy efficiency of external triggering. A model is proposed for the effect of electrical pulses on the cracking rate in loaded geomaterials with primary low-frequency vibrations excited by nonlinear resonant electromagnetic interactions similar to stimulated Brillouin scattering. The model specifies a relation between the electrical pulse amplitude and the material parameters necessary for the acoustic-emission response under constant load with no macrofracture. The model explains the nontrivial similarity between the responses of specimens with greatly differing properties.

Keywords: geomaterial samples, uniaxial compression, microcracks, acoustic emission, acoustic emission response, electromagnetic field, pulse loading, vibrations, trigger effect

1. Введение

В настоящее время влияние физических полей на темп накопления дефектов в нагруженной геологической среде (что проявляется в зависимости от характер-

ных масштабов сейсмической, сейсмоакустической или акустоэмиссионной активности) доказано как многочисленными геофизическими наблюдениями, так и лабораторными экспериментами [1–3]. В лабораторных

экспериментах был выявлен эффект прироста активности акустической эмиссии, стимулированного внешними электромагнитными полями или вибрациями [1, 4–8], который свидетельствует о влиянии нестационарных факторов среды на трещинообразование. Активность акустической эмиссии оказалась весьма информативным параметром, отражающим как сам процесс накопления структурных дефектов в нагруженной среде, так и вариации его скорости под влиянием внешних полей. Именно по вариациям активности прослеживается аналогия между эффектом акустоэмиссионного отклика на импульсное воздействие физических полей и наведенной сейсмичности (в том числе инициированной электромагнитными импульсами естественной [9] и техногенной [10] природы). Отметим, что влияние нестационарных физических полей (так называемых энергетических воздействий) на разных масштабах — от лабораторного при характерной длине 1–10 см до натурального (километрового) — является взаимодополняющим [7, 10]. Сходство реакции геосреды на разных масштабах обусловлено, по всей видимости, тем, что во всех случаях эмиссионные события, возникающие вследствие ее деструкции при умеренных нагрузках, когда макроразрушение маловероятно, отражают процесс «аккомодации» неоднородного материала к данной нагрузке [11]. Важную роль в этом процессе на всех масштабах играет мезоструктура (текстуры разрушения и полосы локализации пластической деформации в случае образцов, блоковая структура с системой разделяющих блоки разломов и трещин в земной коре [12]). Для наиболее крупного масштаба (случай геодинамики и сейсмологии) важно отметить, что с наличием блочно-иерархической структуры связаны саморазвитие деформационных процессов в земной коре и, в частности, возможность концентрации упругой энергии на неоднородностях, т.е. энергонасыщенность структур земной коры [13–15].

До последнего времени считалось, что для образцов, испытываемых на прессах, имеется лучшее понимание закономерностей электромагнитного влияния на скорость трещинообразования по сравнению со случаем натуральных явлений. Но даже для лабораторного масштаба вопрос о механизме (или механизмах) возбуждения откликов активности эмиссионных сигналов (индикаторов деструкции) на электромагнитное воздействие пока не выяснен полностью. В недавних работах [16–18] рассмотрены примеры, когда вариации сейсмичности можно считать результатом не локальных, а удаленных воздействий (движение внутреннего ядра Земли, влияние Солнца и планет). Это обострило как общий вопрос о возможностях лабораторного моделирования геодинамических процессов, так и частность — переоценку роли триггерных эффектов электромагнитного поля.

С учетом вышеизложенного представляются актуальными более детальные исследования влияния электро-

магнитных импульсов на вариации акустической эмиссии различных геоматериалов с целью сопоставления откликов акустической эмиссии для образцов полухрупких (гранитоиды) и псевдопластичных (каменная соль) материалов. Этому посвящена данная работа, в которой изложены результаты последней серии экспериментов по испытанию образцов геоматериалов на ползучесть в условиях ступенчатого одноосного сжатия с дополнительной подачей электромагнитных импульсов. Основное внимание уделено тому, каким образом можно сравнивать влияние электромагнитных импульсов на акустическую эмиссию и влияние сжимающей нагрузки. Поясним направление исследования. Вопрос о сравнении факторов, стимулирующих акустическую эмиссию, рассматривался в работах [19, 20] на примере модельного композитного материала (дисперсный диоксид циркония со связующими добавками). Согласно [20], электромагнитное воздействие значительно уступает по своей эффективности механическому во всем диапазоне нагрузок, за исключением совсем близких к критическим (~ 0.99 от максимума для данного образца). На первый взгляд это выглядит правдоподобно, поскольку при любом нетепловом механизме преобразования энергии значительная часть ее теряется, а электромагнитное стимулирование трещинообразования (акустическая эмиссия) реализуется через целую цепочку преобразований. Из результатов этих работ вытекает, что применение искусственных электромагнитных воздействий для разрядки избыточных напряжений в земной коре (наподобие предложенного в [21] способа управления сейсмическими подвижками) может вызывать сложности. При низком уровне напряжений (задолго до землетрясения) оно неэффективно в том смысле, что потребуются много «лишней» энергии, а при околокритических нагрузках возникает проблема не опоздать с воздействием. Однако этистораживающие выводы нельзя считать безальтернативными или окончательными, поскольку методика работ [19, 20] использует ряд предположений, нуждающихся в проверке: это касается разрешающей способности тензометрических измерений, необходимости калибровки фактически используемого там параметра интенсивности (а не активности) акустической эмиссии.

Другой подход к оценке эффективности различных способов стимулирования высвобождения накопленной энергии при вызванном росте микротрещин был недавно предложен в работах [22, 23]. Отличительной особенностью этого способа является использование небольших тестовых пригрузок, дающих примерно такой же прирост числа актов (событий) акустической эмиссии, как и электроимпульсные воздействия. Расчеты энергии, идущей на инициирование дополнительных событий, акустической эмиссии проводятся на основе прямых электрофизических измерений: характеристик источника и электродов, а также тангенса угла потерь

материала образца. При этом нет необходимости использовать весьма грубые тензометрические измерения. Накопление информации о закономерностях акустоэмиссионных откликов и эффективности их возбуждения позволило сформулировать новую модель, описывающую механизм преобразования энергии электромагнитного поля в акустические возмущения, непосредственно взаимодействующие с ансамблем дефектов.

2. Методика экспериментов

Образцы горных пород и модельных геоматериалов испытывались на ползучесть при постоянном сжатии при помощи пружинного пресса УДИ с максимальным усилием сжатия 100 т (разработка ВНИМИ, С.-Петербург) и рычажно-гравитационного пресса УДИ-Л с максимальным усилием сжатия 35 т (изготовлен на базе установки УДИ). Дополнительное воздействие физических полей осуществлялось во время измерительных сеансов, в течение которых прессовые установки обеспечивали бесшумное нагружение образцов с фиксированным уровнем сжимающей нагрузки. Воздействие электрическими импульсами осуществлялось при подаче на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца, напряжения от генератора прямоугольных импульсов Г5-54 с амплитудой до 50 В. Воздействие скрещенным электрическим и магнитным полями осуществлялось генератором Г5-54 и магнитной катушкой, возбуждающей магнитное поле вдоль ее оси с индукцией ~ 0.004 Т (рис. 1). Синхронизацию фаз электрических импульсов генератора Г5-54, подаваемых на электроды, и генератора Г3-112, нагружающего магнитную катушку, обеспечивало специальное синхронизирующее устройство. Благодаря этому выдерживалось постоянство направления вектора потока энергии (Умова–Пойнтинга) в течение сессии с воздействием скрещенных полей.

Сигналы акустической эмиссии регистрировались пьезодатчиками в частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц. Это позволяло сохранять информацию о волно-

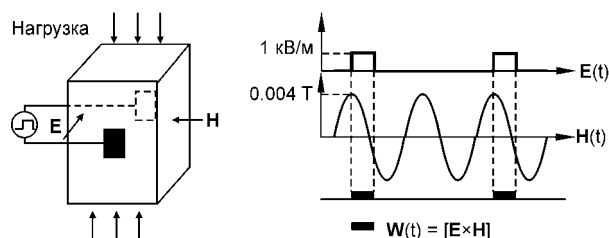


Рис. 1. Схема эксперимента с воздействием скрещенных полей: слева — направление сжимающего усилия (вертикальное), электрического E и магнитного H полей; справа — синхронизация периодических электрических импульсов Г5-54 с импульсами генератора, нагружающего магнитную катушку

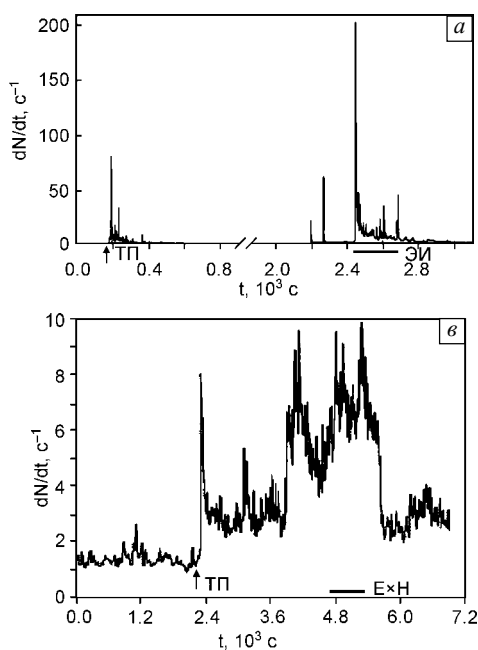
вой форме сигналов. Аппаратура работала в ждущем режиме, запуск осуществлялся по превышению сигналом на входе измерительного канала акустической эмиссии заданного порогового значения. Для исключения ложных срабатываний уровень дискриминации выбирался в 1.5 раза выше, чем среднеквадратичный уровень входного шума канала. Сигналы оцифровывались быстродействующим 8-канальным блоком АЦП USB 3000 и записывались на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме. Более подробное описание постановки эксперимента и методики широкополосных измерений акустической эмиссии приведено в [7, 8, 24]. В последней серии экспериментов было испытано 5 цельных образцов горных пород (гранодиорит — 1, гранит — 2, габбро — 1 и каменная соль — 1). При анализе данных также использовались результаты ранее проведенных экспериментов, в которых на пружинном прессе УДИ было испытано 38 образцов (из них 26 — горные породы) [7, 8].

В ходе экспериментов на рычажно-гравитационном прессе с образцами каменной соли Токтогул (Кыргызстан), гранита Уэстерли (США) и гранита Сары-Жаз (Кыргызстан) проведены сессии с регистрацией акустической эмиссии как при воздействии внешнего электромагнитного поля, так и во время изменения нагружающего усилия. Прежде всего, это стало возможным за счет бесшумного изменения нагрузки. Отметим, что прессы с сервоуправляемым гидроприводом производили множество помех по ходу всего эксперимента, и от них пришлось отказаться при исследовании влияния физических полей с «гомеопатическим» силовым эквивалентом. Пружинные прессы являлись бесшумными только после фиксации нагрузки (шум при добавке сжатия домкратом препятствует сбору данных во время изменения нагрузки).

Порядок проведения сессий выдерживался следующим для всех образцов: сначала образец нагружался на некоторую величину от 50 до 70 % от разрушающей нагрузки в зависимости от исследуемого материала. Затем некоторое время образец находился в состоянии релаксации под достигнутой нагрузкой, после чего проводилась небольшая механическая пригрузка 1–2 %, а затем после стабилизации акустического фона (активности акустической эмиссии) проводилось воздействие электромагнитным полем для соли и гранита Сары-Жаз и скрещенным ($E \times H$) с синхронизацией, как показано на рис. 1, для гранита Уэстерли. Далее нагрузка повышалась ступенчато, и начиналась следующая измерительная сессия.

Наилучшие результаты, заключающиеся в регистрации откликов как на пригрузку, так и на электрические импульсы с контрастной амплитудой, но не выходящей из входного диапазона АЦП, были получены для нагрузки порядка 0.85 от разрушающей. При нагрузках выше

0.9 от максимума фоновая активность акустической эмиссии уже не была квазистационарной даже без дополнительных воздействий. Поэтому эксперименты, нацеленные на сравнение характеристик откликов акустической эмиссии (в форме выбросов или плагноподобных интервалов на временных графиках активности акустической эмиссии), вызванных электрическими импульсами и тестовой механической пригрузкой, проводились в диапазоне главных сжимающих напряжений 0.75–0.9 от уровня разрушения. Следует подчеркнуть, что методика испытания полухрупких (гранит) и псевдопластичных (каменная соль) образцов на одноосное сжатие с дополнительным воздействием электроимпульсов, а также система измерений были практически такими же, как в работах [7, 8, 22–24], где набрана достаточно большая статистика откликов акустической эмиссии. Модификация заключалась в использовании нового блока фильтрации сигналов акустической эмиссии, который позволил осуществить непрерывную регистрацию акустической эмиссии, включая моменты добавки нагрузки. Кроме того, особенностью экспериментов было измерение емкости закрепленных на образце электродов и подводных проводов, а также тангенса угла диэлектрических потерь перед подачей электромагнитных импульсов на электроды и после сеанса электровоздействий. Указанные электрические параметры измерялись при помощи цифрового измерителя LCR Актаком AM 3001, который подсоединялся к тем же самым электродам на боковой грани образца при разорванной цепи от генератора импульсов. По величинам тангенса угла потерь, электрической мощности импульсов на их длительности оценивалось поглощение энергии поля.



3. Сравнение откликов на тестовую пригрузку и на электрические импульсы

Результаты измерения акустической эмиссии образца гранита Сары-Жаз показаны на рис. 2, а. В данной измерительной сессии образец выдерживался при напряжении сжатия 100 МПа (0.85 от максимального разрушающего значения), а фоновая активность была квазистационарной на уровне около 4 событий в секунду. В ходе сессии нагрузка была увеличена ступенчатым образом до 107 МПа. Соответствующее увеличение осевой деформации было примерно $3.5 \cdot 10^{-4}$, а энерговклад при тестовой пригрузке (работа по деформированию образца во время пригрузки) составил приблизительно 5 Дж. Пригрузка привела к резкому росту активности акустической эмиссии (рис. 2, а), за которым последовал спад эмиссии с временной зависимостью, аналогичной известному в сейсмологии закону Омори [1, 25]. Время релаксации было около 180 с. В этот период было зарегистрировано примерно 4 100 событий акустической эмиссии. Количество триггерных событий, вызванных пригрузкой, можно оценить, вычитая из общего числа накопленных событий вклад фоновой активности, определенной по предыстории и экстраполированной на интервал отклика. Таким способом найдено, что появление 3 400 событий было инициировано добавкой сжимающей нагрузки.

Далее с некоторой задержкой во времени включался источник электрических импульсов. Амплитуда напряженности электрического поля была около 400 В/м, частота — 50 кГц. Количество энергии, поглощенной образцом в период воздействия электрического поля, по порядку величины может быть оценено как $2 \cdot 10^{-2}$ Дж.

Рис. 2. Временные зависимости dN/dt акустоэмиссионной активности образцов гранита Сары-Жаз (а), каменной соли Токтогул (б), гранита Уэстерли (в). Для всех случаев $K_{CL} = 0.85$. Стрелкой показан момент ступенчатого изменения нагрузки. ТП — тестовая пригрузка, ЭИ — электрические импульсы

Отклик на воздействие электроимпульсов (случай, отмеченный полосой ЭИ на рис. 2, *а*) превышает отклик на тестовое механическое воздействие по длительности и амплитуде прироста активности акустической эмиссии. Количество триггерных событий за 300-секундный сеанс с подачей электроимпульсов может быть оценено как 7100 ± 50 . Точность этой оценки ограничена примерно 0.5-секундной неопределенностью времени включения генератора. Стоит отметить, что 5700 ± 50 электростимулированных событий произошли за первые 180 с периода электровоздействия, и это в 1.7 раза больше, чем в случае предшествующей механической активации. Полученное отношение является своего рода параметром, описывающим сходство реакции акустической эмиссии нагруженных образцов на электрические и механические воздействия. Для гранитного образца при сжимающей нагрузке, уровень которой составляет 0.85 от максимальной, этот параметр оказался больше единицы, в то время как энерговыклад в случае механической тестовой пригрузки был существенно больше, чем в случае электровоздействия.

Аналогичные результаты были получены на образце псевдопластичного материала (каменной соли). Образец такого материала (со свойством ползучести) испытывался на рычажно-гравитационном прессе, для которого, в отличие от пружинного пресса, исключено частичное ослабление нагрузки при сокращении длины образца. На рис. 2, *б* представлена временная зависимость активности акустической эмиссии образца каменной соли, находящегося при одноосном сжимающем напряжении 30 МПа (0.85 от максимального разрушающего значения, $K_{CL} = 0.85$). Фоновая активность акустической эмиссии была около 4 событий в секунду (т.е. близкой к случаю гранитного образца), средний уровень описывался небольшим затухающим трендом. Вновь тестовая пригрузка была проведена перед сеансом с электровоздействием. Прирост напряжения сжатия был около 0.5 МПа, а соответствующее изменение осевой деформации — $(1-2) \cdot 10^{-4}$. Энерговыклад в образец при пригрузке можно оценить как произведение среднего напряжения сжатия на укорочение образца, вызванное добавкой напряжения. Величина энерговыклада составила от 1 до 2 Дж (разброс получился из-за погрешности измерения деформации во время тестовой пригрузки). Отклик активности акустической эмиссии на добавку нагрузки продолжался около 4700 с. Затем активность установилась на новом квазистационарном уровне. Число вызванных (триггерных) событий, произошедших за время отклика, — 5050 ± 50 .

Вторая резкая активация акустической эмиссии (рис. 2, *б*) вызвана подачей напряжения от того же самого генератора импульсов прямоугольной формы. Амплитуда напряженности электрического поля была около 10^3 В/м, частота — 2.2 кГц. Поглощение энергии электрического поля по оценкам было около 0.05 Дж.

Всплеск активности акустической эмиссии (т.е. отклик на электрические импульсы) произошел со сравнительно долгой задержкой после старта электровоздействия (около 400 с). Продолжительность второго всплеска на рис. 2, *б* — около 3300 с. В течение интервала со всплеском было зарегистрировано примерно 4100 событий акустической эмиссии, среди них 2500 было сверх ожидаемого накопления от неизменного «фоновом» уровня активности. Эти 2500 событий могут рассматриваться как стимулированные. В случае откликов на тестовую пригрузку в течение 3300 с после ее наступления (рис. 2, *б*) произошло чуть более 4200 событий. Эти события могут рассматриваться как триггерные, так как уровень активности акустической эмиссии до пригрузки был слишком низким, чтобы обеспечить накопление 4200 событий за время 3300 с. Отношение числа событий акустической эмиссии, вызванных воздействием электроимпульсов (второй всплеск на рис. 2, *б*), к аналогичному числу при механической пригрузке (за вычетом вклада от стационарного уровня до воздействия) может характеризовать способность электрических импульсов стимулировать активность акустической эмиссии и эффективность этого триггерного воздействия. Для образца каменной соли данное отношение оказалось примерно равным 0.6. Следует отметить, что значение этого параметра не является единым для различных уровней нагрузки.

Результаты еще одного эксперимента с образцом гранита Уэстерли показаны на рис. 2, *в*. Этот образец испытывался по той же методике и программе, что и образец каменной соли. До воздействия средний уровень активности акустической эмиссии образца в данной сессии при постоянном сжимающем напряжении 198 МПа (около 0.85 от разрушающей) был около 1.4 события в секунду. В отличие от предыдущего случая фон может считаться стационарным, так как колебания уровня активности акустической эмиссии до начала воздействий не превышали 5–8 %. По общей методике сначала была проведена тестовая пригрузка на 0.4 МПа, причем относительное изменение нагрузки в этот раз было в шесть раз меньше чем в случае с образцом соли. Соответствующее изменение осевой деформации было порядка 10^{-4} , а энерговыклад в образец при тестовой пригрузке, оцениваемый по произведенной работе, — ~ 0.5 Дж.

Тестовая пригрузка вызвала отклик активности акустической эмиссии длительностью 120 с. Затем активность установилась на новом квазистационарном уровне — 3 события в секунду. Количество событий, произошедших в течение интервала со всплеском активности (т.е. отклика), — 2790 ± 20 . Через некоторое время после установления нового стационарного режима активности акустической эмиссии было проведено воздействие скрещенными электрическим и магнитным полями. Активация акустической эмиссии, иницииро-

ванная таким видом внешних воздействий, началась практически сразу же после включения скрещенных ($E \times H$) полей. Задержка менее минуты потребовалась до того, как активность возросла до максимального уровня (рис. 2, в). В этом эксперименте амплитуда напряженности электрического поля была около 400 В/м, а частота — 3 кГц. Частота импульсов генератора ГЗ-112, используемых для возбуждения магнитного поля, была 6 кГц. Применялась синхронизация включения электрических импульсов при определенной фазе синусоидального сигнала с ГЗ-112 так, что при подаче электрических импульсов направление магнитного поля всегда оставалось одним и тем же. Количество поглощенной энергии, привнесенной скрещенными $E \times H$ полями, было около 0.1 Дж (указанное значение оценено по величине вектора Умова–Пойнтинга и длительности сеанса с $E \times H$ -импульсами). Продолжительность отклика акустической эмиссии составила 1765 с (рис. 2, в). Всего за период активации (отклика) было зарегистрировано 10800 событий акустической эмиссии, а 5990 из них могут считаться триггерными (что соответствует избытку сверх установленного уровня). Между тем, отклик на тестовую пригрузку (первый всплеск на рис. 2, в) включает лишь немного более 2790 триггерных событий. Данная оценка есть результат вычитания из всего числа накопленных событий априорно ожидаемого накопления, получающегося при экстраполяции среднего уровня активности перед моментом тестовой пригрузки. Отклик на внешнее воздействие скрещенными полями оказался значительно больше отклика на механическую пригрузку. Если рассматривать одинаковые временные интервалы откликов на механическую пригрузку и энергвоздействие, отношение избыточного числа событий при электромагнитном ($E \times H$) и механическом стимулировании — порядка 2 (за период 1760 с). Если же брать полные времена откликов, то это число может быть еще больше (так как отклик на воздействие более продол-

жительный). Важно отметить сопоставимость полученных отношений количества вызванных событий для случая воздействий скрещенными полями (рис. 2, в) и простого электровоздействия (рис. 2, а) на гранитные образцы. Найденная величина этого отношения позволяет заключить (в предварительном порядке), что стимулирование источников акустической эмиссии электромагнитными импульсами может быть столь же эффективным, как и добавка механической нагрузки.

Для сопоставления результатов, полученных для полухрупких (граниты) и псевдопластичных (соль) образцов, было рассчитано отношение поглощенной энергии W к найденному числу триггерных, т.е. инициированных извне событий. Этот параметр назовем энергией удельного триггера. В случае с механической тестовой пригрузкой также определялось относительное увеличение деформации в расчете на одно триггерное событие. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 указывает, что существует значительное различие в значениях энергии удельного триггера для событий акустической эмиссии образцов гранита и каменной соли, дополнительно инициированных электрическими импульсами (более чем три порядка величины — $4 \cdot 10^{-7}$ и $2 \cdot 10^{-4}$ Дж соответственно). Что касается активации в результате тестовой механической пригрузки, то величины энергии удельного триггера для этих двух образцов отличаются друг от друга менее чем на порядок ($1.5 \cdot 10^{-3}$ и $(1-2) \cdot 10^{-4}$ Дж). Неожиданным результатом согласно табл. 1 является то, что для эффективности стимулирования акустической эмиссии (роста микротрещин) различие реологических свойств полухрупких гранитных образцов и псевдопластичной каменной соли не сыграло серьезной роли. Триггерное воздействие электрических импульсов генератора Г5-54 на акустическую эмиссию гранитных образцов оказалось наиболее эффективным, поскольку в этом случае цена в единицах энергии за одно дополнительное собы-

Таблица 1

Абсолютные и относительные величины параметров, описывающих возможность стимулирования акустической эмиссии дополнительной механической тестовой пригрузкой, воздействием электрических импульсов и совместным действием магнитного и электрического полей ($E \times H$)

Образец	Воздействие	Прирост деформации	Число триггерных актов акустической эмиссии	Удельный прирост деформации	Энерговклад, Дж	Число триггерных актов акустической эмиссии	Энергия удельного триггера, Дж
Гранит Сары-Жаз	Тестовая пригрузка	$3.5 \cdot 10^{-4}$	3 400	10^{-7}	5	3 400	$1.5 \cdot 10^{-3}$
	Электроимпульсы	Не применимо			0.02	7 100	$3 \cdot 10^{-6}$
Каменная соль	Тестовая пригрузка	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	5 050	$(2-4) \cdot 10^{-8}$	1-2	5 050	$(1-2) \cdot 10^{-4}$
	Электроимпульсы	Не применимо			0.05	2 500	$2 \cdot 10^{-5}$
Гранит Уэстерли	Тестовая пригрузка	10^{-4}	2 790	$3.5 \cdot 10^{-8}$	2.5	2 790	10^{-3}
	$E \times H$	Не применимо			0.1	5 990	$2 \cdot 10^{-5}$

тие минимальна как по сравнению со случаем механической пригрузки, так и в сравнении с электровоздействием на образцы каменной соли. Наиболее эффективным способом стимулирования высвобождения энергии следует считать синхронизированное воздействие скрещенных магнитного и электрического полей, для которого значение энергии удельного триггера равно $2 \cdot 10^{-5}$ Дж. При таком воздействии повышение активности акустической эмиссии происходит с минимальной задержкой и отмечается наибольшее число накопленных индуцированных событий.

В целом, исследования откликов акустической эмиссии в образцах полухрупких и псевдопластичных геоматериалов продемонстрировали скорее сходство, чем различие реакции этих сред на электромагнитное воздействие при одних и тех же параметрах импульсов. Этот весьма нетривиальный результат может свидетельствовать о том, что мезоструктура испытанных материалов (наличие доменов, зерен и их контактов) более существенна для их акустоэмиссионной чувствительности к воздействиям электромагнитных полей и вибраций, чем свойства кристаллической решетки.

4. Тенденция самоподобного прироста акустической эмиссии, вызванного электрическими импульсами

Известно, что при одноосном сжатии образцов горных пород ступенчатое повышение нагрузки сопровождается не просто увеличением активности акустической эмиссии, но и некоторым перераспределением количества событий по их амплитудам (с возрастанием доли крупноамплитудных событий). Подтверждением этого для гранитов, близких по составу и прочностным свойствам к вышеописанным образцам, могут быть результаты работы [25]. При фиксированной нагрузке для потока событий акустической эмиссии характерно устойчивое пропорциональное соотношение числа сильных и слабых событий, которое отражает распределение источников акустической эмиссии (микротрещин) по их размерам. Представляет интерес уточнение вопроса о пределах самоподобия в процессе деструкции нагруженных геоматериалов при дополнительном воздействии на них электромагнитных полей. Для получения информации об этом были проведены специальные эксперименты, в которых зарегистрированные сигналы акустической эмиссии разделялись по амплитудам. Для этого использовался вспомогательный программный дискриминатор с настраиваемым порогом, который задавался выше порога входного дискриминатора. Сигналы акустической эмиссии с амплитудой, превышающей уровень дискриминации, считались «сильными», а прочие зарегистрированные сигналы — «слабыми». Таким образом, в потоке сигналов были выделены две группы, для которых далее вычислялись временные зависимости

ти, имеющие смысл активностей акустической эмиссии по выборкам сильных и слабых событий, или, другими словами, селективных активностей. Согласно результатам предшествующих работ [7, 8] отклики акустической эмиссии на электрические импульсы отмечались при достаточно высоких нагрузках. С учетом этого уровень вспомогательного дискриминатора выбирался так, чтобы при относительной нагрузке $K_{CL} \sim 0.85$ количество накопленных «сильных» и «слабых» событий было соизмеримо. Для представляемого эксперимента с образцом гранодиорита при минимальной амплитуде регистрируемых сигналов 0.02 мВ, приведенной ко входу измерительного канала, порог дискриминатора был установлен в пять раз больше, т.е. 0.1 мВ. При указанном выборе порога усредненные селективные активности не отличаются друг от друга более чем на 50 %.

На рис. 3, а–в представлены результаты, полученные для образца гранодиорита в сессиях с дополнительным электромагнитным воздействием при сжимающих напряжениях 179, 188 и 198 МПа, соответствующих значениям $K_{CL} = 0.86, 0.91, 0.95$. На всех графиках черными линиями показаны временные зависимости для активности сильных (крупноамплитудных) событий акустической эмиссии, а серыми — слабых (низкоамплитудных). Период, в течение которого на образец подавались электрические импульсы генератора Г5-54, длился 1ч (как отмечено черной полосой на рис. 3). В случае $K_{CL} = 0.86$ (рис. 3, а) поведение графиков активности сильных и слабых событий практически не отличается как при выключенном, так и включенном источнике. При электромагнитном воздействии прирост общей активности произошел в самосогласованном режиме, с сохранением пропорций между выделенными группами событий. Но не так обстоит дело для более высокой нагрузки и фоновой активности акустической эмиссии ($K_{CL} = 0.91$). Как видно на рис. 3, б, сразу после включения генератора Г5-54 одновременно с приростом активности слабых событий происходит некоторый спад на графике сильных событий (интервал I). Эти противофазные вариации опережают отклик в форме прироста полной активности акустической эмиссии. Расхождение между графиками активности сильных и слабых событий также наблюдается во временном интервале II при максимальном приросте полной активности. В интервале II расхождение кривых становится более отчетливым по сравнению с интервалом I. Это может свидетельствовать о том, что при рассматриваемой нагрузке 188 МПа ($K_{CL} = 0.91$) относительно низкоамплитудные сигналы акустической эмиссии вносят основной вклад в общий отклик на дополнительное электромагнитное воздействие.

В последней для данного образца сессии (рис. 3, в) отмечен спонтанный всплеск активности акустической эмиссии до начала внешнего воздействия. Из-за этой

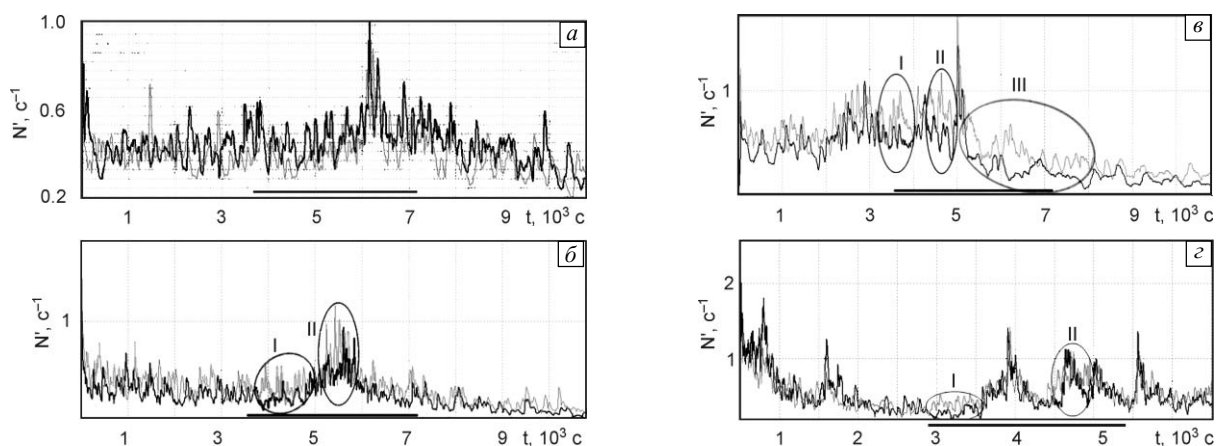


Рис. 3. Временные зависимости активности $N'(t)$ образца гранодиорита с селекцией на группы сильных и слабых событий при трех фиксированных значениях сжимающей нагрузки $K_{CL} = 0.86$ (а), 0.91 (б), 0.95 (в) и аналогичные графики для образца габбро при $K_{CL} = 0.87$ (г)

флуктуации прирост акустической эмиссии, стимулированный электрическими импульсами после спонтанного всплеска, оказался ослабленным, поскольку часть метастабильных зон с концентрацией напряжений (источников акустической эмиссии, готовых откликнуться на внешнее воздействие) уже отдала свою энергию на излучение акустических волн. Немаловажно, что при спонтанной активации различие между трендами активности слабых и сильных событий лишь околороговое. Однако после «предыстории» в течение сеанса с подачей импульсов генератора Г5-54 на рис. 3, в можно видеть три эпизода рассогласования в вариациях селективных активностей, что указано интервалами I–III. Первая вариация с расхождением начинается сразу после подачи электрических импульсов, аналогично случаю предыдущей ступени нагрузки (рис. 3, в).

Для сравнения данных селективных активностей образца гранодиорита с другими породными образцами были обработаны первичные записи сигналов акустической эмиссии, ранее полученные для образца габбро [7, 8]. В экспериментах с этим материалом источник и параметры электрических импульсов были такие же, как в случае рис. 3, а–в. На рис. 3, г показаны временные зависимости селективных активностей в сессии при сжимающей нагрузке, составляющей 0.87 от максимума для данного образца габбро. Полосой отмечен период подачи импульсов. До внешнего воздействия ход графиков активностей сильных и слабых событий практически совпадает. При флуктуации, т.е. спонтанном всплеске активности в период 1600 с, подобие графиков селективных активностей сохраняется. В период подачи импульсов обращают на себя внимание два временных интервала (I, II), когда наблюдается прирост активности слабых событий при стационарном или даже затухающем среднем уровне активности сильных событий. Первый из этих интервалов, попадающий на начальный период электроимпульсного сеанса, соот-

ветствует фазе задержки прироста активности (основном признаке отклика). Вторым интервалом естественно образом ассоциируется с достижением максимальной активации, происходящей с задержкой ~ 650 с после начала воздействия. Общая длительность интервалов I, II — около 850 с или примерно одна четверть от периода подачи импульсов и меньше 0.1 всего времени сессии.

Обобщая приведенные на рис. 3 результаты о селективных активностях акустической эмиссии образцов, испытанных с экспозицией в электромагнитном поле, можно подчеркнуть тенденцию соблюдения самоподобия в потоке событий акустической эмиссии. Действительно, взаимопропорциональное изменение активностей слабых и сильных событий происходит почти все время, включая период воздействия электромагнитных импульсов. Исключением являются лишь кратковременные эпизоды, один из которых весьма важен для понимания закономерного характера реакции среды на воздействие электрических импульсов. Разумеется, при откликах в режиме самоподобия (с пропорциональным приростом относительно слабых и сильных событий) большинство вызванных событий относится к группе слабых. В этом аспекте также проявляется сходство откликов нагруженных образцов геоматериалов на действие электромагнитных импульсов [7, 8] и вибраций с весьма малой амплитудой [1, 5].

Появление вариаций акустической эмиссии с отклонениями от самоподобия в начале сеанса электровоздействия указывает на то, что уже в период задержки (а точнее подготовки) общего прироста активности в среде происходят определенные изменения под влиянием внешнего поля. Это дополнительно поясняет особенность эффекта отклика акустической эмиссии на электрические импульсы, которая зачастую кажется странной, — наличие довольно длительной задержки (от сотен до тысяч секунд, согласно [7, 24]).

5. Модель механизма влияния электрических импульсов

Вышеописанные особенности откликов акустической эмиссии образцов геоматериалов на воздействие электромагнитных импульсов с новой остротой поставили вопрос о механизме этого эффекта. Модель должна объяснять сходство эффекта акустоэмиссионного отклика для столь разнородных материалов, как гранит и каменная соль. В физике конденсированного состояния и физическом материаловедении известен целый ряд примеров взаимодействия электромагнитных полей со структурными дефектами (атом-вакансионными дефектами, заряженными дислокациями, микротрещинами) [3, 6, 7, 26–29]. Этими взаимодействиями, а фактически элементарными процессами в определенных материалах, объясняются на полукачественном уровне электропластический эффект, магнитопластический эффект, торможение и страгивание трещин в электрическом поле и др. [30–33]. Однако такие процессы недостаточно универсальны и сами по себе не могут быть приняты за основу модели возбуждения акустоэмиссионных откликов в материалах с разнообразными физико-химическими и реологическими свойствами. В то же время подобной универсальностью обладает триггерное влияние слабых вибраций на неупругое деформирование, которое установлено и хорошо изучено на разных масштабах: от сантиметровых (лабораторных) до километровых и более (натурных) [1, 2, 34–38]. Это подводит к возможному качественному объяснению механизма активации акустической эмиссии нагруженных породных образцов возбуждением микровибраций при воздействии электромагнитных импульсов [7, 24].

При переходе от качественного к количественному уровню объяснения возникают, однако, следующие трудности. С одной стороны, по оценкам из работ [5, 11, 24] эффект отклика активности акустической эмиссии образцов горных пород проявляется, когда амплитуда колебания давления достигает порядка 10^{-6} от уровня главного напряжения. Но с другой стороны, известные, традиционно рассматриваемые механизмы преобразования электрической энергии в механическую: пьезоэлектрический эффект, пондеромоторные силы, термическое расширение при нагреве среды не могут объяснить такую амплитуду возмущений напряжений σ и деформаций ϵ при воздействиях импульсными полями с электрической напряженностью $E \sim 1000$ В/м, характерной для вышеописанных экспериментов с использованием генератора Г5-54 в качестве источника. Действительно, в диэлектрических средах (образцы гранитов, мраморов, каменной соли) джоулев нагрев исключается и термическое расширение заведомо не может играть роли. Что касается пьезоэффекта, то он может обеспечить относительные возмущения σ , ϵ порядка 10^{-7} от главных значений напряжения лишь для

образцов кварцита с продольным пьезомодулем $d_E \sim 10^{-14} - 10^{-12}$ м/В, где верхнее значение приближается к величине модуля d_E для монокристаллов кварца [39, 40]. Это вытекает из формулы электромеханической связи $\delta\epsilon \sim d_E E \sim 10^{-11} - 10^{-9}$ при указанной типовой напряженности поля E . Если учесть, что упругие модули порядка 10^{10} Н/м², то как раз и получится значение для максимальных возмущений $\delta\sigma \sim 10$ Па, соответствующее 10^{-7} от уровня главного сжимающего напряжения. Для образцов гранита и мрамора характерные значения d_E меньше на 4 порядка [40]. В такой же пропорции должны уменьшиться возмущения $\delta\sigma$, связанные с пьезоэффектом.

Для образцов без пьезоэлектрических свойств расчеты пондеромоторных сил, проведенные для упрощенных случаев (модель изотропного диэлектрика и квазистационарного электромагнитного поля), приводят к еще меньшим возмущениям напряжения при тех же значениях $E \sim 1000$ В/м — $\delta\sigma/\sigma_0 \sim 10^{-8}$ от главного сжатия. Эти расчеты основаны на стандартной модели электродинамики сплошных сред [41] и эквивалентны учету силы притяжения электродов, закрепленных на гранях образца (рис. 4, а) и образующих конденсатор. Подчеркнем, что полученные оценки соответствуют условию применимости известной формулы для усредненной объемной плотности энергии U квазигармонического электрического поля с медленно меняющейся амплитудой [41]:

$$U = 1/2 \epsilon_{e0} \partial/\partial\omega (\omega \epsilon_e) \langle E^2 \rangle, \quad (1)$$

где ω — циклическая частота; ϵ_e — диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_{e0} = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, индекс e введен для наглядности различия от обозначения деформаций.

В некоторых работах [6, 42] были предприняты попытки объяснить влияние электрических полей на разрушение вкладом их энергии с плотностью (1) в общий энергетический баланс в объеме $(2l)^3$ вокруг трещины длиной $2l$. В работе [6] в пренебрежении дисперсией ϵ_e было получено следующее обобщение критерия Гриффитса при наличии электрической поляризации:

$$\sigma^2 l / G = 2\gamma / \pi - 2\lambda / \pi \epsilon_{e0} \epsilon_e \langle E^2 \rangle l, \quad (2)$$

где γ — удельная поверхностная энергия; G — упругий модуль; скобками $\langle \rangle$ обозначено усреднение по времени. В формулу (2) введен численный коэффициент λ , учитывающий, что активационный объем, в котором существенно меняется электрическое поле при рассматриваемом «виртуальном» удлинении трещины, может несколько отличаться от принятого в [6] значения $4l \times 4l$. Физический смысл условия (2) состоит в том, что если при росте трещины в ее окрестности объем среды с меньшей диэлектрической проницаемостью возрастает, а с большим значением ϵ_e — убывает, выделяющаяся при этом энергия может идти на образование новых поверхностей. Правая часть (2) как раз и описывает

Таблица 2

Промежуточные эффекты импульсов с разными амплитудами напряжения					
Образец, σ_0	Источник импульсов	E , В/м	p_- , Па	p_-/σ_0	Поправка к γ в (2)
Каменная соль, 10 МПа	Г5-54	1 000	0.01–0.1	$(0.1-1) \cdot 10^{-8}$	Не существует
Каменная соль, 10 МПа Габбро, 100 МПа	Конденсаторный разрядник	$\sim 10^4$	1–10	$(0.1-1) \cdot 10^{-6}$	+
Бетон, 10 МПа Гранит, 100 МПа	Индукционный разрядник	$\sim 10^5$	10–100	$(0.1-1) \cdot 10^{-6}$	+

уменьшение параметра γ в присутствии электрического поля.

Дальнейшим обобщением условия неустойчивости трещины, позволяющим учесть дисперсию ϵ_e , может быть замена в правой части (2) параметра ϵ_e на производную $\partial/\partial\omega(\omega\epsilon_e)$ в соответствии с (1). Для образцов горных пород и керамик $\gamma \sim 1$ Дж/м², и поэтому при $\epsilon_e < 100$ влияние электрического поля на субмиллиметровые трещины становится существенным, когда напряженность поля $E \sim 100$ кВ/м. Важно отметить, что при электромагнитных возмущениях большой амплитуды для некоторых гетерогенных сред, в частности содержащих связанную воду в порово-трещинном пространстве, фактор $\partial/\partial\omega(\omega\epsilon_e)$ может достигать сотен и даже тысяч [43, 44]. При этом минимальная напряженность E , способная влиять на критерий устойчивости упомянутых трещин ($l \sim 0.05-1$ мм), снижается до значения ~ 10 кВ/м. В экспериментах с модельными электромагнитными воздействиями [7, 8] такие поля создавались при подаче на испытываемые образцы импульсного напряжения 500–5 000 В (от конденсаторной батареи или индукционного разрядника). При этих воздействиях действительно наблюдалась активация трещинообразования, наступающая с задержкой от сотен до тысяч секунд [8, 24]. Для интерпретации задержки можно предположить, что вибрационный канал влияния электрических импульсов на микротрещины с размерами порядка 0.01 мм оказался более эффективным, чем изменение условий устойчивости субмиллиметровых трещин, согласно (2).

При еще более сильных полях $E \sim 1$ МВ/м для ионных кристаллов имеет место электропластический эффект (непосредственное влияние поля E на подвижность дислокаций), характеризующийся практическим отсутствием задержки [3]. Однако при меньшей напряженности ($E \sim 1 000$ В/м), характерной для случаев использования генератора Г5-54, представленный на рис. 2, 3 результат о приросте активности акустической эмиссии не поддается объяснению на основе уравнения (2). Важно наличие соответствия в оценках порога напряженности поля, попадающего в диапазон $E \sim 10-100$ кВ/м, при котором оно, с одной стороны, способно несколько сместить критическое напряжение по критерию Гриффитса и, с другой стороны, возбуждает колебания напряжения с амплитудой порядка $10^{-7}-10^{-6}$ от главного сжатия (табл. 2).

По мнению авторов, трудности объяснения влияния электроимпульсов с напряженностью $E \sim 1$ кВ/м (типичные условия экспериментов с использованием Г5-54, которые дали наибольшую статистику откликов активности акустической эмиссии [8, 24]) связаны с недостаточностью модели квазистационарного поля. На этой модели основан предложенный в [6] вывод условия (2), которое отражает более быстрое изменение поляризации среды и усредненного поля с последующим ростом трещины при уже установившихся характеристиках ϵ_e , $d\epsilon_e/d\omega$, $\langle E^2 \rangle$. Принципиальность фактора нестационарности (резкости изменений поля E) осознавалась еще на стадии постановки экспериментов. В качестве источника электроимпульсов был выбран генератор Г5-54 как раз потому, что он обеспечивает крутые фронты прямоугольных импульсов, и при этом могут становиться важными волновые эффекты. Однако теоретическое описание взаимодействия импульсов электромагнитного поля с растущими дефектами чрезвычайно сложно, наподобие проблемы экситонов [45, 46]. Это выходит далеко за рамки данной работы. Эвристически, для обсуждения механизма раскочки аномальных микровибраций в нагруженных образцах под влиянием электроимпульсов с крутыми фронтами можно сопоставить такое «возбуждение» с известным в нелинейной оптике эффектом вынужденного рассеяния Бриллюэна. Этот эффект описывает рассеяние света на временных флуктуациях диэлектрической проницаемости, возникающих вследствие флуктуаций плотности среды, в частности при быстрой деформации [47]. Низкочастотным аналогом эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна является нелинейное резонансное взаимодействие звуковых и электромагнитных волн с резонансом на разностной частоте. В результате усиливается звуковая волна с частотой $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$, где ω_1 , ω_2 — частоты электромагнитных волн, выделенные из спектра импульса условием резонанса.

В нагруженных образцах при образовании микротрещины в окружающем объеме вещества, несомненно, имеют место неоднородные возмущения деформации. Если эти возмущения получают дополнительную энергию и импульс от внешнего поля, а акустическая добротность среды достаточно велика (как у горных пород), колебания распространяются и оказывают триггерное влияние на рост соседней трещины. Далее процесс повторяется и таким образом может произойти «само-

разгон» роста микротрещин, проявляющийся в экспериментах как временный прирост активности акустической эмиссии. В диапазоне сжимающих напряжений 0.7–0.9 от разрушающих в полухрупких материалах (горных породах) имеются зоны локализации пластических деформаций и домены (мезообъемы), остающиеся в пределах упругой деформации [48–51]. Хотя и внутри доменов могут возникать или удлиняться микротрещины, не влияющие на характер деформации мезообъема в целом, акустическая добротность в этих областях выше, чем в среднем по всему образцу. В таких мезообъемах складываются наиболее благоприятные условия для резонанса на разностной частоте (относящегося к нелинейным трехволновым взаимодействиям) и цепной активации прироста длины трещин при воздействии электроимпульсов.

Рассмотрим более детально взаимодействие электромагнитных и звуковых волн типа бриллюэновского рассеяния при постановке эксперимента, описанного в разделе 2. Электроды, на которые подавались импульсы генератора Г5-54, устанавливались на противоположных боковых поверхностях испытываемого образца. Крутые фронты нарастания импульсов с шириной менее 0.1 мкс обеспечивают возбуждение большого числа гармоник в полосе частот выше или порядка 10^7 с⁻¹. Длины волн, соответствующих этим частотам, намного больше размеров образца, так что их взаимодействие можно описывать в классическом (неквантовом) представлении. В теоретической модели вынужденного рассеяния Бриллюэна [47] рассматривается взаимодействие трех квазигармонических волн: звуковой $\sigma_- = \sigma_a \times \exp(ik_s z - i\omega_s t)$ и двух электромагнитных $E_{1,2} = E_{a1,2} \times \exp(ik_{1,2} z - i\omega_{1,2} t)$ с амплитудами давления σ_a и напряженностями электрического поля E_{a1}, E_{a2} , зависящими от координаты z и времени t значительно медленнее фазовых сомножителей. Частный случай «рассеяния назад», когда волновые вектора k_1 и k_2 направлены противоположно друг другу, может служить упрощенной моделью ситуации, возникающей при прохождении крутых фронтов (рис. 4). Действительно, в отсутствие эффекта рассеяния при переходных процессах в цепи электродов электромагнитные волны, распространяющиеся с противоположных сторон к центру образца, затухали бы одинаково.

Известно, что квазигармонические волны могут описывать нелинейные эффекты при распространении волн в среде (в частности трехволновое взаимодействие) при условии выполнения следующих соотношений для частот $\omega_s, \omega_1, \omega_2$ и волновых векторов k_s, k_1, k_2 [47]:

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_s, \quad k_1 = k_2 + k_s. \quad (3)$$

Абсолютные величины векторов k_s, k_1, k_2 определяются выражениями:

$$k_s = \omega_s/V_s, \quad k_{1,2} = \omega_{1,2}/C, \quad (4)$$

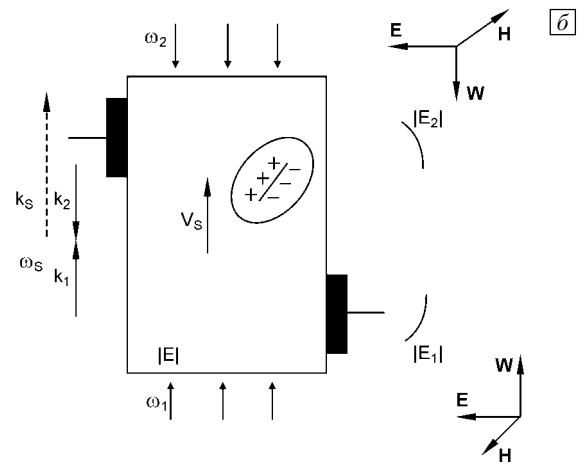
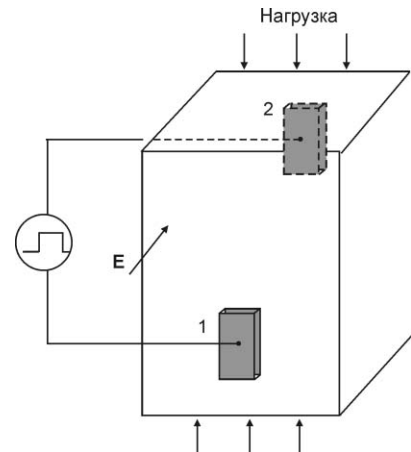


Рис. 4. Аналог нелинейного трехволнового взаимодействия в классической физике — резонанс на биениях, при широком спектре волн, распространяющихся навстречу друг другу. Показаны типовая схема размещения электродов на образце (а) и один из вариантов направления волновых векторов при переходном процессе в цепи генератора импульсов (б)

где V_s — скорость звуковой волны; C — скорость электромагнитных волн, причем для сплошной консолидированной среды обычно $V_s/C \sim 10^{-5}$. В случае когда векторы k_1, k_2 направлены противоположно (рис. 4), из формул (3), (4) вытекает следующее условие усиления звуковой волны при взаимодействии электромагнитных волн с частотами ω_1, ω_2 :

$$\omega_s = V_s/C (\omega_1 + \omega_2) \approx 2V_s/C \omega_{1,2}. \quad (5)$$

Применительно к экспериментам с импульсами генератора Г5-54 условие (5) совместимо с требованием $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ в случае близких друг к другу значений $\omega_1, \omega_2 \sim 10^7$ с⁻¹. При этом частота звуковых волн ω_s попадает в диапазон от сотен до тысяч с⁻¹.

Оценить амплитуду звуковых волн, которые могут возбуждаться при нелинейном взаимодействии электро-

магнитных волн, можно при помощи следующей формулы, выведенной в [47] для одномерной модели вынужденного рассеяния Бриллюэна:

$$\sigma_a \approx \pi \epsilon_{e0} \frac{d\epsilon_e}{d\sigma} \frac{G^2 \omega_s E_{a1} E_{a2}}{2\rho V_s \Gamma_s}, \quad (6)$$

где ρ — плотность материала; E_{a1} , E_{a2} — введенные выше амплитуды гармоник электрического поля с частотами ω_1 , ω_2 ; Γ_s — коэффициент поглощения звука, выражающийся через добротность Q соотношением $\Gamma_s = \omega_s / (2\pi) Q$. Для оценки максимального значения амплитуды σ_a входящую в правую часть формулы (6) производную $d\epsilon_e/d\sigma$ можно с порядковой точностью заменить отношением $(\epsilon_e - 1)/G$. При этом автоматически учитывается наличие значительных флуктуаций плотности в окрестности трещины, излучающей акустические волны (акустическая эмиссия). Преобразования в (6) с использованием соотношения $V_s^2 \cong G/\rho$ и других известных формул приводят к выражению:

$$\sigma_a \sim 1/2 \pi^2 Q \epsilon_{e0} \epsilon_e E_a^2, \quad E_a \sim E_{a1} \sim E_{a2}, \quad (7)$$

которое в наглядной форме указывает на физический смысл эффекта. В результате резонанса на разностной частоте ω_s амплитуда колебаний напряжения может увеличиваться в $\sim Q$ раз по сравнению с обычным случаем квазистационарного поля, когда выражение $\delta\sigma \sim \delta U \sim 1/2 \epsilon_{e0} \epsilon_e E_a^2$ по размерности и по порядку величины соответствует поверхностной плотности пондеромоторных сил и одновременно плотности энергии электрического поля [41]. Подобный результат усиления звуковых волн можно ожидать как естественное проявление общезначимого принципа резонанса, причем роль внешнего воздействия играют биения гармоник электрического поля с близкими частотами ω_1 , ω_2 . Для горных пород без крупных трещин добротность при атмосферном давлении $Q \sim 100-400$, а в сжатом состоянии может достигать нескольких тысяч или даже десятков тысяч [52, 53]. Если считать, что в экспериментах с использованием генератора Г5-54 амплитуда высокочастотных гармоник была сравнимой с амплитудой импульсов (~ 1000 В/м), то выражение (7) дает оценку $\sigma_a \sim 1-10$ Па, попадающую как раз в диапазон $10^{-7}-10^{-6}$ от уровня главного сжимающего напряжения. Для вибраций с амплитудами из этого диапазона установлен вышеупомянутый эффект вибрационного стимулирования активности акустической эмиссии. Поэтому представленная модель механизма возбуждения микроколебаний при воздействии электроимпульсов на образцы геоматериалов может рассматриваться в качестве серьезного кандидата для объяснения триггерного влияния на акустическую эмиссию электрических импульсов с крутыми фронтами, в частности импульсов генератора Г5-54. Эта модель также позволяет понять сходство эффектов акустоэмиссионных откликов на действие

слабых низкочастотных вибраций и на электромагнитные импульсы, которое без объяснения отмечалось в ряде работ [7, 22, 54].

Стоит отметить, что в реальной ситуации, в отличие от одномерной задачи, значение σ_a при резонансном взаимодействии звуковых и электромагнитных волн может оказаться меньше оценки (7) из-за потерь на расходимость возбуждаемой волны и других факторов. В связи с этим в следующем разделе модель механизма триггерного влияния электроимпульсов на акустическую эмиссию через возбуждение низкочастотных вибраций рассматривается как правдоподобная гипотеза, подлежащая проверке с привлечением дополнительных данных. Выдвинутая гипотеза выглядит как неожиданная, поскольку широко распространено представление, что реакция среды (изменение в процессе деструкции) начинается на низших масштабных уровнях, а малым размерам соответствуют высокие частоты. Но вопреки этому представлению, непосредственно в экспериментах на образцах горных пород было продемонстрировано стимулирование акустической эмиссии именно низкочастотными вибрациями (с частотой ~ 200 Гц в работах [4, 5] и частотами 1–2 кГц в экспериментах с другим микровибратором [24, 54]).

6. Обсуждение модели. Масштабирование

Для верификации гипотезы о механизме первичного возбуждения вибраций и последующей активации акустической эмиссии нагруженных образцов геоматериалов могут представлять интерес отдельные случаи, когда при электромагнитных воздействиях не наблюдалось откликов акустической эмиссии. Соответствуют ли эти случаи, которые ранее оставались на втором плане из-за их немногочисленности, неблагоприятным условиям для усиления звуковой волны, согласно выражениям (6), (7)? В этой связи обращают на себя внимание следующие результаты, полученные в тех же сериях экспериментов, что и результаты о приросте активности акустической эмиссии, стимулированном электроимпульсами [7, 8, 22–24].

Согласно цитированным работам, а также [55, 56], по статистике у водонасыщенных породных образцов чувствительность акустической эмиссии к электромагнитным воздействиям больше, чем у обычных, комнатновлажных. В качестве одного из модельных пористых материалов, удобного для сравнения хода активности акустической эмиссии сухих и водонасыщенных образцов, использовалась керамика диоксида циркония. Для сухих образцов диоксида циркония эффект прироста активности не наблюдался, что объяснялось в [56] недостаточной амплитудой электрической напряженности. Отклики акустической эмиссии на воздействие электроимпульсов были зарегистрированы для образцов с различным относительным содержанием воды, за исключе-

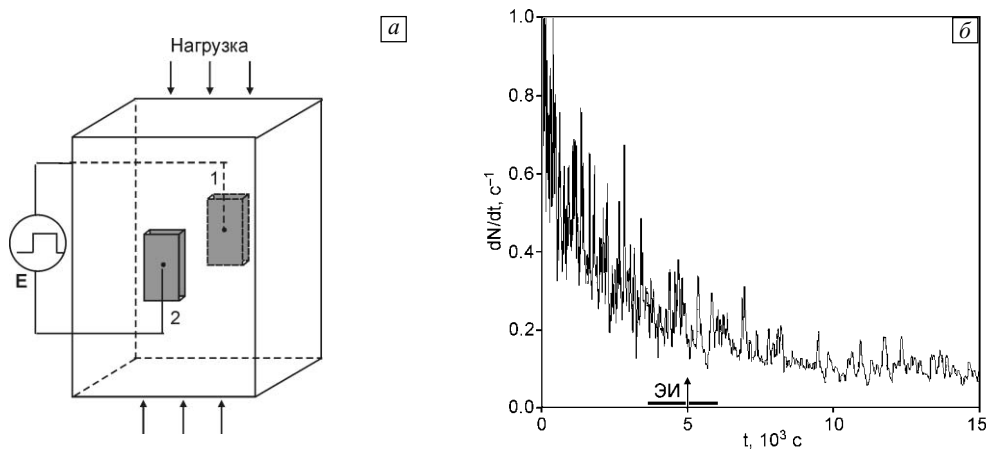


Рис. 5. Особенность расположения электродов (а) на поверхности образца керамики диоксида циркония с содержанием воды 20 % и временная зависимость активности акустической эмиссии этого образца (б) в сеансе с воздействием импульсов генератора Г3-112 (частота 50 кГц) и серии из 10 конденсаторных разрядов с амплитудой 800 В. Период воздействий электроимпульсов и разрядов указан полосой. Сжимающая нагрузка — около 0.97 от разрушающей

нием случая максимального водонасыщения (примерно 20 % по весу). На рис. 5 показана временная зависимость активности акустической эмиссии для этого случая, который ранее казался странным. В рамках предложенной модели исключение (отсутствие отклика) можно связать с тем, что присутствие воды в достаточно большом количестве снизило акустическую добротность Q , входящую в (7). Кроме того, могла сыграть роль особенности расположения электродов в эксперименте с этим образцом (рис. 5, а) — симметричность конфигурации ослабляет биения, которые могут возникнуть в переходных процессах.

В недавнем эксперименте, который может рассматриваться как контрольный, испытывался образец диоксида циркония с меньшей пористостью (содержание воды было около 5 % по весу). Особенностью эксперимента было воздействие электроимпульсов, подведенных при помощи симметричных электродов и кольцевой ошиновки, уменьшающих рассеянное магнитное поле в зоне расположения датчиков акустической эмиссии. Задачей такой системы электропитания была подача импульсов напряжения на образец с меньшими наводками во входной цепи измерительных каналов акустической эмиссии. Но при этом оказались реализованы наиболее неблагоприятные условия для возникновения биений. И, действительно, в этом эксперименте не было обнаружено откликов ни на разряды конденсаторного источника с максимальным напряжением 600 В (рис. 6), ни на периодические импульсы генераторов Г3-112 и Г5-54 с напряжением до 50 В (в других сессиях). Эксперимент проводился, когда модель (гипотеза) нелинейного резонансного механизма еще не была сформулирована. Поэтому его результат, отличающийся от типичного, т.е. наличие отклика, может считаться одним из проверочных, подтверждающих гипотезу.

На основе модели можно также объяснить то обстоятельство, что в экспериментах с подачей на образцы импульсов генератора Г5-54 с напряжением до 50 В практически весь набор данных о наличии акустоэмиссионного отклика получен для сессий, когда фоновая активность образцов была от 0.01 до $10 c^{-1}$. Предварительно отметим, что в этих экспериментах уровень дискриминации, при котором происходил запуск регистрирующей аппаратуры, существенно не менялся, а увеличение сжимающей нагрузки приводило к повышению среднего уровня активности акустической эмиссии. Поэтому указанный диапазон активности естественно сопоставлять с обобщением [8, 24, 55, 56] о характерном диапазоне нагрузок ($0.7-0.95$ от разрушающих), когда имеет место эффект стимулированного прироста акустической эмиссии.

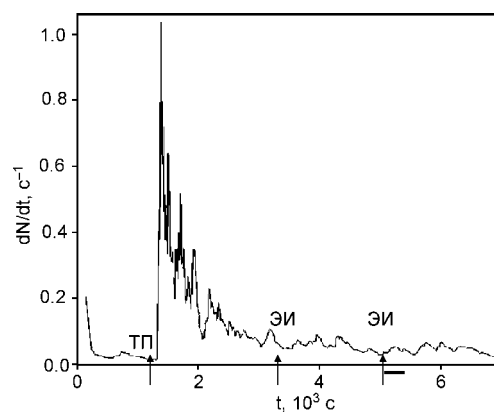


Рис. 6. Зависимость активности акустической эмиссии образца керамики диоксида циркония с содержанием воды менее 5 % в контрольном эксперименте с подачей электрических импульсов через кольцевую трифилярную шину, нагрузка $K_{CL} = 0.85$. Стрелкой отмечена серия из десяти конденсаторных разрядов с амплитудой 600 В, черная полоса — период подачи импульсов Г3-112 (частота 2.2 кГц)

Как упоминалось выше, при образовании или росте микротрещины (событиях акустической эмиссии) возникают вибрации и возмущения диэлектрической проницаемости, причем последние определяют возможность взаимодействия с электромагнитными волнами. Благодаря передаче импульса и энергии звуковым волнам с резонансной (разностной) частотой в среде с высокой добротностью могут возбуждаться низкочастотные вибрации, продолжающиеся в течение времени, значительно превышающего длительность высокочастотного сигнала акустической эмиссии. Эти вибрации способны инициировать рост других микротрещин. Но если подкритических очагов, восприимчивых к внешнему воздействию, нет (что естественно при очень малой фоновой активности, т.е. низком уровне нагрузки), то не будет и стимулированного прироста числа событий. Что касается случая высокой фоновой активности (большие нагрузки), то для него становятся важными условия когерентности возбужденных колебаний диэлектрической проницаемости. Если следующее событие акустической эмиссии спонтанно возникает вскоре после первого, то при этом фаза колебаний на частоте ω_s нарушится из-за возмущений от новой трещины, и резонансное взаимодействие с внешними волнами становится менее эффективным. Характерное время для флуктуаций плотности и диэлектрической проницаемости можно оценить как $\delta t \sim 10\text{--}50$ мкс (время пробега звуковой волны со скоростью $V_s \sim (2\text{--}4) \cdot 10^3$ м/с по образцу размером 5–10 см). Тогда время сохранения когерентности, в том числе при взаимодействии типа вынужденного бриллюэновского рассеяния, будет порядка $Q\delta t \sim 10\text{--}50$ мс (принято $Q \sim 1000$). При частоте следования импульсов генератора Г5-54 2–10 кГц за это время может пройти от 20 до 500 последовательных импульсов, фронты которых вносят вклад в амплитуду высокочастотных гармоник $\omega_{1,2} \sim 10^7$ с⁻¹. В случае когда фоновая активность превысит 20 с⁻¹, интервал между некоторыми событиями станет короче 10–50 мкс и фактическое время когерентности сократится. Уменьшатся и количество прошедших фронтов, и средняя амплитуда E_a в формуле (7). Соответствующим уменьшением максимального σ_a из (7) может объясняться отсутствие эффекта акустоэмиссионного отклика на электроимпульсы. Чтобы этот эффект наблюдался при высокой фоновой активности акустической эмиссии, необходимо воздействие с более высокой напряженностью поля или с большей частотой следования импульсов.

В работе [57] получен результат, подтверждающий на примере образца габбро, находящегося при околокритической нагрузке, $K_{CL} = 0.98$, что при мощной «накачке» (подаче серии из десяти 900-вольтных импульсов конденсаторного разрядника, $E \sim 5 \cdot 10^4$ В/м) стимулированный прирост активности акустической эмиссии происходит и в случае весьма высокого уровня активности перед воздействием — вплоть до сотен со-

бытий в секунду. Согласно [57], после отклика отмечено снижение активности, которое может свидетельствовать о притормаживании магистральной трещины, несомненно присутствующей в образце на этом уровне нагрузки. Разрушение наступило только через сутки, причем после следующей пригрузки образца. В этом отношении полученный результат находится в соответствии с [32]. Рассмотренные примеры показывают, что предложенная гипотеза (модель) первичного возбуждения вибраций позволяет лучше понять ряд особенностей эффекта отклика акустической эмиссии на воздействие электромагнитного поля.

В завершение раздела остановимся на возможности масштабирования модели, что представляет интерес в связи с проблемой объяснения влияния на сейсмический режим импульсов тока, возбуждаемых в земной коре при электромагнитных зондированиях с применением мощных источников: геофизических магнитогидродинамических генераторов [10] и обычных электро-разведочных генераторных устройств [58–60]. Попытка напрямую перенести модель возбуждения колебаний на случай километровых размеров (натурного геофизического масштаба) и характерных параметров зондирующих токовых импульсов, применяемых при электромагнитных зондированиях коры на Бишкекском геодинамическом полигоне (Северный Тянь-Шань), дает отрицательный результат. Это видно по следующим оценкам. Напряженность поля E при электромагнитных зондированиях даже в ближней зоне электродов не превышает 0.1 В/м, так как по описанию [10, 58, 59] напряжение с амплитудой 300–400 В подается на заземляющие электроды, разнесенные на 4 км. Амплитуда тока в импульсах, генерируемых электроразведочным генераторным устройством, которое заменило магнитогидродинамические генераторы, — 600 А. Длительность токового импульса — 5 мс при биполярных зондированиях (в обычном режиме) и 5, 10 либо 20 мс при однополярных, экспериментальных сеансах (после которых отмечен отклик — кратковременный прирост слабой сейсмичности). Во всех режимах длительность фронта нарастания тока — порядка 0.1 мс. Оценки ω_s по формуле (5) при $\omega_{1,2} \sim 10^4$ с⁻¹, соответствующие этой длительности фронта, дают значения ~ 0.1 с⁻¹, которые находятся за пределами геоакустического и сейсмического диапазонов. К тому же уменьшению напряженности поля в $10^3\text{--}10^4$ раз по сравнению со случаем лабораторного эксперимента соответствует уменьшение амплитуды вибраций, описываемой (7), в миллион и более раз. Таким образом, для объяснения влияния токовых зондирующих импульсов на вариации локальной сейсмичности на территории Бишкекского полигона необходим поиск другого механизма.

В предшествующих работах, например [8, 11, 58], обращалось внимание на сходство реакции среды на воздействие импульсных электромагнитных полей, что

проявляется как конформность профилей вариаций на графиках временных зависимостей активности акустической эмиссии и суточного числа сейсмических событий. Это может свидетельствовать о том, что и в природных условиях первичное возбуждение вибраций в земной коре под влиянием зондирующих токовых импульсов играет важную роль в механизме электромагнитного воздействия на сейсмический процесс. Попробуем установить источник вибраций, принимая во внимание, что для эффекта отклика слабой сейсмичности принципиальное значение имеют крутизна фронтов токового импульса и вклад энергии в среду [58–60]. Токи экспериментальных сеансов электроразведочных генераторных устройств концентрируются в электропроводящих каналах, роль которых играют в основном заполненные минерализованной водой полости трещин. Распространение мощных токовых импульсов с крутыми фронтами в трещиноватой среде при заполнении трещин водой чуть менее 100 % может сопровождаться нелинейными электромеханическими эффектами переходного типа, которые ранее не рассматривались применительно к энергетическим воздействиям. Во-первых, это пробой на фронте нарастания тока, а точнее формирование токового канала в режиме с обострением за счет быстрого исчезновения перемычек — пузырьков насыщенного пара, разделяющих отдельные столбики проводящей жидкости (рис. 7, а). Во-вторых, это быстрый разрыв жидкого проводника с образованием пузыря при прохождении фронта спада импульса тока, рис. 7, б (аналог известного эффекта взрывающейся проволочки).

Рассмотрим особенности возникновения и распада токового канала в полости трещины (рис. 7). Будем

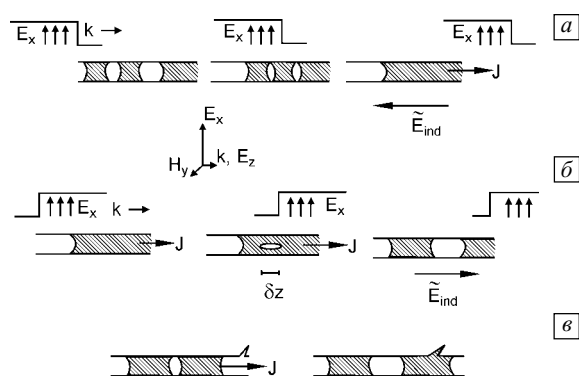


Рис. 7. Гипотеза канального механизма электромеханического преобразования. Для распространяющегося в направлении k электромагнитного импульса фронты нарастания/спада амплитуды поперечной компоненты E_x опережают соответствующие фронты тока J : вступление мощного импульса – формирование токового канала при слиянии жидких объемов в полости (а); разрыв токового канала после прохождения импульса (б); сопутствующий эффект — перемещение столба жидкости в канале может подкачивать ее в трещины, сопряженные с основной полостью (в)

считать жидкость смачивающей и не слишком вязкой. Тогда при дилатансионном деформировании объема среды с полностью водозаполненной трещиной, длина которой стационарна ввиду равновесного состояния, жидкий объем может распадаться на несколько капель, способных перемещаться относительно стенок и друг относительно друга. Пространство между каплями заполняет насыщенный пар. При расширении полости трещины такой распад более вероятен, чем отрыв жидкости от поверхности трещины. И наоборот, при сближении боковых поверхностей частично заполненной трещины отдельные капли могут объединяться за счет поглощения пузыря насыщенного пара. Это может происходить, например, при динамическом воздействии волн сжатия от взрыва или удаленного землетрясения. Описанные эффекты, родственные кавитации, в общем случае реализуются независимо от электромагнитных зондирований. Но при распространении мощных импульсов возникновение в жидкости новых поверхностей (пузыря) или раздавливание пузыря может происходить за счет электромагнитной энергии. Эффекты переключения, в свою очередь, оказывают влияние на распространение импульсов, а именно на сохранение их формы (крутых фронтов) с удалением от источника. В отличие от подхода перколяции возникновение «бесконечного кластера», т.е. в данном случае токового канала, не рассматривается как чисто необратимый процесс. Схематически описанный механизм может работать многократно в случае повторяющихся электромагнитных импульсов достаточной большой мощности.

При вынужденном перемещении границы «жидкость–пар» и тем более раздувании/схлопывании пузыря в жидкой фазе, несомненно, возбуждаются звуковые волны. Эти волны передаются из жидкости в скелетную фазу и оказывают стимулирующее влияние на рост других трещин в окружающем объеме. Кроме того, перемещение столба жидкости при разрыве канала может сопровождаться вторичным эффектом — более интенсивным поступлением воды к вершинам трещин, ответвляющихся от рассматриваемой трещины-канала (рис. 7, в), что впоследствии способствует их дальнейшему росту [61]. Другим эффектом, сопутствующим быстрому пробойному формированию токового канала в слабопроводящей или диэлектрической твердой среде, является индукционное возбуждение противо-ЭДС в окружающей канал области (рис. 7, а). Аналогично, при взрывном распаде токового канала в жидкости в области возле него будет наводиться «перенапряжение» (рис. 7, б). Напряженность наведенного поля может превысить амплитудное значение E в падающей волне, и его взаимодействие с пьезоэлектрическими фракциями и сторонними зарядами в скелетном веществе является еще одним фактором, вносящим вклад в возбуждение вибраций во вмещающей среде. Таким образом,

нелинейные эффекты, связанные с большой мощностью токовых импульсов и крутизной их фронтов вполне могут быть кандидатами на роль механизма, объясняющего первичное воздействие электромагнитных зондирований, т.е. их влияние на процесс трещинообразования на низшем масштабном уровне, предшествующий формированию наблюдаемого отклика слабой сейсмичности. Но количественный анализ этих эффектов выходит за рамки данной работы.

Рассмотренный в общих чертах каналовой механизм возбуждения вибраций в земной коре при электромагнитных зондированиях с применением мощных источников тока оказался не таким, как механизм усиления звуковых волн в нагруженных образцах под влиянием электромагнитных импульсов. В свете концептуального многоуровневого подхода к описанию деформируемой сплошной среды, находящейся под воздействием внешних физических полей [62, 63], это различие неудивительно. Хотя сами зависимости сейсмичности и активности акустической эмиссии отражают процесс деструкции в геофизической среде, которой интегрально свойственно самоподобие на различных масштабах длин [15, 64], но специфические особенности удаленных друг от друга структурно-масштабных уровней определяют различные объяснения вариаций эмиссионных параметров, связываемых с внешними воздействиями.

7. Заключение

Результаты экспериментов, проведенных в течение 2000–2008 гг., продемонстрировали, что эффект от наложения внешних электромагнитных полей обладает достаточным потенциалом для модификации процесса накопления дефектов в образцах геоматериалов, находящихся в состоянии неупругого деформирования, но не слишком близко к критическим условиям. Преобладающей реакцией породных образцов на электромагнитные импульсы является кратковременный прирост скорости образования и удлинения микротрещин, что проявляется как отклик активности акустической эмиссии. Анализ энергии, приходящейся на одно дополнительно инициированное событие (параметра энергии удельного триггера), подтвердил, что такие электромагнитные воздействия, как, например, импульсы скрещенных электрического и магнитных полей, а также некоторые другие оптимизированные энергетические воздействия, могут стимулировать прирост активности акустической эмиссии аналогично небольшим механическим пригрузкам (в несколько процентов напряжения сжатия). Низкое значение энергии удельного триггера для электромагнитных импульсов по сравнению со случаем тестовой пригрузки может объясняться тем, что электромагнитное поле воздействует избирательно на разупрочненные зоны, при добавке же механического напряжения более или менее однородно нагружается весь образец.

При стимулированной активации остаются неизменными соотношения между числом дефектов больших и меньших размеров, чему соответствует сохранение самоподобия в потоке событий акустической эмиссии. За стимулированным высвобождением энергии следует, по-видимому, снижение неоднородности в распределении напряжений. Противофазная активация с преимущественным образованием и ростом малых дефектов может быть вызвана при специальных условиях, в частности при сжимающих нагрузках порядка 0.9–0.95 от разрушающих, если при этом средняя акустоэмиссионная активность квазистационарна. В целом, исследования откликов акустической эмиссии в образцах хрупких и псевдопластичных геоматериалов продемонстрировали скорее сходство, чем различие реакции этих сред на электромагнитное воздействие при одних и тех же параметрах импульсов. Это нетривиальное обобщение вплотную подвело к новой модели механизма возбуждения упругих волн в результате нелинейного резонансного взаимодействия с гармониками электромагнитного импульса. В терминах нелинейного рассеяния электромагнитных волн на неоднородностях плотности механизм описывается как аналог эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна для волн в диапазоне частот выше или порядка 10^7 с⁻¹.

Модель указывает причину, по которой крутизна фронтов электромагнитных импульсов имеет принципиальное значение для генерации наблюдаемых откликов акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых при постоянной сжимающей нагрузке. Предложенный механизм объясняет многие закономерности вариаций акустической эмиссии в проведенных экспериментах с электромагнитными воздействиями, в том числе эмпирическое обобщение [11, 42, 65], что чувствительность к электромагнитным импульсам могут проявлять только те области, где с достаточной интенсивностью идут процессы трещинообразования, но сохраняются цельные зоны с высокой добротностью Q . Применительно к условиям испытаний образцов это означает, что необходимым условием для реализации нелинейных резонансов является достаточно высокий уровень активности акустической эмиссии. Отмечено, что на лабораторном и натурном геофизическом масштабах эффективными оказываются различные механизмы электромеханической взаимосвязи.

Автор благодарен академику В.Е. Панину и профессору О.Б. Наймарку за идею адекватности многоуровневого подхода и термодинамики неравновесных состояний для исследований с геофизической направленностью. Автор также признателен коллегам И.Н. Диденкулову, А.С. Закупину, В.А. Мубассаровой и В.Н. Сычеву за обсуждения результатов экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 09-05-00687а, 09-05-12059-офи_м.

Литература

1. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
2. *Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В.* Некоторые особенности динамики межблокового деформирования в земной коре // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 5. – С. 669–683.
3. *Зуев Л.Б.* Физика электропластичности щелочно-галогенных кристаллов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 120 с.
4. *Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др.* Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – № 12. – С. 2182–2186.
5. *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.
6. *Шнейцман В.В., Жога Л.В.* Кинетика разрушения поликристаллической сегнетокерамики в механическом и электрическом полях // ФТТ. – 2005. – Т. 47. – № 5. – С. 843–849.
7. *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 // Ann. Geophys. – 2004. – V. 47. – No. 1. – P. 65–72.
8. *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.
9. *Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 3–15.
10. *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. 152–160.
11. *Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Ильичев П.В.* Феноменологическая модель потока возбужденных эмиссионных сигналов геосреды // Физика Земли. – 2006. – № 9. – С. 71–80.
12. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 101 с.
13. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
14. *Садовский М.А.* Автомодельность геодинамических процессов // Геофизика и физика взрыва: Избр. тр. – М.: Наука, 1999. – С. 171–176.
15. *Гольдин С.В.* Физика «живой» Земли // Проблемы геофизики XXI века / Под ред. А.В. Николаева. – М.: Наука, 2003. – С. 17–36.
16. *Мальшиков Ю.П., Мальшиков С.Ю.* Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра Земли // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 2. – С. 152–172.
17. *Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н.* Солнечная активность, колебания внутреннего ядра Земли, общепланетарная сейсмичность // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы / Под ред. Ю.Г. Леонова. – Москва–Бишкек: Научная станция РАН, 2009. – С. 321–326.
18. *Тихонов И.Н.* Синодические периоды планет Солнечной системы и синхронизация времен возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 5. – С. 1–10.
19. *Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Клочкин В.Н.* О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энергетическом воздействии // Физика Земли. – 2006. – № 10. – С. 36–42.
20. *Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // Физика Земли. – 2008. – № 1. – С. 77–80.
21. *Пат. 2273035 РФ.* Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов / С.Г. Псахья, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров, В.В. Ружич и др. // ИФПМ СО РАН, ИЗК СО РАН. – 22.03.2004.
22. *Bogomolov L., Zakupin A.* Do electromagnetic pulses induce the relaxation or activation of microcracking rate in loaded rocks? (Acoustic emission based study) // Solid State Phenom. – 2008. – V. 137. – P. 199–208.
23. *Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Sycheva N.A.* The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded rock specimens // Mat. Sci. Eng. A. – 2009. – V. 521–522. – P. 401–404.
24. *Bogomolov L., Zakupin A., Tullis T. et al.* Acoustic emission measurements to understand transition straining processes and seismicity triggering by power impacts // Proc. 8th Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics / Ed. by N. Callaos. – Orlando: Int. Institute of Informatics and Systemics, 2004. – V. XII. – P. 274–279.
25. *Трапезников Ю.А., Манжиков Б.Ц., Богомолов Л.М.* Амплитудные спектры акустической эмиссии при ступенчатом нагружении горных пород // Вулканология и сейсмология. – 2000. – № 2. – С. 75–78.
26. *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.
27. *Урусовская А.А., Альшиц В.И., Беккауер Н.Н., Смирнов А.Е.* Деформация кристаллов NaCl в условиях совместного действия магнитного и электрического полей // ФТТ. – Т. 42. – № 2. – С. 267–269.
28. *Батаронов И.Л.* Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 10. – С. 93–99.
29. *Головин Ю.И.* Магнитопластичность твердых тел // ФТТ. – 2004. – Т. 46. – № 5. – С. 769–803.
30. *Alshitz V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Perzhik E.A.* Magneto-plastic Effect in Nonmagnetic Crystals // Dislocations in Solids / Ed. by J.P. Hirth. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – V. 14. – P. 335–437.
31. *Финкель В.М., Головин Ю.И., Середя В.Е. и др.* Электрические эффекты при разрушении кристаллов LiF в связи с проблемой управления трещиной // ФТТ. – 1975. – Т. 17. – № 3. – С. 770–776.
32. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.
33. *Molotskii M.I.* Theoretical basis for electro- and magnetoplasticity // Mat. Sci. Eng. A. – 2000. – V. 287. – No. 2. – P. 248–258.
34. *Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузибаев З.* Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // Физика Земли. – 1991. – № 12. – С. 69–72.
35. *Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л.* Иницирующие вибровоздействия и сейсмическая эмиссия горных пород // Физика Земли. – 1999. – № 12. – С. 39–46.
36. *Береснев И.А.* Сейсмическая эмиссия, наведенная вибровоздействием // Разработка концепции мониторинга природно-технических систем. – М.: ВНИИФТРИ, 1993. – Т. 2. – С. 80–84.
37. *Соболев Г.А., Шнецлер Х., Кольцов А.В., Челидзе Т.Л.* Иницирование неустойчивой подвжки в лабораторном эксперименте // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – Вып. 1. – С. 38–47.
38. *Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 424 с.
39. *Воларович М.П., Пархоменко Э.И.* Пьезоэлектрический эффект горных пород // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1955. – № 3. – С. 215–222.
40. *Пархоменко Э.И.* Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
41. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
42. *Богомолов Л.М., Адигамов Н.С., Сычев В.Н., Закупин А.С.* Феноменологическое описание разномасштабных триггерных эффектов при деформировании геосреды в присутствии физических полей. – Бишкек, 2006. – 40 с. / Препринт НС РАН № 1-06.
43. *Черняк Г.Я.* Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Недра, 1987. – 213 с.
44. *Светов Б.С.* «Неклассическая» геоэлектрика // Физика Земли. – 1995. – № 8. – С. 3–12.
45. *Нокс Р.* Теория экситонов. – М.: Мир, 1966. – 219 с.
46. *Агранович В.М.* Теория экситонов. – М.: Наука, 1968. – 382 с.

47. Шуберт М., Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. – М.: Мир, 1973. – 244 с.
48. Панин В.Е., Гриняев Ю.В. Физическая мезомеханика — новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 4. – С. 9–36.
49. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. 1. Физические основы многоуровневого подхода // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 9–22.
50. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 25–34.
51. Немирович-Данченко М.М. Модель гипопругой хрупкой среды: применение к расчету деформирования и разрушения горных пород // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1. – № 2. – С. 107–114.
52. Назаров В.Е., Радостин А.В. Нелинейные волновые процессы в упругих микрогетерогенных средах. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007. – 256 с.
53. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986. – 301 с.
54. Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Закутин А.С. и др. К оптимизации вибровоздействий на структуры земной коры для разрядки напряжений по данным лабораторного моделирования // Геодинамика и геологические проблемы высокогорных регионов / Под ред. Ю.Г. Леонова и С.В. Гольдина. – Москва–Бишкек: Научная станция ОИВТРАН, 2003. – С. 325–334.
55. Закутин А.С., Богомолов Л.М. Электротриггерные явления в нагруженных геоматериалах по данным акустической эмиссии // Бишкек, 2006. – 31 с. / Препринт НС РАН № 3-06.
56. Закутин А.С. Исследование электростимулированных вариаций акустической эмиссии при деформировании образцов геоматериалов / Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: ОИВТ РАН, 2006. – 21 с.
57. Бобровский В.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Отклики акустической эмиссии образцов на энерговоздействия как модель инициирования микросейсмичности // 15 Зимняя школа по механике сплошных сред: Сб. матер. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – Часть 1. – С. 116–119.
58. Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Сычев В.Н. и др. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмоэлектрическому мониторингу) // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли / Под ред. С.В. Гольдина. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – С. 112–116.
59. Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Сычева Н.А. и др. Корреляционный анализ локальной сейсмичности на Бишкекском геодинамическом полигоне в связи с проблемой активного мониторинга // Геофизика XXI столетия: 2005 год: Сб. трудов VII геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный мир, 2006. – С. 317–325.
60. Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. и др. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008. – С. 179–188.
61. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. и др. Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 5. – С. 608–621.
62. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.
63. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Неравновесная термодинамика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Корпускулярно-волновой дуализм пластического сдвига // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 2. – С. 9–30.
64. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 1. – С. 5–14.
65. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // Физика Земли. – 2005. – № 6. – С. 55–65.

Поступила в редакцию 22.03.2010 г.,
после переработки 15.04.2010 г.