

КАК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИМПУЛЬСЫ ВЛИЯЮТ НА РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЕ НА РАЗНЫХ СТРУКТУРНО-МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ (ФИЗИКА ЭНЕРГОВОЗДЕЙСТВИЙ)

Л.М. Богомолов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск

Работа посвящена анализу физических механизмов возбуждения откликов акустической эмиссии (АЭ) и сейсмической активности при воздействиях на среду электромагнитных импульсов. Предложена новая модель, связывающая отклик АЭ с возбуждением упругих волн вследствие нелинейного резонансного взаимодействия, аналогичного вынужденному рассеянию Бриллюэна. Для натурального масштаба развита другая модель первичного превращения электромагнитной энергии в механическую.

Введение

Идея невзрывного, вибросейсмического либо электромагнитного инициирования слабых сейсмических событий для ускорения разрядки избыточных напряжений в геосреде и снижения риска катастрофического землетрясения приобретает все большую популярность. Определенный вклад в решение вопросов, тематически связанных с этим замыслом, может внести лабораторное моделирование процессов разрушения материалов земной коры при воздействиях импульсов физических полей (так называемых энерговодействиях). Наблюдения влияния нестационарных физических полей на разных масштабах: от лабораторного при характерной длине 1–10 см, до натурального – километрового – взаимно дополняют друг друга [Тарасов и др., 1999; Соболев и Пономарев, 2003; Bogomolov et al., 2004]. Влияние физических полей (в частности, электроимпульсов и вибраций) на скорость роста микротрещин в образцах горных пород исследовалось, как правило, при помощи метода акустической эмиссии (АЭ). В ряде работ (обзор в [Соболев и Пономарев, 2003]) был выявлен эффект прироста активности АЭ, стимулированного внешними электромагнитными полями, который свидетельствует об их влиянии на скорость трещинообразования. Такое влияние электромагнитных полей (ЭМП) определяется их взаимодействием со структурными дефектами в диэлектрических материалах (в частности, в ионных кристаллах). Взаимосвязь электрических полей, обусловленных поляризацией горных пород, с релаксационными процессами (проявлением пластичности) продемонстрирована в [Куксенко и др., 1997] для случая образцов без пьезоэлектрических свойств, находящихся при относительно небольших нагрузках.

Лабораторное моделирование воздействий ЭМП

В настоящей работе продолжено изучение особенностей откликов акустической эмиссии на импульсы ЭМП. Дополнительные воздействия импульсными полями осуществлялись в ходе сеансов при испытаниях образцов на ползучесть на бесшум-

ных реологических прессах. Методика исследования детально изложена в [Закупин и др., 2006]. Сигналы АЭ регистрировались в широком частотном диапазоне от 80 кГц до 2,5 МГц, аппаратура работала в ждущем режиме. В проведенной серии экспериментов подтвержден ранее полученный результат, что при нагрузках 70–95% от максимальных (для конкретного образца) отдельно взятый отклик не приводит к изменению деформации свыше 10^{-5} (то есть соответствующие изменения размеров образцов меньше микрона). В качестве примера на рис. 1 показаны отклики образцов габбро и каменной соли. При длительном воздействии с использованием в качестве источника генератора Г5-54 амплитуда напряженности электрического поля была в пределах 0,8–1,5 кВ/м, а при импульсных воздействиях конденсаторных разрядов – на порядок выше. Эксперименты с образцами каменной соли представляют особый интерес – это псевдопластичный материал, в котором заведомо отсутствуют пьезоэлектрические фракции и пленки водяного пара, существенно влияющие на поведение трещин. Случай на рис. 1в демонстрирует, что, во-первых, отклик образца каменной соли не менее контрастен, чем габбро, и, во-вторых, характеризуется режимом пропорционального, самосогласованного прироста активности слабых и сильных событий. При этом слабые события вносят основной вклад в общий прирост числа накопленных событий.

При сравнении результатов с материалами предшествующих работ [Закупин и др., 2006; Bogomolov et al., 2004] важное значение имеют примеры сходства откликов образцов каменной соли (рис. 1в) и габбро (рис. 1а), а также сходство с рассмотренными в [Закупин и др., 2006] откликами кварцита и гранита. Оказалось, что по данным АЭ геоматериалы с различными пьезоэлектрическими и реологическими свойствами сходным образом реагируют на воздействие ЭМП. Для объяснения столь нетривиального обстоятельства можно предположить, что во всех случаях под влиянием электромагнитных импульсов происходит возбуждение микроколебаний (слабых вибраций), а они уже оказывают триггерное воздействие на рост микротрещин. Действительно, эффект стимулирования АЭ слабыми низкочастотными вибрациями хорошо известен благодаря работам, где был установлен фундаментальный характер такого влияния вибраций на разных масштабах: от сантиметровых (лабораторных, [Куксенко и др., 2003; Мирзоев и др., 1991]), до километровых и более (натурных, [Мирзоев и др., 1987]). Сходство в характере откликов АЭ нагруженных образцов геоматериалов на воздействие импульсных ЭМП и вибраций демонстрирует рис. 2. По оценкам [Богомолов и др., 2001], эффект отклика активности АЭ образцов горных пород проявляется, когда амплитуда колебания давления становится порядка 10^{-6} от уровня главного напряжения. При воздействии высоковольтных разрядов возможность генерации колебаний с амплитудой такого порядка вытекает непосредственно из уравнений электродинамики, описывающих пондеромоторные силы, действующие на диэлектрические материалы с дисперсией [Ландау и Лившиц, 1982]. Однако до настоящего времени оставался загадочным механизм возбуждения «аномальных» вибраций в сессиях с генератором Г5-54, то есть при относительно небольшой напряженности поля.

Физическая модель преобразования электромагнитной энергии

Для идентификации базового эффекта первичного возбуждения вибраций при подаче на образцы электромагнитных импульсов, важным обстоятельством является резкость изменения поля во всех случаях, когда наблюдались отклики АЭ. При по-

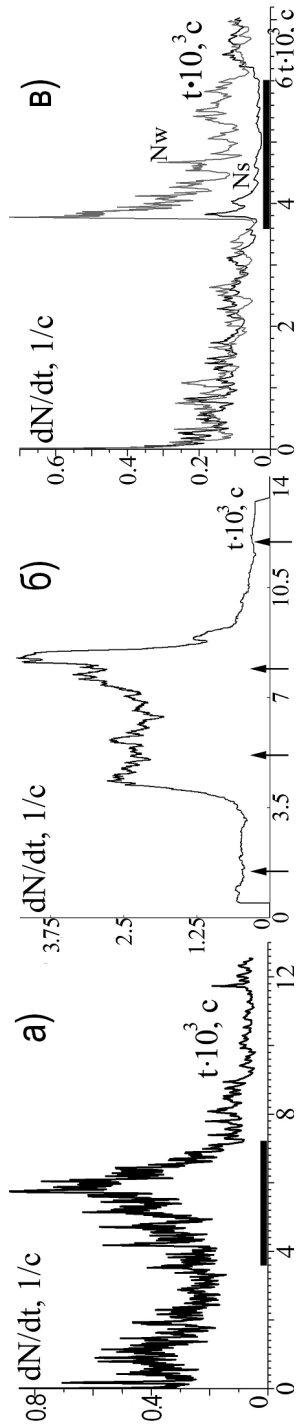


Рис. 1. Временные зависимости активности АЭ образцов в сессиях с подачей электроимпульсов при постоянной нагрузке.

(а) – образец габбро при нагрузке 92% от разрушающей и воздействия импульсов Г5-54 (параметры – 30В, 2 мкс, 90 кГц; (б) – образец габбро на ступени нагружения 98%, стрелки – серии из 10 конденсаторных разрядов с максимальным напряжением 500 В, длительностью около 1 мкс; (в) – селективная активность образца каменной соли при нагрузке 70% от разрушающей, рассчитанная по выборкам событий с меньшей (N_{np}) и большей (N_s) амплитудами, $N(t) = N_{np}(t) + N_s(t)$. Параметры: 60 В, 5 мкс, 2 кГц. Полоса на графиках а), в) указывает время воздействия импульсов генератора Г5-54

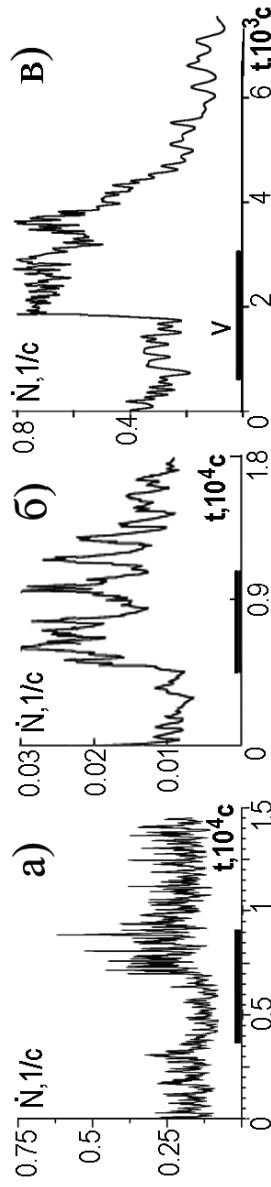


Рис. 2. Сравнение вариаций АЭ в сессиях дополнительными воздействиями.

(а) – зависимость активности АЭ образца гранита в сессии с подачей прямоугольных импульсов с параметрами: амплитуда – 65 В, длительность 10 мкс, частота 50 кГц (источник – генератор Г3-112 с усилителем и выпрямителем); (б) – случай воздействия на образец каменной соли прямоугольными импульсами генератора Г5-54 с амплитудой 60 В, длительностью 5 мкс, частотой повторения – 2 кГц; (в) – зависимость активности АЭ образца гранита в ходе вибротессанса (источник вибраций – динамическая головка, частота – 1000 Гц). Период электро- либо вибровоздействий указан полосой

даче прямоугольных импульсов с крутыми фронтами может проявиться такой волновой эффект, как нелинейное резонансное взаимодействие звуковых и электромагнитных волн, с резонансом на разностной частоте. Для параметров импульсов Г5-54 в экспериментах по воздействию ЭМП на образцы геоматериалов крутые фронты нарастания с длительностью менее 0,1 мкс обеспечивают возбуждение большого числа гармоник в полосе частот выше $\omega \sim 10^7$ 1/с. Среди них найдутся частоты ω_1 , ω_2 , лежащие в диапазоне 10^7 1/с, для которых разность $\omega_1 - \omega_2$ попадает в диапазон звуковых частот ω_s от сотен 1/с до 10^3 1/с. При таком резонансе звуковая волна с частотой $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ будет усиливаться. По существу, эффект является низкочастотным аналогом известного в нелинейной оптике эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна [Шуберт и Вильгельми, 1973] – рассеяния света на временных флуктуациях диэлектрической проницаемости, возникающих вследствие флуктуаций плотности, то есть при деформации. В нагруженных образцах при образовании микротрещин 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, колебания распространяются и могут оказывать триггерное влияние на рост трещины в другой области. Далее процесс повторяется и, таким образом, может произойти «саморазгон» роста микротрещин, проявляющийся в экспериментах как временный прирост активности АЭ. Для горных пород без крупных трещин добротность при атмосферном давлении $Q \sim 100-400$, а в сжатом состоянии может достигать нескольких тысяч [Назаров и Радостин, 2007]. Фактор добротности имеет решающее значение, благодаря нему взаимодействие электромагнитных волн со звуковыми может продолжаться намного дольше времени пробега упругой волны, возникающей при образовании трещины. При этом устраняется неэффективность взаимодействия электромагнитных волн с частотой $\omega \sim 10^7$ 1/с (соответствующей длине волны $\lambda = 2\pi c/\omega \sim 100$ м) с объектами (флуктуациями) малых размеров (от длины микротрещины порядка 10–100 мкм, до нескольких сантиметров).

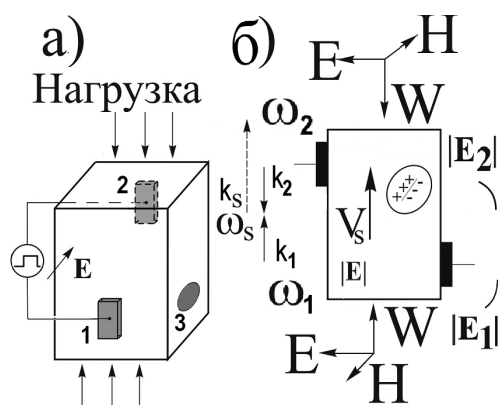


Рис. 3. Аналог нелинейного трехволнового взаимодействия в классической физике: резонанс на биениях электромагнитных волн с близкими частотами ω_1 , ω_2 : (а) – типовая схема размещения электродов на образце; (б) – геометрия задачи с областью, где при росте трещины возникают колебания диэлектрической проницаемости. Показаны направления распространения взаимодействующих волн и усиленной звуковой волны для условного случая, когда волна с частотой $\omega_1 > \omega_2$ «идет снизу». Область сильных флуктуаций выделена эллипсом. 1, 2 – подводящие электроды, 3 – место расположения датчика АЭ либо геофона

Электроды, на которые подавались импульсы генератора Г5-54, устанавливались на противоположных боковых поверхностях испытываемого образца. При этом переходные процессы описываются как распространение двух электромагнитных волн с векторами Умова-Пойнтинга, направленными противоположно друг другу (рис. 3). В теоретической модели вынужденного рассеяния Бриллюэна [Шуберт и Вильгельми, 1973] это соответствует случаю «рассеяния назад», при котором условие усиления звуковой волны записывается в форме:

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

где V_s – скорость звуковой волны, C – скорость электромагнитных волн, для сплошной консолидированной среды обычно $V_s/C \sim 10^{-5}$. Поэтому условие (1) совместимо с требованием $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$, если $\omega_{1,2} \sim 10^7$ 1/с, а частота звуковых волн находится в диапазоне от сотен 1/с до 10^3 1/с. При рассматриваемом классическом (неквантовом) варианте модели вынужденного рассеяния Бриллюэна макроскопическим проявлением этого эффекта, наряду с возбуждением колебаний на частоте ω_s , является различие затухания волн ω_1, ω_2 , (см. рис. 3). Оценить амплитуду микровибраций, возникающих при вынужденном Бриллюэновском рассеянии можно при помощи следующей формулы [Шуберт и Вильгельми, 1973]:

$$\delta\sigma \approx \pi \varepsilon_0 \varepsilon_{(1)} \cdot G^2 \omega_s \cdot E_-(\omega_1, k_1) \cdot E_-(\omega_2, k_2) / (2\rho V_s \Gamma_s), \quad (2)$$

где обозначено: ρ – плотность материала, G – упругий модуль, так что $V_s^2 \sim G/\rho$, Γ_s – коэффициент поглощения звука, выражающийся через добротность Q соотношением $\Gamma_s = \omega_s/2\pi Q$, E_- – амплитуда напряженности электрического поля в волне с указанной частотой и волновым числом k , $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{(1)}$ – возмущение диэлектрической проницаемости при флуктуации плотности, которое в приближении теории возмущений оценивается по формуле $\varepsilon_{(1)} \sim (d\varepsilon/d\sigma)\sigma_-$. Если для грубых оценок взять $\sigma_- \sim 0,2-0,5\sigma$ (имеем дело с окрестностью растущей трещины), то подстановка всех промежуточных соотношений в (2) приводит к выражению:

$$\delta\sigma \sim \pi^2 Q/2 \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot E_-^2, \quad (3)$$

которое подтверждает, что в обсуждаемых экспериментах при характерных значениях $E \sim 1$ кВ/м (случай использования Г5-54) действительно могут возбуждаться колебания с амплитудой давления (напряжения) порядка $10^{-7}-10^{-6}$ относительно уровня главного сжимающего напряжения. Важно отметить, что при одних и тех же величинах напряженности поля E амплитуды колебаний напряжения на частоте ω_s оказались более чем в Q раз больше значений для плотности пондеромоторных сил в квазистационарном случае. Вышерассмотренный механизм возбуждения колебаний объясняет, в какой-то степени, сходство акустоэмиссионных откликов на действие слабых низкочастотных вибраций и на импульсы ЭМП, которое ранее отмечалось в ряде работ. Гипотеза о механизме триггерного влияния на АЭ электромагнитных импульсов через возбуждение низкочастотных вибраций выглядит как неожиданная, поскольку широко распространено представление, что реакция среды (изменение в процессе деструкции) начинается на низших масштабных уровнях, а малым размерам соответствуют более высокие частоты. Однако имеются данные об опережающем возбуждении именно низкочастотных вибраций в сессии с воздействием ЭМП. Эксперимент был проведен на гравитационно-рычажном прессе в 2008 г. с целью сравнения потока обычных сигналов АЭ (с локализацией спек-

тра в полосе 100–500 кГц) и вариаций уровня средней амплитуды низкочастотных сигналов (так называемой геоакустической эмиссии (ГАЭ), в диапазоне частот 10^2 – 10^3 Гц), которые регистрировались при помощи геофона пьезоэлектрического типа, идентичного применяемому при скважинных измерениях [Гаврилов и др., 2006]. В измерительных сессиях включался либо высокочастотный, либо низкочастотный канал, во избежание взаимного влияния первичных пьезопреобразователей. Для испытанного гранитного образца при нагрузках 85–95% от разрушающей отклик активности АЭ на импульсы ЭМП (конденсаторные разряды) наступал с задержкой 600–1000 с. На рис. 4 показано изменение уровня амплитуды ГАЭ в ходе сеанса при воздействии таких же импульсов на 1–5 мин. Прирост уровня ГАЭ произошел скорее, по сравнению с характерной задержкой отклика активности высокочастотных АЭ. Но именно это следует из рассуждений о резонансном усилении низкочастотных вибраций за счет вынужденного Бриллюэновского рассеяния.

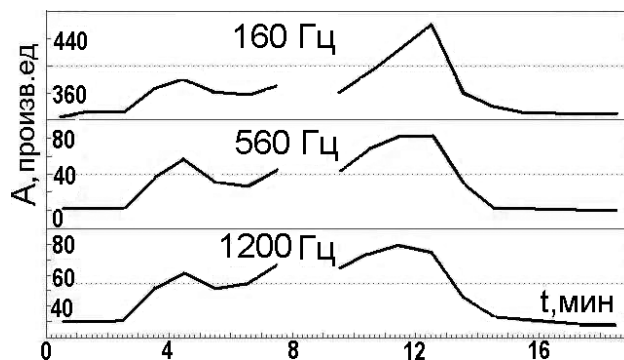


Рис. 4. Временная зависимость амплитуды низкочастотной эмиссии на различных частотах. В данном сеансе проведено 16 конденсаторных разрядов (максимальное напряжение 600 В, длительность ~ 2 мс) с равными интервалами в течение первых 5 минут. Разрыв графиков связан с паузой в регистрации, необходимой для выгрузки данных

О механизме природных энерговоздействий ЭМП

Возможность масштабирования предложенной модели 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 (МГД) [Тарасов и др., 1999; Chelidze et al., 2006] и обычных электроразведочных генераторных устройств (ЭРГУ) [Богомолов и др., 2006; Сычев и др., 2008]. Однако 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 (БГП) (Северный Тянь-Шань), дает отрицательный результат. Это видно по параметрам зондирования и оценке напряженности поля E . Согласно [Тарасов и др., 1999; Сычев и др., 2008], при электромагнитных зондированиях напряжение с амплитудой 300–400 В подается на заземляющие электроды, разнесенные на 4 км, так что даже в ближней зоне электродов $E \leq 0,1$ В/м. Уменьшению напряженности поля в 10^3 – 10^4 раз по сравне-

нию со случаем лабораторного эксперимента соответствует уменьшение амплитуды вибраций, описываемой (1), в миллион и более раз. К тому же амплитуда тока в импульсах, генерируемых ЭРГУ, – 600 А, 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 (1) при $\omega_{1,2} \sim 10^4$ 1/с, соответствующие этой длительности фронта, дают значения $\omega_s \sim 0,1$ с⁻¹, которые находятся за пределами геоакустического и сейсмического диапазонов. Таким образом, для гипотезы о важной роли первичного возбуждения вибраций в земной коре под влиянием зондирующих импульсов необходим поиск другого механизма.

Попытаемся установить источник вибраций, принимая во внимание, что, как и в выше рассмотренном случае АЭ образцов, крутизна фронтов токового импульса – принципиальный фактор для эффекта отклика слабой сейсмичности при электромагнитных зондированиях [Богомолов и др., 2006]. Известно, что возбуждаемые в экспериментальных сеансах ЭРГУ токи 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. 5а). Во-вторых, это быстрый разрыв жидкого проводника с образованием пузыря при прохождении фронта спада импульса тока, рис. 5б (аналог известного эффекта взрывающейся проволоочки). 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.

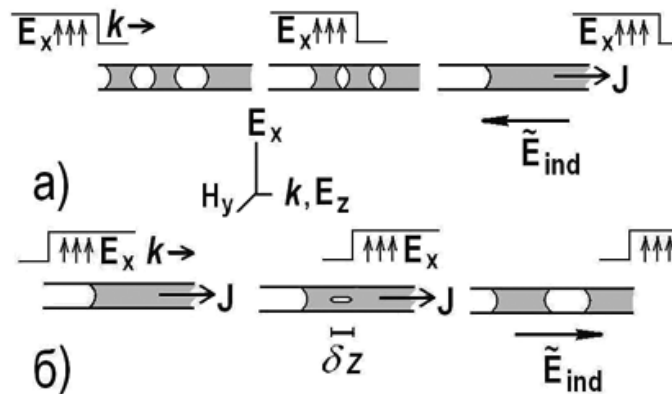


Рис. 5. Схема модели каналового механизма преобразования энергии ЭМП при зондированиях коры мощными импульсами тока в динамические возмущения.

При распространении импульса в направлении k фронты нарастания/спада амплитуды поперечной компоненты E_x опережают фронты тока J : (а) – вступление мощного импульса – формирование токового канала при слиянии жидких объемов; (б) – разрыв токового канала после прохождения импульса

Будем 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. 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. Эти эффекты, родственные кавитации, в общем случае реализуются независимо от электромагнитных зондирований, например при динамическом воздействии волн сжатия от взрыва или удаленного землетрясения. Но при распространении мощных импульсов возникновение в жидкости новых поверхностей (пузыря) может происходить за счет электромагнитной энергии. Для этого необходимо, чтобы высвобождение энергии при угасании тока по месту разрыва проводника превысило энергетические затраты на образование новых поверхностей. Можно записать соответствующий критерий, приравнивая по порядку величины энергию образования новых поверхностей в жидкости $W_s = 2 \gamma s \delta z$ (γ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, δz – длина сегмента, показанная на рис. 5, s – поперечный размер) и энергию тока W_j , локализованную вокруг этого сегмента. В приближении телеграфного уравнения W_j выражается через погонную индуктивность L и силу тока J по формуле $W \sim L \delta z \cdot J^2 / 2$. Условие $W_j > W_s$ сводится к простому выражению

$$J \geq 2(\gamma s/L)^{1/2}, \quad (4)$$

смысл которого сходен с критерием Гриффитса – разрывная неустойчивость реализуется в ослабленных местах при локализованном накоплении там достаточной энергии. В классическом случае это происходит с трещиной, а в нашем случае – в жидкой фазе в полости трещины (рис. 5б). Если выбрать для оценки $\gamma \sim 0,05$ Н/м (вода при температуре 70–90 °С), $L \sim 0,01$ – $0,1$ мГн/м, $s \sim 0,1$ – 1 м, то выражение (3) будет описывать минимальную для реализации эффекта амплитуду тока в одиночном канале (полости) $J \sim 50$ А, что значительно меньше величины тока зондирования (600 А). Другим эффектом, сопутствующим быстрому пробойному формированию токового канала в слабопроводящей или диэлектрической твердой среде (помимо возникновения/схлопывания пузыря) является индукционное возбуждение противо-ЭДС в окружающей канал области (рис. 5а). Аналогично, при взрывном распаде токового канала в жидкости в области возле него будет наводиться «перенапряжение» (рис. 5б). 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.

Следует отметить, что, наряду с ними, определенную роль могут играть и другие механизмы. Показательным примером может быть взаимодействие внешнего электрического поля с несобственными носителями заряда (дырочного типа), которые, согласно [Freund, 2000], возникают в магматических породах при распаде пероксидных групп под воздействием приложенного напряжения. Фактически, в работе [Freund, 2000] представлен сценарий аномальной (диссоциативной) поляри-

зации среды, на которую обращено внимание в связи с вопросом о генерации токов и сильных электромагнитных полей при деструкции среды, то есть обратным эффектом по отношению к вышерассмотренному. В этом сценарии наиболее важно, что подвижные носители удаляются от места распада связей (вершин трещин) и распределяются по макрообъему. Их взаимодействие с импульсным ЭМП приводит к колебаниям плотности заряженных частиц, подобно хорошо известному эффекту возбуждения ионного звука в плазме переменным электрическим полем. Колебания плотности носителей заряда (дырок) передаются скелетному веществу, причем в этом случае амплитуда возмущений $\delta\sigma$ пропорциональна самой напряженности поля E , а не E^2 , как в случае формулы (2) или эффекта электрострикции в диэлектрических средах. Отсюда вытекает принципиальная возможность того, что такая поляризация (при которой, по выражению [Freund, 2000], диэлектрическая среда становится полупроводником) может вносить вклад в чувствительность среды к электромагнитным импульсам.

Заключение

Представлены некоторые новые результаты о вариациях активности акустической эмиссии образцов геоматериалов под влиянием электрических импульсов, отражающих кратковременный прирост числа актов возникновения и удлинения микротрещин. 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 (акустической добротностью и диэлектрической проницаемостью), выполнение которого необходимо для появления акустомиссионного отклика при постоянной нагрузке и отсутствии макроразрушения. В рамках новой модели естественно интерпретируется то обобщение, что крутизна фронтов электромагнитных импульсов имеет принципиальное значение для генерации наблюдаемых откликов акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых при постоянной сжимающей нагрузке.

Для случая полномасштабных (натурных) энерговоздействий указано на наличие другого механизма преобразования электромагнитной энергии в динамические возмущения, которые могут давать вклад в инициирование сейсмического отклика при зондированиях земной коры сильноточными импульсами. Описывающая этот механизм простая модель позволила оценить минимальную амплитуду тока, концентрирующегося в проводящих каналах в трещиноватой водонасыщенной среде, при возбуждении и разрывах которого могут эффективно возбуждаться упругие волны. Обращено внимание на нетривиальность аналогии вариаций АЭ и сейсмической активности, вызванных воздействиями ЭМП на лабораторном и натурном масштабах: сходный сценарий (первичное возбуждение вибраций и активация эмиссионных источников низших уровней иерархии) может быть реализован различными механизмами.

Накопленные экспериментальные результаты и выдвинутые полукачественные модели свидетельствуют, что продолжение исследований триггерных эффектов ЭМП может проводиться в обычном для современной физики режиме выдвижения и экспериментальной проверки гипотез с последующим уточнением модели и т.д.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 09-05-00687а, 09-05-12059-офи_м, 10-05-00 а).

Литература

Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. и др. Виброупругость, акусто-пластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород. // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1678–1689.

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 Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный Мир. 2006. С. 317–325.

Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчевус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.

Закутин 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.

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.

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.

Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 2 изд. 1982. 620 с.

Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. – Душанбе: Дониш. 1987. С. 101–119.

Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузубаев З. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // Физика Земли. 1991. № 12. С. 69–72.

Назаров В.Е., Радостин А.В. Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. – Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2007. 256 с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука. 2003. 270 с.

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: Изд. Института горного дела СО РАН. 2008. С. 179–188.

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.

Шуберт М, Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. – М.: Мир. 1973. 244 с.

Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A. et al. AE response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. N. 1. P. 65–72.

Chelidze T., De Rubeis V., Matcharasgvili T., Tosi P. Influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquake time distribution in the Bishkek test area (Central Asia) // Annals of Geophysics. 2006. V. 49. N. 4/5. P. 961–975.

Freund F. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. B5. P. 11001–11020.