

Вариации акустической эмиссии и деформации горных пород при триггерных воздействиях электромагнитных полей (обзор). Часть 1

© 2019 В. А. Мубассарова*¹, Л. М. Богомолов², А. С. Закупин², И. А. Пантелеев³

¹Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

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

³Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

*E-mail: helmik69@gmail.com

На основе литературных источников представлен обзор современного состояния проблемы влияния электромагнитного поля на процессы деформирования в образцах горных пород и искусственных материалов. Не вызывает сомнений определенное сходство особенностей процессов разрушения, обнаруженных при лабораторных исследованиях поведения различных материалов под нагрузкой, и явлений, наблюдаемых в сейсмически активных регионах. Опираясь на это сходство, можно с определенными допущениями говорить о вкладе того или иного механизма в триггерное воздействие электромагнитных полей на вариации сейсмической активности. Однако адекватной и применимой на практике количественной модели, описывающей наблюдаемые эффекты, пока не существует.

Ключевые слова: триггерное воздействие, электромагнитное поле, акустическая эмиссия, деформация, деформация горных пород.

Acoustic emission and strain responses of rocks triggered by electromagnetic action. – A review. Part 1

Virginia A. Mubassarova¹, Leonid B. Bogomolov², Alexander S. Zakupin², Ivan A. Panteleev³

¹Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³Institute of Continuous Media Mechanics, the Ural Branch of the Russian Academy of Science, Perm, Russia

The state of the art of the problem of electromagnetic field influence on the deformation processes in specimens of rocks and artificial materials has been represented on the base of extensive bibliography.

There are some similar features between details of the destruction processes in various loaded materials tested in the laboratories and that of phenomena observed in seismically active regions. Such similarity may be useful (with certain extra assumptions) assumptions to discuss the possible contribution of a mechanism to the trigger effect of variations in the seismic activity caused by electromagnetic fields.

However, an adequate and applicable quantitative model describing the observed effects does not yet exist.

Keywords: triggered influence, electromagnetic field, acoustic emission, strain, rock specimen.

Введение

За последнее столетие в исследованиях землетрясений накоплен обширный материал, который продолжает непрерывно дополняться новыми сведениями о структуре сейсмичности и влиянии на нее всего многообразия факторов естественной и антропогенной природы (их удобно называть

кратко внешним воздействием, которое дополнительно наложено на поле напряжений в земной коре). Определенное сходство в проявлениях хрупкого разрушения геоматериалов (на самых различных пространственных масштабах) и сопутствующих процессах дефектообразования в этих материалах обнаружено благодаря результатам

многочисленных работ [Смирнов, Пономарев, 2004; Завьялов, 2005; Смирнов и др., 2010; Zhurkov et al., 1984; Lockner et al., 1991; Kuksenko et al., 1996; Веттегрень и др., 2006; McLaskey et al., 2014; и др.]. Опираясь на это сходство, процесс деформирования среды перед землетрясением традиционно анализируется с позиций механики разрушения. Перед динамической подвижкой, т.е. непосредственно перед землетрясением, массив горной породы (как и образец при лабораторном моделировании) находится в состоянии, близком к неустойчивому равновесию, или, другими словами, в околокритическом состоянии [Соболев, 2011]. Немонотонное поведение σ – ε -характеристики вблизи точки неустойчивого равновесия соответствует существованию набора метастабильных состояний в диапазоне, особенностью которого является значительное изменение деформации при небольших вариациях напряжения. Такие вариации могут возбуждаться при воздействии различных внешних факторов. Отсюда вытекает принципиальная возможность реализации триггерных эффектов, заключающихся в переходе от одного метастабильного состояния к другому под влиянием внешних воздействий даже небольшой интенсивности [Соболев, Пономарев, 2003; Куксенко, Махмудов, 2004; Нелинейная... , 2007; Гохберг, Колосницын, 2010; Богомолов, 2010; Соболев, 2011; Авагимов и др., 2011; Кочарян, 2016]. В процессе такого перехода открытая термодинамическая система, которой является нагруженный материал, может скачкообразно переходить в новое неустойчивое состояние, минуя несколько возможных точек неустойчивого равновесия.

Само метастабильное состояние очаговой зоны зависит от целого ряда факторов, таких как текущий уровень трещинообразования, динамика напряжений во времени, определяемая темпом внешней (глобальной) деформации и уровнем возможных внешних воздействий, роль которых в активации землетрясения увеличивается [Keilis-Borok, 1990; Sornette, Sammis, 1995]. Триггерные эффекты (переходы) могут быть вызваны различными факторами, в том числе переменными физическими полями. Для возмущений напряжения порядка 0.1–0.001 от ха-

рактерных значений главного напряжения подобные эффекты хорошо известны [Соболев, Пономарев, 2003; Кочарян и др., 2013; Кочарян, 2016]. На натурном геофизическом масштабе триггерный эффект электромагнитного поля был установлен по кратковременной активации сейсмичности [Тарасов и др., 2001; Tarasov, Tarasova, 2004; Chelidze et al., 2006] и по вариациям ее характеристик [Тарасов, Тарасова, 2011; Смирнов, Завьялов, 2012]. В работах [Тарасов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011, 2016] отмечено изменение скорости сейсмотектонических деформаций в период электромагнитных воздействий (ЭМВ) при зондированиях земной коры магнитогидродинамическими генераторами, а также проведена оценка релаксации напряжений по месту таких зондирований. Тем самым подведен итог большого цикла работ, посвященных этим триггерным воздействиям. Но вопрос о механизмах воздействия электрозондирований на сейсмичность выяснен далеко не полностью, о чем свидетельствуют работы [Гаврилов и др., 2014; Гаврилов, Пантелеев, 2016; Gabrielov, Keilis-Borok, 1983; Gavrilov et al., 2013; Panteleev, Gavrilov, 2015]. В этих условиях, с учетом свойств самоподобия геосреды [Гольдин, 2004; Соболев, 2014; Gabrielov, Keilis-Borok, 1983; Panteleev et al., 2012; Пантелеев, Наймарк, 2014], особый интерес могут представлять результаты лабораторных экспериментов на нагруженных образцах горных пород [Богомолов, 2010; Bogomolov, Zakupin, 2008; Bogomolov et al., 2004]. В этих экспериментах с воздействием электромагнитного (ЭМ) поля на процесс деформации и разрушения геоматериалов внешние факторы легко воспроизводятся, они модифицируют количественные, а не качественные характеристики: скорость осевой и поперечной деформации, интенсивность трещинообразования (активность акустической эмиссии). Сама акустическая эмиссия (АЭ) при этом выступает в роли индикатора дефектообразования (неустойчивости) [Куксенко и др., 2011; Scholz, 1968; Kuksenko et al., 1996]. Подобные эксперименты проводились в Институте физики Земли РАН (ИФЗ РАН), Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН) и Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН)

в конце 1990-х годов и начале нашего века. В наибольшей степени исследован вопрос о влиянии электромагнитных полей на накопление дефектов (фактически, неупругую составляющую деформации) по данным акустической эмиссии образцов горных пород. Ниже представлены основные результаты этих работ. Стоит отметить, что для построения модели, объясняющей механизм влияния ЭМ полей на процесс разрушения геоматериалов и геосред, необходимо описание последовательной цепочки явлений: нетепловое поглощение энергии ЭМ полей в нагруженных геоматериалах → изменение их состояния или свойств в некоторых локальных областях, в том числе изменения в дефектной подсистеме → изменения в режиме пластической или неупругой деформации. Результаты цитируемых работ, относятся, как правило, к одному из звеньев логической цепочки.

1. Исследование электромагнитных воздействий на образцах геоматериалов с помощью метода акустической эмиссии

Первые результаты исследования электромагнитного влияния на акустическую эмиссию модельных образцов были получены в геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН на сервоуправляемом прессе – электрогидравлической системе INOVA [Соболев, Пономарев, 2003; Sobolev et al., 2000; Ponomarev et al., 2002]. Эксперименты выполнены на образцах, изготовленных из бетона с примесью либо кварцевого песка («пьезоэлектрических»), либо диабазового («непьезоэлектрических»). Образцы подвергались деформированию в условиях двухосного сжатия при постоянном боковом сжимающем усилии ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$). Основная (вертикальная) нагрузка изменялась с постоянной скоростью, обеспечивая скорость деформации $\dot{\epsilon}_1 = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$. В течение заданного промежутка времени на образец действовало переменное электрическое поле. Несмотря на то что приращение (отклик) числа сигналов акустической эмиссии нагружаемых образцов при возбуждении ее ЭМ полем составило порядка 1 % от исходного уровня до воздействия (рис. 1), обнаружен-

ная тенденция увеличения активности АЭ оказалась статистически значимой [Соболев, Пономарев, 2003].

Несколько позднее большой цикл исследований по этой тематике был проведен в ИС РАН на образцах горных пород с различными физико-химическими и реологическими свойствами (обзор всех результатов в [Богомолов и др., 2011]). При выборе образцов горных пород в качестве материалов для испытаний было принято во внимание, что для серий образцов гранита, габбро, мрамора и т.п. из пород одних и тех же месторождений по сравнению с образцами, изготовленными из цементно-песчаных смесей, достигается лучшая воспроизводимость деформационной кривой (σ – ϵ -характеристики) при одноосном сжатии. Такая воспроизводимость при одинаковых режимах нагружения важна для выявления реакции среды на дополнительные воздействия (в том числе электроимпульсы) на фоне типичного поведения активности АЭ и деформационных параметров.

Наибольшее количество экспериментов было проведено на образцах магматических пород, для которых исследован эффект электрочувствительности материалов в зависимости от величины сжимающего напря-

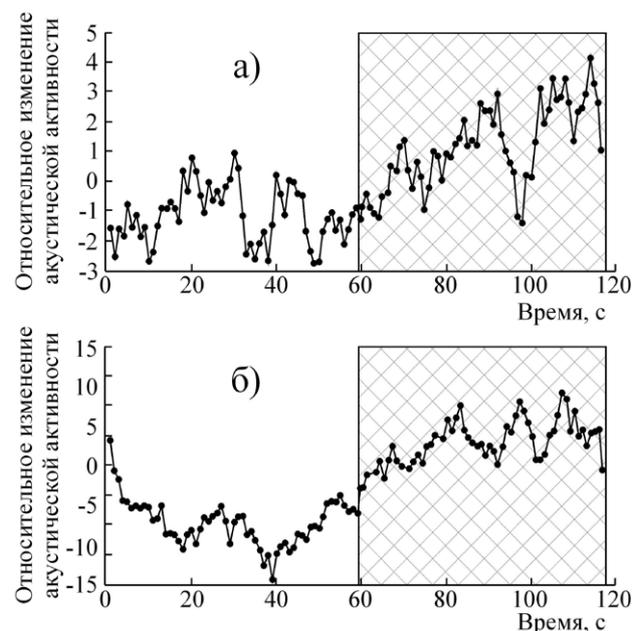


Рис. 1. Изменение акустической активности при переходе от фазы покоя (1–59 с) к фазе инициирования электрическими импульсами (60–118 с) частотой 250 Гц (а) и 2.5 кГц (б), согласно [Соболев, Пономарев, 2003; Sobolev et al., 2000; Ponomarev et al., 2002]. Модель с диабазовым песком.

жения (сеансы ЭМ воздействия проводились при фиксированном уровне напряжения $\sigma_1 = \text{const}$). Как правило, схема экспериментов была следующей [Закупин и др., 2006а; Мубассарова, 2018; Bogomolov et al., 2004]: вначале на образец подавалась нагрузка, которая сразу же фиксировалась и оставалась постоянной на протяжении всего испытания. Затем образец для завершения переходных процессов после пригрузки выдерживался некоторый период времени (обычно около 1 ч), характеризуемый степенным спадом активности АЭ, подобным закону Омори для афтершоковой активности [Utsu, 1961]. После этого на образец воздействовали электромагнитным полем (обычно также в течение 1 ч), затем следовал период ожидания последствий ЭМ поля и следующая нагрузка с повторением всех описанных этапов.

На образцах гранитов, гранодиоритов и габбро было продемонстрировано, что активность АЭ, обусловленная воздействием ЭМ поля, проявляется при значениях осевого сжимающего напряжения, соответствующих $k_p > 0.7$ (k_p – отношение текущей нагрузки к разрушающей) [Закупин и др., 2006б; Bogomolov, Zakupin, 2008]. Наименьшая величина напряжения, при которой зарегистрированы электромагнитные эффекты, соответствует началу дилатансионной стадии деформирования, когда при увеличении сжимающей нагрузки объем образца увеличивается за счет бокового расширения. Наблюдаемые задержки откликов активности АЭ от момента подачи электровоздействия уменьшаются при увеличении нагрузки. Вариации усредненной активности АЭ

при внешних воздействиях отчетливо выделялись визуально на временных графиках (рис. 2), а с применением статистического анализа временных рядов стимулирующий эффект электроимпульсов стал бесспорным [Закупин и др., 2006б; Богомолов и др., 2011].

При дальнейшем изучении триггерных электромагнитных эффектов в ОИВТ РАН были получены оценки вносимой электровоздействием энергии и энергии, излучаемой акустическим сигналом [Авагимов и др., 2006]. Установлено, что для образцов двуокиси циркония средняя энергия, необходимая для генерации одного АЭ-сигнала, по мере увеличения нагрузки уменьшается на три порядка величины, а коэффициент акустоэлектрической связи $K_{МЭ}$ равен $2.85 \cdot 10^{-2}$ [Авагимов и др., 2006]. Для бетонных образцов с включениями корунда или керамической крошки из двуокиси циркония был рассчитан минимальный уровень энергии триггерного воздействия e_{tr} , который нелинейно зависит от накопленной потенциальной энергии Π , соответствующей уровням нагрузки k_p от 0.3 до 1.0 (рис. 3). Полученное соотношение $K_{tr} = e_{tr}/\Pi$ составило величину порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ для образцов с различными механофизическими свойствами [Авагимов, Зейгарник, 2008; Авагимов и др., 2011].

На рис. 3 в пятом цикле нагружения представлено уменьшение энергонасыщенности модельного образца, вызванное высвобождением накопленной энергии в виде АЭ-сигналов в результате дополнительного воздействия ЭМ поля. Таким образом, было показано, что внешнее электровоздействие может быть эффективным инструментом для снижения структурных напряжений только на конечном этапе линейного распределения K_{tr} (циклы 5 и 6 на рис. 3) [Авагимов и др., 2011].

При деформировании образца гранита с непрерывным воздействием ЭМ поля (не прекращающимся в течение всего времени нагружения) характер деформирования изменяется [Пантелеев и др., 2015].

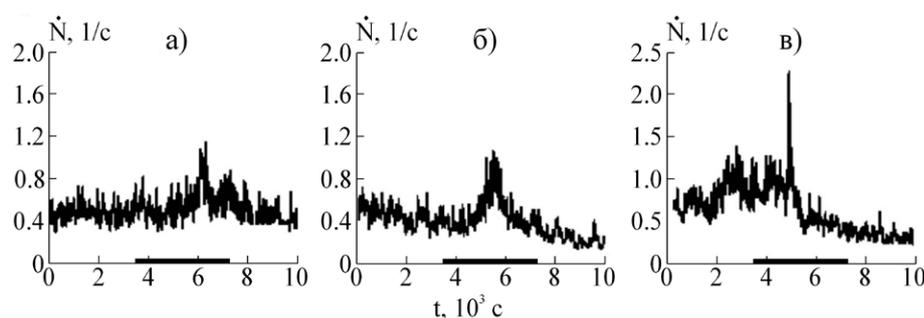


Рис. 2. Активность акустической эмиссии сухого образца гранодиорита при нагрузках: (а) – $k_p = 0.86$ ($\sigma = 170$ МПа); (б) – $k_p = 0.91$ ($\sigma = 178$ МПа); (в) – $k_p = 0.95$ ($\sigma = 187$ МПа), согласно [Закупин и др., 2006б]. Воздействие во всех случаях – прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой 55 В, частотой 2 кГц, длительностью 20 мкс.

Это проявляется в увеличении угла наклона графика повторяемости сигналов АЭ по энергиям, а также в том, что периоды существенного прироста активности АЭ, наблюдающиеся без ЭМ воздействия, в случае облучения ЭМ полем отсутствуют вплоть до разрушения. Также в случае непрерывного ЭМ воздействия отмечено относительное уменьшение количества низкочастотных сигналов АЭ при пропорциональном увеличении количества средне- и высокочастотных импульсов АЭ и резкое сокращение низкочастотных высокоамплитудных импульсов АЭ.

Наиболее наглядно об электромагнитном влиянии свидетельствует изменение пространственного расположения источников АЭ (дефектов) в объеме образца [Пантелеев и др., 2015; Mubassarova et al., 2014]. Кратковременное (1 ч) воздействие электрическими импульсами на стадии диффузного (рассредоточенного) накопления дефектов приводит к перераспределению и кластеризации дефектов в области будущего макроразрыва (рис. 4).

Если ЭМ поле действует на образец непрерывно в течение всего хода нагружения, поэтапное образование и развитие локализованных в объеме образца разрывов (трещин), происходившее до воздействия ЭМ поля, сменяется дисперсным накоплением относительно большого количества соизмеримых по размеру трещин, коалесценция которых и вызывает макроразрушение (рис. 5).

В экспериментах [Лапшин и др., 2016] исследовалось усиление активности АЭ при прохождении электрического тока через флюидонасыщенные образцы песчаника

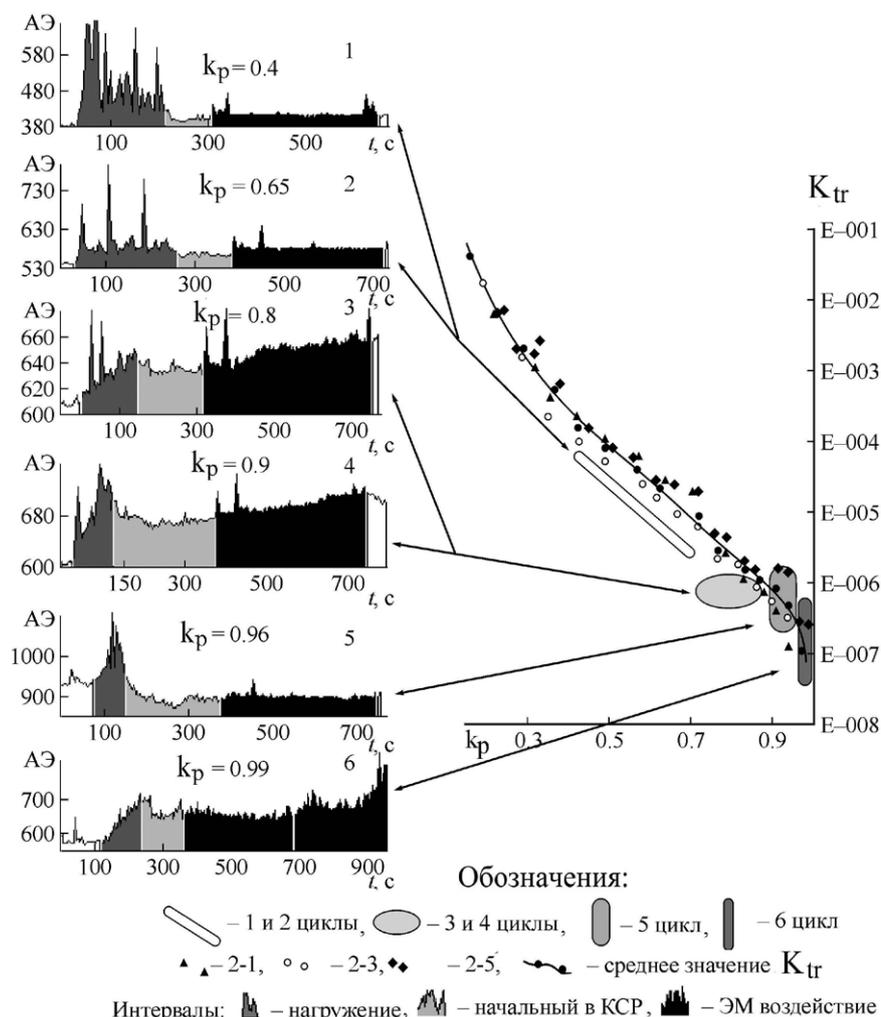


Рис. 3. Распределения параметра K_{tr} (отношение минимальной энергии триггерного воздействия к потенциальной энергии образца при уровне нагрузки k_p) в зависимости от k_p по данным модельных образцов 2-1, 2-3, 2-5, согласно [Авагимов и др., 2011].

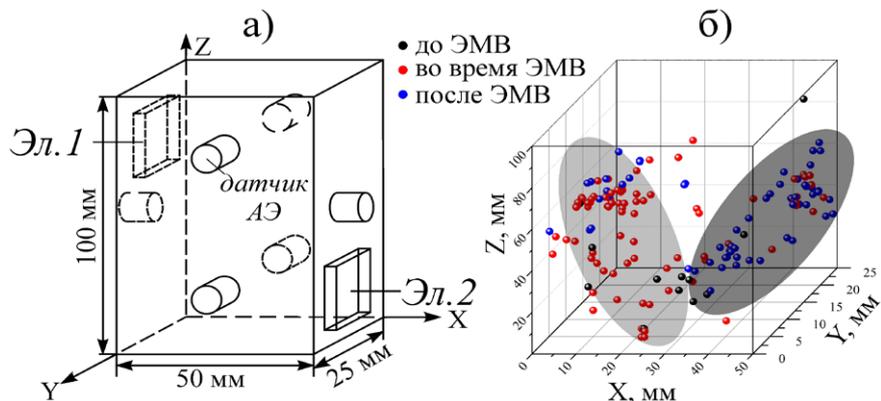


Рис. 4. Схема расположения датчиков АЭ и электродов ЭМВ (а) и пространственное распределение источников сигналов АЭ (б) при постоянном уровне сжатия $k_p = 0.94$ ($\sigma = 75$ МПа), согласно [Mubassarova et al., 2014].

в постановке с гальванической связью электродов с образцом (рис. 6). Важным отличием от экспериментов, проведенных в ИС РАН, являются испытания в запредельной области деформирования, когда на деформационной кривой (σ - ϵ -зависимости) напряжение сжатия образца σ уменьшается с ростом деформации ϵ . В периоды прохождения тока также происходило значимое увеличение объемной деформации образцов. Полученные оценки температурного нагрева порядка 70 °С позволили сделать вывод, что акустоэмиссионная

активизация вызвана температурным расширением флюида в порах и трещинах образца [Лапшин и др., 2016]. В постановке опыта с электростатическим полем, создаваемым разностью потенциалов на электродах, при отсутствии гальванической связи электродов с образцом усиления акустической эмиссии не наблюдалось.

2. Эксперименты с воздействием различных источников электромагнитного поля

Ускорение перемещения дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах при совместном действии электрического и магнитного полей (усиление магнито-пластического эффекта), полученное в работах [Альшиц и др., 1998; Урусовская и др., 2000], побудили сотрудников ИС РАН провести подобный эксперимент на образцах гранита Уэстерли (США) [Закупин et al., 2009]. Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов с высотой в 2–2.5 раза большей поперечных размеров. Источником магнитного поля вместо магнита, как в указанных работах, служила катушка индуктивности, которая была прижата к одной из свободных боковых граней образца и на которую подавались электрические импульсы. Электрическое поле создавалось при помощи электродов, размещенных на других боковых гранях образца так, что направления векторов индукции магнитного поля \vec{B} и напряженности электрического поля \vec{E} были перпендикулярны друг другу и оси сжатия.

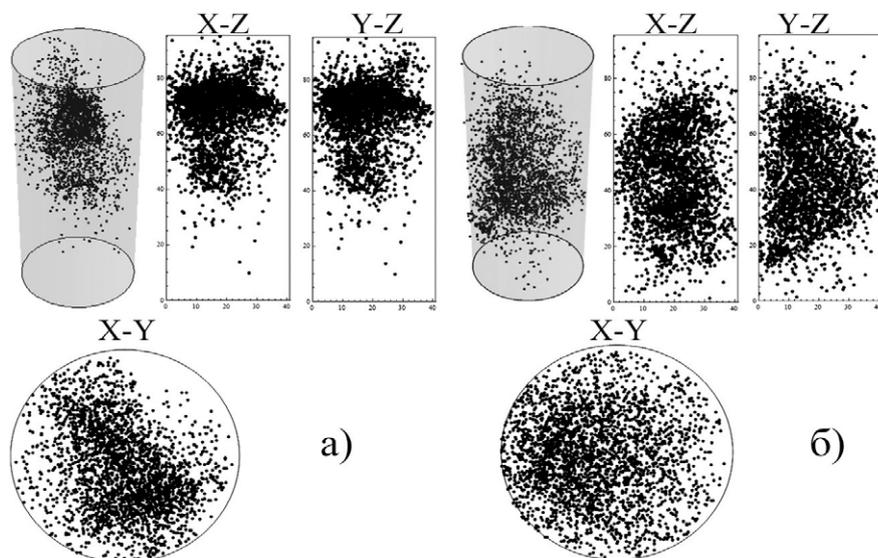


Рис. 5. Пространственное расположение источников импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной в течение всего эксперимента, в случае отсутствия воздействия ЭМ поля (а) и при его воздействии (б), согласно [Пантелеев и др., 2015].

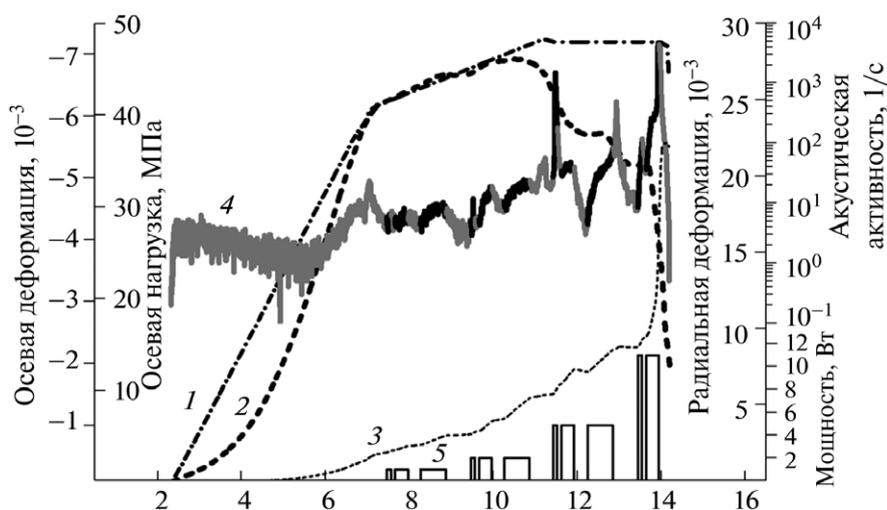


Рис. 6. Примеры вариаций скорости АЭ при воздействии переменным электрическим током разной мощности, согласно [Лапшин и др., 2016]. 1 – задаваемая осевая деформация; 2 – осевые напряжения; 3 – радиальная деформация; 4 – скорость АЭ; 5 – электрическая мощность. Темным тоном на кривой 4 отмечены интервалы воздействия электрическим током.

При сравнении откликов АЭ на этот вид ЭМ воздействия и тестовую механическую пригрузку, равную 1 % от приложенного усилия (рис. 7а), были получены следующие результаты. Отклик активности АЭ на ЭМ воздействие оказался по амплитуде больше отклика на тестовую пригрузку. А его длительность была примерно в 15 раз больше (было зарегистрировано последствие ЭМ поля), чем в случае отклика на механическую пригрузку [Zakurin et al., 2009]. Анализ амплитуд зарегистрированных сигналов АЭ показал, что соотношение условно «крупноамплитудных» и «слабоамплитудных» сигналов в случае активизации АЭ при механической пригрузке и ЭМ воздействии было практически равным. Однако спад активности АЭ после отклика на электромагнитное воздействие характеризуется резким уменьшением количества «слабых» сигналов практически до нуля (рис. 7б) [Zakurin et al., 2009].

В дальнейших экспериментах для приближения условий нагружения образцов натурным (медленный рост напряжения при подготовке очага землетрясения) воздействие ЭМ полем проводилось в период нарастающей нагрузки [Zakurin et al., 2012a; Zakurin et al., 2012b].

Интерес представляет эксперимент, проведенный с разными типами электрических импульсов: с условно «высокоамплитудными» (амплитудой 800 В) от конденсаторного разрядника (10 разрядов в 1 мин) и «низкоамплитудными» (амплитудой 50 В) от генератора прямоугольных импульсов с частотой

3 кГц. Вначале на образец в течение 30 мин подавали «низкоамплитудные» импульсы, затем следовала серия «высокоамплитудных», и процедура заново повторялась еще раз. Это составляло один сеанс ЭМ воздействия. Электромагнитное воздействие в такой комбинации вызывает существенные изменения не только в акустической эмиссии, но также в осевой и поперечной деформации (рис. 8). Отметим, что именно в этих экспериментах [Zakurin et al., 2012a] впервые было подтверждено стимулирующее влияние ЭМ поля на ускорение деформации. В данном случае «низкоамплитудные» импульсы «энергетически» насыщали материал, подготавливая к последующему воздействию и росту деформации (рис. 8). Наблюдаемые скачки деформации проявлялись в центральном поперечном сечении образца.

При комбинированном воздействии электрического и магнитного полей по схеме, описанной выше, были получены синхронные изменения в активности АЭ и деформации в образцах мрамора при нарастающей нагрузке (рис. 9) [Богомолов и др., 2017]. С задержкой около 8 мин от начала сеанса отмечено первое изменение скорости деформации $\dot{\epsilon}_y$ (цифра 1 на рис. 9а). Через 15 мин от начала воздействия синхронно увеличились скорости продольной $\dot{\epsilon}_z$ и поперечной $\dot{\epsilon}_x$ деформации (момент обозначен цифрой 2 на рис. 9а). За это время продольное укорочение образца составило $\Delta l_z \approx 0.8$ мкм, а поперечное удлинение – $\Delta l_x \approx 0.9$ мкм. Второй прирост скоростей деформации наблюдается

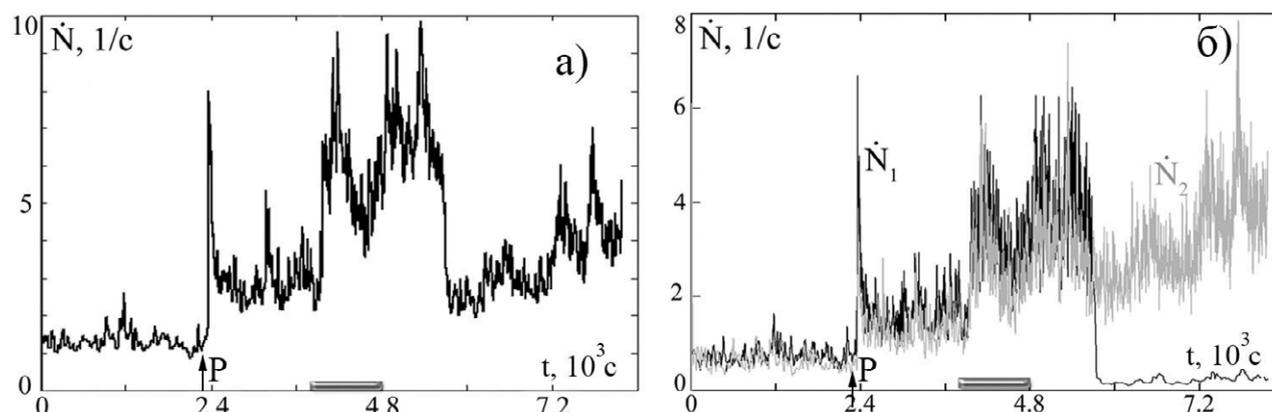


Рис. 7. Временные зависимости активности АЭ: а – активность всех зарегистрированных сигналов, б – активности сигналов «слабоамплитудных» (черная кривая, N_1) и «крупноамплитудных» (серая кривая, N_2) образца гранита Уэстерли при $k_p = 0.85$ ($\sigma = 107$ МПа) [Zakurin et al., 2009]. Серая линия на нижней оси – интервал воздействия, стрелка и буква Р указывают момент механической пригрузки.

за 10 мин до окончания сеанса воздействия (цифра 3 на рис. 9а). Аналогично предыдущему приросту осевое укорочение и поперечное удлинение в данном случае не превысили 1 мкм. При первом приросте деформации выделилось примерно 3800 сигналов АЭ, а в течение второго – около 3900 сигналов. Всего за 1 ч воздействия зарегистрировано более 10 000 сигналов АЭ, в то время как за 1 ч до него выделилось лишь около 1200 (прирост по количеству сигналов составил 8.7 раза). Таким образом, при укорочении образца в продольном направлении примерно на 1 мкм и одновременном поперечном расширении на 1 мкм в образце мрамора генерируется около 4000 сигналов АЭ.

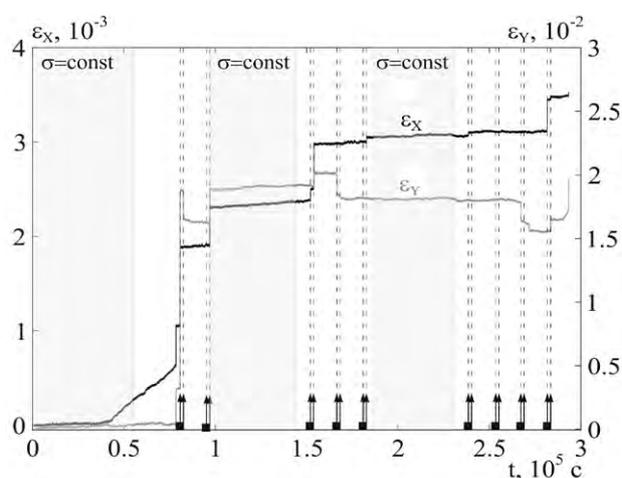


Рис. 8. Изменения деформации образца мрамора в поперечных сжатии направлениях (X- и Y-компоненты деформации) от начала нагружения и до разрушения, согласно [Zakupin et al., 2012a]. Прямоугольниками со стрелками и вертикальными линиями показаны периоды сеансов ЭМ воздействий.

В этой же работе показано, что в случае непрерывного воздействия ЭМ поле играет роль скорее не триггера (спускового крючка некоего большого по энергетике события, предваряемого длительным накоплением напряжений), а «соучастника» деформационного процесса на всех его стадиях. Продемонстрировано, что непрерывное ЭМ воздействие обеспечивает рост средней скорости деформации, снижая вероятность скачкообразных смещений (сдвигов) по поверхностям формирующихся разрывов [Богомолов и др., 2017].

3. Исследование триггерных эффектов электромагнитных полей на установках-слайдерах

Рассмотренные выше экспериментальные результаты базировались на концепции механизма землетрясения как акта разрушения сплошной ненарушенной среды вследствие накопления напряжений и локализации деформации. Однако наряду с этой концепцией существует модель неустойчивого скольжения, «stick-slip» [Соболев, Пономарев, 2003; Scholz, 1998]. Эта модель учитывает сложный характер зависимости внутреннего трения от скорости и параметров состояния поверхностей, включая интервал снижения трения при росте скорости относительного перемещения блоков [Brace, Byerlee, 1966; Scholz, 1998]. В лабораторных условиях модель stick-slip реализуется при помощи специальных пружинно-блочных установок – слайдеров, ими-

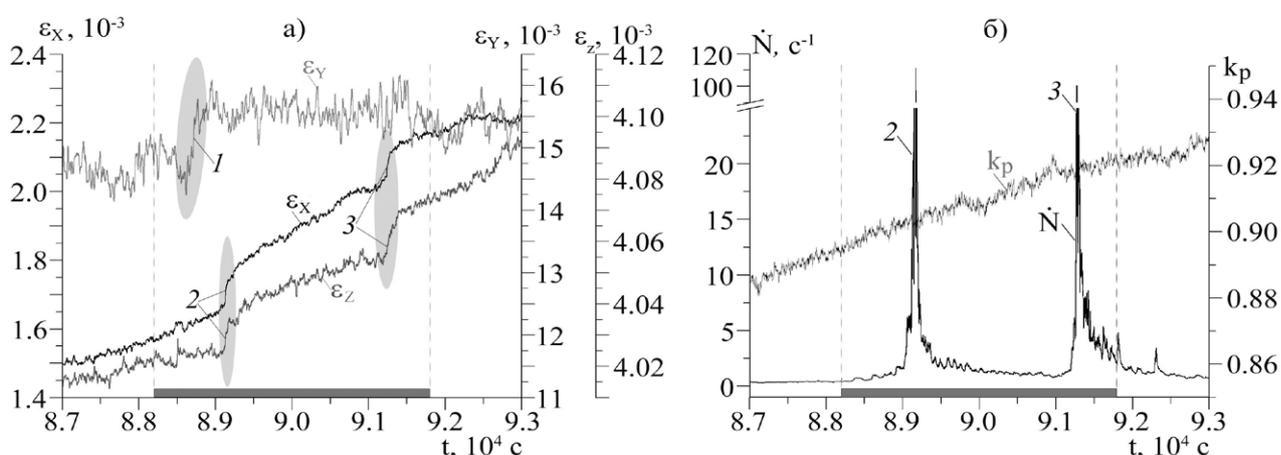


Рис. 9. Масштабированные графики: а – изменения 3 компонент деформации, сглаженные методом скользящего среднего: черная кривая – ϵ_x , светло-серая – ϵ_y , серая – ϵ_z ; б – активность АЭ образца мрамора при растущем значении относительного напряжения k_p (серая кривая), согласно [Богомолов и др., 2017]. Штриховыми линиями и серой полосой отмечены интервалы с сеансами ЭМ воздействий.

тирующих прерывистое скольжение по разлому [Кочарян, Новиков, 2015].

В работах [Chelidze et al., 2002, 2004] описаны эксперименты по воздействию электромагнитного поля на проскальзывание контактирующих блоков.

Особенно нагляден эксперимент с «классическим» слайдером – соскальзывание одного из блоков по наклонной плоскости другого блока, стимулированное электрическими импульсами [Chelidze et al., 2002]. В качестве материалов блоков (верхнего, соскальзывающего, и нижнего, опорного) авторы использовали стекло, базальт, лабрадорит и гранит. Оба блока были выполнены из одного материала. Получены критические значения угла наклона опорной поверхности для соскальзывания верхнего блока. При уменьшении угла наклона опорного блока на $0.1\text{--}2^\circ$ относительно критического значения было обнаружено, что воздействие электроимпульсов амплитудой несколько вольт на миллиметр инициирует скольжение (подвижку) верхнего блока в случае, когда направление ЭМ поля параллельно поверхности скольжения. В случае перпендикулярной ориентации вектора напряженности ЭМ поля и плоскости скольжения ЭМ поле препятствует реализации подвижки. Механический эквивалент электрического воздействия, вызывающего подвижку, в этом эксперименте равен силе в 0.2 Н . Вероятность чисто случайной подвижки во время электровоздействия оценивалась как 0.07 [Chelidze et al., 2002]. Учитывая, что влияние ЭМ поля было зафиксировано и на материалах, не обладающих пьезоэлектрическими свойствами, авторы [Chelidze et al., 2002, 2004] приходят к выводу, что пьезоэлектрический эффект не является определяющим механизмом действия ЭМ поля, а основную роль играют пондеромоторные силы.

В другой постановке [Chelidze et al., 2016] при тяговом волочении верхнего блока по неподвижному опорному блоку был обнаружен эффект синхронизации микроподвижек с импульсами ЭМ поля, нормально направленного к плоскости скольжения. Обнаруженную в этих работах синхронизацию интервалов преимущественного возникновения АЭ с амплитудой напряженности электрического

поля можно рассматривать как разновидность (одну из мод) эффекта электростимулирования деформации. Для этой разновидности реакции среды (в данном случае системы контактирующих тел) на электровоздействие не отмечен прирост общего числа событий АЭ по сравнению со случаем отсутствия поля; происходит лишь перераспределение во времени, «модуляция» потока событий.

Результаты цитированных работ могли бы свидетельствовать об уменьшении коэффициента внутреннего трения и/или сцепления, так как наблюдаемые подвижки на контактах указывают на нарушение критерия Кулона–Мора при электровоздействии в условиях неизменности механического напряжения, действующего по нормали к поверхности контакта [Кочарян, Новиков, 2015; Chelidze et al., 2004; Novikov et al., 2017; Кочарян, Новиков, 2015].

В работе [Novilov et al., 2017] на слайдере была подтверждена возможность инициирования макроподвижки блока импульсами тока, протекающего вдоль модельной разломной зоны (рис. 10). Резкая подвижка

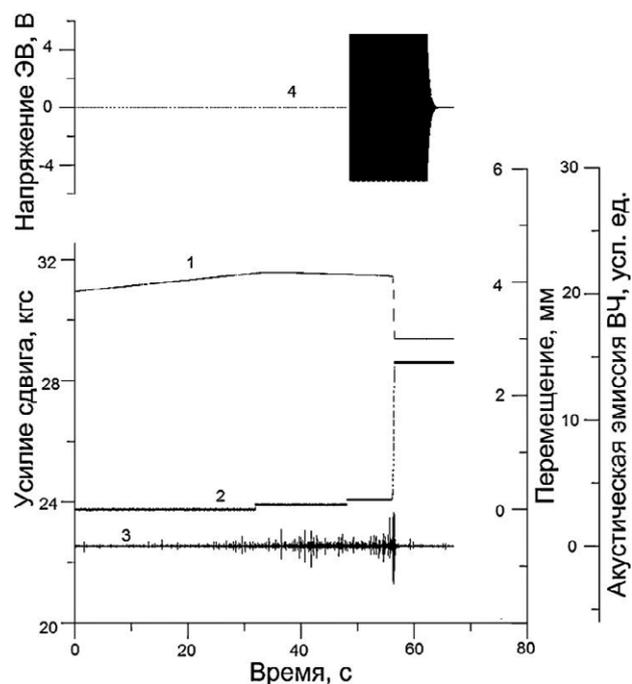


Рис. 10. Изменение параметров пружинно-блочной установки во время подготовки и инициирования резкой подвижки блока электрическим воздействием (лабораторного «землетрясения»), согласно [Novikov et al., 2017]. 1 – усилие сдвига подвижного блока, 2 – перемещение подвижного блока, 3 – высокочастотная акустическая эмиссия, 4 – напряжение электрического воздействия (ЭВ).

блока была зарегистрирована в области субкритического состояния системы со сдвиговыми напряжениями 0.98–0.99 от максимума. Определен минимальный уровень плотности тока воздействия, необходимый для реализации подвижки, – 20 А/м² [Novikov et al., 2017].

При другой постановке экспериментов в работах [Petrenko, 1994, 2003; Arakawa et al., 2003; Mugele et al., 2005] было выявлено значительное возрастание сцепления трущихся поверхностей с налипшим снегом (каплями воды) в присутствии ЭМ поля. С ростом напряженности электрического поля (пропорционально напряжению между электродами) капли воды удлиняются и растекаются вдоль электродов – наблюдается повышение смачиваемости поверхности (электросмачиваемость) [Mugele et al., 2005]. При использовании льда в качестве неподвижной подложки и образца из нержавеющей стали в качестве подвижного скользящего блока также произошло увеличение силы трения-сцепления в системе блок–подложка под действием постоянного и переменного напряжения амплитудой до 12 кВ (рис. 11).

Электрическое поле стимулирует заполнение кристаллами льда пространства у границы раздела металл/лед, формируя «мостики» и «перешейки». Постоянное поле вызывает электролиз льда с высвобождением кислорода на аноде и водорода на катоде. Газообразные кислород и водород собираются в межграницные пузырьки, нарушающие целостность граничного слоя, что несколько

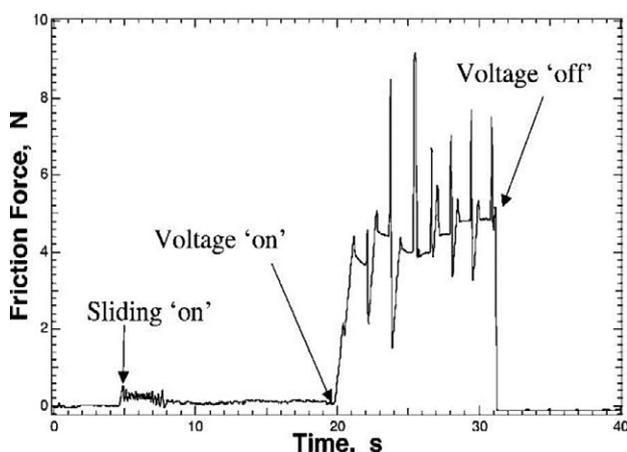


Рис. 11. Запись силы трения образца из нержавеющей стали, скользящего по ледовой подложке. Величина постоянного напряжения $U = 2$ кВ, температура – 14 °С [Arakawa et al., 2003].

ослабляет силу трения-сцепления [Arakawa et al., 2003]. Эксперимент с осаждением капель воды на охлажденную сетчатую подложку из алюминия, часть которой была подключена к источнику электрического поля напряженностью 2.8 кВ/см, выявил эффект противодействия осаждению [Petrenko, 2003]. Измерений акустической эмиссии в этих работах не проводилось. Различие результатов относительно знака изменения сцепления может быть обусловлено более сложным характером поверхностных явлений по сравнению с деформационными процессами в сплошной среде, а также зависимостью от таких параметров окружающей среды, как температура, влажность и др. Таким образом, влияние электрических импульсов на трение (сцепление) контактирующих поверхностей имеет свои особенности, исследование которых может считаться самостоятельной задачей.

4. Физические основы реакции неупругой деформации геоматериалов на воздействие электромагнитных полей

4.1. Электропластический эффект

Известно, что физико-механические свойства твердых тел определяются упругими и неупругими процессами, протекающими на различных структурно-иерархических уровнях: молекулярном, дислокационном, мезоструктурном и макроскопическом. Рассмотренные выше эффекты электромагнитного возбуждения сейсмических и акустоэмиссионных сигналов проявляются на масштабных уровнях двумерных (дислокации) и трехмерных (двойники, зерна, границы зерен, микротрещины) структурных дефектов [Hardy, 2003]. Вместе с тем, с учетом двухстадийной модели разрушения твердых тел [Kuksenko, 1996] и недавних экспериментальных результатов [Дамаскинская, Кадомцев, 2015], можно ожидать, что электромеханические и магнитомеханические явления или эффекты первоначально проявятся на самых низких структурно-масштабных уровнях – молекулярных. К электромеханическим явлениям относятся прежде всего увеличение ионной проводимости в процессе пластической деформации (эффект Дьюлаи–Хартли) и появление электрического

потенциала на поверхности деформируемых образцов при отсутствии внешнего электрического поля (эффект Степанова). Детальный обзор ранних работ, посвященных этим эффектам в щелочно-галоидных кристаллах, представлен в [Урусовская, 1968; Aaronson, Sanday, 1995].

Подвижность дислокаций в кристаллах NaCl и некоторых мелкозернистых керамиках (MgO , Al_2O_3 и ZrO_2), помещенных в электрические поля напряженностью $E \sim 10^2$ – 10^3 кВ/м в широком диапазоне температур (от комнатных до температур плавления), исследовалась в ряде сравнительно недавних работ Х. Конрада [Conrad, 2000, 2002]. При комнатных температурах детальные исследования электропластичности щелочно-галоидных кристаллов были проведены в работах Л.Б. Зуева (обобщенных в [Зуев, Данилов, 2013]). Независимо друг от друга эти авторы выявили, что при комнатных температурах для увеличения мобильности дислокаций в ионных кристаллах (NaCl, LiF и др.) необходимо приложение полей с напряженностью $E \sim 10^3$ – 10^4 кВ/м. Существенное увеличение скорости деформации при меньших на порядок значениях $E \sim 100$ кВ/м в работах [Conrad, 2000, 2002] объясняется усилением поперечного скольжения винтовых дислокаций. При температурах выше половины температуры плавления ($T > 0.5T_{пл} \gg 400$ С°) достаточно приложения полей $E \leq 30$ кВ/м для роста скорости деформации вследствие движения границ зерен в кристаллах NaCl и уменьшения энергии активации диффузии анионов через решетку. В том же диапазоне температур и напряженностей поля ($T > 0.5 T_{пл}$, $E \leq 30$ кВ/м) в оксидах MgO , Al_2O_3 и ZrO_2 отмечено обратимое ускорение деформации, вызванное увеличением скорости скольжения границ зерен, управляемым диффузией катионов не через решетку, а сквозь границы зерен (рис. 12) [Conrad, 2000, 2002].

Полученные результаты позволили выделить определяющий механизм электропластического эффекта – уменьшение электрохимического потенциала облака заряженных вакансий вблизи границ зерен [Conrad, 2002]. Электрохимический потенциал ионных компонентов μ_α^* можно определить из выражения

$$\mu_\alpha^* = \mu_\alpha^0 + Z_\alpha e \varphi_i - \sigma \Omega_\alpha - Z_\alpha e \varphi_a, \quad (1),$$

где μ_α^0 – химический потенциал в нормальном состоянии, Z_α – валентность заряженного иона, e – амплитуда заряда иона в кулонах, φ_i , φ_a – локальные внутренний и внешний электропотенциалы, σ – приложенное механическое напряжение, Ω_α – атомный объем; $\varphi_a = E d_{sc}$, d_{sc} – ширина заряженного облака. При этом электрическое поле не изменяет механизма деформирования, а снижает электрохимический потенциал облака заряженных вакансий у границ зерен, усиливая пластическую деформацию [Conrad, 2002].

Стоит упомянуть, что электропластический эффект более детально изучался в металлах [Conrad, 2002; Beridze et al., 2015]. В случае металлов, где имеются свободные электроны, вклад в электропластичность вносится следующими механизмами. При тепловом рассеивании электронов (локальный Джоулев нагрев) химические связи ослабляются. Направленное движение электронов (электронный ветер) воздействует на дислокационные линии и образует определенное давление. Кроме того, электрический ток создает избыток электронов, которые уменьшают силу сцепления валентного иона и электрона [Conrad, 2002; Beridze et al., 2015]. Еще один механизм отмечен в работе [Данилов и др., 2010]: электрический потенциал, подаваемый на образцы Al и Zr при их микроиндентировании и возникающий вследствие присоединенной массы из другого металла, вызывает перезаряд двойного слоя на поверхности образца. Вследствие этого происходит изменение плотности поверхностной энергии, которое обуславливает зарождение различных дефектов и пластических сдвигов, определяющих такие механические характеристики, как микротвердость и скорость ползучести [Данилов и др., 2010].

Наряду с рассмотренным подходом к объяснению электропластического эффекта существует теория [Molotskii, 2000], которая рассматривает электропластический эффект как результат действия магнитного поля, «наведенного» протекающим электрическим током. Предполагаемый таким образом механизм электропластичности лежит в плоскости

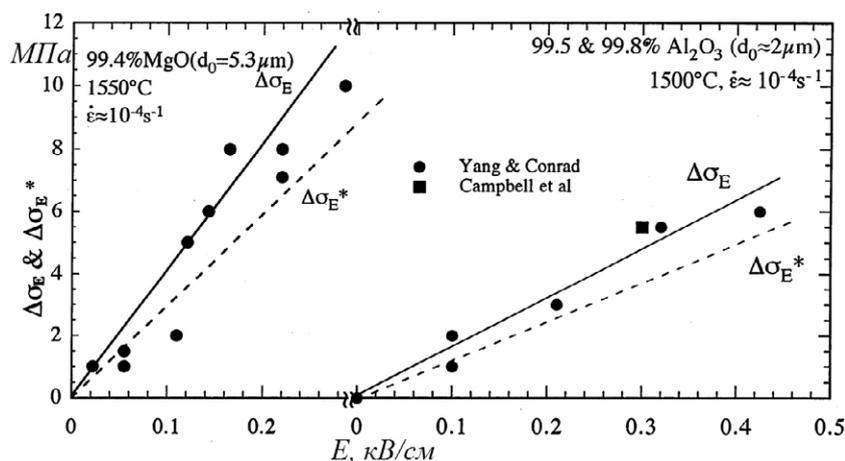


Рис. 12. Зависимость уменьшения напряжения пластического течения $\Delta\sigma_E = \sigma - \sigma_E$ от напряженности приложенного электрического поля для MgO при $t = 1550\text{ }^\circ\text{C}$ и Al_2O_3 при $t = 1500\text{ }^\circ\text{C}$, согласно [Conrad, 2002]. $\Delta\sigma_E$ – измеренное значение напряжения текучести, $\Delta\sigma_E^*$ – скорректированное значение напряжения текучести с учетом Джоулева нагрева.

спиновых эффектов, роль которых подробно будет рассмотрена ниже при обсуждении магнитопластического эффекта. Если учесть, что величина наведенного током магнитного поля, так же как и длина свободных сегментов дислокаций (расстояние между стопорами), максимальна на поверхности проводника, то магнитное поле увеличивает их длину, открепляя тем самым дислокации от поверхностных стопоров. Тем самым можно провести оценки вклада магнитоиндуцированных спиновых эффектов в электропластичность кристаллов [Molotskii, 2000].

В экспериментах, проведенных в Физико-техническом институте им. Иоффе, показано, что для некоторых диэлектрических материалов, не обладающих пьезоэлектрическими свойствами (стекло, мрамор), механоэлектрические и электромеханические взаимосвязи

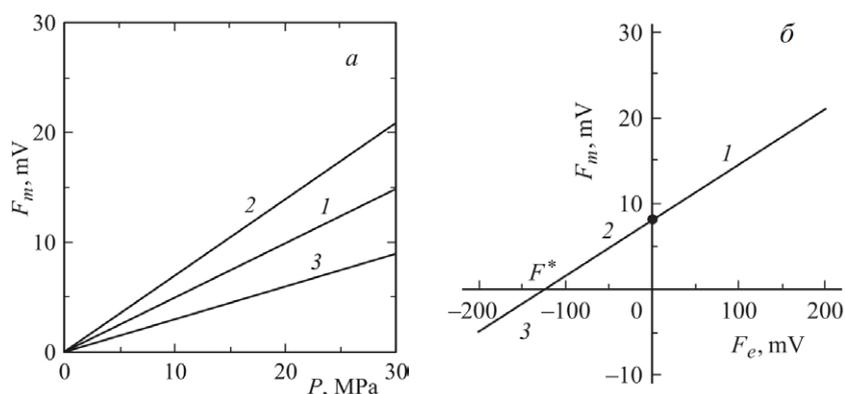


Рис. 13. Зависимость механоэлектрического потенциала от механического сжимающего напряжения P (а) и величины полярности электрического потенциала (б), согласно [Куксенко, Махмудов, 2004].

проявляются как релаксация электрического поля [Куксенко и др., 1997]. При этом пластические свойства выражены крайне слабо. Было отмечено, что физическая природа носителей заряда, вызывающих релаксацию электрического поля, одна и та же и не зависит от того, механически нагружали образец или подавали на него электрическое напряжение [Куксенко и др., 1997; Куксенко, Махмудов, 2004]. По экспериментальным данным была проведена оценка энергии активации движения носителей зарядов. Полученное значение ~ 0.1 эВ характерно для примесных ионов – основных источников электропроводности в горных породах [Куксенко и др., 1997].

Дальнейшие исследования в этом направлении показали, что существует линейная зависимость электрического потенциала, вызванного механической нагрузкой, от величины нагрузки (рис. 13). При подаче на образец ЭМ поля меняется угол наклона этой зависимости в сторону увеличения или уменьшения (вследствие совпадения или несовпадения полярностей соответственно) [Куксенко, Махмудов, 2004].

Это позволило формально ввести понятие электромеханического модуля материала: $\theta^* = \Delta\phi_m / \Delta P$, где ϕ_m – электрический потенциал, вызванный механической нагрузкой, P – нагрузка. Таким образом, абсолютные значения электромеханического модуля θ^* (В/Па) зависят от характеристик регистрирующего оборудования и условий эксперимента, величина θ^* , оцененная по графику на рис. 13а, порядка 0.05. А по относительному изменению модуля θ^* можно оценить влияние механической нагрузки на механоэлектрополяризацию при одновременной электрополяризации материала [Куксенко, Махмудов, 2004].

4.2. Магнитоэластический эффект

Наличие структурных дефектов в немагнитных кристаллах является определяющим не только для существования электропластичности, но и для магнитоэластического эффекта. В отличие от «магнитного пробоя», возникающего также в «слабых» магнитных полях в идеальных немагнитных кристаллах при криогенных гелиевых температурах, магнитоэластический эффект обязан своим существованием примесным дефектам в кристалле.

Начало систематических исследований в этом направлении было положено в Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН работой [Альшиц и др., 1987], в которой обнаружено перемещение краевых дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного поля с индукцией $B = 0.1-1.6$ Тл в отсутствие механического нагружения. Магнитные поля с $B \leq 10$ Тл при комнатной температуре являются «слабыми» для немагнитных материалов. Более строго это условие выглядит следующим образом: $\mu_B B \ll kT$, а для металлов дополнительно действует условие $\omega = Be/m \ll \omega_c$, где μ_B – магнетон Бора, B – индукция магнитного поля, k – постоянная Больцмана, ω – циклотронная частота, e и m – заряд и масса электрона, ω_c – частота столкновений электрона с рассеивающими центрами [Головин, 2004].

В дальнейших исследованиях на образцах различных щелочно-галогенидных кристаллов (NaCl, LiF, CsI и др.) и парамагнитных металлов (Al, Zn) было показано (обзор в [Головин, 2004; Альшиц и др., 2017]), что величина пробега дислокаций l достигает сотен микрометров, линейно зависит от времени экспозиции в магнитном поле, квадрата индукции B , обратного корня из концентрации парамагнитной примеси C (эффект отсутствует в кристаллах с диамагнитной примесью) и слабо зависит от температуры:

$$l = l_0 + k^* B^2 t, \quad (2)$$

где l_0 – фоновый пробег, который не зависит от магнитного поля и связан с вытравливанием приповерхностных стопоров (пояснения ниже), k^* – коэффициент, являющийся функцией концентрации примесей: $k^* \sim 1/\sqrt{C}$. Отмечено, что пробег дислокаций в магнитном

поле также зависит от взаимной ориентации линии дислокации l , ее вектора Бюргерса b и вектора индукции B . В случае дислокаций, ориентированных параллельно полю, пробег равен нулю и достигает максимума при перпендикулярной ориентации линии дислокации и вектора B [Альшиц и др., 1990]. Направление перемещения дислокаций не зависит от смены знака магнитного поля, на основании чего авторы исключили возможность объяснения эффекта магнитоэластичности действием пондеромоторных сил магнитного поля или создаваемого вихревого электрического поля.

Магнитное поле в сочетании с активным деформированием при $\dot{\epsilon} = \text{const}$ (так же как и при $\dot{\sigma} = \text{const}$) активизирует дополнительные системы скольжения, что проявилось в уменьшении предела текучести σ_y (в 1.5 раза), а также значений напряжения и деформации на каждой стадии деформирования [Альшиц и др., 2000]. Подобные макроскопические проявления магнитоэластичности были также установлены для режимов активного нагружения и ползучести [Головин, Моргунов, 1995; Смирнов и др., 2001].

Для объяснения наблюдаемого эффекта авторы [Альшиц и др., 2000] предлагают кинетическую модель, базирующуюся на конкуренции термоактивационного и магнитостимулированного открепления ядра дислокаций от примесных закрепляющих центров, играющих роль стопоров, с последующей релаксацией дислокационной структуры в поле внутренних напряжений:

$$\sigma_y = (U/\gamma) + [(kT/\gamma) \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)], \quad (3)$$

где U – энергия активации при отсутствии поля ($B = 0$), γ – активационный объем, k – постоянная Больцмана, T – температура. Выражение (3) по форме аналогично уравнению С.Н. Журкова из кинетической концепции прочности [Zhurkov et al., 1984], причем σ_y сопоставляется с напряжением, при котором частота термофлуктуаций может обеспечить реальную скорость дислокаций.

Влияние приложенного магнитного поля проявляется выше некоторого порогового уровня B_c , которое пропорционально скорости деформации $B_c \sim \sqrt{\dot{\epsilon}}$, однако авторы [Альшиц

и др., 2000] отмечают, что оно не может быть меньше, чем микроскопический порог магнитопластичности $B_c^{(0)}$. Таким образом, при хорошем соответствии экспериментальным кривым порог магнитопластического эффекта авторами определен в рамках предложенной кинетической модели следующим выражением:

$$B_c = \begin{cases} B_c^{(0)}, & \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_c \\ B_c^{(0)} \sqrt{\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_c}, & \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_c, \end{cases} \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_0 \tau_0 / \tau_{dp}^{\max}$ и $\tau_{dp}^{\max} = k^* B^{(0)-2}$, τ_{dp}^{\max} – время магнитоиндуцированного открепления дислокации от центра закрепления.

Резюмируя, отметим, что само по себе магнитное поле изменяет структуру и состояние системы дислокация–стопор, понижая высоту барьеров, преодолеваемых дислокациями, но не влияет на количество дислокаций [Альшиц и др., 2000]. Движущей силой перемещения дислокаций является поле крупномасштабных макроскопических внутренних напряжений кристалла, а роль парамагнитных центров при этом играют электроны, дырки, радикалы, экситоны и т.п. [Головин, 2004].

Объяснение наблюдаемого эффекта депиннинга (англ. *depinning* – открепление) дислокаций от центра закрепления (стопора) лежит в плоскости спиновых эффектов. При этом под стопором в большинстве работ [Головин, 2004] подразумевается примесный комплекс в ядре дислокации, содержащий радикальную пару электронов. Магнитное поле изменяет спиновое состояние и снимает запрет на определенные электронные переходы [Molotskii, Fleurov, 2000; Альшиц и др., 2017]. Вследствие этого происходит перестройка структуры всего примесного комплекса с уменьшением силы закрепления (пиннинга), приводящей к депиннингу дислокации под действием внутренних напряжений в кристалле. Время спиновой эволюции (время депиннинга τ_{dp}) в системе примесь–дислокация всегда должно быть мало по сравнению со временем τ_{s-1} спин-решеточной релаксации системы (термоактивационного преодоления). В противном случае термические осцилляции приведут к хаотизации

спиновой системы задолго до электронного перехода [Альшиц и др., 2017].

Модель рождения спинового двухэлектронного нанореактора А.Л. Бучаченко [Бучаченко, 2006, 2014; Моргунов, Бучаченко, 2009] столкнулась с несоответствием спинового состояния пары стопор–ядро дислокации, а также не могла объяснить значительное увеличение скорости дислокаций при совместном действии электрического и магнитного полей (данный эксперимент [Альшиц и др., 1998; Урусовская и др., 2000] будет рассмотрен ниже). Однако последующие работы (обзор в [Бучаченко, 2019]) показали, что воздействие магнитной составляющей ЭМ поля на спиновые состояния может внести вклад в изменение пластичности.

Предложенная авторами [Альшиц и др., 2017] физическая модель, объясняющая кинетику процесса спиновой эволюции, исходит из парадоксальности влияния примеси кальция на магнитопластичность кристаллов NaCl, атомы которого образуют диполи с отрицательно заряженными вакансиями натрия. Парадоксальность заключается в том, что эти диполи, хоть они подвижны и мигрируют в кристалле как единое целое, но являются диамагнитными. А именно в кристаллах с диамагнитными примесями магнитопластический эффект отсутствует. Очевидно, что существуют причины, по которой атомы из диамагнитных примесей Ca^{2+} превращаются в магнитоактивные Ca^+ . Авторы [Альшиц и др., 2017] предлагают следующее объяснение: на краю лишней плоскости возле ядра дислокации под действием огромного давления происходит выталкивание иона Na^+ (с образованием его отрицательно заряженной вакансии V_{Na}^-) на свободное место вблизи иона Ca^{2+} . Ближний к образованной вакансии V_{Na}^- анион Cl^- отдает электрон иону Ca^{2+} с образованием магнитоактивного катиона Ca^+ . Предполагается [Альшиц и др., 2017], что далее ставший нейтральным атом Cl^0 и соседний анион Cl^- образуют в ядре дислокации ковалентный V-центр – заряженную молекулу Cl_2^- . Таким образом, в ядре дислокации появляется магнитоактивный комплекс $Ca^+Cl_2^-$, содержащий радикальную пару спинов, магнитное

превращение которой завершается реакцией $\text{Ca}^+ + \text{Cl}_2^- = \text{CaCl}_2$. Новая ковалентная молекула является новым центром закрепления CaCl_2 ; вследствие своей нейтральности и немагнитоактивности она гораздо слабее связана с ядром дислокации, что объясняет экспериментально установленный факт задержки перемещения дислокации при повторной экспозиции в магнитном поле [Альшиц и др., 2017]. В общем случае синглет-триплетное преобразование и его роль в магнитопластическом эффекте подробно описаны в ранее предложенной S–T-модели [Molotskii, Fleurov, 1997; Molotskii, 2000; Molotskii, Fleurov, 2000], которая получила дальнейшее развитие в недавних работах [Альшиц и др., 2017; Бучаченко, 2019].

Процесс превращения дефектов на дислокациях в магнитоактивные происходит во многих местах последовательно по механизму каскадного открепления – анзиппинга (unzipping) – от активных центров пиннинга по всей длине дислокации. Скорость пробега дислокации от одного ряда стопоров к другому оценивается формулой

$$v = \frac{2w}{\tau_{\text{др}} \sqrt{2bC_V}}, \quad (5)$$

где $w = n_{\text{act}}/n_{\text{tot}}$ – вероятность того, что данный стопор является центром анзиппинга,

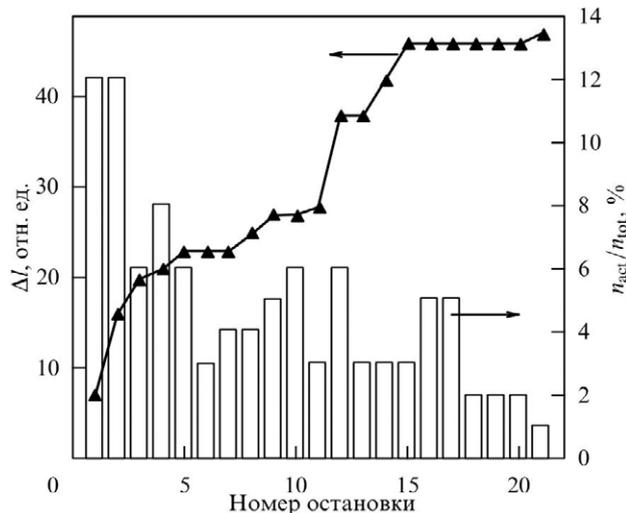


Рис. 14. Найденные из моделирования последовательные положения дислокации при ее остановках, требующих включения магнитного поля для продолжения движения (левая ось ординат), и относительное число активных центров, преодолеваемых благодаря магнитному полю (правая ось ординат), согласно [Альшиц и др., 2017]. Треугольниками обозначены длины пробега.

C_V – объемная концентрация примесных центров, отличающаяся от концентрации кальция только размерным множителем [Альшиц и др., 2017].

При компьютерном моделировании движения дислокации в магнитном поле получено подтверждение предложенной авторами физической модели как по числу центров магнитного анзиппинга, так и по кривой пробега дислокаций, Δl (рис. 14) [Альшиц и др., 2017]. На рисунке на кривой пробега, построенной по экспериментальным точкам (треугольники), имеются горизонтальные участки, которые, согласно [Альшиц и др., 2017], свидетельствуют о неподвижности (остановке) дислокации. По оценкам [Альшиц и др., 2017], относительное число центров анзиппинга (пропорциональное Δl) – порядка 10 %, т.е. невелико.

Заключение

Обобщены результаты лабораторных исследований триггерных эффектов на образцах, обнаруживающие определенное сходство с наблюдениями на натурном масштабе (сейсмичность).

В лабораторных условиях (на сантиметровом масштабе) триггерный эффект от воздействия электромагнитного поля на процесс разрушения образцов горных пород и искусственных материалов проявляется в росте активности акустической эмиссии и скорости деформации. Известны проявления электромагнитных триггерных эффектов в сейсмичности – кратковременное увеличение сейсмической активности и скорости сеймотектонических деформаций. В этом случае эффекты характеризуются размерами от единиц до десятков километров (натурный масштаб). В обоих случаях реакция среды на воздействие ЭМ поля происходит с задержкой.

В завершение обзора можно выделить следующие примеры сходной реакции среды на лабораторном (сантиметровом) и натурном масштабах. Н.Т. Тарасовым с соавторами отмечено ускорение высвобождения энергии, накопленной в земной коре в ходе естественных тектонических процессов, в виде увеличения количества относительно слабых сейсмических событий. В.Б. Смирновым

и А.Д. Завьяловым отдельно для каждого акта зондирования показано, что угол наклона графика повторяемости существенно увеличивается непосредственно в период зондирования, после чего постепенно в течение 35 ч снижается. Подобная тенденция – увеличение угла наклона графика повторяемости сигналов АЭ по энергиям и резкое уменьшение низкочастотных высокоамплитудных сигналов АЭ под воздействием ЭМ поля была продемонстрирована И.А. Пантелеевым с коллегами для образцов гранита.

При сопоставлении результатов ряда работ Н.Т. Тарасова, Н.В. Тарасовой и А.С. Закупина с соавторами также прослеживаются сходные черты. В обеих группах работ рассматриваются отклики эмиссионных сигналов (сейсмичности и АЭ) при различных импульсных воздействиях.

В первой показано, что облучение коры электрическими импульсами значительно повышало эффективность последующего триггерного воздействия от ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне. Во второй группе работ отмечено, что длительное облучение «низкоамплитудными» импульсами перед подачей «высокоамплитудных» усиливало эффект прироста деформации и активности АЭ от последних импульсов. Заметим, что столь же большой по амплитуде прироста и часто повторяющийся эффект увеличения деформации (в восьми из девяти сеансов) был получен только при сочетании двух источников ЭМ воздействия (с амплитудами напряжения 50 и 800 В).

Таким образом, если сопоставлять только сам факт вклада энергии от двух различных источников, не принимая во внимание различие электромагнитного и динамического (взрывного) воздействий, можно говорить о сходстве результатов упомянутых работ.

Помимо всего этого, как показано Тарасовыми, пространственное распределение скоростей сейсмотектонических деформаций за период облучения коры свидетельствовало о наличии аномалии, в пределах которой эти скорости возрастают на 2–3 порядка. На границе этой аномалии впоследствии произошло землетрясение. Эти результаты согласуются с явлением кластеризации дефектов в области зарождения и роста магистральной трещи-

ны под воздействием ЭМ поля, которые продемонстрированы авторами данного обзора в эксперименте на образцах гранита (ссылки см. в тексте). Эффекты электропластичности и магнитопластичности, по всей видимости, проявляются в период задержки активации акустической эмиссии и изменений скоростей деформации на низших структурных уровнях.

При интерпретации результатов о триггерном воздействии ЭМ полей на деформирование и разрушение породных образцов в данной статье сделан упор на физические эффекты, которые реализуются на наименьших масштабах длин (молекулярных и дислокационных) и определяют первичную реакцию среды на внешнее воздействие. Наряду с первичными эффектами (условно выделенными в I часть обзора), в нагруженных материалах и геосредах под влиянием ЭМ полей могут иметь место так называемые коллективные (макроскопические) эффекты. Для описания таких эффектов, которые можно считать вторичными по отношению к откликам среды на низших масштабных уровнях, широко используются теория самоорганизации или упрощенные феноменологические подходы. Авторы намерены осветить эти явления в продолжении настоящей работы во II части обзора.

В заключение можно отметить, что в условиях краткосрочности сейсмологических наблюдений по сравнению с временем тектонических деформаций лабораторное моделирование подтвердило свою эффективность и значимость как инструмент исследования, в частности, проблемы воздействия внешних ЭМ полей на сейсмический процесс.

Список литературы

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 77–80. [Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. Estimation of the triggering effect energy in relation to model sample failure. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2008, 44(1): 69-72. <https://doi.org/10.1134/s1069351308010096>]
2. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энергетическом воздействии // *Физика Земли*. 2006. № 10. С. 36–42. [Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Klyuchkin V.N. On the structure of acoustic emission of model samples in response to an external energy action. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2006, 42(10): 824-829. <https://doi.org/10.1134/s1069351306100065>]

3. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Окунев В.И. Динамика энергообменных процессов в модельных образцах при воздействии упругим и электромагнитным полями // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 64–70. [Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Okunev V.I. Dynamics of energy exchange in model samples subjected to elastic and electromagnetic impacts. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2011, 47(10): 919-925. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100016>]
4. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля // *Физика твердого тела*. 1987. Т. 29, № 2. С. 467–470.
5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. Микропластичность диамагнитных кристаллов в постоянном магнитном поле // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1990. № 10. С. 85–88.
6. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Михина Е.Ю., Петржик Е.А. О природе влияния электрического тока на магнитостимулированную микропластичность монокристаллов Al // *Письма в ЖЭТФ*. 1998. Т. 67, вып. 10. С. 788–793.
7. Альшиц В.И., Урусовская А.А., Смирнов А.Е., Беккауер Н.Н. Деформация кристаллов LiF в постоянном магнитном поле // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42, вып. 2. С. 270–272. [Al'shits V.I., Urusovskaya A.A., Smirnov A.E., Bekkauer N.N. Deformation of LiF crystals in DC magnetic field. *Physics of the Solid State*, 2000, 42(2): 277-279. <https://doi.org/10.1134/1.1131197>].
8. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Котовский Р.К., Петржик Е.А., Трончик П. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно // *Успехи физических наук*. 2017. Т. 187, № 3. С. 327–341. [Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A., Kotowski R.K., Tronczyk P. Dislocation kinetics in nonmagnetic crystals: A look through a magnetic window. *Physics-Uspekhi*, 2017, 60(3): 305-318. <https://doi.org/10.3367/ufne.2016.07.037869>]
9. Богомолов Л.М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов = [Bogomolov L.M. Electromagnetic effect on microcrack kinetics and electro-induced variations in acoustic emission of rocks] // *Физическая мезомеханика*. 2010. Т. 13, № 3. С. 39–56.
10. Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н. *Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности*. Саарбрюкен: Lambert Acad. Publ., 2011. 408 с.
11. Богомолов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. Особенности влияния электромагнитных полей на скорость деформации образцов мрамора в условиях сложного напряженно-деформированного состояния // *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 7. С. 20–27.
12. Бучаченко А.Л. О влиянии магнитного поля на механику немагнитных кристаллов: происхождение магнитопластического эффекта // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2006. Т. 129, вып. 5. С. 909–913. [Buchachenko A.L. Effect of magnetic field on mechanics of nonmagnetic crystals: The nature of magnetoplasticity. *J. of Experimental and Theoretical Physics*, 2006, 102(5): 795-798. <https://doi.org/10.1134/s1063776106050116>]
13. Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184, № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0184.201401e.0101> [Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Physics-Uspekhi*, 2014, 57(1): 92-98. <https://doi.org/10.3367/ufne.0184.201401e.0101>]
14. Бучаченко А.Л. Микроволновое стимулирование дислокаций и магнитный контроль очага землетрясения // *Успехи физических наук*. 2019. Т. 189, № 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.3367/ufnr.2018.03.038301> [Buchachenko A.L. Microwave stimulation of dislocations and the magnetic control of earthquakes core. *Physics-Uspekhi*, 2019, 62(3): 46–53. <https://doi.org/10.3367/ufne.2018.03.038301>]
15. Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Крючков М.А. Динамика и иерархия землетрясений // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 40–45. [Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Kryuchkov M.A. Dynamics and hierarchy of earthquakes. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2006, 42(9): 755-760. <https://doi.org/10.1134/s1069351306090059>]
16. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А. Влияние фильтрационных процессов в горных породах на характеристики геоакустической эмиссии // *Геофизические исследования*. 2016. Т. 17, № 2. С. 32–53.
17. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // *Физика Земли*. 2014. № 1. С. 89–103. [Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V. The physical basis of the effects caused by electromagnetic forcing in the intensity of geoacoustic processes. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2014, 50(1): 87-101. <https://doi.org/10.1134/s1069351314010042>]
18. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (обзор) // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, вып. 5. С. 769–803.
19. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на скорость макропластического течения ионных кристаллов // *Письма в ЖЭТФ*. 1995. Т. 61, вып. 7. С. 583–586.
20. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // *Физика земли*. 2004. № 10. С. 37–54.
21. Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. *Триггерные механизмы землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010, Москва, ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 52–61.*
22. Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Выявление пространственной области будущего очага разрушения на основе анализа энергетических распределений сигналов акустической эмиссии // *Физика Земли*. 2015. № 3. С. 78–84. [Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G.

- Locating the spatial region of a future fracture nucleation based on analyzing energy distributions of acoustic emission signals. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2015, 51(3): 392-398. <https://doi.org/10.1134/s1069351315030027>
23. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Коновалов С.В., Филиппев Р.А., Семухин Б.С. О влиянии электрического потенциала на сопротивление микроиндентированию поверхности металлов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2010. № 2. С. 85–89.
24. Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // *Физика твердого тела*. 2005. Т. 47, вып. 6. С. 1000–1008.
25. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Ильичев П.В., Сычев В.Н., Сычева Н.А. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия = [Zakupin A.S., Aladiev A.V., Bogomolov L.M., Borovskii B.V., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Sycheva N.A. Relationship of electric polarization and acoustic emission from specimens of geomaterials under uniaxial compression] // *Вулканология и сейсмология*. 2006а. № 6. С. 22–33.
26. Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // *Физика Земли*. 2006б. № 10. С. 43–50. [Zakupin A.S., Avagimov A.A., Bogomolov L.M. Responses of acoustic emission in geomaterials to the action of electric pulses under various values of the compressive load. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2006, 42(10): 830-837. <https://doi.org/10.1134/s1069351306100077>]
27. Зуев Л.Б., Данилов В.И. *Физические основы прочности материалов*: учеб. пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2013. 376 с.
28. Кочарян Г.Г. *Геомеханика разломов* / отв. ред. акад. РАН В.В. Адушкин. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
29. Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Ч. 1. Лабораторные эксперименты // *Физическая мезомеханика*. 2015. Т. 18, № 4. С. 94–104. [Kocharyan G.G., Novikov V.A. Experimental study of different modes of block sliding along interface. Pt 1. Laboratory experiments. *Physical Mesomechanics*, 2015, 19(2): 189-199. <https://doi.org/10.1134/s1029959916020120>]
30. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Режим деформирования разломных зон и инициирующий потенциал сейсмических колебаний // *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010, Москва, ИДГ РАН*. М.: ГЕОС, 2013. С. 34–45.
31. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Влияние механического поля на поляризацию природных диэлектриков (горных пород) // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30, вып. 14. С. 82–88. [Kuksenko V.S., Makhmudov Kh.F. Effect of mechanical stress on the polarization of natural dielectrics (Rocks). *Technical Physics Letters*, 2004, 30(7): 612-614. <https://doi.org/10.1134/1.1783419>]
32. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках // *Физика твердого тела*. 1997. Т. 39, № 7. С. 1202–1204.
33. Куксенко В.С., Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 25–31. [Kuksenko V.S., Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G. Fracture of granite under various strain conditions. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2011, 47(10): 879–885. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100053>]
34. Лапшин В.Б., Патонин А.В., Пономарев А.В., Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Строганова С.М. Инициация акустической эмиссии в обводненных образцах песчаника // *Докл. АН*. 2016. Т. 469, № 1. С. 97–101. [Lapshin V.B., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Potanina M.G., Smirnov V.B., Stroganova S.M. Initiation of acoustic emission in fluid-saturated sandstone samples. *Dokl. Earth Sciences*, 2016, 469(1): 705-709. <https://doi.org/10.1134/s1028334x16070047>]
35. Моргунов Р.Б., Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и магнитная память в диамагнитных твердых телах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2009. Т. 136, N 3. С. 505–515. [Morgunov R.B., Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and magnetic memory in diamagnetic solids. *J. of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, 109(3): 434–443. <https://doi.org/10.1134/s1063776109090076>]
36. Мубассарова В.А. *Влияние электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразование в нагруженных образцах горных пород*: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2018. 24 с.
37. *Нелинейная механика геоматериалов и геосред* / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, П.В. Кузнецов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов; отв. ред. Л.Б. Зуев. Новосибирск: Гео, 2007. 235 с.
38. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений // *Вестник Пермского НЦ*. 2014. № 3. С. 44–62.
39. Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Дамаскинская Е.Е., Богомолов Л.М., Наймарк О.Б. Влияние слабого электрического поля на пространственно-временную динамику акустической эмиссии при одноосном сжатии гранита // *Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы третьего Всерос. семинара-совещ.* / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2015. С. 244–252.
40. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // *Физика Земли*. 2012. № 7–8. С. 63–88. [Smirnov V.B., Zavyalov A.D. Seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2012, 48(7): 615-639. <https://doi.org/10.1134/s1069351312070075>]
41. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 26–36.

42. Смирнов Б.И., Песчанская Н.Н., Николаев В.И. Магнитопластический эффект в сегнетоэлектрических кристаллах NaNO_2 // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, № 12. С. 2154–2156.
43. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурного моделирования // *Физика Земли*. 2010. № 2. С. 17–49. [Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V. Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2010, 46(2): 104-135. <https://doi.org/10.1134/s1069351310020023>]
44. Соболев Г.А. *Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии*. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
45. Соболев Г.А. *Сейсмический шум*. М.: Наука и образование, 2014. 272 с.
46. Соболев Г.А., Пономарев А.В. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 2003. 270 с.
47. Тарасов Н.Т. Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмоструктурных деформаций // *Докл. АН*. 2010. Т. 433, № 5. С. 689–692.
48. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмоструктурных деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 82–96. [Tarasov N.T., Tarasova N.V. Influence of electromagnetic fields on the seismotectonic strain rate; relaxation and active monitoring of elastic stresses. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2011, 47(10): 937-950. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100120>]
49. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Активизация сейсмичности в области активного разлома под действием электромагнитных полей и взрывов // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докл. Четвертой тектонофиз. конф., 3–7 окт. 2016, Москва*. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 571–577.
50. Тарасов Н.Т., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42, № 10. С. 1641–1649.
51. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // *Успехи физических наук*. 1968. Т. 96, № 1. С. 38–60.
52. Урусовская А.А., Альшиц В.И., Беккауэр Н.Н., Смирнов А.Е. Деформация кристаллов NaCl в условиях совместного действия магнитного и электрического полей // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42, № 2. С. 267–269.
53. Aaronson H.I., Sanday S.C. *Effects of high intensity electrical, magnetic, ultrasonic and microwave fields upon the microstructure, processing and properties of metal and ceramic alloys*: Report Naval Res. Lab. Washington DC, 1995. NRL/MR/6303-95-7791.
54. Arakawa M., Petrenko V.F., Chen Ch. Effect of direct and alternating-current electric fields on friction between ice and metal // *Canadian J. of Physics*. 2003. Vol. 81. P. 209–216. <https://doi.org/10.1139/p03-020>
55. Beridze E., Gennari C., Michieletto F., Forzan M. Electroplastic effect // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 698. P. 264–272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.264>
56. Bogomolov L., Zakupin A. Do electromagnetic pulses induce the relaxation or activation of microcracking rate in loaded rocks? // *Solid State Phenomena*. 2008. Vol. 137. P. 199–208. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.137.199>
57. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 47, N 1. P. 65–72.
58. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Vol. 153, N 3739. P. 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
59. Chelidze T., Varamashvili N., Devidze M., Tchelidze Z., Chikhladze V., Matcharashvili T. Laboratory study of electromagnetic initiation of slip // *Annals of Geophysics*. 2002. Vol. 45, N 5. P. 587–598.
60. Chelidze T., Gvelesiani A., Varamashvili N., Devidze M., Chikhradze V., Tchelidze Z., Elashvili M. Electromagnetic initiation of slip: laboratory model // *Acta Geofizika Polonica*. 2004. Vol. 52, N 1. P. 49–62.
61. Chelidze T., De Rubeis V., Matcharashvili T., Tosi P. Do influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquakes time distribution in the Bishkek Test Area (Central Asia) // *Annals of Geophysics*. 2006. Vol. 49, N 4/5. P. 961–975.
62. Chelidze T., Matcharashvili T., Mepharidze E., Tephnadze D., Zhukova N. Preliminary results of forced stick-slip synchronization area studies: experiments and theoretical models // *J. of the Georgian Geophysical Society*. 2016. Vol. 19(A). P. 35–48.
63. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering A*. 2000. Vol. 287, N 2. P. 276–287. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00786-3)
64. Conrad H. Thermally activated plastic flow of metals and ceramics with an electric field or current // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 322, N 1–2. P. 100–107. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(01\)01122-4](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01122-4)
65. Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I. Patterns of stress corrosion: Geometry of the principal stresses // *Pure and Applied Geophysics*. 1983. Vol. 121, N 3. P. 477–494. <https://doi.org/10.1007/bf02590152>
66. Gavrillov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks // *Russ. J. of Earth Sciences*. 2013. Vol. 13, ES1002. P. 1–16. <https://doi.org/10.2205/2013ES000527>
67. Hardy H.R.Jr. *Acoustic Emission / Microseismic Activity*: Vol. 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications. London: CRC Press, 2005. 300 p. <https://doi.org/10.1201/9780203971109>
68. Keilis-Borok V.I. The lithosphere of the Earth as nonlinear system with implications for earthquake

- prediction // *Reviews of Geophysics*. 1990. Vol. 28, N 1. P. 5–34. <https://doi.org/10.1029/rg028i001p00019>
69. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks // *Pure and Applied Geophysics*. 1996. Vol. 146, N 2. P. 253–263. <https://doi.org/10.1007/bf00876492>
70. Lockner D., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // *Nature*. 1991. Vol. 350, N 6313. P. 39–42. <https://doi.org/10.1038/350039a0>
71. McLaskey G.C., Kilgore B.D., Lockner D.A., Beeler N.M. Laboratory generated M-6 earthquakes // *Pure and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171, N 10. P. 2601–2615. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0772-9>
72. Molotskii M. Theoretical basis for electro- and magnetoplasticity // *Materials Science and Engineering A*. 2000. Vol. 287(2). P. 248–258. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)00782-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00782-6)
73. Molotskii M., Fleurov V. Spin effects in plasticity // *Physical Review Letters*. 1997. Vol. 78, N 14. C. 2779–2782. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.78.2779>
74. Molotskii M., Fleurov V. Dislocation paths in a magnetic field // *The J. of Physical Chemistry B*. 2000. Vol. 104, N 16. P. 3812–3816. <https://doi.org/10.1021/jp993259g>
75. Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A., Naimark O.B. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5, N 4. P. 919–938. <https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-4-0163>
76. Mugele F., Klingner A., Bucherle J., Steinhauser D., Herminghaus S. Electrowetting: a convenient way to switchable wettability patterns // *J. of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 17. P. 5559–5576. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/9/016>
77. Novikov V.A., Okunev V.I., Klyuchkin V.N., Liu J., Ruzhin Ya.Yu., Shen X. Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models // *Earthquake Science*. 2017. Vol. 30, N 4. P. 167–172. <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0181-8>
78. Panteleev I.A., Gavrilov V.A. Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoaoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study // *Russ. J. of Earth Sciences*. 2015. Vol. 15, ES4003. P. 1–14. <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>
79. Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B. Nonlinear dynamics of the blow-up structures in the ensembles of defects as a mechanism of formation of earthquake sources // *Izv. Physics of the Solid Earth*. 2012. Vol. 48, N 6. P. 504–515. doi:10.1134/S1069351312060055
80. Petrenko V.F. The effect of static electric fields on ice friction // *J. of Applied Physics*. 1994. Vol. 76, N 2. P. 1216–1219. <https://doi.org/10.1063/1.357850>
81. Petrenko V.F. *Study of the physical mechanisms of ice adhesion*. Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 2003. 37 p.
82. Ponomarev A., Sobolev G., Koltsov A. Acoustic emission under electric excitation // *ESC XXVIII General Assembly, Genova: Book of Abstracts*. 2002. P. 238.
83. Scholz C.H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes // *Bull. of the Seismological Society of America*. 1968. Vol. 58, N 1. P. 399–415.
84. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature*. 1998. Vol. 391, N 6662. P. 37–42. <https://doi.org/10.1038/34097>
85. Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. Initiating acoustic emission with electric action // *Proc. 27-th ESC General Assembly*. Lisbon, Portugal, 2000.
86. Sornette D., Sammis C.G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions // *J. de Physique I*. 1995. Vol. 5(5). P. 607–619. <https://doi.org/10.1051/jp1:1995154>
87. Tarasov N.T., Tarasova N.V. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses // *Annals of Geophysics*. 2004. Vol. 47, N 1. P. 199–212.
88. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophys. Mag.* 1961. Vol. 30. P. 521–605.
89. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Sycheva N.A. The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded rock specimens // *Materials Science and Engineering A*. 2009. Vol. 521–522. P. 401–404. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.112>
90. Zakupin A., Bogomolov L., Mubassarova V., Kachesova G., Borovsky B. Acoustic emission and electromagnetic effects in loaded rocks // *Acoustic Emission / Ed. W. Sikorski*. Croatia, Rijeka: InTech, 2012a. Ch. 8. P. 173–198. <https://doi.org/10.5772/31411>
91. Zakupin A.S., Mubassarova V.A., Borovsky B.V., Kachesova G.S. Electromagnetic effects in loaded marble // *Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, 26–31 August 2012, Kazan, Russia*. Kazan: Esis, 2012b. P. 107–114.
92. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Principles of the kinetic approach of fracture prediction // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1984. Vol. 1, N 3. P. 271–274. [https://doi.org/10.1016/0167-8442\(84\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0167-8442(84)90007-7)

Сведения об авторах

МУБАССАРОВА Виргиния Анатольевна, научный сотрудник лаборатории моделирования энергонасыщенных сред – Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия; БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович, доктор физико-математических наук, директор, ЗАКУПИН Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, заместитель директора – Институт морской геологии и геофизики, Южно-Сахалинск; ПАНТЕЛЕЕВ Иван Алексеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел – Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь.