

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ

На правах рукописи

МУБАССАРОВА Виргиния Анатольевна

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
НА СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ И ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ  
В НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

25.00.10 – Геофизика.

Геофизические методы поисков полезных ископаемых

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН)

**Научный**

**руководитель:**

**Официальные**

**оппоненты:**

**Ведущая организация:**

**Богомолов Леонид Михайлович**, доктор физико-математических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск

**Марапулец Юрий Валентинович**, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН), с. Паратунка

**Остапчук Алексей Андреевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), г. Москва

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва

**Защита диссертации состоится** «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного совета Д 002.05.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН) по адресу: 119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1.

**С диссертацией можно ознакомиться** в библиотеке ИДГ РАН и на сайте [idg.chph.ras.ru](http://idg.chph.ras.ru).

Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ИДГ РАН.

**Автореферат разослан** «\_\_» \_\_\_\_\_ 201 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д002.050.01  
кандидат физико-математических наук

Виноградов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты лабораторных исследований влияния электромагнитного поля на образцы горных пород, находящиеся в напряженном состоянии. Постановка лабораторных экспериментов определялась одной из проблем геофизики – разработкой количественных моделей триггерного воздействия электромагнитных полей на протекание деформационных процессов в земной коре.

### Актуальность

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. Применение подходов механики разрушения к описанию процессов, происходящих в земной коре перед землетрясением, позволило определить, что землетрясение является следствием накопления и последующей релаксации упругих напряжений, и на основе данных, полученных в лабораторных экспериментах, разработать ряд моделей [Brace, Byerlee, 1966; Scholz, 1998; Соболев, Пономарев, 2003; Lockner et al., 1991]. Перед землетрясением массив горной породы (как и образец, испытываемый в лабораторном эксперименте) находится в состоянии, близком к неустойчивому равновесию, или, другими словами, в околокритическом состоянии. Особенностью этого состояния является значительное изменение деформации при небольших вариациях напряжения, которые могут возбуждаться при воздействии внешних факторов. Отсюда вытекает принципиальная возможность триггерных эффектов – переходов от одного метастабильного состояния к другому под влиянием внешних воздействий даже небольшой интенсивности, в том числе виброакустических и электромагнитных (ЭМ) воздействий [Соболев, Пономарев, 2003; Тарасов, Тарасова, 2011; Богомолов, 2010; Novikov et al., 2017]. На натурном геофизическом масштабе в работах [Тарасов, 1997; Chelidze et al., 2006; Турунтаев и др., 2012; Смирнов, Завьялов, 2012 и др.] с использованием различных подходов был установлен триггерный эффект электромагнитного поля: по кратковременной активизации сейсмичности, вариациям ее характеристик и скорости сеймотектонических деформаций в период ЭМ воздействий при зондированиях земной коры с применением магнитогидродинамических (МГД) генераторов и электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2.

В проведенных ранее экспериментах на лабораторных образцах “электротриггерный эффект” зарегистрирован, как правило, по увеличению активности акустической эмиссии (АЭ), отражающей скорость трещинообразования геоматериалов (библиография в обобщениях [Соболев, Пономарев, 2003; Богомолов и др., 2011]). Необходимо подчеркнуть, что метод акустоэмиссионного контроля состояния материалов является косвенным (хотя и высокочувствительным). Однако в этих работах не представлены данные об изменении деформации  $\delta\epsilon$  в инициированном электромагнитными полями процессе переходов между метастабильными состояниями. В ранних экспериментах, проведенных в ИС РАН в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред (ЛМЭС), возможное изменение деформации образцов в периоды откликов активности АЭ на электромагнитное воздействие,  $\delta\epsilon < 10^{-6}$ , (при их квазистационарном сжатии 0.7-0.9 от разрушения) не было зарегистрировано вследствие низкой разрешающей способности измерительного канала. В значительной степени из-за этого задержалось развитие феноменологической модели, предложенной в ЛМЭС [Bogomolov et al., 2004]. Модель учитывает возникновение в нагруженных геоматериалах зон с разделением зарядов вследствие динамической (ударной) поляризации по месту очагов АЭ – растущих микротрещин, где могут достигаться огромные ускорения [Bogomolov et al., 2004; Bogomolov et al., 2004 a]. Эффект ударной поляризации горных пород (гранита) был подтвержден в экспериментах, проведенных в ИДГ РАН [Гончаров, Соловьев, 2004]. Аномальное поглощение энергии электрического поля в зонах поляризации нагруженных геоматериалов может считаться первичным механизмом влияния ЭМ поля. Такое поглощение энергии, в конечном счете, должно приводить к увеличению скорости пластической деформации, а не только к приросту активности АЭ. С учетом вышеизложенного, для описания реакции параметров состояния среды на воздействие внешних ЭМ полей актуально получение новых количественных данных об изменениях компонент деформации нагруженных геоматериалов при таких воздействиях.

Представляет интерес постановка новой серии экспериментов на нагруженных образцах горных пород (предпочтительно гранита и мрамора как референтных материалов с различными физико-механическими характеристиками). Применение усовершенствованных методов регистрации трех компонент деформации,

главного напряжения и акустической эмиссии может обеспечить получение новой и более детальной информации о реакции нагруженных образцов на внешнее электромагнитное воздействие. В диссертации приведены результаты этих экспериментов.

#### **Цель работы:**

Установить закономерности влияния электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразование в нагруженных образцах мрамора и гранита, выявить новые характеристики деформационных процессов в присутствии внешних полей на основе усовершенствованной системы измерений деформации и акустической эмиссии.

#### **Основные задачи исследования**

- Отладить и развить методики исследования влияния электромагнитных полей на нагруженные образцы горных пород на основе быстродействующей высокоточной автоматической системы измерений компонент деформации, нагрузки и акустической эмиссии, обеспечивающей длительную регистрацию этих параметров в ходе экспериментов на прессах;

- Исследовать комбинированное влияние электрического и магнитного полей на скорость деформации и акустическую эмиссию образцов мрамора, деформируемых в условиях одноосного сжатия с постоянной скоростью нагружения;

- Сравнить реакции образцов мрамора на воздействие электромагнитных полей при разных режимах сжатия (нарастающего ступенчато или с постоянной скоростью) и с разной степенью водонасыщения.

- Изучить влияние внешнего электромагнитного поля на локализацию дефектов образцов горных пород при фиксированном уровне напряжения на стадии кластеризации микротрещин и зарождения макроразрыва;

#### **На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. При деформировании образцов мрамора в режиме одноосного сжатия с постоянной скоростью роста нагрузки происходит увеличение скорости продольной деформации под воздействием электрического и магнитного полей, направленных перпендикулярно друг другу и оси сжатия.

2. Увеличение скорости продольной деформации образцов мрамора естественной влажности, вызванное воздействием комбинированных электрического и магнитного полей при нагрузках выше 0.7 от напряжения разрушения, в типичных случаях составляет 1.5-2 раза и в большинстве случаев происходит синхронно с приростом активности акустической эмиссии.

3. Для водонасыщенных образцов мрамора, находящихся в состоянии одноосного сжатия при напряжениях выше 0.5 от напряжения разрушения, воздействие комбинированных электрического и магнитного полей инициирует, как правило, синхронное увеличение скорости продольной деформации и активности акустической эмиссии.

4. Для образцов гранита, находящихся в состоянии одноосного сжатия при околоразрушающих нагрузках в период увеличения активности акустической эмиссии, вызванном воздействием электрического поля, происходит заметное уменьшение углового коэффициента (b-value) графиков энергетического распределения сигналов АЭ.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые детально рассмотрено изменение скоростей продольной и поперечных деформаций нагруженных образцов мрамора при комбинированном воздействии электрического и магнитного полей. Показано, что, как правило, изменения компонент деформаций происходят синхронно между собой и с откликами активности акустической эмиссии на внешнее воздействие. Вместе с тем, при фиксированном уровне напряжений обнаружены случаи реакции нагруженных образцов на комбинированное воздействие электрических и магнитных полей в виде изменения скорости деформации без приростов активности АЭ. Впервые выявлено пространственное перераспределение очагов акустической эмиссии при воздействии импульсов электрического поля на образцы гранита, испытываемые на одноосное сжатие при постоянной нагрузке. Впервые обнаружены примеры стократного и более возрастания активности акустической эмиссии при воздействии электромагнитных полей на образцы мрамора в условиях одноосного сжатия, причем для водонасыщенных образцов вариации скорости деформации и активности акустической эмиссии имеют характер резких всплесков.

#### **Практическая значимость**

Результаты исследований могут быть использованы для разработки вопросов активного сейсмоэлектрического мониторинга земной коры, а также в прикладных задачах неразрушающего контроля изделий и конструкций из диэлектрических материалов – мраморов и гранитов – с учетом новой информации о комбинированном воздействии электрического и магнитного полей и реакции на него скорости деформации и активности акустической эмиссии испытываемых материалов.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 5 – в изданиях, рекомендуемых ВАК и проиндексированных в реферативных базах Web of Science и SCOPUS, и 6 – в научных журналах, индексируемых РИНЦ. По теме диссертации также опубликовано 8 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций (2 изданы при поддержке РФФИ).

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении всех лабораторных экспериментов как ответственный исполнитель соответствующих задач по планам НИР ИС РАН (2008-2012 гг.) и Госзаданию № 0155-2018-0003 в ИС РАН (2013-2017 гг.). Диссертантом лично выполнена обработка деформационных данных образцов горных пород и сигналов акустической эмиссии. Написано более 2/3 текста публикаций по теме диссертации и сформулированы выводы.

В диссертацию включены также результаты, полученные в лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) при научной стажировке по проекту РФФИ «Физическое моделирование влияния слабого электрического поля на процесс разрушения мрамора», грант № 13-05-90702-мол\_рф\_нр. Автор являлась участником проектов РФФИ «Исследование влияния электромагнитных полей на микроразрушение в геологической среде методами активного геоакустического мониторинга и лабораторного моделирования» (грант РФФИ № 10-05-00231-а, 2010-2012 гг.); проекта по гранту Президента РФ «Влияние слабых электрических полей на дефектную структуру и процесс разрушения поликристаллических диэлектриков» (МК-6741.2013.1, 2012-2013 гг.); проекта по гранту Президента РФ «Разработка физических основ мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния сейсмоактивных районов земной коры по данным комплексных скважинных измерений» (МК-2682.2017.5, 2017-2018 гг.).

**Достоверность результатов и выводов** обеспечивается использованием подходов и методов исследования, ранее апробированных и взаимно дополняющих друг друга (измерение деформации и акустической эмиссии), надежными алгоритмами обработки данных, согласованностью результатов с результатами других работ по смежной тематике, а также воспроизводимостью результатов при проведении повторных испытаний, и в экспериментах с использованием другого аппаратно-программного оснащения в лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

### **Структура и объем работы**

Работа изложена на 202 страницах, включает в себя 111 рисунков, 28 таблиц, 267 библиографических ссылок.

**Апробация работы** Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены на международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе на: IV международном симпозиуме «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и Геоэкологические проблемы», Бишкек, 2008 г.; XIX Петербургских чтениях по проблемам прочности, посвященных 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н.Н. Давиденкова, г. Санкт-Петербург, 2010 г.; VIII международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», г. Санкт-Петербург, 2010 г.; 51-ой международной конференции «Актуальные проблемы прочности», г. Харьков, 2011 г.; V международном симпозиуме к 75-летию со дня рождения Ю.А.Трапезникова «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», г. Бишкек, 2011 г.; VII Российской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», г. Екатеринбург, 2012 г.; V международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», г. Бишкек, 2013 г.; Втором всероссийском семинаре-совещании «Триггерные эффекты в геосистемах», г. Москва, 2013 г.; Международной конференции «Иерархически организованные системы живой и неживой природы», г. Томск, 2013 г.; VI Международном симпозиуме «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», г. Бишкек, 2014 г.; III

всероссийском семинаре-совещании «Триггерные эффекты в геосистемах», г. Москва, 2015 г.; VII Международном симпозиуме «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», г. Бишкек, 2017 г.

Автор выражает признательность и благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Богомолу Л.М. за постановку темы работы, общее руководство исследованиями и моральную поддержку на всех этапах. Искренне благодарю к.ф.-м.н. Пантелева И.А. и к.ф.-м.н. Закупина А.С. за многолетнюю совместную работу, конструктивные предложения и полезные советы при написании настоящей работы. Также выражаю благодарность директору Научной станции РАН д.ф.-м.н. Рыбину А.К. за возможность провести данное исследование и внимание к работе. Особо признательна Российскому фонду фундаментальных исследований за оказание поддержки грантом по конкурсу научных проектов, выполняемых молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации. Благодарю всех коллег из Научной станции РАН, Института динамики геосфер РАН, Института физики Земли РАН, Объединенного института высоких температур РАН, Института механики сплошных сред УрО РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, которые оказали помощь ценными советами по улучшению диссертации.

### **Содержание работы**

## **Глава I. Анализ состояния исследований влияния электромагнитных полей на процесс разрушения геосред**

*В разделе 1.1* изложены наиболее общие, концептуальные представления о триггерных эффектах в контексте проблемы внешних воздействий на сейсмичность. Сейсмичность Земли представляет собой процесс, протекающий в нелинейной диссипативной системе с набором квазистационарных состояний, в которой проявляются свойства как упорядоченности, так и хаоса. Переход системы из одного состояния в другое возможен при поступлении или расходе энергии. При поступлении энергии из внутренних или внешних источников в системе может произойти переход от устойчивого состояния в неустойчивое. Обратный переход происходит при диссипации накопленной в среде энергии. При землетрясении происходит быстрый сброс части накопленной энергии вследствие того, что диссипативные процессы протекают медленнее, чем происходит приток энергии в очаговую область.

Особенностью метастабильного состояния среды является значительное изменение деформации при небольших вариациях напряжения [Макаров и др., 2007; Соболев, 2011]. Такие вариации могут возбуждаться при воздействии 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. При этом точка (или несколько точек) неустойчивого равновесия проскакиваются. Триггерами могут служить различные физические поля, к примеру, вибрационные и рассматриваемые в данной работе электромагнитные поля.

*В разделе 1.2* изложены результаты работ [Закржевская, Соболев, 2002, 2004; Адушкин и др., 2012; Duma, Ruzhin, 2003; Зотов и др., 2013; Бакмутов и др., 2007; Moldovan et al., 2012 и других], в которых выявлена взаимосвязь сейсмичности и физических процессов, протекающих в системе Солнце-Земля. В этих работах установлены связи между сейсмичностью и импульсами (SSC, SI, BMP, Sq-вариациями, короткопериодными и V-образными аномалиями) магнитных бурь (и полярных суббурь) для регионов с высокой сейсмической активностью (Кавказ, Румыния, Казахстан и Киргизия) и некоторых других областей (Якутия, Томская и Московская области, Кольский полуостров). Согласно модели [Duma, Ruzhin, 2003], магнитный момент, порожденный теллурическими токами земной коры и мантии, взаимодействует с горизонтальной компонентой глобального магнитного поля Земли. Создаваемый таким взаимодействием вращательный момент действует на ионосферные токи, из-за чего возникают наблюдаемые возмущения. Распределенные силы противодействия через геомагнитное поле передаются веществу Земли (на глубинах, где электропроводность достаточно велика), и могут быть триггерами сейсмической активности.

Однако наиболее важными для данной диссертационной работы являются сейсмические эффекты при электромагнитных зондированиях земной коры с использованием мощных источников электрического тока – МГД-генераторов и электроимпульсной генераторной установки. В работах Тарасова Н.Т. установлено пространственно-временное изменение сейсмической активности при облучении земной коры

электромагнитными импульсами, а также значительное приращение сейсмотектонической деформации (СТД) за счет большого числа относительно слабых землетрясений [Тарасов, 1997; Тарасов, Тарасова, 2016]. Увеличение скорости СТД  $\varepsilon(t)$  происходит с задержкой до 5 суток после начала электровоздействия, а длительность периода быстрого высвобождения деформации соизмерима с продолжительностью серий пусков МГД-генератора. После электроразрядов скорость деформации возрастает во всей рассматриваемой территории в десятки раз. Зона локализации сейсмических очагов, рассматриваемых как отклики на электровоздействие, окружает питающий электрический диполь, находящийся в ее центре [Авагимов и др., 2005; Смирнов, Завьялов, 2012]. В завершение **раздела 1.2** рассматриваются некоторые подходы к определению механизмов влияния электроразрядов на сейсмичность, опирающиеся на представления о преимущественной роли эффектов, усиливающих поступление воды на поверхности контактов геоблоков или к устьям трещин, в частности динамические эффекты при формировании или разрыве токовых каналов [Богомолов, 2010].

**Раздел 1.3** посвящен исследованиям триггерного влияния ЭМ полей в экспериментах на образцах геоматериалов с помощью метода акустической эмиссии. Согласно классическим работам [Mogi, 1962; Ohnaka, Mogi, 1982; Lockner et al., 1991; Kuksenko et al., 1996; Виноградов и др., 1975; Виноградов, 1989], метод АЭ зарекомендовал себя как один из информативных (эффективных) подходов к выявлению закономерностей сейсмической активности. Как и сейсмичность, акустическая эмиссия вызывается динамическим развитием разрыва в материале. В работах [Соболев, Пономарев, 2003; Авагимов и др., 2008, 2011; Куксенко, 1986; Bogomolov, Zakupin, 2008; Богомолов и др., 2011 и других] достоверно установлена активизация АЭ при воздействии электрического поля напряженностью порядка 1 кВ/м в образцах горных пород и искусственных материалов при нагрузках выше 0.7 от разрушения. При комбинированном действии электрического и магнитного полей, как и при сочетании воздействий низкоамплитудных и высокоамплитудных электроимпульсов в работах [Zakupin et al., 2009, 2012, 2012 a] отмечены наиболее интенсивные проявления эффекта прироста активности АЭ и компонент деформации. Лабораторные эксперименты, реализующие представление о землетрясении как о скольжении по разлому, также уверенно продемонстрировали инициирование межблоковой подвижки электрическими импульсами [Chelidze et al., 2002, 2016; Novikov et al., 2017].

Рассмотренные эффекты электромагнитного возбуждения акустоэмиссионных сигналов проявляются на масштабах дислокационных ансамблей, двойников, зерен и их границ, а также микротрещин. Для качественного объяснения этих эффектов предложена феноменологическая модель [Bogomolov et al, 2004]. Эта модель, как уже упомянуто выше, основана на представлении о динамической поляризации в нагруженных образцах геоматериалов, на которые воздействует внешнее электрическое поле. Частным случаем этой модели можно считать предложенный Ф. Фройндом механизм образования дырочных носителей заряда при росте трещин [Freund, 2004].

Вместе с тем, естественно ожидать первоначальной реализации электромеханических и магнитомеханических явлений и эффектов на самых низких структурных уровнях – дислокационных и молекулярных. К таким эффектам относятся, к примеру, электропластический и магнитопластический эффекты. Электропластический эффект, заключающийся в увеличении мобильности дислокаций в ионных кристаллах (NaCl, LiF и др.) при приложении электрических полей с напряженностью  $E \sim 10^3\text{-}10^4$  кВ/м исследован в работах [Conrad, 2000, 2004; Зуев, Данилов, 2013]. Определяющим механизмом этого явления является уменьшение электрохимического потенциала облака заряженных вакансий вблизи границ зерен. При этом электрическое поле не изменяет механизма деформирования, а снижает электрохимический потенциал облака заряженных вакансий у границ зерен, усиливая пластическую деформацию [Conrad, 2002]. Для некоторых диэлектрических материалов (стекло, мрамор), не имеющих пьезоэлектрических свойств, обнаружена релаксация электрического поля, подаваемого на образцы [Куксенко, Махмудов, 2004].

Также уделено внимание магнитопластическому эффекту (В.И. Альшиц, А.А. Урусовская, Ю.И. Головин и др.), который заключается в откреплении дислокаций от примесных центров пиннинга вследствие спиновой эволюции атомов примесей из диамагнитных в парамагнитные [Molotskii, Flerov, 2000; Альшиц и др., 2017]. Особенности резонансного магнитопластического эффекта в магнитном поле Земли подробно изучены в работе [Альшиц и др., 2013].

Проведенный в **главе 1** аналитический обзор материалов, посвященных проявлениям триггерных

эффектов электромагнитных полей, позволил сформулировать **выводы** об актуальности и научной значимости экспериментальных исследований по теме диссертации для получения количественных данных об изменениях скорости деформации образцов горных пород при воздействии на них электромагнитных полей.

## **Глава II. Методика лабораторного моделирования электромагнитных воздействий.**

**Раздел 2.1** посвящен ключевым вопросам постановки экспериментов для исследования электромагнитных эффектов на образцах горных пород: выбору режима деформирования (и, как следствие, выбору испытательных машин) и скорости деформирования. Известно, что для образцов горных пород испытание на одноосное сжатие является и самым простым в технической реализации и наиболее распространенным режимом [Ставрогин, Тарасов, 2001]. При таких испытаниях внесение в эксперимент дополнительного фактора в виде воздействия электромагнитного поля может быть проведено простыми средствами, и существенно упрощаются задачи как обнаружения признаков реакции геоматериалов на ЭМ поле, так и выявления количественных характеристик или особенностей деформационных и акустоэмиссионных откликов. В этой связи в качестве испытательных машин были выбраны: рычажная установка для испытаний материалов в условиях одноосного сжатия и гидравлический пресс ОМА. Рычажная установка позволяет проводить эксперименты в двух режимах: при нагрузке, нарастающей с заданной скоростью, и при неизменной нагрузке [Рычажная..., 2012] Эта установка, в отличие от пружинных прессов, обеспечивает нагружение, при котором задаваемое усилие сжатия не зависит от скорости осевой деформации (податливости) образца.

Известно [Гольдин, 2004], что распределение напряжений в энергонасыщенной среде зависит не только от неоднородности среды по упругим модулям, но и от эффективности процессов диссипации энергии в разных участках (блоках) среды. Считается, что неспособность к высокой скорости крипа как раз и определяет возникновение высоких напряжений в определенных частях активизированной зоны. В этой связи постоянный приток энергии вследствие механического нагружения с некоторой (отличной от нуля) скоростью может поддерживать неустойчивость состояния некоторых объемов (частей) образца, давая возможность реализации триггерных эффектов. При постановке эксперимента с непрерывным нагружением с относительно невысокой скоростью (0.5 Н/с) условие приближения состояния образца к тектоническим условиям в глубинах земной коры выполняется лучше, чем в ранних экспериментах ИС РАН, проведенных на образцах с резким ступенчатым нагружением и выдержкой образца длительное время (несколько часов) в состоянии квазиползучести. Учитывая принцип подобия, такая скорость прироста нагрузки (скорость деформации при этом составляет порядка  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  мкм/с) близка скорости перемещения отдельных точек в земной коре порядка 1 см/год [Гзовский, 1975].

Эксперименты в ИМСС УрО РАН проводились на гидравлическом прессе ОМА при постоянном уровне нагрузки с применением современной системы многоканальной регистрации акустической эмиссии Amsy-5 Vallon System. Задачи экспериментов (наряду с проверкой воспроизводимости откликов АЭ на электровоздействие): выявление возможных изменений энергетических распределений сигналов, а также перераспределений очагов АЭ в испытываемых образцах при стимулированном извне приросте акустоэмиссионной активности.

Комбинированное воздействие взаимоперпендикулярных электрического и магнитного поля, вызывающее увеличение активности АЭ образцов горных пород [Zakupin et al., 2009, 2012, 2012 a] и пластическую деформацию щелочно-галоидных кристаллов [Альшиц и др., 1998; Урусовская, 2000] продемонстрировало как усиление магнитопластического эффекта, так и уменьшение характерного времени задержки откликов АЭ и увеличение их амплитуды на такой тип воздействия (15 минут) по сравнению со случаем использования только электрического или только магнитного поля (15-30 минут). Также известно из электродинамики сплошных сред, что действие таких полей может вызывать движение свободных носителей заряда в полупроводниках (электронов, ионов и вакансий) в направлении вдоль вектора Умова-Пойнтинга, т.е. по сути активизировать пластичность на молекулярном уровне. Все это дало основания для применения комбинированного электрического и магнитного поля в настоящем исследовании (описание в *разделе 2.2*). Электрическое поле создавалось при помощи графитовых электродов (размером 25×20 мм), прижатых к параллельным боковым граням образца, на которые с генератора подавались прямоугольные импульсы такой амплитуды, что напряженность создаваемого поля была около 500 В/м (рисунок 1 а), а время установления тока было около 0.1 мкс. Источником магнитного поля служила катушка индуктивности, прижатая к другой боковой грани образца, на которую подавались синусоидальные электрические импульсы с другого генератора, синхронизированные с импульсами, подаваемыми на электроды



(рисунок 1 б). Индукция магнитного поля, возбуждаемого катушкой, по оценкам составляла  $B \sim 0.004$  Тл у оси катушки, именно при таком значении индукции были получены первые уникальные результаты на граните Уэстерли, описанные в главе 1 (рисунок 1 а). При таком расположении электродов и катушки индуктивности на образце напряженности электрического и магнитного полей были взаимоперпендикулярны друг другу и оси сжатия и создаваемый вектор потока энергии (Умова-Пойнтинга) был направлен внутрь образца.

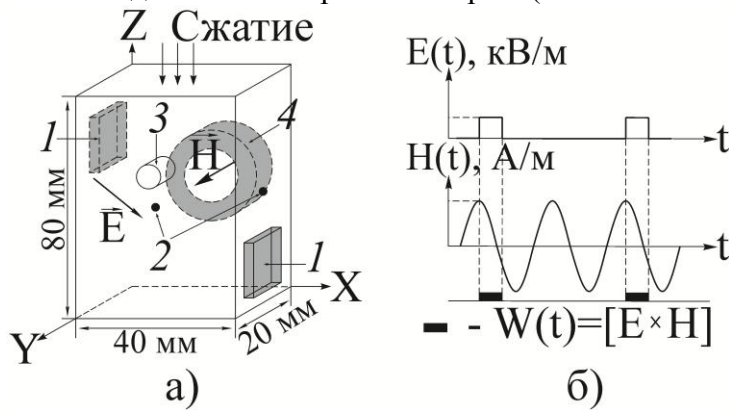


Рисунок 1 – Схема расположения на испытываемом образце источников электрического и магнитного полей: а – направление сжимающего усилия (вертикальное), электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей, 1 – электроды, 2 – точки регистрации компонент деформации, 3 – датчик АЭ, 4 – катушка индуктивности; б – синхронизация периодических электрических импульсов (Г5-54:  $U=50$  В,  $\nu=3$  кГц,  $T=10$  мкс, скважность 75%) с импульсами генератора Г3-33 ( $U=20$  В,  $\nu=6$  кГц), нагружающего магнитную катушку, согласно [5].

Схема испытаний образцов, испытываемых в условиях одноосного сжатия с ростом нагрузки с постоянной скоростью, была однотипной для всей серии: после нагрузки образца на 25-30 кН в начале испытания нагружение в дальнейшем продолжалось с постоянной скоростью 0.5 Н/с вплоть до разрушения. Длительность эксперимента зависела от предела прочности образцов и составляла от 60 до 90 часов. Воздействие электрическим и магнитным полями осуществлялось периодически в течение всего эксперимента через равные интервалы нагрузки 7.85 кН (равные интервалы времени около 4 часов). В соответствии с работами [Закупин и др., 2006, 2006 а; Zakupin et al., 2012, 2012 а], длительность воздействия была выбрана 1 час как оптимальный интервал, на котором электромагнитные поля могут возбуждать акустоэмиссионную активность. Таким образом, в зависимости от предела прочности каждого образца в среднем в ходе одного эксперимента было реализовано от 5 до 10 сеансов ЭМ воздействия. Для полноты описания различных режимов влияния электрического и магнитного полей (одной и той же напряженности) на нагруженные образцы мрамора было проведено несколько экспериментов с непрерывным воздействием этих полей. В этих экспериментах образцы мрамора естественной влажности нагружались с постоянной скоростью 0.5 Н/с, а комбинированное воздействие электрическим и магнитным полями продолжалось в течение всего времени испытания, начиная с уровня нагрузки  $k^* > 0.3$  и вплоть до разрушения,  $k^* = 1$ , (где  $k^*$  - отношение текущей нагрузки к разрушающей).

В цикле испытаний в ИМСС УрО РАН использовалась схема электровоздействия при постоянном уровне нагрузки, использованная в предыдущих исследованиях [Закупин и др., 2006, 2006 а; Мубассарова, Богомолов, 2010, 2010 а]. После ступенчатого увеличения сжимающей нагрузки происходила ее фиксация, далее каждый экспериментальный сеанс состоял из следующих трех интервалов длительностью 1 час: время ожидания после прироста нагрузки, но перед воздействием, при котором происходила релаксация переходных процессов, период электровоздействия и последний интервал – после воздействия.

**В разделе 2.3** представлено описание системы и методики измерения деформаций и сжимающей нагрузки. Значения нагрузки и трех компонент деформации (продольной и двух поперечных) регистрировались при помощи индукционных датчиков линейных перемещений (LVDT – Linear Variable Differential Transducers). Один из датчиков был встроен в давящую пятю и регистрировал нагрузку на образце с точностью 260 Н. Датчики были установлены таким образом, чтобы регистрировалось абсолютное приращение размеров образца: в точках в центрах боковых граней измерялись две поперечные деформации ( $\Delta l_x$  и  $\Delta l_y$ ), а продольная деформация ( $\Delta l_z$ ) определялась укорочением рабочего пространства между давящими плитами прессы, где был установлен образец (рисунок 1 а). Рабочий диапазон датчиков, регистрирующих поперечную деформацию составлял: для  $\Delta l_x \pm 0.13$  мм и для  $\Delta l_y \pm 0.25$  мм, а для продольной  $\Delta l_z \pm 1.27$  мм. По проведенным калибровочным испытаниям коэффициенты преобразования составили:  $k_z = 2.1$  мкм/мВ,  $k_y = 1.1$  мкм/мВ,  $k_x = 0.66$  мкм/м, а погрешность измерений не превысила 2 % для всех датчиков. Таким образом, зная начальные размеры образцов и их

абсолютные приращения в процессе испытаний, рассчитывались относительные деформации (три компоненты).

В *разделе 2.4* описана методика регистрации сигналов акустической эмиссии в одноканальном (эксперименты в НС РАН) и многоканальном (эксперименты в ИМСС УрО РАН) режимах, а также алгоритм выделения реакции геоматериала на электромагнитное воздействие, определяемой как отклик активности АЭ, рисунок 2. В экспериментах в НС РАН сигналы АЭ регистрировались широкополосным датчиком SE-2MEG-P производства компании DECI, США, располагаемом на исследуемом образце, с частотным диапазоном от 200 кГц до 2 МГц. В испытаниях в ИМСС УрО РАН дополнительно к четырем датчикам SE-2MEG-P использовались два датчика компании Vallen System стандартного типа AE104A, работающие в диапазоне частот 100-400 кГц. Сигналы АЭ регистрировались в ждущем режиме по превышению некоторого порогового уровня, заведомо выше инструментальных шумов, возникающих в процессе испытаний. В НС РАН зарегистрированные пьезоэлектрическим датчиков сигналы АЭ поступали на вход измерительной системы, включающей предварительный усилитель, блок усиления и синхронизации, быстродействующий аналого-цифровой преобразователь USB 3000 и персональный компьютер. В ИМСС УрО РАН использовалась многоканальная система Amsy-5, в которой в режиме реального времени проводилась обработка сигналов с определением активности АЭ, накопления событий АЭ, энергии сигналов и других параметров сигналов, а также трехмерная локация источников сигналов в объеме образца. Для выполнения локационных расчетов скорость звука в материале (граните) задавалась равной 5350-5600 м/с [Добрынин и др., 1991; Физические..., 1984], а точность определения источника сигнала была не хуже 1 мм.

При обнаружении отклика среды на воздействие в активности АЭ можно воспользоваться методикой [Соболев, Пономарев, 2003], основанной на расчете среднеквадратического отклонения  $\sigma^*$  после вычитания линейного тренда на графике активности АЭ (рисунок 2). Превышение величины  $3\sigma^*$  может считаться откликом активности АЭ на внешнее (в нашем случае электромагнитное) воздействие.

Для определения и последующего вычитания линейного (фонового) тренда использовался промежуток времени около трех часов до начала сеанса воздействия (красные линии на верхнем графике для трех интервалов времени на рисунке 2). Для каждого периода до и во время воздействия определялось среднеквадратическое отклонение  $\sigma^*$ . Превышение активностью во время сеанса значения  $3\sigma^*$  определяло отклик на воздействие. Под искомыми откликами активности АЭ подразумевались только вариации акустоэмиссионной активности, произошедшие с временными задержками, не превышающими длительности воздействия. Это ограничение вызвано тем, что при непрерывном росте нагрузки активизацию АЭ после выключения источника ЭМ воздействия можно связывать просто с более высокой нагрузкой. Таким образом, в отличие от экспериментов с ЭМ воздействием при фиксированной нагрузке, поиск откликов активности АЭ целесообразно проводить только в периоды воздействия.

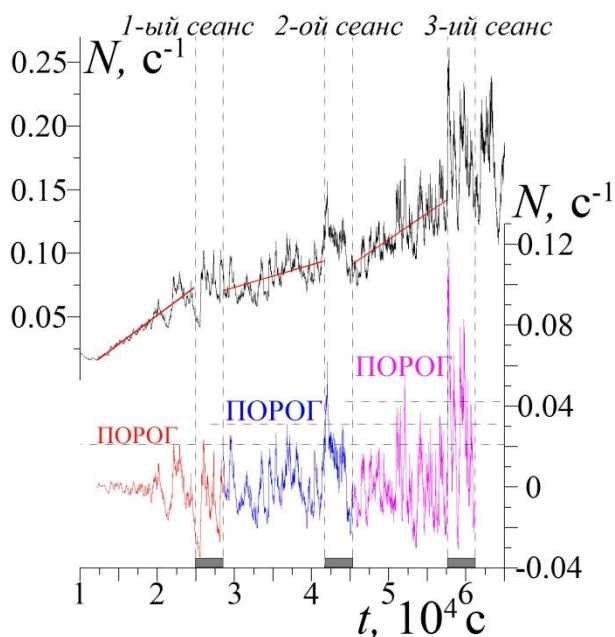


Рисунок 2 – Методика обнаружения откликов активности АЭ. Черная кривая – активность сигналов АЭ, зарегистрированная в эксперименте. Красными линиями обозначены аппроксимационные прямые активности до каждого из трех сеансов воздействия (фоновой активности). Красной, синей, розовой кривой представлены активности АЭ с вычетом тренда, рассчитанного по фоновой активности до каждого сеанса воздействия.

Методика выделения откликов активности АЭ в экспериментах в ИМСС УрО РАН отличалась от вышеописанной только тем, что при ступенчатом изменении нагрузки и последующей фиксации ее уровня активность АЭ описывается степенным распределением, подобным закону Омори для афтершоковой активности [Utsu, 1961]. Участок спада АЭ активности как раз и связан с переходными процессами после нагружения. Далее активность АЭ характеризуется плавным убывающим трендом, который можно аппроксимировать либо спадающей линейной зависимостью, а при длительной выдержке в режиме ползучести – константой. Для большинства горных пород и композитных материалов длительность участка спада активности АЭ не превышает 30-60 минут [Закупин и др., 2006]. С учетом этого длительность интервалов выдержки образца после нагружения, интервал воздействия и интервал последействия были выбраны равными 1 час каждый.

Наряду с поиском откликов активности АЭ на ЭМ воздействие, рассматривалась реакция материала в изменении углового коэффициента графика энергетического распределения сигналов АЭ (b-value). В экспериментах в ИМСС УрО РАН для этого проводилась сортировка событий АЭ по времени возникновения – в течение 1 часа до сеанса воздействия, включая момент ступенчатой нагрузки, в течение самого сеанса и за 1 час после выключения источников электрического и магнитного полей. Для каждой из этих выборок строилось кумулятивное распределение сигналов АЭ по условным (электрическим) энергиям и вычислялся угловой коэффициент (b-value).

**В разделе 2.5** описан выбор исследуемых материалов помимо соображений подобия, который опирался на опыт предыдущих исследований – тип горных пород, залегающих на территории, для которой был установлен эффект электровоздействия на прирост локальной сейсмичности и наличие у этих пород выраженных акустоэмиссионных свойств. Следует также отметить, что ранее не проводилось исследований на породах, обладающих свойствами пластичности, но подвергающихся хрупкому типу разрушения, несмотря на близость такого типа разрушения к реальным тектоническим процессам в земной коре [Гольдин, 2004]. В этой связи для испытаний были изготовлены образцы мрамора, имеющие форму параллелепипеда с размерами 80×40×20 мм и гранита с размерами 100×50×25 мм. Наряду с образцами естественной влажности в настоящем исследовании использовались водонасыщенные образцы мрамора, степень насыщения минерализованной водой составляла 2% от массы образцов до водонасыщения при табличном значении пористости не более 4%. Проведение экспериментов на водонасыщенных образцах мрамора направлено на уточнение представлений о роли воды в эффекте электростимулирования сейсмических подвижек в земной коре.

В экспериментах в ИМСС УрО РАН использовался ранее хорошо изученный в ИС РАН материал с хрупким типом разрушения – гранит. Гранит обладает пьезоэлектрическими свойствами, однако пьезоэлектрический модуль  $d$  достаточно мал ( $\approx 10^{-15}$  Кл/Н), и при напряженности внешнего электрического поля

$E \sim 10^3$  В/м вклад обратного пьезоэффекта в приросты активности АЭ при электровоздействии незначителен [Закупин, 2008]. Постановка экспериментов с электровоздействием в ИМСС УрО РАН, благодаря имеющейся там современной системе регистрации сигналов АЭ, может не только подтвердить результаты об откликах АЭ образцов гранита, но и обнаружить новые закономерности.

Проведенное в главе 2 описание апробированных подходов и методик (одноосное сжатие, измерение деформации и акустической эмиссии, в том числе с лоцированием источников сигналов АЭ, выбор источников и параметров электрического и магнитного поля, а также мрамора и гранита в качестве материала испытания) позволило обосновать возможность и эффективность их применения для цели исследования.

### **Глава III. Вариации скорости деформации и параметров АЭ нагруженных образцов мрамора при комбинированном воздействии электрического и магнитного полей.**

Для анализа результатов экспериментов на образцах горных пород, испытываемых с воздействием электромагнитного поля, и приближения к пониманию и теоретическому построению моделей преобразования энергии ЭМ поля в упругую энергию необходимо предварительно изучить типичный характер деформирования материала, когда на образец действует только один фактор – напряжение сжатия. Для этого из серии образцов мрамора, предназначенных для исследований влияния ЭМ поля, было отобрано 4 экземпляра для проведения измерений трех компонент деформации (с построением диаграммы напряжения-деформации –  $\sigma$ - $\epsilon$ ) и акустической эмиссии в отсутствие ЭМ воздействий. Результаты представлены в *разделе 3.1*. Показано, что в испытаниях без воздействия усредненное за час изменение скорости продольной деформации образцов мрамора не превышает 10%. Эта величина была принята в качестве пороговой для выявления реакции деформируемого материала на электромагнитное воздействие. Причем реакцией считается как увеличение, так и уменьшение скорости деформации на величину, больше 10%.

*Раздел 3.2* включает в себя результаты исследований комбинированного воздействия электрического и магнитного полей на процесс деформации образцов мрамора естественной влажности, подвергаемых нагружению с постоянной скоростью 0.5 Н/с. Опираясь на опыт предыдущих исследований (обзор в [Богомолов и др., 2011]), реакцию материала, выражающуюся в приростах компонент деформации  $\epsilon_z, \epsilon_x, \epsilon_y$  и их скоростей  $\dot{\epsilon}_z, \dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y$ , а также активности АЭ (отклике АЭ), целесообразно исследовать отдельно в области деформирования при относительных значениях нагрузки ниже 0.7 от разрушения и при  $k^* > 0.7$ . Отметим, что в экспериментах при фиксированном уровне напряжения лишь в диапазоне  $k^* > 0.7$  появление откликов АЭ на электровоздействие было статистически достоверным.

При сжатии, соответствующем значению  $k^* < 0.7$ , для одиннадцати сеансов воздействия электрического и магнитного полей, проведенных на трех образцах мрамора, приросты скорости продольной деформации были получены только в шести случаях (что составляет 54%). Величина относительного изменения  $\dot{\epsilon}_z$  в период воздействия варьируется от 1.1 до 2.9 раз (рисунок 3). Среднее за шесть сеансов увеличение  $\dot{\epsilon}_z$  составляет 1.8 раз.

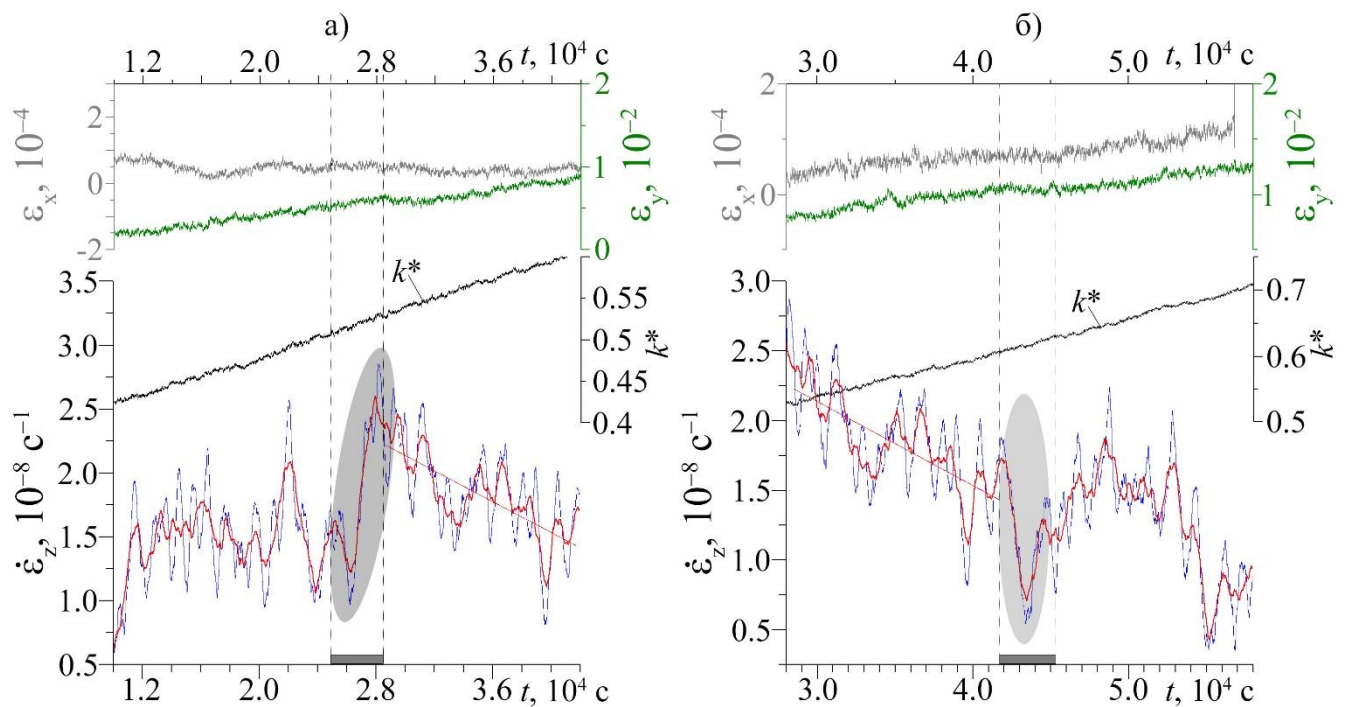


Рисунок 3 – Скорость продольной деформации, определенная в скользящем окне длиной 900 с (синяя кривая) и 1800 с (красная кривая) для двух сеансов воздействия при разных значениях нагрузки. Черная кривая – зависимость  $k^*$  от времени, серой и зеленой кривыми показаны изменения поперечных компонент деформаций  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  соответственно. Интервалы комбинированного воздействия обозначены штрих-пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу.

Как видно из рисунка 3, изменения скорости продольной деформации имеют как положительное значение (прирост скорости на рисунке 3 а), так и отрицательное (уменьшение скорости на рисунке 3 б), встречающееся не чаще, чем в трех случаях из десяти (и в основном при  $k^* < 0.7$ ). Наблюдаемое на рисунке 3 б уменьшение скорости продольной деформации спустя длительное время после воздействия (при  $t \approx 5.4 \cdot 10^4$  с) по амплитуде меньше, чем подобное уменьшение скорости в период сеанса (выделенное овалом) и не может однозначно интерпретироваться как реакция на воздействие.

В данной серии экспериментов изменения скорости поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_y$  выявлены в двух из одиннадцати сеансов. В восьми из одиннадцати сеансов в этой области (при  $k^* < 0.7$ ) наблюдалась реакция АЭ на комбинированное воздействие электрического и магнитного полей, причем только в пяти из них имели место также изменения скорости продольной деформации. Отклики активности АЭ имели небольшую амплитуду, минимальный прирост составил 1.1 раза, максимальный – 2.4 раза (в среднем же увеличение активности АЭ равнялось 1.8 раза).

При повышенном уровне сжатия (нагрузки) комбинированное влияние электрического и магнитного полей на скорость продольной деформации проявилось в 69% проведенных сеансов (девять из тринадцати случаев). Скорость продольной деформации  $\dot{\varepsilon}_z$  увеличивалась в 1.2-340 раз. Среднее увеличение  $\dot{\varepsilon}_z$  составило 40 раз. В одном из сеансов отмечено изменение скорости  $\dot{\varepsilon}_z$  в 340 раз и продольное укорочение образца на  $\Delta l_z = 1.3$  мкм. Скорость поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_x$  во время этого сеанса выросла на 4 порядка, а поперечное расширение составило  $\Delta l_x = 20$  мкм. Важно, что на этой стадии нагружения при изменениях скорости продольной деформации как правило происходили изменения скоростей поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_x$  (отмечено в пяти из девяти сеансов) и  $\dot{\varepsilon}_y$  (шести из девяти сеансов). На рисунке 4 представлен пример, в котором при  $k^* = 0.91$  дважды произошло увеличение двух компонент деформации ( $\varepsilon_z, \varepsilon_x$ ) и активности АЭ синхронно между собой (обозначено цифрами 2 и 3) и прирост третьей компоненты деформации  $\varepsilon_y$  независимо от других (обозначено цифрой 1). Наблюдаемые асинхронные изменения скоростей деформации, обусловлены, с наибольшей вероятностью, использованием

образцов с прямоугольным поперечным сечением (так что компоненты поперечных деформаций неравноправны). Также возможны другие причины, описанные в тексте диссертации.

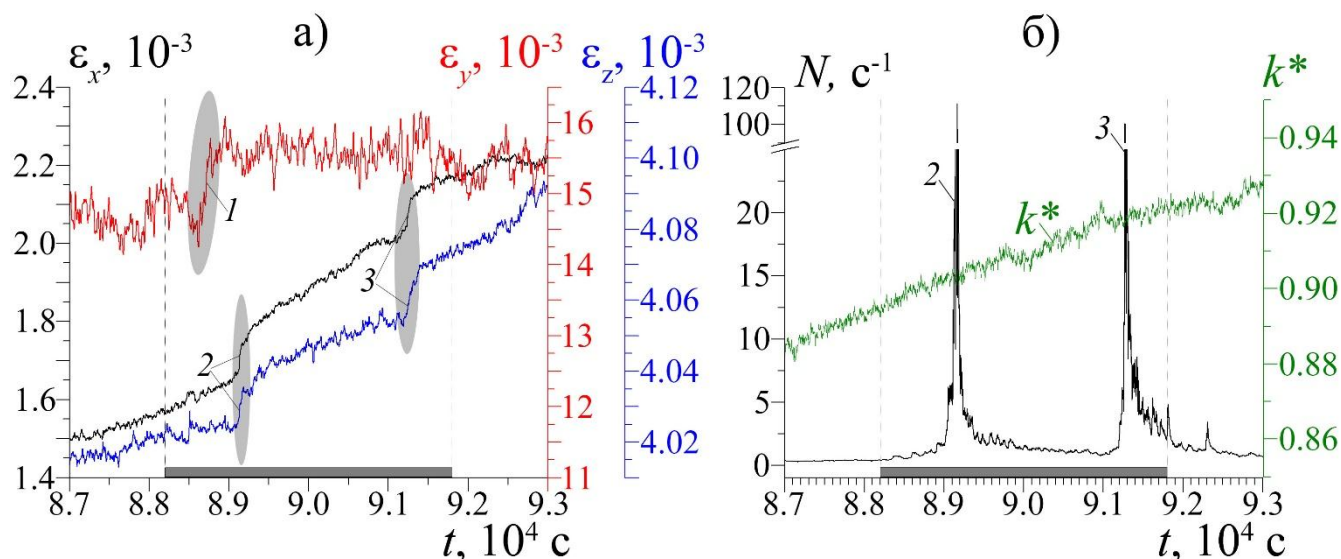


Рисунок 4 – Масштабированные графики: а – изменения трех компонент деформации, сглаженные методом скользящего среднего: черная кривая –  $\varepsilon_x$ , красная –  $\varepsilon_y$ , синяя –  $\varepsilon_z$ , б – активности АЭ (черная кривая) и коэффициента нагрузки  $k^*$  (зеленая кривая) образца мрамора № 2 в период сеанса, согласно [5]. Штрих-пунктирными линиями и серыми линиями снизу отмечен интервал воздействия. Максимальные значения активности АЭ: 2 –  $111 \text{ c}^{-1}$ , 3 –  $100 \text{ c}^{-1}$ .

В диапазоне нагрузок с  $k^* > 0.7$  прирост активности АЭ при комбинированном воздействии электрического и магнитного полей зарегистрирован в 11 из 13 проведенных сеансов (85%). То есть акустическая эмиссия оказалась более чувствительным индикатором реакции материала на воздействие, чем изменения скоростей деформаций, которые наблюдались в 69% случаев.

Полученные результаты можно представить в виде обобщающих гистограмм, в которых показано, что значительные по амплитуде относительные изменения скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}_z$ ,  $\dot{\varepsilon}_x$ ,  $\dot{\varepsilon}_y$  (рисунок 5), а также активности АЭ (отклики АЭ, рисунок 6) наблюдаются при высоких значениях нагрузки (рисунок 6), что подтверждает и дополняет ранее обнаруженные эффекты активации акустической эмиссии при воздействиях электромагнитных полей [Закупин и др., 2006, 2006 а; Богомолов и др., 2011].

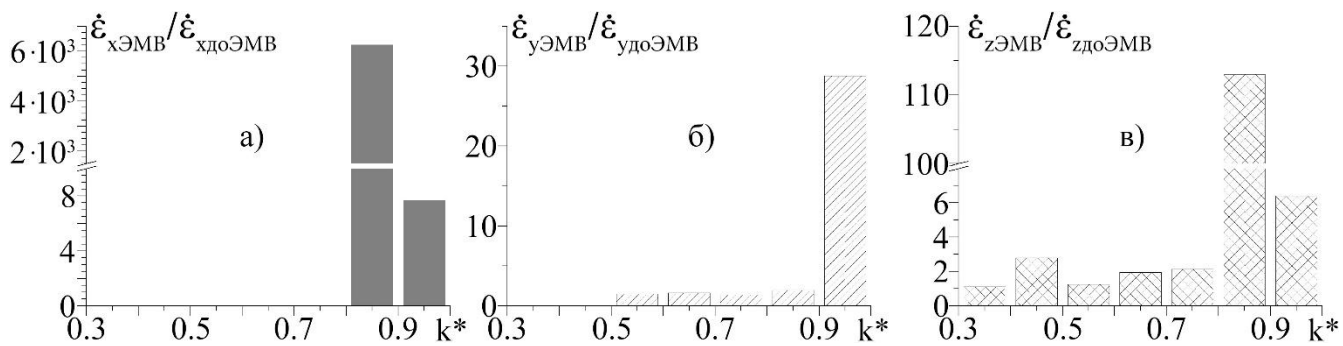


Рисунок 5 – Усредненные по всей серии экспериментов относительные изменения скоростей деформации: а – поперечной  $\dot{\varepsilon}_x$ , б – поперечной  $\dot{\varepsilon}_y$  и в – продольной  $\dot{\varepsilon}_z$  образцов мрамора при комбинированных воздействиях электрического и магнитного полей при разных коэффициентах одноосного сжатия,  $k^*$ .

Стоит особо отметить, что в рассматриваемом режиме нарастающей нагрузки акустоэмиссионные отклики характеризуются большей амплитудой прироста активности АЭ (по сравнению с электростимулированными откликами при постоянном уровне сжатия при тех же нагрузках  $k^* > 0.7$ , см. рисунок 6 б). В среднем по одиннадцати

сеансам (при  $k^* > 0.7$ ) приросты активности АЭ составили 110 раз, минимальный – 1.1 раза, максимальный – 780 раз.

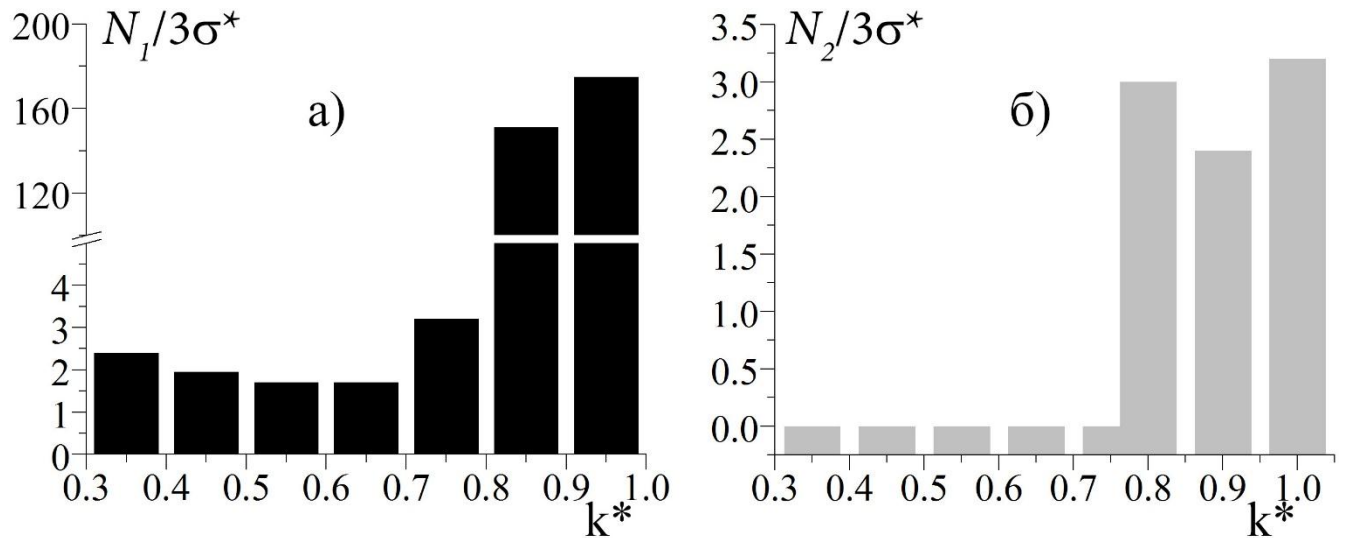


Рисунок 6 – Усредненные по всей серии экспериментов относительные изменения активности АЭ образцов мрамора  $N_1$  при комбинированных воздействиях электрического и магнитного полей при разных коэффициентах одноосного сжатия  $k^*$  (а), и образцов гранитов, гранодиорита,  $N_2$  по данным [Закупин и др., 2006, 2006 а; Богомолов и др., 2011] (б).

Результаты экспериментов, проведенных с непрерывающимся в течение всего испытания комбинированным воздействием электрического и магнитного полей, продемонстрировали существенное отличие как от экспериментов с часовыми сеансами включения ЭМ полей, так и от случая отсутствия ЭМ воздействий. При «непрерывном» воздействии ЭМ полей практически отсутствуют значительные кратковременные приращения деформации, а приросты активности акустической эмиссии редки и имеют меньшую амплитуду, чем в случае сеансовых воздействий. Увеличение скорости поперечной деформации  $\varepsilon_y$ , а также синхронные кратковременные приращения деформаций  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_z$  наблюдаются с большой задержкой (2.5 часа) от начала воздействия (обозначено цифрой 1 на рисунке 7 а). Это позволяет понять, почему в экспериментах с сеансами воздействия ЭМ полей в подавляющем большинстве случаев приросты скоростей деформации отмечаются при высоких значениях напряжения и с задержками, близкими к длительности сеанса.

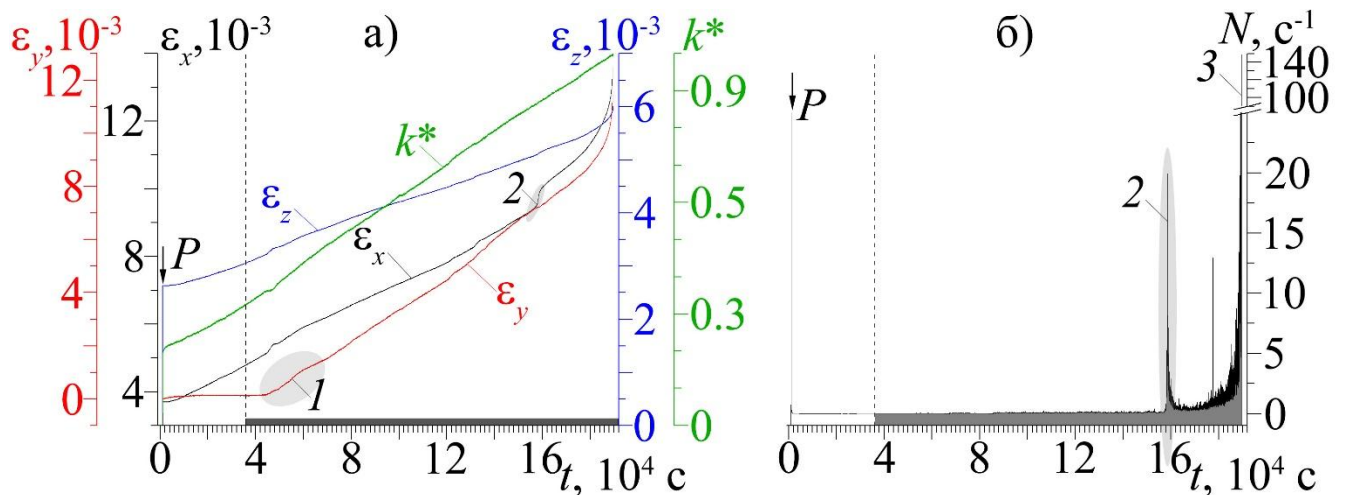


Рисунок 7 – Графики: а – изменения трех компонент деформаций: черный график –  $\varepsilon_x$ , красный график –  $\varepsilon_y$ , синий график –  $\varepsilon_z$  и коэффициента нагрузки  $k^*$  (зеленый график), б – активности АЭ. Серым затемнением графика активности и серой линией снизу на графике деформаций показано комбинированное воздействие электрическим и магнитным полями. Стрелка с подписью Р – момент нагружения; 1 – начало роста поперечной деформации  $\varepsilon_y$ , 2 – прирост поперечной деформации  $\varepsilon_x$  и

активности АЭ, 3 – значение активности АЭ при разрушении  $87 \text{ с}^{-1}$  согласно [5].

Представленные в главе 3 результаты экспериментов, проведенных на образцах мрамора естественной влажности в режиме одноосного сжатия с непрерывным ростом нагрузки и комбинированным воздействием электрического и магнитного поля позволили сформулировать следующие **выводы по главе 3**.

В методических экспериментах на образцах мрамора, проведенных по схеме с увеличением нагрузки, но без дополнительного воздействия электрического и магнитного полей, были установлены типовые зависимости продольной и поперечных деформаций и их скоростей от времени. Обоснована методика анализа этих данных, которая подразумевает выявление характерных пороговых значений параметров (среднечасовых относительных изменений скоростей продольной и поперечной деформации), превышение которых свидетельствует о реакции материала на электромагнитное воздействие.

В экспериментах на образцах мрамора естественной влажности, на которые в течение часовых сеансов действовали комбинированные электрическое и магнитное поля, обнаружены превышения этих пороговых значений. При напряжениях ниже 0.7 от разрушения изменения скорости деформации отмечены в половине случаев, а при увеличении напряжений – в большинстве сеансов с воздействием этих полей. Величина приростов скоростей деформации варьируется в диапазоне от десяти процентов до нескольких порядков и, как правило, сопровождается откликами активности АЭ. В диапазоне напряжений ниже 0.7 от разрушения отклики активности АЭ характеризуются небольшой амплитудой прироста и отмечены в 73% сеансов воздействия. При более высоких значениях напряжения сжатия процент сеансов с откликами акустоэмиссионной активности возрастает до 85% и амплитуда откликов возрастает в разы и десятки раз. В диапазоне сжимающих нагрузок с  $k^* > 0.7$  амплитуда приростов активности АЭ образцов мрамора оказалась на порядок выше, чем для образцов гранитоидов.

Изложенные результаты позволяют обосновать защищаемые научные положения 1, 2 (стр. 4).

Результаты акустоэмиссионных откликов образцов мрамора на воздействие ЭМ полей согласуются с результатами предшествующих работ об электрочувствительности акустической эмиссии образцов горных пород, испытываемых на одноосное сжатие.

#### **Глава IV. Особенности реакции образцов мрамора и гранита на воздействия электромагнитных полей. Различная постановка эксперимента**

В главе 4 изложены результаты экспериментов, проведенных чтобы подтвердить, уточнить и дополнить описанные в главе 3 тенденции изменения скорости деформации и активности акустической эмиссии образцов мрамора. Для этой цели может быть применен принцип рандомизации, подразумевающий некоторые изменения в постановке экспериментов – использование водонасыщенных образцов мрамора и ступенчатого нагружения, а также образцов другой горной породы (гранита). Часть экспериментов проведена на другой установке в лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН.

**В разделе 4.1** представлены результаты экспериментов, проведенных на водонасыщенных образцах мрамора в связи с распространенными представлениями, что в земной коре присутствие воды в поро-трещинном пространстве повышает чувствительность среды к воздействию ЭМ полей, в том числе при зондированиях с применением мощных источников тока. Для экспериментов использовались образцы мрамора из той же партии, что и сухие образцы, рассмотренные в главе 3. После насыщения минерализованной водой боковые поверхности образцов были обмазаны силиконовой смазкой для предотвращения испарения влаги в процессе испытаний. Эксперименты проводились по той же схеме, по которой были испытаны сухие образцы мрамора в главе 3.

Средний предел прочности водонасыщенных образцов мрамора (77 МПа) значительно ниже значения для сухих образцов (128 МПа) вследствие эффекта Ребиндера [Ребиндер, 1979]. Модуль Юнга для водонасыщенных образцов оказался вдвое меньшим, чем для сухих образцов.

Для семи сеансов комбинированного воздействия электрического и магнитного полей, проведенных в ходе испытаний двух водонасыщенных образцов мрамора приросты скорости продольной деформации  $\dot{\epsilon}_z$  отмечены в пяти случаях (71%) – все при  $k^* > 0.5$ . Таким образом, порог электрочувствительности водонасыщенных образцов мрамора оказался ниже, чем у сухих ( $k^* = 0.7$ ). Скорость  $\dot{\epsilon}_z$  увеличивалась минимум в 1.2 раза и максимум в 380 раз (рисунок 7 б).



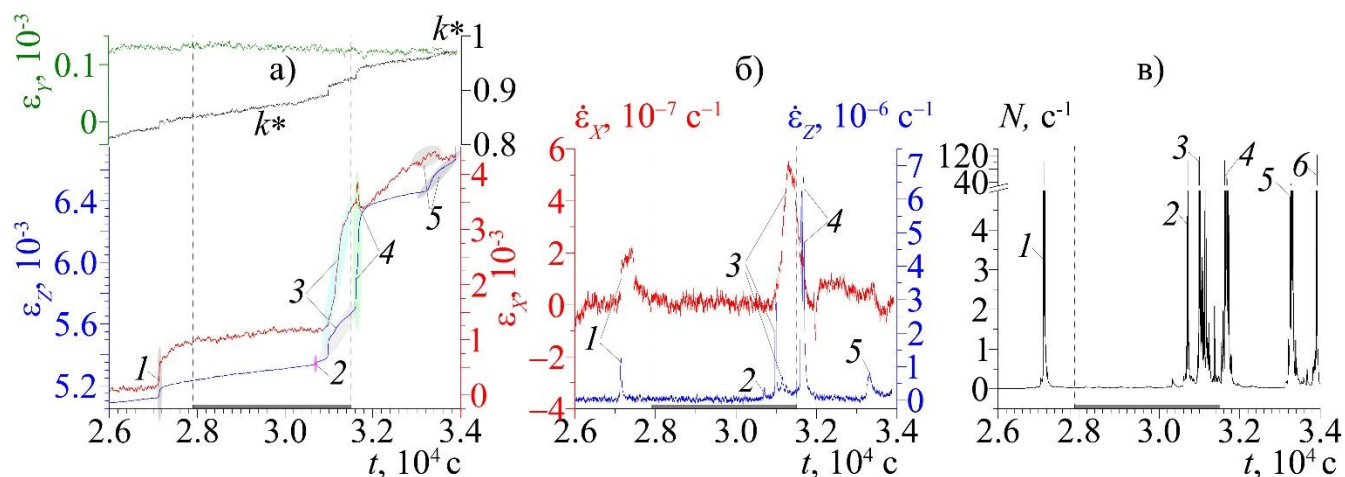


Рисунок 8 – Графики изменения компонент деформации водонасыщенного образца мрамора (красная кривая –  $\varepsilon_x$ , зеленая –  $\varepsilon_y$ , синяя –  $\varepsilon_z$ ), коэффициента нагрузки  $k^*$  (черная кривая) (а), скоростей деформации, сглаженных в скользящем окне (б) и активности АЭ (в) по материалам [16]. Интервал воздействия обозначен штрих-пунктирными линиями и серой чертой снизу. Цифровые обозначения – изменения компонент деформации, соответствующие максимальным значениям активности АЭ: 1 –  $103 \text{ c}^{-1}$ , 2 –  $104 \text{ c}^{-1}$ , 3 –  $119 \text{ c}^{-1}$ , 4 –  $106 \text{ c}^{-1}$ , 5 –  $36 \text{ c}^{-1}$ , 6 –  $123 \text{ c}^{-1}$ .

Наиболее длительное по времени изменение  $\dot{\varepsilon}_z$  при комбинированном воздействии электрического и магнитного полей, зарегистрировано, когда скорость продольной деформации изменялась несколько раз в течение сеанса и продолжила свой рост и после завершения сеанса, приведя к разрушению образца (рисунок 8 а, б). В данном случае наблюдалось последствие комбинированных электрического и магнитного полей. Значение  $\dot{\varepsilon}_z = 5.8 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$  до начала воздействия увеличилось в 290 раз до максимального уровня в сеансе  $\dot{\varepsilon}_z = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ , при этом осевое смещение составило  $\Delta l_z = 95 \text{ мкм}$  (рисунок 8 а). Скорость поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_x$  во время этого сеанса выросла в 15 раз, а поперечное удлинение составило  $\Delta l_x = 6 \text{ мкм}$  (рисунок 8 а).

Рост деформации сопровождался резкими всплесками активности АЭ (примерно в 2500 раз больше  $3\sigma^*$ , оцененной до сеанса). Общая длительность отклика АЭ – около 2100 с (рисунок 8 в), за это время накоплено дополнительно около 2200 событий АЭ. В 57% сеансов изменения происходили одновременно в скоростях двух и трех компонент деформации. Минимальное изменение  $\dot{\varepsilon}_x$  было примерно 15, а максимальный рост – на 6 порядков. Скорость поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_y$  увеличивалась в двух сеансах в 4.6 и 6.7 раз.

В представленных экспериментах значительные изменения скоростей деформаций (более, чем в 100 раз) происходили чаще, чем в случае неводонасыщенных образцов. По всей видимости, это объясняется влиянием воды, также как и снижение уровня сжатия, при котором обнаруживается «электрочувствительность» образцов. Вода играет роль смазки при проскальзывании по контактирующим поверхностям зерен. Кроме этого, присутствие воды в поро-трещинном пространстве материала может изменить электрическую поляризацию, возникающую при наложении электрического поля и вносящую вклад в образование новых поверхностей разрыва.

Полученный результат об изменении скорости деформации водонасыщенных образцов мрамора при комбинированном воздействии электрического и магнитного полей позволяет предположить, что и в ранее проведенных в ИС РАН экспериментах в режиме ступенчатого нагружения образцов также могли происходить изменения деформации. Напомним, что в упомянутых экспериментах (обзор в [Богомолов и др., 2011]) возможное изменение деформации не было зарегистрировано вследствие низкой разрешающей способности измерительной аппаратуры. В связи с изложенным были вновь проведены эксперименты на образцах мрамора естественной влажности (из той же серии) в режиме со ступенчатым ростом нагрузки. Воздействия комбинированных электрического и магнитного полей проводились при фиксированном уровне нагрузки. В разделе 4.2 представлены результаты этих экспериментов. Аналогично предыдущим экспериментам, интерпретация результатов проводилась для двух диапазонов нагрузок: при относительных нагрузках до 0.7 от разрушения и при  $k^* > 0.7$ .

Из шестнадцати проведенных сеансов при  $k^* < 0.7$  в девяти было выявлено изменение  $\dot{\epsilon}_z$ , которое, в среднем, представляло собой рост в примерно 33 раза (рисунок 9). Изменение  $\dot{\epsilon}_x$  наблюдалось в 38% сеансов и всего в двух сеансах имело место увеличение  $\dot{\epsilon}_y$  в 2.4 и 11 раз.

В диапазоне более высоких нагрузок с  $k^* > 0.7$  значение скорости продольной деформации изменилось в шести из десяти проведенных сеансов (увеличение, в среднем, в 12 раз). Отклики АЭ на комбинированное воздействие электрического и магнитного полей проявились лишь в пяти сеансах и имели небольшую амплитуду и длительность. При  $k^* > 0.7$  максимальное увеличение активности АЭ составило 19 раз. Согласно графикам активности АЭ неупругая энергия, излучаемая с акустической эмиссией, преимущественно выделялась в моменты ступенчатого прироста нагрузки.

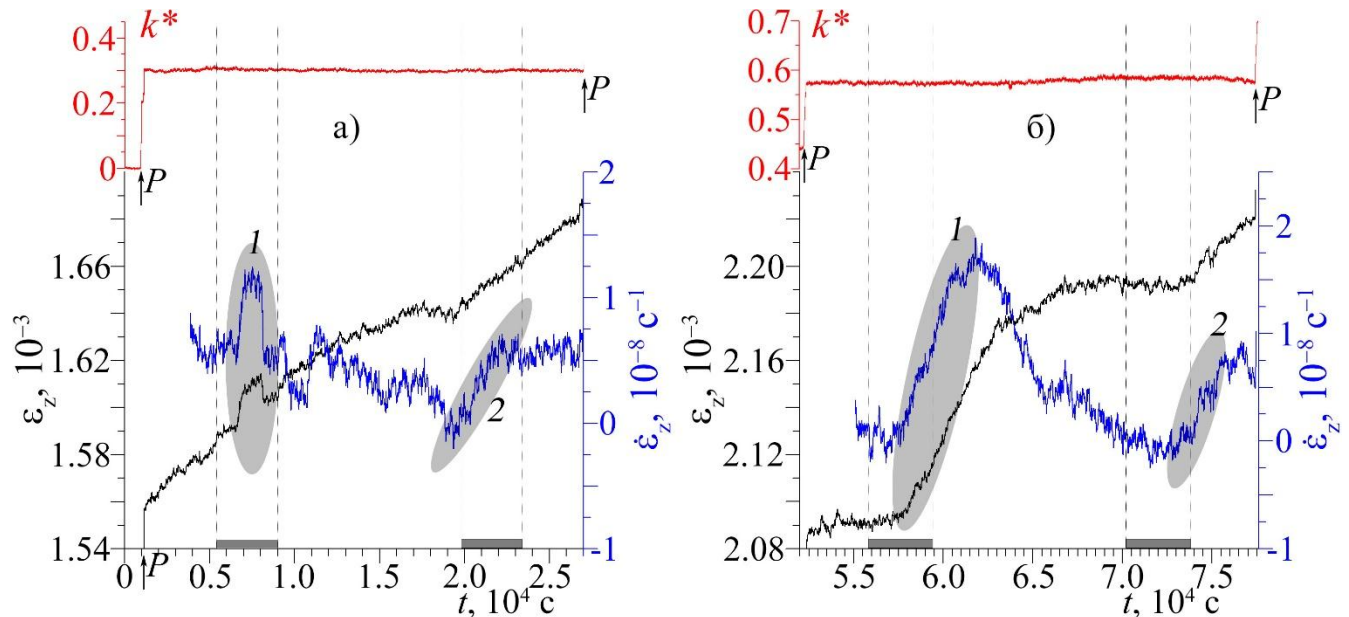


Рисунок 9 – Изменения продольной деформации (черная зависимость) и ее скорости (синяя зависимость), а также график нагрузки (красная зависимость) образца мрамора при разных значениях нагрузки согласно [14, 17]. Интервалы комбинированного воздействия электрическим и магнитным полями показаны серыми прямоугольниками снизу и вертикальными штрих-пунктирными линиями.

Сопоставляя результаты, полученные при разных условиях испытаний, можно отметить, что процент сеансов, в которых были выявлены изменения скоростей деформации при воздействии электрического и магнитного полей наиболее высок в случае водонасыщенных образцов при непрерывном росте нагрузки. Наименее выраженный эффект электрического и магнитного полей проявился в экспериментах на образцах мрамора естественной влажности в режиме ступенчатого нагружения. Такой результат можно интерпретировать следующим образом. Вследствие резкого увеличения нагрузки (в течение нескольких секунд нагрузка возрастает на 7-15% от разрушающей) в материале происходит перераспределение и последующая релаксация напряжений таким образом, что в материале остается небольшое количество зон-концентраторов напряжений, для которых энергии, вносимой в образец при электромагнитном воздействии достаточно для структурных изменений, наблюдаемых в активности АЭ и деформации. Подобное поведение может быть вызвано пластичностью материала – мрамора, в отличие от других испытанных ранее хрупких горных пород (гранитов, гранодиорита и габбро). При медленном, но непрерывном росте нагрузки зоны концентрации напряжений (по сути, очаги зарождения дефектов) генерируются менее интенсивно, чем при ступенчатом, резком нагружении. Но эти очаги сразу взаимодействуют с внешним полем.

Завершающим этапом проверки достоверности полученных результатов и сравнения воздействия различных ЭМ полей стало проведение экспериментов в ИМСС УрО РАН на образцах среднезернистого гранита естественной влажности с регистрацией АЭ в шестиканальном режиме и локацией источников сигналов АЭ.

Выбор испытываемого материала определялся тем, на таких образцах при большом количестве испытаний был установлен электротриггерный эффект увеличения активности АЭ [Bogomolov et al., 2004].

Эксперименты проводились по схеме со ступенчатым нагружением и сеансами с подачей электрических импульсов (с напряженностью создаваемого электрического поля  $E \sim 1$  кВ/м).

Полученные результаты представлены в разделе 4.3. В диапазоне нагрузок выше 0.4 от разрушения обнаружены значительные отклики активности АЭ, по амплитуде в 14–48 раз превышающие трехкратное среднеквадратическое отклонение активности АЭ до воздействия, рисунок 10. При относительном значении нагрузки  $k^*=0.94$  произошло формирование магистральной трещины, с выходом разрыва на боковую грань образца, активность при этом достигла значения  $N \approx 5 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>, что в примерно 40 раз превышает значение  $3\sigma^*$ , падение нагрузки составило при этом 2.7 кН (рисунок 10 в).

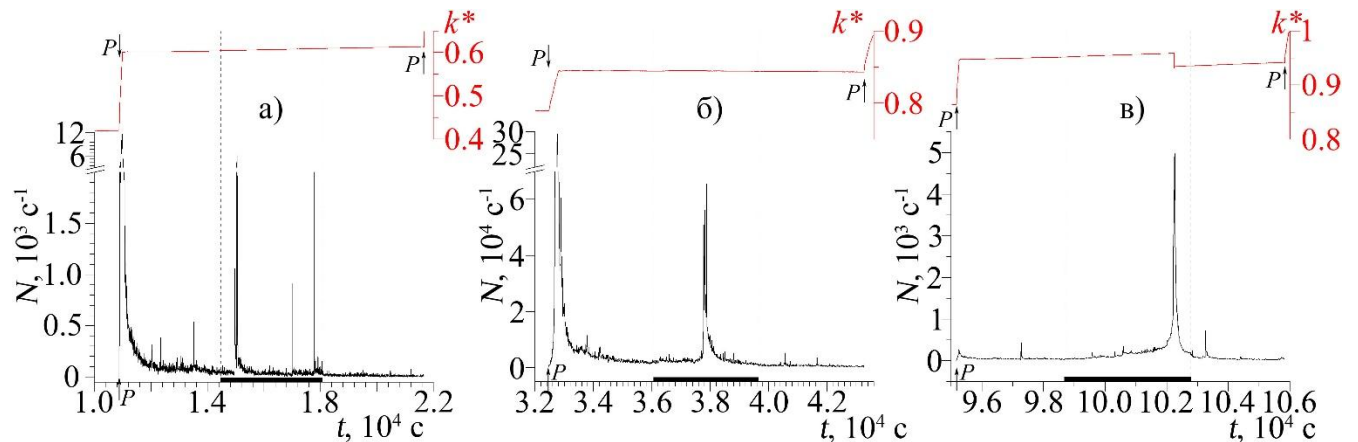


Рисунок 10 – Активность акустической эмиссии образца гранита Каинда (черная кривая), зарегистрированная 6-канальной системой Vallen Amsy-5, при различных значениях коэффициента нагрузки (красная кривая) согласно [3]. Черными прямыми снизу и штрих-пунктирными линиями обозначены интервалы воздействия электрическими импульсами. Стрелки с подписью Р – моменты нагрузки.

Наличие значительных откликов активности АЭ, возбужденной электрическими импульсами позволило предположить, что в периоды воздействия наблюдаются также различия в угловых коэффициентах (b-value) энергетических распределений количества сигналов АЭ. Для проверки этой гипотезы были построены кумулятивные распределения сигналов АЭ по энергиям для разных уровней напряжения сжатия (рисунок 10). Количество зарегистрированных сигналов АЭ для каждого интервала времени (первый – до воздействия, включая нагрузку, второй – в течение сеанса воздействия и третий – после воздействия) было не менее, чем 14000 событий АЭ при  $k^*=0.61$ , не менее 32000 сигналов АЭ при  $k^*=0.84$  и не менее 113000 сигналов АЭ при  $k^*=0.94$ . Условная энергетическая характеристика, введенная аналогично [Соболев, Пономарев, 2003]  $K = \lg E$ , изменялась в диапазоне от 0 до 4.4, что согласуется с величинами К, полученными авторами для сигналов АЭ образцов гранита Уэстерли. Построенные кумулятивные распределения сигналов АЭ описываются линейной зависимостью (в логарифмических единицах), аналогичной закону Гутенберга-Рихтера в сейсмологии. При напряжениях ниже 0.9 от разрушения различия в угловых коэффициентах b до, во время и после воздействия электрическими импульсами составляют не более 15%, а диапазон энергий не превышает  $10^4$  у.е. (рисунок 10 а-б). При увеличении нагрузки до  $k^*=0.94$  энергетические распределения АЭ до и после электровоздействия практически совпадают (черные квадраты и розовые треугольники на рисунке 10 в). При этом в период воздействия при нагрузках, близких к разрушению ( $k^*>0.9$ ), наблюдаются существенные отличия от предыстории (до сеанса) как по угловому коэффициенту b, так и по положению графика (т.е. диапазону энергий, красные кружочки на рисунке 10 в).

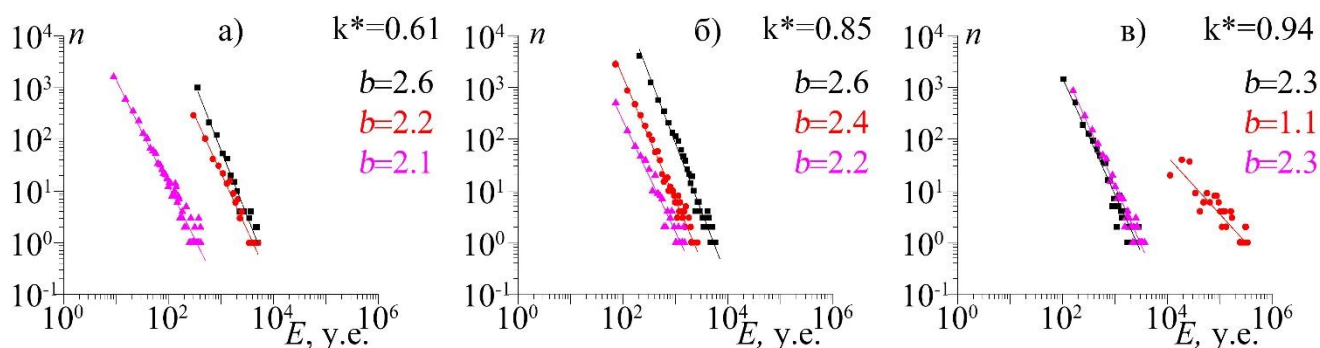


Рисунок 11 – Кумулятивные распределения сигналов акустической эмиссии гранита Каинда (рассортированных по времени регистрации: черные квадраты – до воздействия, красные кружки – во время воздействия, розовые треугольники – после воздействия) по энергиям при относительных нагрузках: а)  $k^*=0.61$ , б)  $k^*=0.84$  и в)  $k^*=0.94$  от разрушения;  $b$  – угловой коэффициент согласно [3].

В этих экспериментах в ИМСС УрО РАН также была реализована методика определения координат гипоцентров сигналов АЭ в объеме образца при помощи трехмерной локации по шести пьезоэлектрическим датчикам (рисунок 12 а). Рисунок 12 б демонстрирует выборку сигналов АЭ, для которых координаты его источника определены с точностью 1 мм, т.е. погрешность не хуже, чем 5% от линейных размеров образцов.

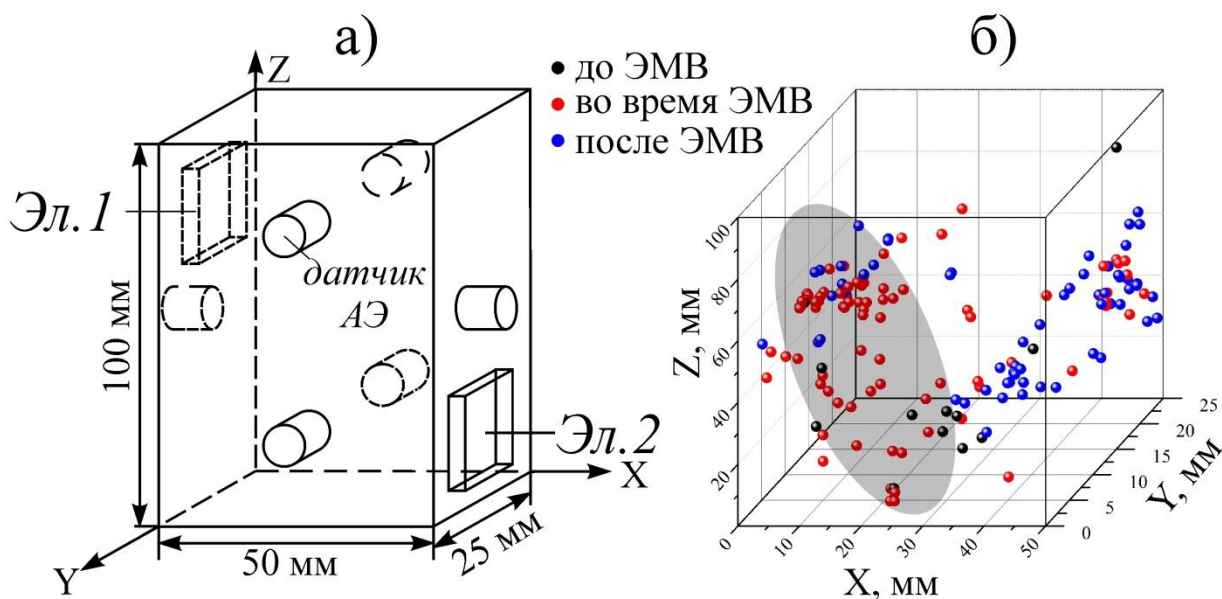


Рисунок 12 – Схема расположения датчиков АЭ и электродов воздействия (а) и пространственное распределение источников сигналов АЭ (б) при постоянном уровне сжатия 0.94 от разрушения согласно [3]. Черными точками обозначены источники сигналов, произошедших во время нагружения и до начала воздействия, красными точками – произошедших во время воздействия и синими – после воздействия.

Результаты локации источников АЭ (дефектов) по шести датчикам показывают, что при нагрузках близких к разрушающим ( $k^*=0.94$ ) в период прироста нагрузки и до воздействия гипоцентры сигналов АЭ диффузно рассеяны по всему объему образца. При подаче электрических импульсов число событий АЭ возрастает, и большая доля источников концентрируется в некоторой области (“кластере”), которая является зоной зарождения магистральной трещины (выделенная светло-серая область на рисунке 12 б). Одна из плоскостей разрыва (при разрушении образца) располагалась в области сосредоточения дефектов после воздействия (синие шарики на рисунке 12 б).

Представленные в главе 4 результаты экспериментов, проведенных на образцах мрамора и гранита (естественной влажности и водонасыщенных) в режиме одноосного сжатия при разных условиях испытаний и

сравнения воздействия различных ЭМ полей позволили сформулировать следующие **выводы по главе 4**.

Сравнительный анализ результатов экспериментов, проведенных на образцах мрамора, показал, что наибольшие по амплитуде прироста изменения скоростей деформации наблюдались в экспериментах на водонасыщенных образцах мрамора, испытываемых в режиме нарастающей с постоянной скоростью нагрузки. Эти изменения происходили чаще, чем в случае образцов естественной влажности и при меньших значениях уровня сжатия. Это свидетельствует в пользу гипотезы, что заполнение водой поро-трещинного пространства способствует уменьшению силы трения для облегчения межзеренного скольжения. Следует отметить, что вода слабой минерализации может вносить существенный вклад в электрическую поляризацию, образование двойных электрических слоев, которые возникают при внешнем электромагнитном воздействии, стимулируя формирование новых поверхностей разрыва (скольжения).

Реакция материала на комбинированное воздействие электрического и магнитного полей оказалась наименее выраженной в случае испытаний образцов мрамора естественной влажности, деформируемых в условиях ступенчатого изменения нагрузки. Это может быть вызвано самой спецификой режима (условиями) нагружения, т.к. в процессе кратковременного и значительного по амплитуде увеличения нагрузки в образце происходит перестройка структуры, сопровождающаяся перераспределением и последующей релаксацией (полной или частичной) локальных напряжений. Длительная выдержка (от 1 до 3 часов) образцов после нагружения приводит к тому, что к началу сеансов ЭМ воздействия количество зон концентрации напряжений может быть очень малым. Кроме этого, даже при внесении дополнительной энергии ЭМ полей возможна также ситуация, что лишь часть из этих зон оказывается в состоянии, энергетически подготовленном к дальнейшей релаксации накопленных напряжений, которая отражается в изменениях активности АЭ и деформации. При медленном (с постоянной скоростью) нагружении эти зоны концентрации возникают постепенно и сразу взаимодействуют с внешним полем. Более того, незначительные по амплитуде прироста и столь редкие отклики активности АЭ на электромагнитное воздействие при том, что изменения скоростей деформации наблюдались намного чаще, могут быть следствием пластических деформаций, присущих мрамору, в отличие от результатов ранних исследований [Богомолов и др., 2011], где были получены контрастные акустоэмиссионные отклики образцов гранитов, гранодиоритов и габбро.

Анализ результатов экспериментов, проведенных на образцах гранита в ИМСС УрО РАН, показал, что электрическое поле вызывает значительное (в десятки раз) увеличение активности АЭ, которое при нагрузках близких к разрушению происходит за счет сигналов АЭ с энергиями, на два порядка большими, чем энергии сигналов АЭ, зарегистрированных в отсутствие воздействия. При околоразрушающих нагрузках очаги акустической эмиссии (дефекты) при электровоздействии кластеризуются в области формирования магистрального разрыва. В обладающем пьезоэлектрическими свойствами граните с учетом проведенных ранее оценок возмущений напряжения (не более  $10^8$  от напряжения разрушения) [Закупин, 2008], вызванного внешним электрическим полем (с напряженностью  $E$  не более 1 кВ/м), можно заключить, что обратный пьезоэффект ничтожно мал и не играет принципиальной роли в стимулировании активности АЭ [Соболев, Демин, 1980]. Это также подтверждается результатами, полученными на водонасыщенных образцах мрамора. Продемонстрированные закономерности позволяют допустить параллельный, практически совпадающий по времени реализации, другой механизм генерации упругого поля, отличающийся от обратного пьезоэффекта. Подтверждением может служить наблюдаемый при этом высокий уровень акустической эмиссии.

Изложенные результаты позволяют обосновать защищаемые научные положения 3, 4 (стр. 4).

### **Заключение**

Проведенное исследование процессов деформации нагруженных образцов мрамора и гранита с воздействием электромагнитных полей весьма слабой интенсивности (напряженностью электрического поля не более 1кВ/м и индукцией магнитного поля порядка 4 мТл) продемонстрировало влияние этих полей на скорость деформирования указанных материалов. Установлено, что комбинированное воздействие электрического и магнитного полей, как правило, вызывает синхронные изменения скоростей продольной и поперечных деформаций и активности акустической эмиссии образцов мрамора, испытываемых в режиме фиксированной и нарастающей нагрузки. Кратковременный рост активности АЭ образцов мрамора может быть более чем стократным и не предшествовать разрушению. В образцах гранита при фиксированном уровне нагрузки

электрическое поле стимулирует увеличение количества сигналов акустической эмиссии в десятки раз по сравнению с фоновым уровнем до воздействия. При увеличении напряжения выше 0.9 от разрушения природной активности АЭ в образцах гранита происходят за счет сигналов, энергии которых на два порядка превышают энергии сигналов, зарегистрированных в периоды без электровоздействия, при заметном уменьшении углового коэффициента (b-value) графиков энергетического распределения сигналов АЭ. В эксперименте с локацией очагов акустической эмиссии (дефектов) получено, что на стадии диффузного (рассредоточенного) накопления дефектов воздействие электромагнитного поля приводит к перераспределению и кластеризации дефектов в образце гранита в области будущего макроразрыва.

Полученные в диссертационной работе результаты согласуются с ранее предложенной в [Bogomolov et al., 2004; Bogomolov et al., 2004 a] феноменологической моделью, описывающей возникновение электрической поляризации вследствие динамических явлений, происходящих в устьях трещин при их удлинении, где, как известно, достигаются огромные ускорения. Наибольший эффект электромагнитного воздействия, полученный при нарастающей с постоянной скоростью нагрузки, может служить подтверждением этой модели, т.к. поляризация в горных породах имеет непрерывный характер по мере возрастания нагрузки [Адушкин, Спивак, 2014]. Образование в материале новых микротрещин или удлинение уже имеющихся приводит к возникновению разноименных зарядов на их бортах. Вблизи устья растущей трещины создаются значительные градиенты напряжений, неупругие (пластические) деформации и накопление объемного заряда и др., которые определяют аномальное поглощение электромагнитной энергии. В конечном счете (из-за стремления к расталкиванию объемных зарядов), это должно приводить к увеличению скорости пластической деформации, а не только к генерации упругих сигналов (акустической эмиссии). Наблюдаемый высокий уровень приростов активности АЭ может служить подтверждением применимости этой модели к полученным в лабораторных экспериментах результатам. Вместе с тем, возможен некоторый вклад магнитопластического эффекта, в особенности при напряжениях ниже 0.7 от уровня разрушения. На это могут косвенно указывать изменения скоростей деформации при практически полном отсутствии при этом приростов активности АЭ в сеансах электромагнитного воздействия на образцах мрамора при фиксированном уровне нагрузки. Эффекты магнитопластичности, по всей видимости, проявляются в период задержки активации акустической эмиссии и изменений скоростей деформации на низших структурных уровнях [Богомолов и др., 2006]. Полученные результаты подтверждают ранее обнаруженные эффекты активации акустической эмиссии и дополняются новыми сведениями – закономерностями изменений деформации при воздействии электромагнитных полей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в реферируемых изданиях, рекомендуемых ВАК*

1. Боровский Б.В. К вопросу о стимулировании акустической эмиссии образцов геоматериалов электромагнитными полями / Б.В. Боровский, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, **В.А. Мубассарова** // Физика земли. – 2011. – № 10. – С. 71-81.
2. Закупин А.С. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне / А.С. Закупин, Л.М. Богомолов, **В.А. Мубассарова**, П.В. Ильичев // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 105-120.
3. **Мубассарова В.А.** Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических импульсов / **В.А. Мубассарова**, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, И.А. Пантелеев, О.Б. Наймарк // Геодинамика и Тектонофизика. – 2014. – Т.5, № 4. – С. 919 -938.
4. Пантелеев И.А. Возмущение напряженно-деформированного состояния упругого полупространства шаровой неоднородностью упругих свойств при сдвиге в горизонтальной плоскости с учетом гравитационных сил / И.А. Пантелеев, Е.В. Полтавцева, **В.А. Мубассарова**, В.А. Гаврилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 4. С. 138-153.
5. Богомолов Л.М. Особенности влияния электромагнитных полей на скорость деформации образцов мрамора в условиях сложного напряженно-деформированного состояния / Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, **В.А. Мубассарова** // Особенности влияния электромагнитных полей на скорость деформации образцов мрамора в условиях сложного

#### ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

6. Ильичев П.В. Локация источников АЭ в экспериментах по моделированию энерговоздействий на геологическую среду как проблема информационных технологий / П.В. Ильичев, Л.М. Богомолов, Г.С. Закупина, **В.А. Мубассарова**, А.В. Аладьев // Вестник КРСУ. – 2006. – Т. 6. – С. 137-143.
7. Богомолов Л.М. От экспериментов В.А. Степанова по электропластическим эффектам в кристаллах NaCl к современным исследованиям электрочувствительности трещинообразования в горных породах / Л.М. Богомолов, Б.В. Боровский, А.С. Закупин, **В.А. Мубассарова**, В.Н. Сычев, Н.А. Сычева // Сб. материалов XVIII Петербургских чтений по проблемам прочности и роста кристаллов. – С-Пб.: Изд-во ФТИ. – 2008. – Ч. 1. – С. 23-26.
8. Богомолов Л.М. О влиянии внешних энергетических воздействий на скорость трещинообразования в геоматериалах / Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, Б.В. Боровский, Г.С. Закупина, П.В. Ильичев, **В.А. Мубассарова** // Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твердых телах. Ред. Д.М. Левин. – Тула: изд-во ТулГУ, 2008. – С. 47-59.
9. **Мубассарова В.А.**, Богомолов Л.М. К вопросу о чувствительности акустической эмиссии образцов геоматериалов к импульсным электровоздействиям // В мире научных открытий. – 2010. – № 3 (09), Часть 3. – С. 12-16.
10. **Мубассарова В.А.**, Богомолов Л.М. Чувствительность акустической эмиссии образцов горных пород к импульсным электровоздействиям как возможное проявление эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна // В мире научных открытий. – 2010. – № 3 (09), Часть 3. – С. 7-12.
11. Богомолов Л.М. О базовых физических эффектах, определяющих возможность влияния электромагнитных импульсов на трещинообразование в нагруженных образцах геоматериалов / Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, В.А. Гаврилов, **В.А. Мубассарова** // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Отв. Ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. – Петропавловск-Камчат.: ИКИР ДВО РАН. – 2010. – С. 315-318.
12. **Мубассарова В.А.** Особенности потока АЭ сигналов нагруженных гранитных образцов при воздействии слабых вибраций / В.А. Мубассарова, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, Б.В. Боровский // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 60-66.
13. **Мубассарова В.А.**, Богомолов Л.М. Потенциал общезначимых подходов для объяснения влияния электромагнитных полей на деформацию и акустическую эмиссию образцов горных пород // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Материалы докладов V Международного симпозиума, г. Бишкек, 19-24 июня 2011 г. – Бишкек: НС РАН. – 2012. – Т. 2. – С. 148-155.
14. Zakupin A.S. Electromagnetic Effects in Loaded Marble / A.S. Zakupin, **V.A. Mubassarova**, B.V. Borovsky, G.S. Kachesova // Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety. Kazan, Russia, 26-31 August, 2012. – Kazan: Esis. – 2012. – P. 107-114.
15. Zakupin A. Acoustic Emission and Electromagnetic Effects in Loaded Rocks / A. Zakupin, L. Bogomolov, **V. Mubassarova**, G. Kachesova, B. Borovsky // In: Acoustic Emission / Ed. W. Sikorski. InTech, Rijeka, Croatia. – 2012. – Ch. 8. – P. 173-198. – ISBN: 978-953-51-0056-0. –  
URL: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/acoustic-emission-and-electromagnetic-effects-in-loaded-rocks>.
16. **Мубассарова В.А.**, Закупин А.С. Роль флюида в разрушении геоматериалов при воздействии электромагнитных полей // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Материалы V международной конференции молодых ученых и студентов. г. Бишкек, 24-25 апреля 2013 г. Бишкек: НС РАН. 2013. С. 23–27.
17. **Мубассарова В.А.** Современные решения в задачах акустических и тензометрических измерений при испытании горных пород // Вестник КРСУ. – 2014. – Т.14, № 7. – С. 73-76.
18. Пантелеев И.А. Влияние слабого электрического поля на пространственно-временную динамику акустической эмиссии при одноосном сжатии гранита / И.А. Пантелеев, **В.А. Мубассарова**, Е.Е. Дамаскинская, Л.М. Богомолов, О.Б. Наймарк // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. – М.: ГЕОС. – 2015. – С. 244-252.
19. Panteleev I. Influence of weak electric field on spatial dynamics of damage evolution during granite deformation / I.

Pantelev, O. Naimark, **V. Mubassarova**, E. Damaskinskaya, L. Bogomolov // AIP Conference Proceedings Ser. "Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures". – 2015. – С. 020177.

20. Сычев В.Н. Вариации электрических характеристик в процессе разрушения образцов горных пород / В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов, С.А. Имашев, **В.А. Мубассарова** // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 163-168.