

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке  
(ФГБУН ИС РАН)**

*На правах рукописи*

МУБАССАРОВА Виргиния Анатольевна

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

Специальность 25.00.10 –

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук

Богомолов Л.М.

Бишкек – 2018

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Анализ состояния исследований влияния электромагнитных полей на процесс разрушения геосред.....	10
1.1. Концепция триггерности и ее значение для проблемы экзогенных воздействий на сейсмичность .....	10
1.2. Основные представления о влиянии электромагнитных полей на сейсмический процесс... 17	
1.2.1. Взаимосвязь сейсмичности и физических процессов в системе Солнце-Земля .....	18
1.2.2. Сейсмические эффекты зондирований земной коры мощными источниками тока.....	27
<i>1.2.2.1. Электронзондирования с применением геофизических МГД-генераторов (уникальные эксперименты) .....</i>	<i>27</i>
<i>1.2.2.2. Экспериментальные зондирования на Бишкекском геодинамическом полигоне с использованием мощного электроимпульсного источника .....</i>	<i>35</i>
1.2.2.3. Возможные механизмы влияния электронзондирований на сейсмичность.....	41
1.3. Исследования триггерного влияния ЭМ полей в экспериментах на образцах геоматериалов .....	42
1.3.1. Влияние электромагнитных полей на акустическую эмиссию образцов горных пород ....	43
<i>1.3.1.1. Акустическая эмиссия как метод геофизических исследований.....</i>	<i>43</i>
1.3.1.2. Моделирование электромагнитных воздействий на геоматериалы методом акустической эмиссии.....	44
<i>1.3.1.3. Случаи особой постановки эксперимента с воздействием электромагнитного поля....</i>	<i>48</i>
1.3.2. Исследование триггерных эффектов электромагнитных полей на установках - слайдерах .....	50
1.3.3. Физические основы реакции неупругой деформации геоматериалов на воздействие электромагнитных полей.....	53
<i>1.3.3.1. Электропластический эффект .....</i>	<i>53</i>
<i>1.3.3.2. Магнитопластический эффект .....</i>	<i>56</i>
<i>1.3.3.2. Особенности совместного воздействия электрического и магнитного полей .....</i>	<i>60</i>
Выводы по главе 1.....	64
Глава 2. Методика лабораторного моделирования электромагнитных воздействий.....	66
2.1. Общая характеристика постановки экспериментов по моделированию электромагнитных воздействий. Режимы деформирования. Испытательные машины .....	66

2.2. Модельные источники электромагнитных полей. Организация электромагнитных воздействий на нагруженные образцы горных пород .....	75
2.3. Системы и методика измерений деформаций и сжимающей нагрузки.....	79
2.4. Регистрация акустической эмиссии .....	86
2.4.1. Методика регистрации акустической эмиссии в одноканальном режиме .....	86
2.4.2. Методика выделения акустоэмиссионных откликов образцов горных пород на электромагнитное воздействие .....	89
2.4.3. Применение многоканальной системы регистрации АЭ Vallen Amsy-5.....	92
2.5. Выбор модельных материалов.....	95
Выводы по главе 2.....	98
Глава 3. Вариации скорости деформации и параметров акустической эмиссии нагруженных образцов мрамора при воздействиях взаимоперпендикулярных (скрещенных) электрического и магнитного полей .....	100
3.1. Методические эксперименты по одноосному сжатию образцов мрамора в режиме с постоянной скоростью нагружения (без воздействия электромагнитных полей).....	100
3.1.1. Измерения деформаций, нагрузки и акустической эмиссии при одноосном сжатии в отсутствие электромагнитных воздействий .....	100
3.1.2. Определение скоростей деформаций (или методика расчета скоростей деформаций) ....	107
3.2. Влияние кратковременных сеансов электромагнитных воздействий на скорость деформации и дефектообразование (акустическую эмиссию) образцов мрамора .....	113
3.3. Обсуждение результатов .....	135
Выводы по главе 3.....	142
Глава 4. Особенности реакции образцов мрамора и гранита на воздействия электромагнитных полей. Различная постановка эксперимента.....	144
4.1. Вариации скорости деформации и активности АЭ водонасыщенных образцов мрамора при воздействиях скрещенных электрического и магнитного полей .....	144
4.2. Воздействие скрещенных электрического и магнитного полей на скорость деформации образцов мрамора при фиксированном уровне напряжений.....	155
4.3. Перераспределение характеристик акустической эмиссии образцов гранита в условиях одноосного сжатия и влияния электрических импульсов.....	170
Выводы по главе 4.....	178
Заключение .....	179

Список литературы ..... 181

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 (ЭМ) 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. Поскольку процесс деформирования среды перед землетрясением традиционно анализируется с позиций механики разрушения, многие составляющие этого процесса можно и целесообразно исследовать в экспериментах на нагруженных образцах [Соболев, Пономарев, 2003; Lockner et al., 1991; Авагимов и др., 2011]. Перед землетрясением массив горной породы (как и образец, испытываемый в лабораторном эксперименте) находится в состоянии, близком к неустойчивому равновесию, или, другими словами, в околоскритическом 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 виброакустическими и электромагнитными (ЭМ) воздействиями [Соболев, Пономарев, 2003; Тарасов, Тарасова, 2011; Богомолов, 2010; Novikov et al., 2017]. На натурном геофизическом масштабе Н.Т. Тарасовым, Т.Л. Челидзе, С.Б. Турунтаевым, В.Б. Смирновым, А.Д. Завьяловым и другими триггерный эффект электромагнитного поля был установлен по кратковременной активации сейсмичности, вариациям ее характеристик и скорости сеймотектонических деформаций в период ЭМ воздействий при зондированиях земной коры с применением магнитогидродинамических генераторов.

В экспериментах на образцах “электротриггерный эффект” зарегистрирован, как правило, по увеличению активности акустической эмиссии (АЭ), отражающей скорость трещинообразования геоматериалов, а метод акустоэмиссионного контроля состояния материалов является косвенным (хотя и высокочувствительным). В большинстве этих работ не представлены данные об увеличении деформации  $\delta\varepsilon$  в процессе переходов между метастабильными состояниями, инициированном электромагнитными полями. Согласно ранним работам, проведенным в ИС РАН, в экспериментах при квазистационарном сжатии образцов (при нагрузке 0.7-0.9 от разрушения) возможное изменение

деформации в периоды откликов активности АЭ на электромагнитное воздействие  $\delta\varepsilon < 10^{-6}$  не было зарегистрировано вследствие низкой разрешающей способности измерительного канала. В этой связи остался открытым вопрос о деформационных проявлениях влияния ЭМ полей на нагруженные геоматериалы. С учетом вышеизложенного, для выявления основного элемента электромеханической взаимосвязи актуально получение количественных данных об изменениях компонент деформации или их скоростей. 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 информации о реакции нагруженных образцов на внешнее электромагнитное воздействие. Результаты таких экспериментов, проведенных соискателем, легли в основу данной диссертационной работы.

#### **Цель работы:**

Установить закономерности влияния электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразования 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 автоматической системы измерений компонент деформации, нагрузки и акустической эмиссии, обеспечивающей длительную регистрацию этих параметров в ходе экспериментов на прессах;
- Исследовать влияние скрещенных (взаимно перпендикулярных) электрического и магнитного полей на скорость деформации и акустическую эмиссию образцов мрамора, деформируемых в условиях одноосного сжатия с постоянной скоростью нагружения;
- Изучить влияние внешнего электромагнитного поля на локализацию деформации образцов горных пород при фиксированном уровне напряжения на стадии кластеризации микротрещин и зарождения макроразрыва;
- Сравнить реакции образцов мрамора на воздействие электромагнитных полей при разных режимах сжатия (нарастающего ступенчато или с постоянной скоростью).

#### **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, вызванное воздействием скрещенных электромагнитных полей при нагрузках выше 0.7 от разрушения, может достигать десятков раз и наблюдается в большинстве случаев (69%), сопровождаясь одновременным откликом активности акустической эмиссии.

3. Воздействие скрещенных электрического и магнитного полей инициирует синхронное увеличение скорости продольной деформации и активности акустической эмиссии водонасыщенных образцов мрамора, находящихся в состоянии одноосного сжатия при напряжениях выше 0.5 от разрушения.

4. Значение угловых коэффициентов (b-value) графиков энергетического распределения сигналов акустической эмиссии уменьшается во время воздействия электрического поля. Для образцов гранита при нагрузках, близких к разрушению, значение углового коэффициента уменьшается от 2.2 до 1.1.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые детально рассмотрено изменение скоростей продольной и поперечных деформаций нагруженных образцов мрамора, причем в ряде случаев происходящих синхронно между собой и с откликами активности акустической эмиссии под влиянием скрещенных электрического и магнитного полей. Впервые выявлено пространственное перераспределение очагов акустической эмиссии при воздействии импульсов электрического поля на образцы гранита, испытываемые на одноосное сжатие при постоянной нагрузке. Впервые получены результаты о стократном и более возрастании активности акустической эмиссии при воздействии электромагнитных полей на образцы мрамора и гранита в условиях одноосного сжатия, причем для водонасыщенных образцов мрамора вариации скорости деформации и активности акустической эмиссии имеют характер резких всплесков.

#### **Практическая значимость**

Результаты исследований могут быть использованы в прикладных задачах неразрушающего контроля изделий и конструкций из диэлектрических материалов – мраморов и гранитов – с учетом новой информации о воздействиях скрещенных электрического и магнитного полей и реакции на них 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 НС РАН (2008-2012 гг.) и Госзаданию № 0155-2018-0003 в НС 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 основные 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 большим объемом накопленных данных, надежными алгоритмами обработки данных, применением нескольких методов исследования, взаимно дополняющих друг друга (измерение деформации и акустической эмиссии), согласованность результатов с результатами других работ по смежной тематике и воспроизводимостью результатов при использовании другого аппаратно-программного оснащения в лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

**Апробация работы** Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены в ряде международных и всероссийских научных мероприятий, в том числе: 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.

**Структура и объём работы.** Диссертация изложена на 203 страницах, включает в себя 117 рисунков, 29 таблиц, 266 библиографических ссылок.

*В первой главе* изложены наиболее общие, концептуальные представления о триггерных эффектах в контексте проблемы внешних воздействий на сейсмичность. Рассмотрены основные материалы о влиянии на сейсмический процесс электромагнитных полей естественной и антропогенной природы: магнитных бурь (и полярных суббурь) и электромагнитных зондирований земной коры мощными источниками тока. Освящены последние результаты лабораторных исследований триггерного влияния ЭМ полей в экспериментах на образцах геоматериалов с помощью метода акустической эмиссии, а также исследования электропластической и магнитопластического эффекта в щелочно-галоидных кристаллах и других диэлектрических материалах.

*Во второй главе* описаны использованные в работе материалы (горные породы), испытательные машины, аппаратура и программные комплексы регистрации акустической эмиссии, измерения деформации, а также методика проведения электромагнитных воздействий.

*Третья глава* включает в себя результаты авторских исследований влияния скрещенных электрического и магнитного полей на величину деформации и ее скорости, а также параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) образцов мрамора (условно «сухих»), деформируемых с постоянной скоростью в режиме одноосного сжатия.

*В четвертой главе* представлены результаты экспериментов со скрещенными электрическим и магнитным полями, проведенных на образцах мрамора с особой постановкой – на водонасыщенных образцах и в режиме постоянства нагрузки. В главу включены результаты лабораторных экспериментов на образцах гранита, проведенных в Институте механики сплошных сред с применением метода локализации дефектов.

Основные выводы сформулированы в конце каждой главы и в заключении

# **Глава 1. Анализ состояния исследований влияния электромагнитных полей на процесс разрушения геосред**

## **1.1. Концепция триггерности и ее значение для проблемы экзогенных воздействий на сейсмичность**

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). Сложность изучения землетрясений, в том числе происходящих в условиях влияния экзогенных факторов, заключается в том, что исследователь не имеет возможности прямыми методами наблюдать процессы, происходящие в очаге, полагаясь только на информацию, получаемую от сейсмических волн. Согласно сложившимся представлениям [Соболев, 2011; Адушкин, Турунтаев, 2015], сейсмический процесс представляет собой нелинейную диссипативную систему, которая в ряде случаев обнаруживает свойства упорядоченности, а в других – хаоса. При этом смена состояния равновесия с устойчивого на неустойчивое, а также локальная неустойчивость происходят при поступлении энергии от внешних и внутренних источников. Противоположный переход из одного состояния в другое проявляется при диссипации накопленной в геосреде энергии, часть которой выделяется при землетрясении. А землетрясение в свою очередь является «попыткой» среды сбросить избыточную энергию, которая накапливается из-за неспособности диссипативных процессов релаксировать всю поступающую в очаговую область энергию [Гольдин, 2004, 2005].

По многочисленным измерениям, выполненным средствами спутниковой космической геодезии (GNSS – Global Navigation Satellite Systems) было установлено, что регионы с повышенной сейсмической активностью представляют собой области несогласованного по величине и направлению изменения перемещений [Teunissen, Montenbruck, 2017; Василенко, Прытков, 2012]. Планетарные и региональные зоны (полосы) концентрации сейсмической активности совпадают с разломными зонами, и в ряде работ было проведено картирование земной коры на сейсмогенные и асейсмические зоны [Gutenberg, Richter, 1949; Zaliapin et al., 2002; Gorshkov et al., 2005, Шерман, 2014]. Это позволило сделать вывод [Костров, 1974; Добровольский, 2009] о том, что землетрясение является следствием процесса накопления напряжений и локализации деформации, вызывающих разрыв сплошности и сдвиг массива горных пород. Землетрясения, причина которых заключается в накоплении напряжений, обусловленном замедлением механического движения из-за наличия препятствий, называются тектоническими [Добровольский, 1991]. Специфическими движениями при этом могут быть медленные движения тектонических плит, контактирующих друг с другом по системе

поверхностей, течение вещества коры в виде крипа и другие. Явления магматизма, метаморфизма и других видов твердотельных фазовых переходов также могут быть причинами, вызывающими концентрацию напряжений в определенной области. Все перечисленные явления являются весьма медленными, а реализующееся в этой области землетрясение – разрыв – является актом хрупкого разрушения среды [Гольдин, 2004, 2005; Родкин и др., 2009]. При этом самозалечивание среды после землетрясения (восстановление сплошности) не меняет геомеханической природы самого явления.

Поскольку процесс деформирования среды перед землетрясением традиционно анализируется с позиций механики разрушения, многие составляющие этого процесса можно и целесообразно исследовать в экспериментах на нагруженных образцах [Соболев, Кольцов, 1988; Соболев, Пономарев, 2003; Lockner et al., 1991; Kuksenko et al., 1996; Куксенко и др., 2011; Mclasley et al., 2014; Макаров, Перышкин, 2016; Смолин и др., 2016]. Определенное сходство в проявлениях хрупкого разрушения и процессах дефектообразования на самых разных масштабах длин обнаружено благодаря результатам многочисленных работ [Zhurkov et al., 1984; Lockner et al., 1991; Kuksenko et al., 1996; Завьялов, Никитин, 1997, 1999; Ponomarev et al., 1997; Smirnov et al., 1995; Смирнов, Пономарев, 2004; Смирнов и др., 2010; Томилин и др., 2005; Веттегрень и др., 2006; Завьялов, 2005; Куксенко и др., 2011; Дамаскинская, Кадомцев, 2013, 2015; McLasley G.C. et al., 2014] и др. Сходные черты прослеживаются на масштабах, начиная с сантиметровых (лабораторные эксперименты на образцах геоматериалов) и вплоть до сотен и тысяч метров (зоны очагов землетрясений, где наблюдались системы километровых разрывов, вдоль которых происходит перемещение больших блоков). Подчеркнем общность процессов накопления дефектов на лабораторном и натурном масштабах: образование трещин в нагруженных образцах сопровождается излучением упругих волн (акустическая эмиссия, АЭ, [Hardy, 2003]) с квадрантным угловым распределением знаков вступления продольных и поперечных волн, что также характерно для сейсмических волн из очага землетрясения.

Залегающие на глубине массивы горных пород подвержены трехосному сжимающему напряжению ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ), которое может быть пространственно неоднородным. В этой ситуации необходимым условием для разрыва сплошности (землетрясения) является достаточно высокий уровень главного напряжения.

В лабораторных исследованиях прочности образцов горных пород предельное значение главного напряжения, называемое “пределом прочности”, обычно определяется в испытаниях в режиме одноосного сжатия [Ставрогин, Протосеня, 1985]. При наличии бокового подпора ( $\sigma_2 \neq 0$ ,  $\sigma_3 \neq 0$ ) могут реализоваться состояния с напряжением главного сжатия  $\sigma_1$ , превышающим “предел прочности”. Это описывается паспортом прочности [Шемякин, 1999],

или критерием Кулона-Мора [Поль, 1975; Ребецкий, 2007]. Таким образом “предел прочности” имеет смысл необходимого, но не достаточного условия.

В определенных зонах земной коры высокий уровень напряжений может возникать, когда на более крупных масштабах скорость крипа оказывается недостаточной, то есть процесс релаксации не успевает обеспечить диссипацию энергии [Гольдин, 2002, 2004]. При этом (в зависимости от характерного времени) может реализоваться либо метастабильное (квазистационарное) напряженное состояние, или околоскритическая динамика системы.

Перед динамической подвижкой, то есть непосредственно перед землетрясением, массив горной породы (как и образец при лабораторном физическом моделировании) находится в состоянии, близком к неустойчивому равновесию, или, другими словами, в околоскритическом состоянии, рисунок 1.1 [Соболев, 2011]. Немонотонное поведение  $\sigma$ – $\varepsilon$  характеристики вблизи точки неустойчивого равновесия соответствует существованию ряда метастабильных состояний в диапазоне, который выделяется на графике  $\sigma$ – $\varepsilon$  на рисунке 1.1 а своим трендом, почти параллельным оси деформаций (выделен синим прямоугольником). Особенностью этого диапазона является значительное изменение деформации при небольших вариациях напряжения. Такие вариации могут возбуждаться при воздействии внешних факторов. Отсюда вытекает принципиальная возможность триггерных эффектов, заключающихся в переходе от одного метастабильного состояния к другому под влиянием внешних воздействий даже небольшой интенсивности [Куксенко и др., 1997, 2004; Соболев, Пономарев, 2003; Соболев, 2011; Гохберг, Колосницын, 2010; Макаров и др., 2007; Богомолов, 2010; Авагимов и др., 2011; Закупин и др., 2006; Кочарян, 2016]. При этом точка (или несколько точек) неустойчивого равновесия проскакиваются.

В отсутствии внешних (триггерных) воздействий длительность нахождения среды в состоянии метастабильного равновесия может быть сколь угодно долгой. Переход к разрушению происходит, когда изображающая точка состояния проходит диапазон метастабильности (правая граница диапазона, выделенного синим прямоугольником, на рисунке 1.1 а). Крутизна спада  $\sigma$ – $\varepsilon$  характеристики (падение напряжения) и длительность неустойчивости (время от максимума напряжения до подвижки) определяются жесткостью нагружающей системы. В данном случае жесткость  $k$  выражается через зависимость падения усилия  $\Delta F$  при неустойчивости, отнесенной к значению деформации  $D$ :  $k = \Delta F / D$  [Соболев, 2011]. В лабораторных испытаниях в жесткой машине (значение  $k$  велико [Ставрогин, Протосеня, 1985]) нагрузка на образец уменьшается по мере увеличения деформации (развития неустойчивости) и макроразрушение может не состояться. В случае небольших величин  $k$  величина удельной упругой энергии, накопленной в образце на пределе прочности, будет

сравнима или больше энергии релаксации среды при деформации и разрушении в процессе развития неустойчивости. В «мягких» нагружающих системах разрушение происходит мгновенно вслед за пределом прочности [Ставрогин, Тарасов, 2001; Dudley et al., 2016]. В условиях лаборатории жесткость испытательного оборудования известна, в реальной геосреде (земной коре) жесткость контактов геоблоков оценивается более сложными методами [Кочарян, 2013, 2016]. Наличие конечного интервала времени, в течение которого имеет место локальная неустойчивость, дает возможность по косвенным признакам наблюдать сейсмический процесс в окрестности очага вплоть до самой динамической подвижки (землетрясения).

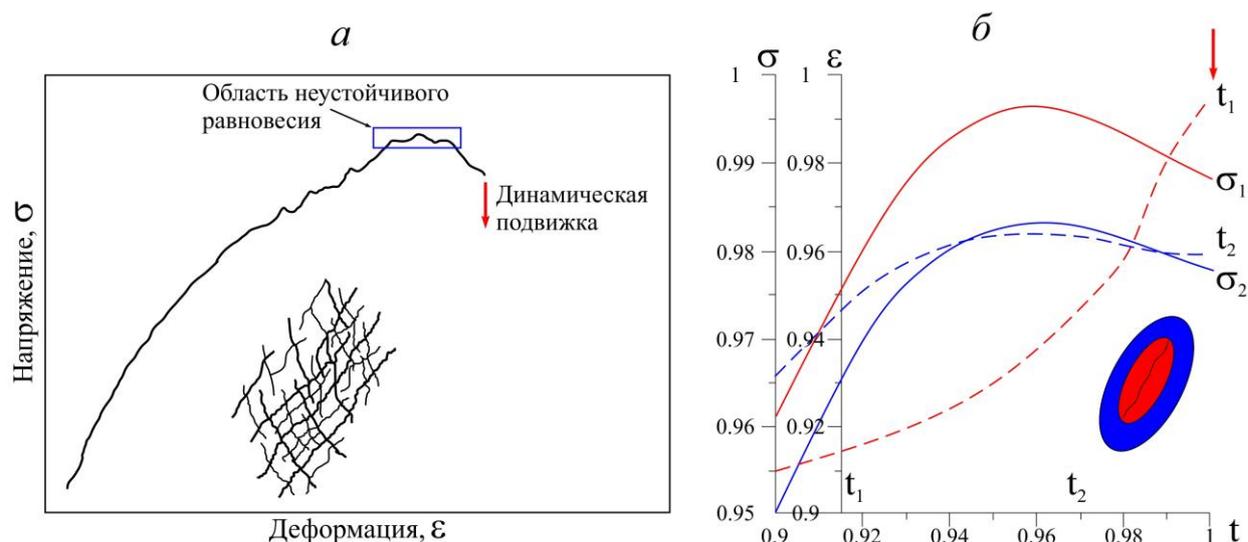


Рисунок 1.1 – Метастабильные состояния и развитие механической неустойчивости, согласно [Соболев, 2011]: а – реологическая кривая и схема блокового строения сейсмоактивного района, б – схема разделения материала на области неустойчивой и устойчивой деформации.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – напряжения в соседних блоках 1 и 2,  $t_1$  – момент времени, при котором уровень напряжений в блоках 1 и 2 недостаточен для развития неустойчивой деформации в обоих блоках,  $t_2$  – момент времени, при котором в блоке 1 развивается неустойчивая деформация, а в соседнем блоке 2 уровень напряжений еще низок для ее реализации.

Как уже упомянуто выше, триггерные эффекты (переходы) могут быть вызваны самыми разными факторами, в том числе переменными физическими полями. Для возмущений напряжения порядка 0.1-0.001 от характерных значений главного напряжения подобные эффекты хорошо известны [Соболев и др., 1991, 1993; Соболев, Пономарев, 2003; Кочарян, 2010, 2016; Кочарян и др., 2013]. В работах [Куксенко и др., 1997, 2004; Мирзоев и др., 1991; Богомолов и др., 2001; Малыгин, 2000; Кардашев, 2009] показано, что роль таких триггеров при определенных условиях могут играть виброакустические воздействия, даже когда они создают весьма малые возмущения напряжения менее  $10^{-6}$  от характерных значений главного напряжения. Воздействия электромагнитных (ЭМ) полей на нагруженные геоматериалы, при

которых возмущения напряжения еще меньше, чем в случае виброакустического стимулирования (по оценкам [Богомолов, 2010, 2010 а]), также могут приводить к изменениям режима деформирования и высвобождения энергии [Тарасов и др., 2001; Tarasov, Tarasova, 2004; Авагимов и др., 2011; Закупин и др., 2006; Смирнов, Завьялов, 2012; Авагимов, Зейгарник, 2016; Bogomolov et al., 2004; Zakupin et al., 2009, 2012 а]. Другим примером высокой чувствительности состояния дефектной структуры диэлектриков (геоматериалов) к внешним и внутренним электромагнитным полям можно считать магнитоэластические эффекты [Головин, 2004; Бучаченко, 2014; Альшиц и др., 2016, 2017; Molotskii, 2000, Molotskii, Fleurov, 2000], наблюдаемые на микроструктурном уровне (движение дислокаций). Согласно обзору [Головин, 2004], такие эффекты обусловлены неравновесностью, изначально существующей в кристалле или приобретенной каким-либо способом и подпитываемой извне.

На натурном геофизическом масштабе триггерный эффект электромагнитного поля был установлен по кратковременной активации сейсмичности [Tarasov, Tarasova, 2004; Chelidze et al., 2006], либо вариациям ее характеристик [Тарасов, Тарасова, 2011; Смирнов, Завьялов, 2012]. Стоит особо отметить, что в работе [Тарасов, Тарасова, 2011], ставшей логическим завершением большого цикла исследований этих авторов, обнаружено изменение скорости сейсмотектонических деформаций в период электромагнитных воздействий при зондированиях с применением геофизических магнитогидродинамических (МГД) генераторов, а также проведена оценка релаксации напряжений по месту таких зондирований. В экспериментах на образцах “электротриггерный эффект” зарегистрирован, как правило, по увеличению активности акустической эмиссии, отражающей скорость трещинообразования в горных породах (библиография в обобщениях [Соболев, Пономарев, 2003; Богомолов и др., 2011]. Однако в этих работах не представлены данные об увеличении деформации  $\delta\epsilon$  в процессе переходов между метастабильными состояниями, инициированных электромагнитными полями. Согласно [Bogomolov, Zakupin, 2008; Боровский и др., 2011] в экспериментах при заданном квазистационарном сжатии образцов (при нагрузке 0.7-0.9 от разрушения) возможное укорочение образцов в периоды откликов активности АЭ на ЭМ воздействие было менее 0.1 мкм, что ниже разрешающей способности измерительного канала. Соответствующее изменение деформации  $\delta\epsilon < 10^{-6}$  не было зарегистрировано, и встает вопрос о применимости схемы переходов (рисунок 1.1 а) в случае воздействий электромагнитных полей. Отсюда вытекает одна из задач настоящей работы – экспериментальное исследование вариаций скорости деформации образцов горных пород, испытываемых в условиях одноосного сжатия с постоянной скоростью нагружения и воздействия внешних электромагнитных полей.

В завершение раздела перечислим, следуя [Гольдин, 2002, 2004], основные факторы,

которые определяют деструктивные процессы в сейсмоактивных зонах, в том числе подверженных экзогенным воздействиям. Это следующие факторы: 1) неоднородность среды по механическим свойствам; 2) скорость деформации; 3) неоднородность среды по скорости крипа, что определяет аккумуляторы (концентраторы) напряжений; 4) локализация деформаций и появление поясов пластичности; 5) процесс переконцентрации напряжений в результате движения блоков [Гольдин, 2002, 2004]. Кроме перечисленного, важную роль играет сама структура зон разломов, так как именно вблизи разломов, их сочленений, пересечений наблюдаются наиболее сильные концентраторы напряжений. Рассмотрим геомеханическую ситуацию, когда в одном из соседствующих блоков развивается локальная неустойчивость деформации, рисунок 1.1 б [Соболев, 2011]. Развитие неустойчивости в одном из соседствующих блоков возможно при достижении следующих условий. Пусть напряжения  $\sigma_1$  в блоке 1 в некоторый момент времени  $t_1$  были равны 96% от максимально возможного уровня. При дальнейшем увеличении напряжений в некоторый момент времени  $t_2$  происходит достижение такого уровня, который удовлетворяет условию развития неустойчивой деформации в приразрывной области величиной  $\varepsilon_1$ . При этом происходит одновременное падение уровня напряжения  $\sigma_1$  в блоке 1. При условии, когда имеет место хрупкое разрушение, при дальнейшем ускорении деформации наблюдается и усиление сейсмической активности. В зависимости от напряжений в блоке 2, являющимся смежным к первому блоку, может развиваться тот или иной сценарий перехода от стабильного состояния к неустойчивости. В первом случае предположим, что в соседнем блоке 2 уровень напряжений  $\sigma_2$  в момент времени  $t_1$  составлял 95%. Рост напряжений внутри блоков 1 и 2 к моменту времени  $t_2$  недостаточен для развития неустойчивости в блоке 2. При этом необходимо учитывать, что поддержание процесса неустойчивой деформации в приразломной зоне блока 1 требует расхода накопленной потенциальной энергии, кроме этого падение напряжения  $\sigma_1$  приведет к падению напряжения в соседних блоках. Там будет наблюдаться увеличение скорости деформации  $\varepsilon_2$  и ослабление сейсмической активности. Таким образом, при развитии неустойчивости сейсмоактивная зона во времени разделяется на две области с разной геомеханической ситуацией. В этих областях по-разному будут протекать деформационные и, как следствие, сейсмические процессы.

В блоке 1 будет наблюдаться сейсмическая активизация, а в окружающих блоках – сейсмическое затишье. Конкретный сценарий развития неустойчивости зависит и от рассмотренной неоднородности сейсмоактивной зоны по напряжениям, и от неоднородности среды по упругим модулям, конкретным РТ-условиям (Р – давление, Т – температура) и флюидонасыщенности, а также от эффективности процессов диссипации энергии в разных

блоках. Но резкий контраст в реологии соседствующих блоков и высокий градиент напряжений остается основным фактором в развитии неустойчивости.

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 and Sammis, 1995; Varnes, 1989]. Чаще всего роль внешних воздействий существенна в ситуации, когда речь идет о зонах преимущественного сжатия, для которых характерна низкая скорость внешней деформации, в отличие от зон растяжения с большими скоростями деформации [Гольдин, 2002, 2004; Пономарев, 2008]. Дополнительными факторами, являющимися причинами подвода энергии к потенциальному очагу и служащими потенциальными триггерами сейсмической активизации в очаговой зоне могут быть как естественные природные явления, так и антропогенные процессы. К естественным природным процессам относятся глобальные явления планетарного масштаба, такие как лунные и солнечные приливы, изменение скорости вращения Земли, собственные колебания Земли, ионосферные возмущения и магнитные бури, а также процессы регионального масштаба – перепады атмосферного давления, циклоны, а также сами землетрясения [Николаев, 1994, Природные..., 2000]. Антропогенными факторами являются процессы, вызванные деятельностью человека – подземные ядерные взрывы, закачка либо откачка жидкости (или газа) из скважин, изменение уровня водохранилищ (сбросы воды) и мощные вибро- и электромагнитные воздействия при зондированиях земной коры [Мирзоев и др., 2009, 2010; Тарасов, Тарасова, 2016; Еманов и др., 2014; Сейсмичность при горных работах, 2002; Doornhof et al., 2006; White et al., 2005; Адушкин, Турунтаев, 2015].

В работе [Гольдин, 2004] отмечено, что “коэффициент полезного действия”, понимаемый как коэффициент преобразования энергии в упругую деформацию среды, для таких экзогенных факторов, как искусственные источники сейсмических колебаний (промышленные и сейсморазведочные взрывы, ядерные испытания) достигает лишь нескольких процентов. Малая величина вносимой такими источниками энергии является достаточной для того, чтобы некоторый блок среды, находящийся в метастабильном состоянии с критическим уровнем энергии, начал выделять избыточную энергию в виде сейсмических колебаний. Так как энергия дополнительных источников воздействует на весь объем блока, то энергия расходуется непосредственно на подготовку (возбуждение) сейсмического события. Эта энергия выделяется не только в виде теплоты, но также расходуется на динамометаморфизм (твердотельные фазовые переходы, гидратация и дегидратация), и на переупаковку системы блоков [Гольдин, 2004]. Все это сопровождается некоторыми локальными возмущениями напряжения, наложение которых на области с неустойчивым равновесием на диаграмме  $\sigma$ - $\epsilon$

(рисунок 1.1 а) может инициировать в них рост деформации.

Представленные в этом разделе материалы указывают на наличие предпосылок, при которых может заработать механизм возбуждения отклика сейсмической активности на различные экзогенные воздействия, в том числе электромагнитные поля, генерируемые мощными источниками. С позиций концепции триггерности и представлений об энергонасыщенной, “живой” геосреде подобные вариации локальной сейсмичности отражают закономерности процессов деструкции в геосреде и не являются экзотическими примерами, выпадающими из общей картины подготовки тектонических землетрясений. В следующем разделе рассматриваются примеры изменений сейсмичности в регионах проведения зондирований земной коры импульсными источниками электромагнитных полей, а также вариации сейсмической активности в периоды прохождения в атмосфере магнитных бурь.

## **1.2. Основные представления о влиянии электромагнитных полей на сейсмический процесс**

Электромагнитное (ЭМ) воздействие заметно выделяется на фоне других внешних факторов тем, что оказывает существенное влияние на скорость изменения напряжений и деформаций в геосреде, в то время как амплитуда этих напряжений (вызванных ЭМ полем) меняется незначительно. В работах [Богомолов и др., 2011; Тарасов, Тарасова, 2011; Тарасов, Тарасова, 2016] обращено внимание на то, что скорость изменения напряжений при прохождении фронтов электрических импульсов может быть того же порядка или выше, чем при чисто механических возмущениях (вибрации, взрывы, явления на контактах блоков и т.п.). На отдельных участках или сегментах разломов мощность электромагнитных воздействий может приближаться к оценкам мощности деформационных процессов (произведения характерного напряжения на площадь контакта и на среднюю скорость относительного перемещения блоков).

В недавних работах [Соболев, 2010; Соболев, Пономарев, 2011] в качестве вторичного инициирующего фактора рассматривалось поступление воды в объем слоистого образца. При этом реакция проявляется повышением активности акустической эмиссии (АЭ) с последующим затишьем, после которого происходит макроразрушение. Возможно, в условиях земной коры механизм внешнего электровоздействия определяется поступлением воды в очаг (разлом) [Gabrielov, Keilis-Borok, 1983; Соболев, 2014; Gavrilov et al., 2013; Пантелеев, Гаврилов, 2015; Panteleev, Gavrilov, 2015; Гаврилов и др., 2014; Гаврилов, Пантелеев, 2016]. В работах [Богомолов и др., 2011; Сычева и др., 2011] был предложен специфический механизм возбуждения колебаний при коммутации мощных импульсов тока, используемых при электрораззондированиях среды и концентрирующихся в жидких проводниках-каналах. Этот

механизм также может вносить вклад в локальные возмущения напряжения.

В данном разделе изложены наиболее существенные представления о взаимосвязи между сейсмическим процессом и электромагнитными полями, опирающиеся на совокупность натуральных наблюдений и полевых испытаний в разных частях света. Часть раздела посвящена натурным наблюдениям взаимосвязи естественных геоэлектрических и геомагнитных явлений с сейсмичностью Земли. В основном, это материалы исследований последствий аномальных магнитных бурь [Соболев, Пономарев, 2003; Соболев, 2014]. Зондирования с применением искусственных источников электромагнитных полей, начатые в конце XX века, являются целенаправленным воздействием на земную кору, они сыграли роль ядра, стержня, вокруг которого сформировалась концепция разрядки избыточных напряжений в геосреде, актуальная и в настоящее время [Сычев, 2008].

### **1.2.1. Взаимосвязь сейсмичности и физических процессов в системе Солнце-Земля**

В данном разделе представлены наиболее существенные результаты о взаимосвязи между электромагнитными (ЭМ) полями и вариациями сейсмичности, опирающиеся на совокупность натуральных наблюдений последствий солнечных вспышек: магнитных бурь и других.

Многочисленными исследованиями (обзор, например, в [Surkov, Hayakawa, 2014]) отмечено, что магнитосфера Земли представляет собой своеобразную площадку для протекания таких процессов, как геомагнитная активность, геомагнитная буря и суббуря, порождаемых солнечной активностью, которая также определяет и состояние ионосферы – глобальное распределение ионизации и ее возмущений [Афраймович, Перевалова, 2006]. Солнечная активность в атмосфере является причиной таких динамических явлений как циклоны и антициклоны, тайфуны, штормы и так далее [Огурцов, 2009]. Множество исследований подтверждают наличие связи между солнечной активностью и геодинамическими процессами в литосфере. Рассмотрим часть из них, посвященных связям сейсмического процесса и электромагнитных полей, вызываемых геомагнитными бурями и суббурями. В работах [Соболев и др., 2001; Закржевская, Соболев, 2002, 2004] подробно исследовались регионы Кавказа, Казахстана и Киргизии с высокой сейсмической активностью на предмет корреляции землетрясений с магнитными бурями (средней и высокой интенсивности) с внезапным началом. В процессе солнечных вспышек возникает выброс потоков заряженных частиц. Несмотря на то, что выделение энергии при солнечных вспышках составляет много меньшую величину, по сравнению с полным потоком энергии от Солнца, во время вспышек качественно меняется спектральный состав излучения [Афраймович, Перевалова, 2006]. Излучение заряженных частиц вызывает сильное сжатие магнитосферы Земли, при этом происходит значительное (на

сотни – единицы тысяч нТ) понижение Н-компоненты (горизонтальной) геомагнитного поля Земли [Соболев и др., 2001]. Длительность магнитной бури варьируется по времени от нескольких часов до нескольких дней и подразделяется на несколько фаз: внезапное начало, начальную, главную фазы и фазу восстановления [Surkov, Hayakawa, 2014]. Внезапное начало, SSC (SSC – storm sudden commencement), характеризуется значительным повышением значения Н-компоненты геомагнитного поля. SSC – однополярный магнитный импульс, генерируемый при сжатии магнитосферы Земли межпланетарной ударной волной и следующим за ней плотным высокоскоростным потоком горячей солнечной плазмы [Зотов и др., 2013; Нишида, 1980]. После чего происходит переход к начальной фазе – исходной точке сильного уменьшения Н-компоненты. Сам период уменьшения называется главной фазой, сменяющейся фазой восстановления значения Н-компоненты до уровня до начала магнитной бури [Соболев и др., 2001].

Результаты анализа влияния магнитных бурь на сейсмичность ([Соболев и др., 2001]) продемонстрировали как уверенную активизацию землетрясений в интервале 2-7 суток после внезапного начала бури (15 событий до бури и 31 – после бури), так и противоположный эффект – уменьшение количества землетрясений после бури (27 событий до бури и 20 – после бури). Таким образом, для исследуемого региона Казахстана и Киргизии получена мозаичная картина распределения районов с положительным и отрицательным эффектами воздействия магнитных бурь на прирост сейсмичности. Оценки суммарной энергии, закачанной всеми изученными бурями за рассматриваемый период, дают значение  $10^{12}$  Дж. Выделившаяся суммарная сейсмическая энергия составляет  $10^{13}$  Дж. Учитывая коэффициенты сейсмической эффективности, коэффициенты преобразований механической энергии в электрическую (пьезоэффект, сейсмоэлектрический эффект и другие) авторы приходят к выводу, что наблюдаемое воздействие магнитных бурь на сейсмичность носит триггерный характер [Соболев и др., 2001]. На сравнимо меньшей территории Северного Тянь-Шаня по данным сейсмологической сети KNET, охватывающей территорию Бишкекского геодинамического полигона Научной станции РАН были получены сходные результаты [Сычева и др., 2010]. Повышение среднеквадратического отклонения (СКО) сейсмического шума происходит не во время солнечной вспышки, а на следующие сутки после нее, т.е. в период, в большинстве случаев совпадающий с началом магнитных бурь [Сычева и др., 2010, 2011]. Кроме этого выделяется еще один прирост СКО сейсмического шума (более высокоамплитудный) на 4-7 сутки после солнечной вспышки. Причем большая часть откликов на солнечные вспышки и магнитные бури приходится на зимний период, когда наблюдается более сильный разброс СКО сейсмического шума (по сравнению с летним периодом) [Сычева и др., 2011].

Для региона Кавказа [Закржевская, Соболев, 2002] получены аналогичные эффекты положительного и отрицательного влияния магнитных бурь, но с более долговременным последствием. Более того, при разделении каталога землетрясений по энергетическим классам,  $K$ , на 2 выборки с  $7 \leq K < 8$  и  $K \geq 8$  выявлено следующее. До 1980 года (когда отмечался рост сейсмичности по региону) положительный эффект был достигнут за счет землетрясений высоких классов (рисунок 1.2). Отрицательный эффект наблюдался за счет событий более низких классов вне зависимости от характера сейсмической активности (как до 1980 г. при ее увеличении, так и после 1980 г. при ее уменьшении, рисунок 1.2).

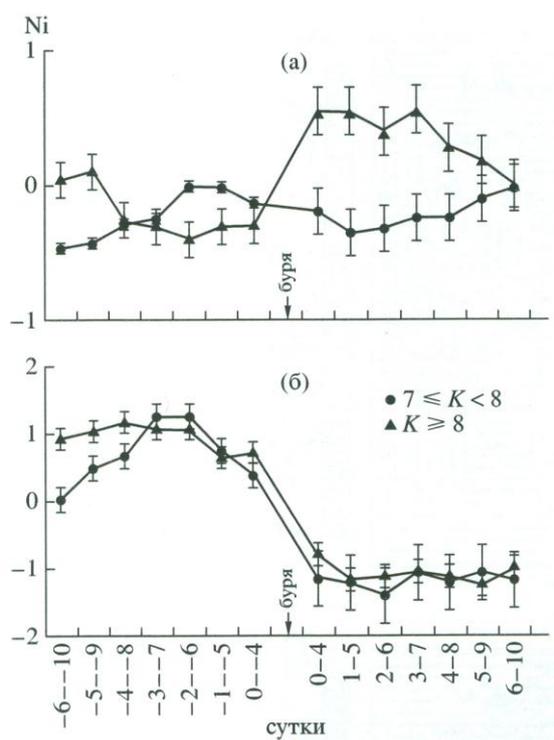


Рисунок 1.2 – Нормированные на уровень долговременного шума значения разности между суммарным числом землетрясений энергетических классов  $7 \leq K < 8$  и  $K \geq 8$  в активном интервале после 92 бурь и в пассивном интервале для всего региона Кавказа: а – за временной период 1963-1979 гг.; б – за временной период 1980-1990 гг. согласно [Закржевская, Соболев, 2002].

Обобщение результатов исследований магнитных бурь на сейсмичность разных сейсмически активных областей России в 2004-2008 гг. показало, что максимальный эффект (40%) был получен в 2004 году [Попова и др., 2011], последующие годы характеризуются снижением геомагнитной активности. Обнаружено наличие корреляции между интенсивностью магнитных бурь (она максимальна вблизи магнитных полюсов) и усилением сейсмичности (на Кольском полуострове и в Якутии (порядка 55% случаев)). Выдвинутая авторами [Попова и др., 2011] гипотеза о наличии связи магнитных бурь и микросейсмической активности подтвердилась для Томского исследовательского полигона. Амплитуда микросейсм возрастает с небольшой задержкой (от 1 до 3 суток) после начала бури и расширяется спектральный диапазон фоновых колебаний в 2-4 раза по сравнению с типовым уровнем за сутки до начала бури.

В зоне сосредоточенной сейсмичности Вранча в Карпатах (Румыния) авторами

[Бахмутов и др., 2007] были исследованы мелкофокусные (коровые) и глубокофокусные (верхнемантийные) землетрясения в период суббурь. Суббури отличаются от магнитных бурь локальным характером протекания и охватывают в основном ночные части полярных областей. Они происходят как на относительно спокойном «фоновом» уровне магнитного поля, так и во время магнитных бурь. Отмечено, что более 90% землетрясений с  $9 \leq K \leq 11$  (типичные события) связаны со среднеширотным проявлением околополуночных полярных суббурь и их энергетические классы линейно зависят от амплитуды суббурь, рисунок 1.3 [Бахмутов и др., 2007]. Диапазон изменений главного градиента ( $\Delta H$  – максимальный перепад горизонтальной  $H$ -компоненты магнитного поля в период суббури), после которого происходило большинство землетрясений (вне зависимости от глубины очага), составляет 50-90 нТл, однако для верхнемантийных он несколько шире. Показана прямая линейная зависимость длительности околополуночной полярной суббури и глубины сейсмического очага и обратная зависимость между временем задержки после начала суббури.

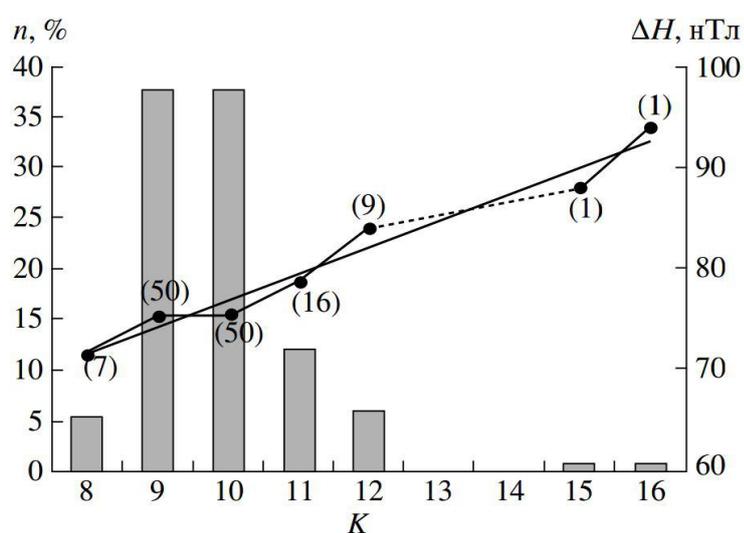


Рисунок 1.3 – Преимущественное распределение энергетического класса  $K$  глубокофокусных землетрясений за 1988-1996 гг. и связь с амплитудой  $H$ -составляющей в максимуме развития полярной суббури, согласно [Бахмутов и др., 2007]. В скобках – количество событий.

Для этой же переходной зоны сосредоточенной сейсмичности (Вранча, Румыния) авторами [Moldovan et al., 2012] были исследованы геомагнитные аномалии (ступенчатого (короткопериодные) и  $V$ -образного вида (длиннопериодные)), связанные с увеличением индекса планетарной геомагнитной активности  $K_p$ . Продемонстрировано, что ступенчатого вида аномалии вызваны изменением амплитуды вектора индукции магнитного поля  $B$ , а  $V$ -образные – ориентацией вектора  $B$ . Все отмеченные аномалии предшествовали землетрясениям (с моментной магнитудой  $M_w > 3.5$ ), 64% из них сопровождалось землетрясениями с  $M_w > 4.0$ . Несмотря на то, что наблюдаемые увеличения геомагнитной активности были вызваны солнечными вспышками с  $K_p > 20$ , авторы отмечают, что нет прямого явного свидетельства о триггерном возбуждении сейсмичности магнитными аномалиями [Moldovan et al., 2012].

В то же самое время, при увеличении масштаба до планетарного и рассмотрении землетрясений с магнитудами  $M \geq 7.5$  не дало статистически значимого подтверждения о триггерной роли солнечных вспышек и геомагнитных вариаций в инициировании землетрясений [Love, Thomas, 2013]. Однако в этом же исследовании продемонстрировано, что после сильной магнитной бури в ноябре 1960 года наблюдалась череда из трех землетрясений с  $M \geq 7.5$  в течение года (средняя частота появления землетрясений с  $M \geq 7.5$  выросла с 0.28 до магнитной бури до 3.38 после нее). Подобный результат наблюдали [Anagnostopoulos, Papandreou, 2012]: максимум скорости солнечного ветра и геомагнитной активности совпал с возникновением 6 землетрясений с  $M \geq 6.8$  за месяц до Суматро-Андаманского землетрясения ( $M = 9.3$ ) 26 декабря 2004 г.

Как продолжение исследований в работе [Закржевская, Соболев, 2004], была выдвинута гипотеза, что внезапные начала магнитных бурь (SSC) можно считать внешними предвестниками землетрясений. Термином «внешние предвестники» (по классификации [Зотов и др., 2013]) указывают на расположение источников магнитных возмущений, предшествующих сейсмическим событиям, во внешних геосферах (в ионосфере и магнитосфере). Внутренними предвестниками считаются источники в земной коре. Также выделяются смешанные предвестники, первичные источники (в магнитосфере и ионосфере) которых не связаны с землетрясениями, возбуждают вторичные источники в земной коре. Гипотетический механизм такого возбуждения – изменение электропроводности горных пород в процессе подготовки сейсмического события [Закржевская, Соболев, 2004]. Исследование изолированных спонтанно возбуждаемых магнитных импульсов, называемых ВМР (Big Magnetic Pulses), на высокоширотной обсерватории «Мирный» продемонстрировало повышение сейсмичности после их прохождения [Зотов и др., 2013]. Однако, сложность состоит в том, что пока не представляется возможным разделить ВМР от внешних и внутренних источников.

Еще одной разновидностью магнитных импульсов, вызывающих прирост сейсмичности, является внезапный пикообразный положительный импульс (SI-событие, SI – sudden impulse), не сопровождаемый в дальнейшем развитием магнитной бури (в отличие от SSC-импульса) [Адушкин и др., 2012]. По данным сейсмичности геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (Серпуховский район Московской области) найдена корреляционная зависимость вариаций скорости колебаний сейсмического фона от амплитуды геомагнитных вариаций (рисунок 1.4), выраженная формулой:

$$V_m = 0.35 \cdot \left\{ 1 - e^{-0.007B} \right\}, \quad [V_m] - \text{мкм/с}, \quad (1.1),$$

где  $V_m$  – среднеквадратическая скорость колебаний в микросейсмическом фоне,  $B$  – индукция магнитного поля в нТл [Адушкин и др., 2012].

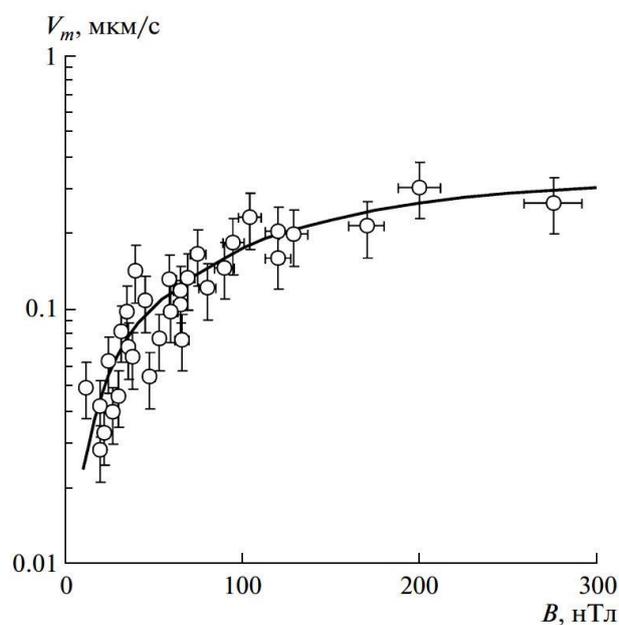


Рисунок 1.4 – Зависимость между относительной амплитудой внезапного геомагнитного импульса  $B$  и максимальным значением вариаций среднеквадратической скорости колебаний в микросейсмическом фоне  $V_m$  в диапазоне частот 0.01–0.1 Гц, согласно [Адушкин и др., 2012]. Горизонтальные и вертикальные отрезки – неопределенность в установлении значений соответствующих величин.

Зарубежные исследования также представлены многочисленными работами, остановимся на некоторых из них. Важный результат был получен в исследованиях [Duma, Ruzhin, 2003], где установлена взаимосвязь между Sq-вариациями геомагнитного поля (solar-quiet-time variation), а также вековыми вариациями и слабой сейсмичностью разных регионов планеты. Этот результат согласуется, в частности, с данными для Синайского полуострова [Raben et al., 2010]. Sq-вариации представляют собой строго периодическое явление, связанное с лунно-солнечными приливами в ионосфере, и порождаемое ионосферным незаряженным и солнечным ветрами, текущими в магнитосфере [Surkov, Hayakawa, 2014]. Согласно модели, представленной в работе [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 внешними триггерами сейсмической активности. Хотя механизм влияния “магнитного и вращательного моментов” на неупругие деформации (сейсмичность) остался необъяснен, в подтверждение модели в [Duma, Ruzhin, 2003] проведены оценки энергии полного магнитного и вращательного момента для разной площади зоны. Показано, что эта энергия соответствует энергии, выделяющейся при сильном землетрясении в регионе Филиппин – Индонезии (над которым анализировалось ионосферное возмущение и магнитный момент). Для малой окружности зоны (радиусом около 300 км), опоясывающей центр токовой системы,

генерируемые токи  $\sim 6.2 \cdot 10^4$  А, создают магнитный момент равный  $2 \cdot 10^{10}$  А м<sup>2</sup> и вращательный момент  $6 \cdot 10^{11}$  Н м, равнозначный энергии землетрясений магнитудой  $M=4.7$ .

Вместе с тем нельзя исключить, что “синхронизация” слабой сейсмичности и Sq-вариаций обусловлена влиянием другого фактора с суточной периодичностью (такой же, как у Sq-вариаций). В работах [Afraimovich et al., 2004; Гохберг, Колосницын, 2010] отмечено, что триггерное влияние на слабую сейсмичность могут оказывать градиенты атмосферного давления, область локализации которых порядка 100 км. Горизонтальная компонента этих градиентов действительно может передаваться земной коре как сдвиговое возмущение. Такие градиенты могут возбуждаться при распространении в атмосфере внутренних волн с длиной 100 км и более, обусловленных сменой светлого и темного времени суток (прохождением солнечного терминатора) [Сомсиков, 1991, 2011]. А взаимосвязь неравномерности распределения сейсмичности по времени суток с солнечным терминатором хорошо известна [Иванов-Холодный и др., 2004; Сычева и др., 2005; Сычев и др., 2012].

Большая группа зарубежных работ, например, [Telesca et al., 2008; Bleier et al., 2010; Rabeh et al., 2010; Xu et al., 2013; Han et al., 2014] посвящена тем магнитным аномалиям (к примеру, ультранизкочастотным аномалиям), которые по терминологии [Зотов и др., 2013] относятся к «внутренним предвестникам» землетрясений. Такие аномалии связаны с подготовкой землетрясения, и их источники имеют внутриземное происхождение. Существует несколько объяснений процессов, в которые могут быть вовлечены электромагнитные импульсы. Одна из них базируется на явлении эманации газов (радона, благородных газов, аэрозолей) перед землетрясениями, что служит причиной изменения электропроводности слоев земной коры, их латентного нагрева и ионосферных вариаций [Пулинец и др., 1999; Ouzounov et al., 2007; Liu et al., 2006]. Другая теория [Freund, 2002] опирается на образование подвижных зарядов (дырок) в структуре магматических горных пород, индуцированных нагрузкой. Подвижные положительные заряды способны распространяться из зоны повышенных значений напряжения (сейсмоактивные зоны) в окружающее менее напряженное пространство, вызывая непрерывное излучение ультранизкочастотных сигналов [Freund, Pilors, 2012]. Эта теория (или гипотеза) описывает обратный эффект по отношению к воздействию электромагнитных полей на геосреду. Но идея ее авторов о появлении свободных зарядов в ходе трещинообразования в горных породах была принята во внимание в работе [Bogomolov et al., 2004 a] при интерпретации эффектов воздействия ЭМ поля на нагруженные материалы. Авторы [Bogomolov et al., 2004 a] попытались связать этот эффект с аномальной дисперсией и поглощением ЭМ волн в среде со свободными носителями заряда (дырками).

Нетривиальный подход, основанный на изучении сейсмичности в период затмения Солнца (в отличие от усиления солнечной активности, порождающего магнитные бури)

использовался несколькими группами авторов [Козырев, 1993; Алексеев и др., 2006; Попова и др., 2011; Адушкин и др., 2007]. Противоречивость результатов этих авторов ставит под сомнение связь сейсмичности с затмениями, однако сама идея учитывает, что при движении теневой зоны на ее границе в атмосфере и ионосфере возбуждаются внутренние волны, как и при сменах светлого и темного времени суток [Сомсиков, 2011].

Возвращаясь к результатам исследований вариации сейсмичности, связываемых с изменениями вспышечной активности Солнца, можно отметить обобщение [Шестопалов и др., 2013], что периодам минимальной солнечной активности соответствует с высокой степенью корреляции повышенная сейсмическая активность. Исследования временной зависимости энергии, выделившейся при землетрясениях за год, выявлены 11-летние периоды, обусловленные внутренней сейсмической активностью Земли, и периоды меньшей длительности, вызванные солнечными вспышками [Шестопалов, Харин, 2004].

В недавней работе [Тарасов, 2017] получен оригинальный результат, что глобальная сейсмичность несколько уменьшается после вспышек на Солнце, причем такое уменьшение начинается, когда всплеск электромагнитного излучения Солнца достигает магнитосферы Земли (за 2-3 суток до магнитных бурь). Этот результат находится в очевидном соответствии с вышеприведенным обобщением. Что касается рассмотренных выше результатов о приросте сейсмичности в том или ином регионе через 2-7 суток после аномальных SSC, то их можно интерпретировать следующим образом. Отмеченное в [Тарасов, 2017] снижение глобальной сейсмичности под влиянием всплеска электромагнитного излучения Солнца означает кратковременное уменьшение выделения сейсмической энергии. Эта энергия должна выделиться позднее, через какое-то время, причем прирост региональной сейсмичности вполне может обеспечить высвобождение “избыточной” энергии сейсмичности. А магнитные бури (SSC), начинающиеся, когда поток заряженных частиц от Солнца дойдет до магнитосферы Земли, как раз могут сыграть роль триггера для этого процесса. Альтернативное объяснение, предложенное в [Гохберг, Колосницын, 2010] связывает увеличение региональной сейсмичности после магнитных бурь с внезапным началом с возникновением после них локальных градиентов атмосферного давления, передающихся в глубь твердой земли. Однако подобное объяснение сталкивается с трудностью: до сих пор не обнаружены значимые корреляции между изменением сейсмичности и прохождением циклонов, хотя при них наблюдаются пространственно-временные вариации атмосферного давления [Соболев, 2014].

Ввиду обнаружения корреляций сильных вариаций геомагнитного поля (магнитных бурь, суббурь, SSC, SI, BMP) и сейсмичности, авторами [Файнберг и др., 2004] была предпринята попытка объяснить наблюдаемые корреляции с позиции существования промежуточного механизма преобразования – генерации тепловой энергии в недрах Земли. В

качестве источника тепловой энергии рассматривался поток электромагнитной энергии от магнитосферы в глубь земли, описываемый вектором Умова-Пойнтинга,  $S$ :

$$S = [E, H], \quad (1.2),$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $H$  – напряженность магнитного поля в электромагнитной волне, возбуждающейся при геомагнитных возмущениях.

Результаты проведенного моделирования тепловых потоков для разных моделей среды продемонстрировали сходную картину распределения – основная часть тепла поглощается проводящими слоями. Для трехмерной геоэлектрической модели Тянь-Шаня показано, что распределение тепла как на поверхности, так и на глубинах до 60 км является неоднородным, наибольшие величины тепла локализованы в узких зонах контактов проводящих структур с менее проводящими [Файнберг и др., 2004]. Однако расчеты величин теплового потока (который на 3 порядка меньше необходимого для разогрева горной породы) не дают однозначного ответа на вопрос о механизме триггерного воздействия геомагнитных вариаций на сейсмичность.

Для анализа возможных механизмов возбуждения сейсмических откликов среды на воздействие электромагнитных полей, генерируемых при магнитных бурях и вносящих в среду поток энергии (1.2), могут быть полезными результаты лабораторных экспериментов, в которых выявляются базовые эффекты. Особый интерес представляют эксперименты, проведенные в институте кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН по воздействию скрещенных электрического,  $E$ , и магнитного,  $B$ , полей на образцы ионных кристаллов, испытываемых на одноосное сжатие [Урусовская и др., 2000]. Было обнаружено существенное изменение скорости деформации под влиянием полей с умеренной напряженностью  $E \sim 1$  кВ/м,  $B < 1$  Тл. Ниже в разделе 1.3 приведено описание этих экспериментов. В продолжение исследований по этой теме в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред НС РАН проведен большой цикл исследований влияния скрещенных  $E$  и  $B$  полей значительно меньшей напряженности на скорость деформации и акустическую эмиссию горных пород. Результаты, полученные лично диссертантом, представляются в Главе 3.

В следующем разделе представлены результаты исследований, посвященных воздействиям мощных токовых импульсов, создаваемых искусственными источниками (магнитогидродинамическими генераторами и электроимпульсными установками) на локальный режим сейсмичности некоторых регионов Земли. Важность этих исследований очевидна в связи с вышеизложенным.

## 1.2.2. Сейсмические эффекты зондирований земной коры мощными источниками тока

### 1.2.2.1. Электронзондирования с применением геофизических МГД-генераторов (уникальные эксперименты)

Первые результаты экспериментов с воздействиями на геосреду электрических импульсов, генерируемых при пусках геофизических магнитогидродинамических (МГД) генераторов, были получены на Гармском (Таджикистан, Памир) и Бишкекском (Киргизия, Северный Тянь-Шань) полигонах в 70-80-х годах XX века. В этих регионах для прогноза землетрясений проводился мониторинг электропроводности земной коры методом дипольного зондирования при помощи мощных установок – МГД-генераторов [Велихов и др., 1975; Писакин и др., 1991]. На сейсмоактивном Гармском полигоне МГД-генератор "Памир-1" располагался в северной части Таджикской депрессии на кайнозойской толще мощностью 5-7 км. В качестве излучающей антенны использовался электрический диполь с разномом электродов на 3 км и сопротивлением 1.5 Ом, который служил нагрузкой мощного МГД-генератора. Во время зондирования ток в нагрузке достигал 1.5 кА, длительность электроимпульсов (ЭИ) составляла 2.0-2.5 с, а отдаваемая в землю энергия составляла 6.7-8.5 МДж [Тарасов, Тарасова, 2016]. Всего было проведено 34 сеанса зондирования [Сидорин и др., 1983; Сидорин, 2006].

В 1975-1978 гг. при выполнении мониторинга электропроводности земной коры на Гармском сейсмоактивном полигоне в качестве побочного результата было получено, что облучение коры вызвало заметную активизацию сейсмичности, которая наиболее ярко проявилась в верхнем пятикилометровом слое. Интенсивность возникновения землетрясений резко возрастала через 5-6 суток после сеансов зондирования, а увеличение суммарной сейсмической энергии (ССЭ) оказалось на пять порядков больше энергии, вносимой МГД-генератором [Тарасов, 1997]. Это отчетливо наблюдается на графике распределения по глубине отношения энергий землетрясений Таджикской депрессии  $E_a/E_b$  (где  $E_a$  – суммарная энергии землетрясений, которые возникли в течение 30 суток после пусков МГД-генератора,  $E_b$  – суммарная энергия «фоновых» землетрясений, произошедших в течение 30 суток до пусков МГД-генератора, рисунок 1.5), приведенном авторами [Тарасов, Тарасова, 2016]. На рисунке 1.5 видно, что после электромагнитного воздействия в слое с глубиной  $h = 0-5$  км наблюдается значительное приращение ССЭ на  $4.14 \cdot 10^{13}$  Дж ( $1.22 \cdot 10^{12}$  Дж в среднем на одно воздействие). Глубины  $h = 9-11$  км характеризуются ее уменьшением, а в нижележащих слоях с  $h > 11$  км она изменяется незначительно. По данным скоростей распространения сейсмических волн и электропроводности горных пород в пределах Таджикской депрессии выделяются две границы:

первая на глубинах 5-7 км (граница кайнозойских и мезозойских отложений), а вторая при  $h=10-12$  км соответствует кровле фундамента. Авторы [Тарасов, Тарасова, 2016] предполагают, что особенности изменения отношения  $E_a/E_b$  предопределяются строением Таджикской депрессии и электромеханическими характеристиками слагающих ее горных пород в большей степени, нежели обуславливаются скин-эффектом.

Используя геологическую терминологию, авторы делают вывод, что триггерное электромагнитное воздействие приводит к возбуждению кайнозойской толщи, характеризующейся низкими скоростями продольных сейсмических волн  $V_p$  и высокой электропроводностью (выделение ССЭ в ней составляет 85% от общего значения). У подошвы слоя мезозойских отложений, имеющих промежуточные значения скоростей и электропроводности, электромагнитные импульсы вызывают снижение сейсмичности. Сейсмичность кристаллического фундамента, обладающего высокими значениями скоростей  $V_p$  и низкой электропроводностью, не подверглась изменениям [Тарасов, Тарасова, 2016].

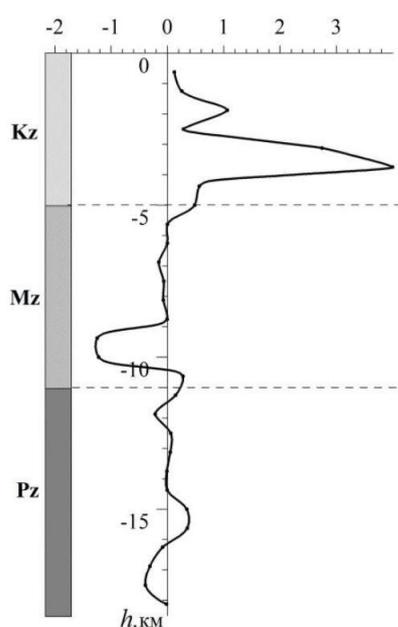


Рисунок 1.5 – Зависимость от глубины  $E_a/E_b$  – отношения суммарной энергии землетрясений Таджикской депрессии, возникших в течение 30 сут после и за такой же период до облучения коры электромагнитными импульсами, согласно [Тарасов, Тарасова, 2016]. Значения  $E_a/E_b$  отложены в логарифмическом масштабе по оси абсцисс, по оси ординат – глубина  $h$  (км). Слева представлен геологический разрез депрессии, где символами Kz, Mz и Pz показаны породы кайнозойского, мезозойского и палеозойского возраста соответственно.

В упомянутой работе было также рассмотрено распределение по площади ССЭ, выделившейся после облучения коры электромагнитными импульсами. Полученные результаты представлены в виде карты (рисунок 1.6), на которой ярко выделяются две обширные аномалии, характеризующиеся на порядок более высокой величиной ССЭ. Одна из них (1) расположена севернее Петровского разлома в непосредственной близости от воздействующего МГД-генератора, а другая (2), более обширная и интенсивная – в 50 км к югу от него, приурочена к глубинному Дарваз-Каракульскому разлому, целиком располагаясь в пределах его южного крыла [Тарасов, Тарасова, 2016].

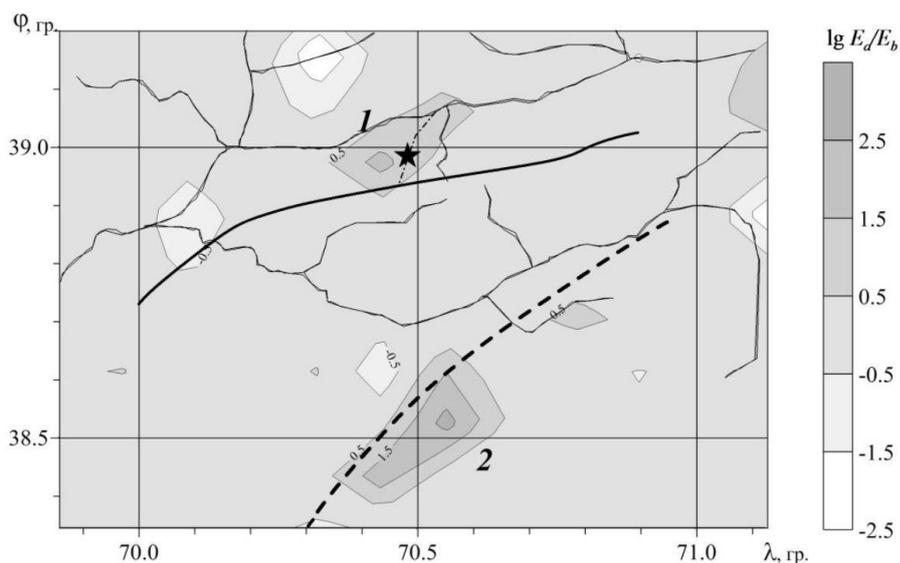


Рисунок 1.6 – Карта распределения  $E_a/E_b$  – отношения суммарной сейсмической энергии землетрясений Гармского района, возникших в течение 30 сут после облучения коры электромагнитными импульсами и за такой же период времени до них согласно работе [Тарасов, Тарасова, 2016]. Цифрами 1, 2 отмечены области аномального повышения  $E_a/E_b$  после облучения коры импульсами МГД-генератора. Пунктирной и сплошной линиями показаны глубинный Дарваз-Каракульский и Петровский разломы, а тонким штрихпунктиром – второстепенный разлом вблизи от источника электромагнитного облучения коры. Положение самого источника отмечено звездочкой. Тонкими линиями показана речная сеть.

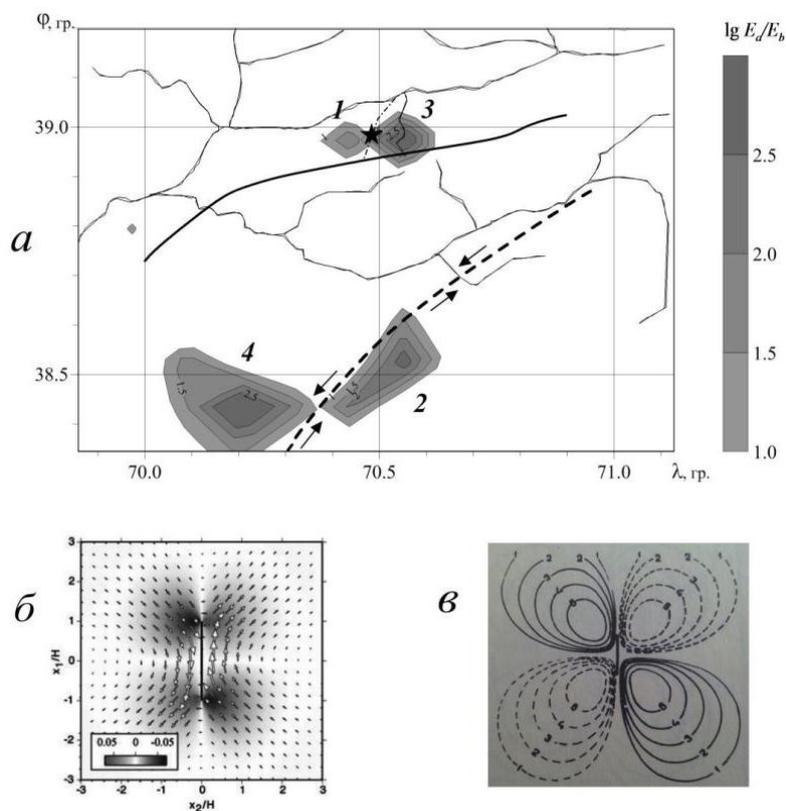


Рисунок 1.7 а – Результат совмещения областей аномального повышения  $E_a/E_b$  – после и до электромагнитного облучения коры (1 и 2), а также после и до семипалатинских ядерных взрывов (3 и 4), согласно [Тарасов, Тарасова, 2016]. б и в – примеры распределения остаточных смещений после подвижки по левостороннему сдвигу по оси ординат, из теоретических работ [Грайзер, 1984; Varbot et al., 2009]. Обозначения те же, что и на рисунке 1.6.

Анализ эффективности (суммарной сейсмической энергии) триггерного воздействия от

электромагнитных импульсов МГД-генератора и подземных ядерных взрывов, проведенных на семипалатинском полигоне [Тарасов, Тарасова, 1995] показал следующее. Облучение коры электроимпульсами вызывает более сильную активизацию сейсмичности, чем воздействие ядерных взрывов. Воздействие электромагнитными импульсами, проведенное перед ядерными взрывами повышает эффективность их триггерного воздействия, тогда как взрывы, произведенные перед облучением, снижают эффективность триггерного воздействия электромагнитных импульсов [Тарасов, Тарасова, 2016]. Согласно этой работе, распределение ССЭ, выделившейся в исследуемом регионе в результате облучения коры МГД-генератором и действия ядерных взрывов, продемонстрировало сложную картину. Выделяются зоны высокого значения ССЭ после облучения коры импульсами и взрывами (рисунок 1.7 а). Их конфигурация напоминает "бабочку", состоящую из двух "лепестков", расположенных на разных крыльях активных разломов. Один из "лепестков" (1 и 2 на рисунке 1.7 а) проявляется после облучения коры электроимпульсами, а второй – после ядерных взрывов (3 и 4 на рисунке 1.7 а), то есть ЭИ и взрывы вызывают активизацию разных геологических структур [Тарасов, Тарасова, 2016]. Продемонстрированные на картах (рисунок 1.7 б) поля остаточных деформаций, рассчитанные авторами для Дарваз-Каракульского разлома с применением двух разных теоретических моделей для левостороннего сдвига [Грайзер, 1984; Varbot et al., 2009], обнаруживают большое сходство с конфигурацией "лепестков" – аномалий суммарной сейсмической энергии. В каждом крыле разлома в направлении его смещения образуется область сжатия, а в обратном направлении – область растяжения. Эти области сжатия по своему виду похожи на "бабочку" на рисунке 1.7 а.

Для исследуемой территории Памира авторами [Тарасов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011] были проведены оценки сеймотектонических деформаций (СТД), выполненные по данным каталога землетрясений КСЭ ИФЗ РАН [Попандопуло, 1991], произошедших в этой области за 36 лет с применением методики Б.В. Кострова [Костров, 1975]. По рассчитанному скалярному сейсмическому моменту землетрясения вычислялись значения СТД некоторой области с объемом  $V$ , где реализовалось данное сейсмическое событие:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2\mu V} \sum_{i=1}^N M_0^i, \quad (1.3),$$

где  $t$  – текущее время,  $M_0^i$  – скалярный сейсмический момент  $i$ -го землетрясения в каталоге, время возникновения которого  $t_i \leq t$ , а  $N$  – число таких землетрясений,  $\mu$  – модуль сдвига, [Костров, 1975]. Полученные величины СТД, а также их скорости представлены на рисунке 1.8, согласно [Тарасов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011].

Величина высвобожденной СТД (рисунок 1.8 а, б) представляет собой непрерывно возрастающую ломанную кривую, на которой выделяются резкие (и относительно короткие по времени) ступенчатые приросты, сменяющиеся продолжительными периодами медленного плавного роста. Резкие приросты обусловлены возникновением относительно сильных землетрясений [Тарасов, Тарасова, 2011]. Авторы отмечают, что на 36-летнем графике отчетливо выделяется один единственный интервал (длительностью 3.5 года), который по времени совпадает с периодом электроразондирования. В пределах этого периода значительное приращение СТД достигается за счет большого количества относительно слабых землетрясений [Тарасов, Тарасова, 2011]. Этот эффект как и в случае распределения суммарной сейсмической энергии (рисунок 1.5 из [Тарасов, Тарасова, 2016]) и увеличения количества землетрясений [Тарасов, 1997; Тарасов, 2009] наиболее ярко проявляется именно в верхнем пятикилометровом слое земной коры (рисунок 1.8 б).

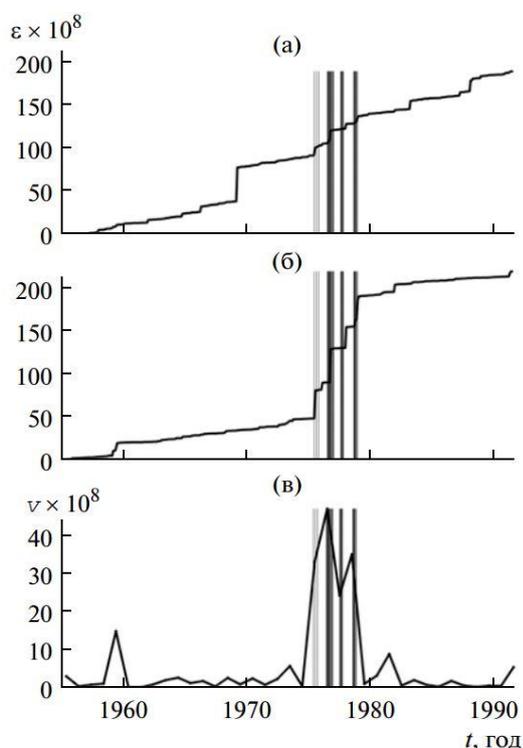


Рисунок 1.8 – Изменение сейсмоструктурных деформаций Гармского района Таджикистана (а) и его верхнего (0–5 км) слоя (б), а также скорости деформации (1/год) в этом слое (в) по данным [Тарасов, Тарасова, 2011]. По оси абсцисс – время (годы). Вертикальными линиями отмечены моменты облучения коры этой области электромагнитными импульсами.

Периоды медленного плавного роста соответствуют временам до и после электровоздействия, а во время облучения наблюдается резкое приращение СТД, превосходящее по своей величине почти в 2 раза деформацию, высвобожденную в рассматриваемой области за остальные 32 года наблюдений [Тарасов, Тарасова, 2011]. Скорость СТД возрастает почти сразу же после начала облучения и сохраняет высокие значения до окончания периода зондирования (рисунок 1.8 в).

Более детальный временной анализ сейсмоструктурных деформаций, проведенный авторами [Тарасов, Тарасова, 2011] с применением методики когерентного суммирования

показал следующее (рисунок 1.9). Прирост СТД после начала электростимулирования (при  $t > 0$ ) происходит гораздо быстрее, чем до него ( $t < 0$ ). Увеличение  $\varepsilon(t)$  происходит с задержкой на 5 суток после начала электростимулирования, что согласуется с обнаруженной ранее задержкой активизации сейсмичности после пусков МГД-генератора в Гарме [Тарасов, 1997; Тарасов, 2009]. Длительность периода быстрого высвобождения СТД составляет шесть месяцев – это соизмеримо с продолжительностью серий пусков МГД-генератора. Усредненные значения СТД показали, что после воздействия ЭИ скорость деформации возросла в рассматриваемой области в 11 раз, а в ее приповерхностном слое – в 15 [Тарасов, Тарасова, 2011]. Наибольший рост скорости СТД отмечался в небольшой области радиусом 20 км, окружающей диполь.

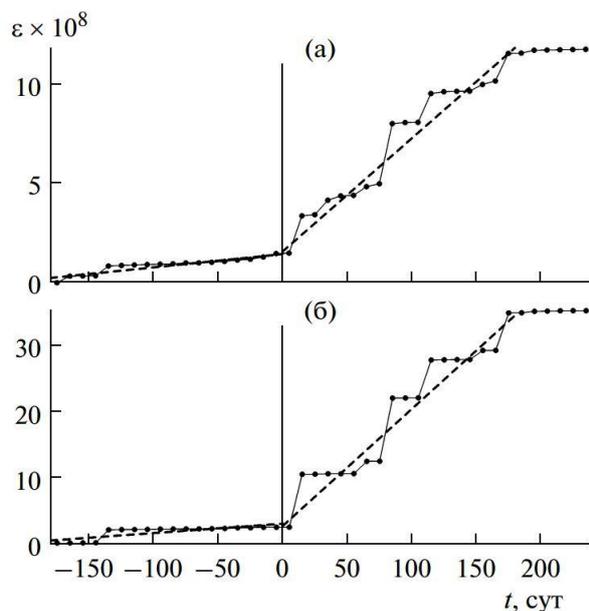


Рисунок 1.9 – Сейсмоструктурные деформации Гармского района (а) и его верхнего (0-5 км) слоя (б) до ( $t < 0$ ) и во время ( $t > 0$ ) облучения коры ЭИ, усредненные по четырем сериям пусков МГД-генератора, согласно [Тарасов, Тарасова, 2011]. По оси абсцисс – время (сутки), отсчитываемое от начала облучения (вертикальная линия). Точками показаны экспериментальные значения, пунктиром – аппроксимирующие прямые в пределах интервалов  $-180 \leq t < 0$  и  $0 < t \leq 180$  сут.

Более отчетливо эффект электростимулирования сейсмической активности проявился в других геолого-геофизических условиях при зондировании земной коры одиночными электрическими импульсами в 1983-1990 гг. на Бишкекском полигоне [Тарасов и др., 2001]. Рассматриваемая область – северотяньшаньская сейсмогенерирующая зона – относится к наиболее сейсмически активным, за последние 120 лет здесь произошло два землетрясения с магнитудой  $M > 8.0$  [Тарасов и др., 2001]. Однако средняя сейсмическая активность (число событий в единицу времени на единицу площади) этой зоны по сравнению с Гармским районом Таджикистана существенно меньше и составляет  $A_{10} = 0.1$ . Всего за время электростимулирования коры было проведено 113 пусков МГД-генератора [Трапезников и др., 1989]. Подобно случаю Гармского полигона, нагрузкой МГД-генератора служил электрический диполь длиной 4.5 км и сопротивлением 0.4 Ом. Диполь располагался в пределах структур Северного Тянь-Шаня, которые примыкали к осадочным отложениям Чуйской впадины. При зондировании коры ток варьировался в интервале 0.28-2.8 кА, длительность импульсов

составляла 1.7-12.1 с, а внесенная энергия находилась в пределах 1.2-23.1 МДж [Тарасов, Тарасова, 2011].

Первые результаты [Тарасов, 1997; Тарасов, 2001] показали, что на 2-4 сутки после электроразрядирования во всем регионе отмечалось увеличение суточного числа землетрясений  $N_t$ , причем максимум наблюдался в Южной части исследуемого района в верхнем пятикилометровом слое коры и превышал фоновое значение на 10 СКО. Суммарная сейсмическая энергия, выделенная всеми землетрясениями, инициированными каждым из пусков, превышает фоновую энергию землетрясений на  $2.03 \cdot 10^{15}$  Дж и энерговклад МГД-установки на 6 порядков. Изменения отмечаются также в распределении землетрясений по энергиям и в расположении их гипоцентров в пространстве [Тарасов, 2001].

При более детальном анализе с использованием сейсмического каталога Н.Н. Михайловой [Михайлова, 1990] за период 1975-1996 гг., включающий 14115 землетрясений 4-15 классов, авторами было выявлено следующее [Тарасов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011]. В области Северного Тянь-Шаня, ограниченной радиусом 130 км вокруг излучающего диполя МГД-генератора, в период облучения коры величина сейсмоструктурных деформаций возрастает намного быстрее, чем до и после облучения (рисунок 1.10). Увеличение скорости СТД наблюдается только через 1.5 года после начала зондирования и совпадает по времени с резким повышением суммарной вносимой в среду энергии в середине 1985 г. (рисунок 1.10 а). Авторы [Тарасов, Тарасова, 2011] объясняют полученный результат наличием преимущественно областей, далеких от неустойчивого состояния, реализация землетрясений в которых возможна лишь при резком увеличении энергии облучения. В этой связи дополнительно была рассмотрена ситуация в заведомо напряженной области, окружающей эпицентр землетрясения с  $M_w=6.3$ , которое произошло 24.01.87 в 390 км от диполя МГД-генератора (рисунок 1.10 в). Вплоть до самого начала зондирования величина СТД растет медленно, что может быть связано с сейсмическим затишьем перед указанным землетрясением. Зато с момента электровоздействия наблюдается рост деформаций, причем их величина в сумме в три раза превышает значения СТД в этой области за весь период наблюдений до и после зондирования. За 6 месяцев до сейсмического события 24.01.87 г. отмечается максимум СТД, который может являться следствием форшокового процесса [Тарасов, Тарасова, 2011].

Результаты расчета сейсмоструктурной деформации, полученные при так называемых «горячих» пусках, которые учитывались авторами [Тарасов, Тарасова, 2011], были дополнены оценками суммарной энергии всех зондирующих пусков, включая «холодные» [Богомолов и др., 2011]. Под «холодными» пусками авторы [Богомолов и др., 2011] подразумевают проводившиеся в штатном режиме разряды стартовой конденсаторной батареи МГД-генератора

без поджига топлива, «на фоне» которых проводились «горячие пуски». Как видно из графика на рисунке 1.10 г при приведении суммарной энергии импульсов (из работы [Богомоллов и др., 2011]) к тому же масштабу времени, что и график СТД из рисунок 1.10 б, обе зависимости намного лучше скоррелированы, чем зависимости  $\epsilon_{STD}$  и  $E_{MГД}$  из рисунок 1.10 а и б.

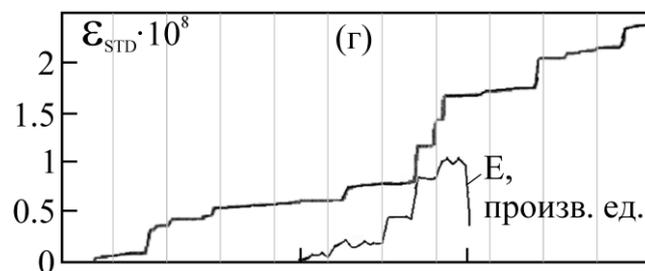
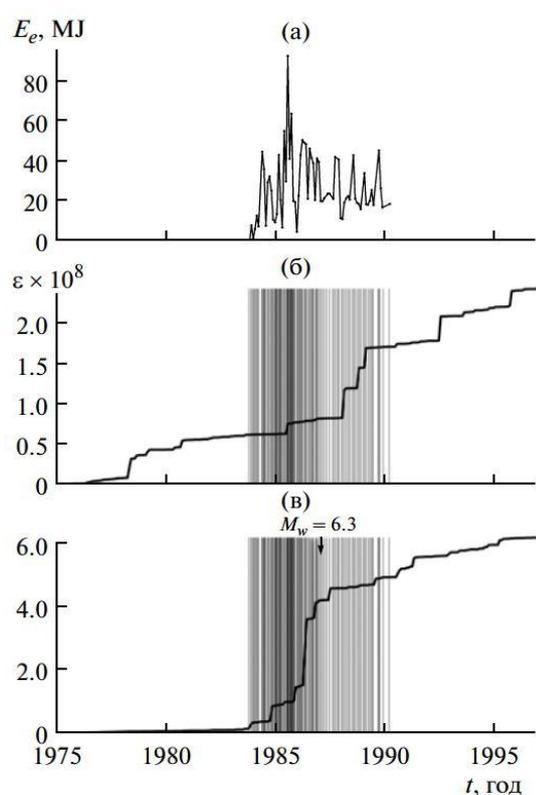


Рисунок 1.10 – Временные зависимости: а – ежемесячной суммарной энергии облучения, согласно [Тарасов, Тарасова, 2011]; б – изменения сейсмостектонических деформаций в области МГД-генератора в Бишкеке; в – изменения СТД в такой же области вокруг эпицентра землетрясения 24.01.1987,  $M_w = 6.3$ , г – график СТД из рисунка б и энергия всех зондирующих импульсов (и горячих и холодных пусков) согласно [Богомоллов и др., 2011]. Вертикальными линиями (а-в) отмечены моменты облучения коры в районе Бишкека, стрелкой – время этого землетрясения.

Авторы [Богомоллов и др., 2011] считают, что это может свидетельствовать о вкладе импульсов при «холодных» пусках в усиление слабой сейсмичности и согласуется с результатами зондирования при использовании конденсаторно-тиристорной установки ЭРГУ-600-2, о которых пойдет речь в разделе 1.2.2.2.

Средняя скорость сейсмостектонической деформации области, окружающей МГД-генератор, в период электровоздействия в 2.3 раза выше аналогичной скорости до воздействия (рисунок 1.10 б). А вот в области подготовки землетрясения с  $M_w = 6.3$  отношение скоростей до и во время зондирования достигает 10.3, что хорошо заметно на карте на рисунке 1.11. В более чем половине областей после электрозондирования наблюдается увеличение скорости СТД, особенно в зоне, прилегающей к эпицентру указанного землетрясения. В пределах этой аномалии скорости деформаций во время электровоздействия увеличиваются на 2-3 порядка [Тарасов, Тарасова, 2011].

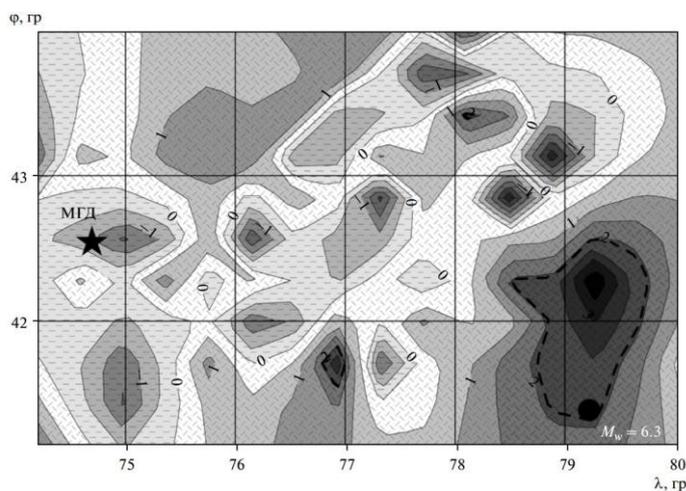


Рисунок 1.11 – Отношение скоростей СТД Северного Тянь-Шаня за период от начала облучения коры до землетрясения 24.01.87 г. с  $M_w = 6.3$  и за все время наблюдений до начала облучения, согласно [Тарасов, Тарасова, 2011]. Звездочка – положение диполя, кружок – эпицентр землетрясения, пунктир – значимая область аномалии. По осям – широта ( $\varphi$ ) и долгота ( $\lambda$ ) в градусах.

Обобщая результаты оценки сейсмотектонических деформаций, рассчитанных для областей Гармского и Бишкекского полигонов, можно отметить следующее. Прирост СТД, инициированный электровоздействием от МГД-генератора оказался сопоставим с деформациями коры, которые сопровождают процесс подготовки сильных землетрясений. Уровень сброса напряжений оценивается авторами как 0.04-0.17 МПа, что соответствует 1-17% от величины напряжений, отрелаксированных в результате высвобождения упругих деформаций в очагах сильных землетрясений [Тарасов, Тарасова, 2011].

#### ***1.2.2.2. Экспериментальные зондирования на Бишкекском геодинамическом полигоне с использованием мощного электроимпульсного источника***

Исследования воздействия электрических импульсов на геосреду были продолжены на Бишкекском полигоне с применением вместо МГД-генератора другого мощного источника тока – электроразведочной генераторной установки (ЭРГУ-600-2, далее просто ЭРГУ). В штатном режиме эта установка используется для мониторинга электрического сопротивления земной коры [Волыхин и др., 1993]. В 2000-2005 гг. были проведены серии электромагнитных зондирований (дополнительно к штатным), при которых установка ЭРГУ работала в экспериментальном режиме, генерируя однополярные импульсы тока, имитирующие воздействие МГД-генератора [Сычев и др., 2008]. Обстоятельства проведения экспериментальных зондирований, технические условия и параметры импульсов тока детально описаны в работе [Сычев и др., 2008] и обобщении [Богомолов и др., 2011] и не приводятся в данной диссертации. Отметим только, что вклад энергии в геосреду при таком режиме зондирования был сопоставим с энергией слабого сейсмического события ( $\sim 10^8$  Дж).

В работах [Богомолов и др., 2006, 2011; Сычев и др., 2008, 2010], посвященных итогам эксперимента, анализировался каталог землетрясений энергетических классов  $6.5 \leq K \leq 10.5$  за

1998-2006 гг. на территории внутри цифровой сейсмической сети KNET [Сычева и др., 2011]. Эта территория, получившая название Бишкекского геодинамического полигона, БГП, [Сычев и др., 2008; Богомолов и др., 2011], существенно меньше по сравнению с областью, анализируемой в вышецитированных работах Н.Т. Тарасова. Однако ввиду наличия наиболее полных и высококачественных сейсмических данных именно для территории БГП, оконтуренной станциями сети KNET, на ней было сфокусировано внимание авторов из НС РАН [Сычев и др., 2008, 2010]. Результаты расчета кумулятивных распределений суточного числа землетрясений продемонстрировали прирост слабой сейсмичности (всех рассматриваемых классов) с типовой задержкой 7-8 суток после электровоздействия показаны на рисунке 1.12. Для событий классов  $8.5 \leq K \leq 9.5$  прирост их суточного числа превысил фоновый уровень более чем на 2 СКО. Столь контрастный прирост не был отмечен в период зондирования с применением МГД-генераторов.

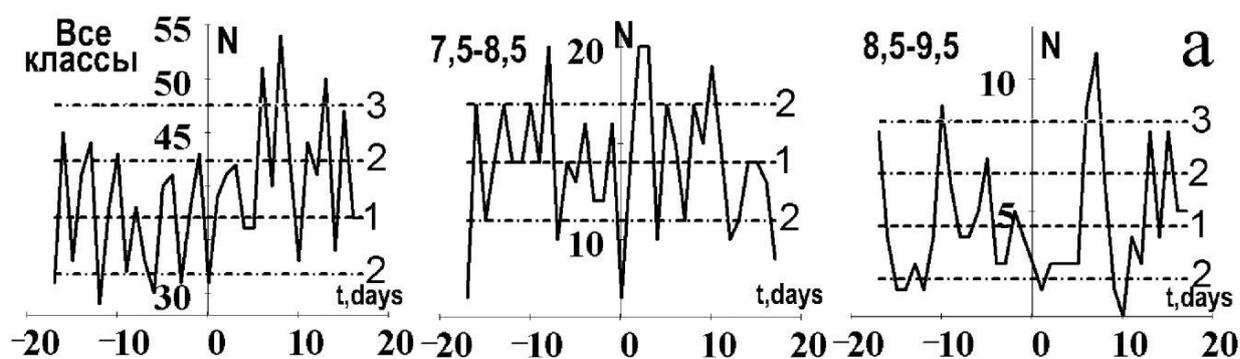


Рисунок 1.12 – Кумулятивные распределения суточного количества сейсмических событий для территории Бишкекского геодинамического полигона согласно [Сычев и др., 2010]. Пунктиром показано среднее значение, найденное по первым 17 суткам до ЭВ (1), и среднеквадратичное отклонение от него на СКО (линия 2) и на 2 СКО (линии 3).

По данным [Сычев и др., 2010; Богомолов, 2013], электрозондирование вносит изменения в режим сеймотектонических деформаций территории БГП. Отмечено, что на западной части БГП после электрозондирования сдвиговой режим СТД меняется на режим транспрессии. В целом по всей территории локализация сейсмической активности в годы до проведения электрозондирования приурочена к области сжатия, а в период воздействия наблюдается ее смещение в зону транспрессии [Сычев и др., 2010]. Зона локализации сейсмических очагов, рассматриваемых как отклики на электровоздействие, окружает питающий электрический диполь, находящийся в ее центре [Авагимов и др., 2005; Сычев и др., 2008]. Вблизи диполя значительный вклад в сейсмический отклик дают землетрясения, гипоцентры которых приурочены к разломным и сейсмогенерирующим зонам (находящимся в околокритическом состоянии) [Авагимов и др., 2005; Богомолов и др., 2006; Matcharashvili et

al., 2015].

В другой работе [Смирнов, Завьялов, 2012] был проведен анализ накопленных сейсмических данных территории Северного Тянь-Шаня за 1967-2008 гг. с целью более детального изучения эффекта электровоздействия МГД-генератора и установки ЭРГУ на земную кору по набору ранее неизученных другими авторами статистических параметров. Рассматривались вариации: наклона графика повторяемости, фрактальной (корреляционной) размерности множества эпицентров землетрясений, параметра  $q$  – зависимости длительности цикла разрушения от размера очага землетрясения, расстояния от середины диполя до барицентра «облака» сейсмичности, радиуса гирации (дисперсия «облака»). Результаты были получены для цилиндрической области радиусом 150 км вокруг питающего диполя и глубиной до 6 км. Показано, что для интервалов зондирований 1983-1990 гг. и 2000-2005 гг. происходит приближение барицентра «облака» землетрясений к электрическому диполю. Данные наклона графика повторяемости, фрактальной размерности и параметра  $q$  не выявили четких корреляций, связанных с электровоздействием. Для уточнения характеристик влияния электрозондирований на локальную сейсмичность авторами [Смирнов, Завьялов, 2012] детально рассмотрены данные по каждому отдельному акту зондирования. Показано, что угол наклона графика повторяемости существенно увеличивается непосредственно в период зондирования, после чего постепенно в течение 35 часов снижается (рисунок 1.13). Аналогичные выводы сделаны для сейсмической активности. Отмечен эффект последствия, выражающийся в наличии локального максимума угла наклона графика повторяемости на третьи сутки после зондирования с последующим медленным (4-5 суток) снижением его величины (рисунок 1.13). Это согласуется с результатами, демонстрирующими локальный максимум на третьи сутки сейсмической активности после зондирования МГД-генератором, отнесенной к фоновой активности до облучения [Авагимов и др., 2005].

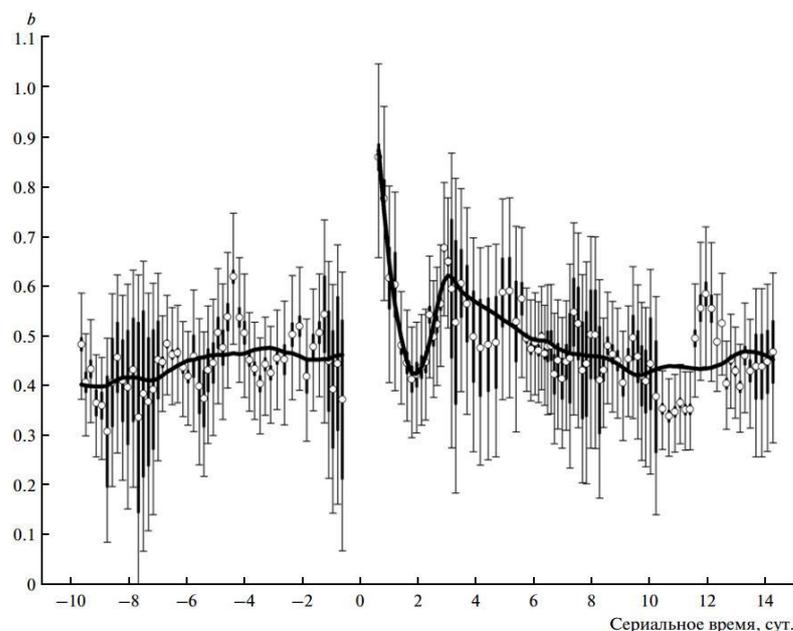


Рисунок 1.13 – Вариации наклона графика повторяемости до (отрицательные значения времени) и после (положительные значения времени) зондирований, рассчитанные по данным сериального каталога, согласно [Смирнов, Завьялов, 2012]. Жирными вертикальными линиями показаны диапазоны между оценками наклона графика повторяемости по нецензурированной и цензурированной выборке землетрясений; точками показаны середины этих диапазонов, сплошная линия – их сглаженные значения, тонкие вертикальные отрезки – статистические погрешности оценок границ диапазонов.

Последовательность интервалов между землетрясениями, зарегистрированными в период 1983-1996 гг. на Бишкекском геодинимическом полигоне, была исследована в работах [Chelidze, Matcharashvili, 2003, 2007; Chelidze et al., 2006; Matcharashvili et al., 2015] с применением нелинейных алгоритмов фазового портрета, IFS-метода и рекуррентного анализа, оценки энтропии Шеннона, а также преобразования вейвлет- и Гильберта-Хуанга. Полученные данные свидетельствуют о том, что временное распределение локальных землетрясений во время электрзондирования становится более регулярным, корреляционная размерность интервалов между землетрясениями убывает в более, чем 2 раза. В периоды времени, следующие после электрзондирований, динамика землетрясений приобретает характерные черты неупорядоченности и хаоса [Chelidze, Matcharashvili, 2003, 2007; Chelidze et al., 2006; Matcharashvili et al., 2015].

Применение метода нелинейной динамики (метод Грассбергера-Прокаччиа [Grassberger, Procaccia, 1983]) для оценки поведения сложных динамических систем, к которым относится земная кора, позволило авторам [Турунтаев и др., 2012] на базе этих же сейсмических данных БГП получить следующие результаты. В периоды электрзондирований и фрактальная размерность аттрактора и размер пространства вложения уменьшаются по сравнению с периодами до воздействия, что свидетельствует об упорядочении сейсмического режима и

переходе напряженного состояния геосреды в более устойчивое (рисунок 1.14).

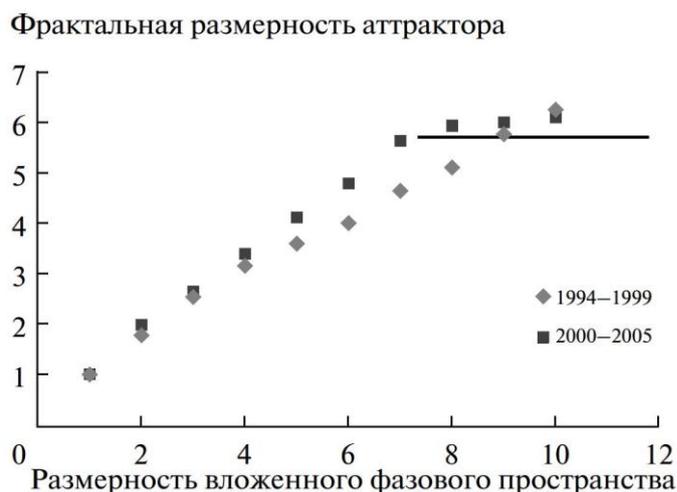


Рисунок 1.14 – Зависимость фрактальной размерности аттрактора от размерности вложенного фазового пространства, построенная для выборок, свободных от особенностей по данным о сейсмичности в районе БГП согласно [Турунтаев и др., 2012].

Важным дополнением ко всем рассмотренным трудам по электромагнитному зондированию земной коры БГП являются результаты работ [Авагимов и др., 2005, 2016]. В первой из них [Авагимов и др., 2005] для исследуемой территории были рассчитаны поле плотности тока и структура тепловых потоков, создаваемых при электроразондировании. Показано, что на глубине 5 км наблюдается максимум амплитуды плотности тока вблизи источника (диполя) равный  $j=8 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}^2$ , а при удалении от него плотность тока убывает до величины порядка 10% от максимума для глубин 10-15 км (рисунок 1.15). Структура теплового потока отражает схожие тенденции: максимум сосредоточен вблизи диполя (порядка нескольких его длин) на глубинах 0-5 км, для остальной области тепловой поток незначителен [Авагимов и др., 2005]. Во второй упомянутой работе [Авагимов и др., 2016] проведена оценка порогового уровня энергии электромагнитного воздействия  $A_{tr}$ , необходимого для реализации вызванной сейсмичности. Продемонстрирована обратно пропорциональная зависимость между энергией внешнего воздействия, величина которой способна вызвать триггерные эффекты, и уровнем сейсмической активности среды (состоянием энергонасыщенности среды).

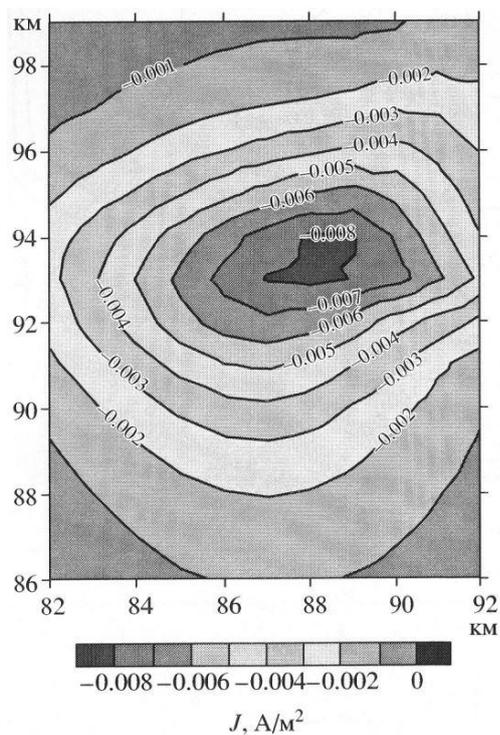


Рисунок 1.15 – Распределение плотности электрического тока на глубинах 5 км согласно [Авагимов и др., 2005].

Своеобразным «апофеозом» рассмотренных работ по электромагнитному зондированию и выявленных корреляциях сейсмического режима можно считать 2 патента авторов Тарасова Н.Т. и Тарасовой Н.В. Первый из них имеет название «Способ снятия упругих напряжений в земной коре для предотвращения катастрофических землетрясений» [Способ снятия..., 2010]. Сущность этого изобретения заключается в следующих этапах. 1 Разбиение исследуемой сейсмоактивной территории на квадратные ячейки, в каждой из которых производятся измерения сеймотектонических деформаций, рассчитывается среднее (фоновое) значение. 2 Устанавливается как минимум один излучатель электромагнитных импульсов, при помощи которого происходит облучение коры исследуемой территории. В период облучения также измеряются значения СТД в каждой ячейке. В тех ячейках, где обнаружены повышенные уровни отношений СТД во время облучения к фоновым СТД, превышающие среднее по всем ячейкам, проводят дополнительные облучения. По результатам измерения СТД за весь период облучения предполагается оценить уровень «снятых» (отрелаксированных электроимпульсами) напряжений. Ожидаемый авторами результат – повышение эффективности снятия упругих напряжений в земной коре, снижение неблагоприятного воздействия на окружающую среду [Способ снятия..., 2010].

Ключевым компонентом предложенного в патенте «Способ прогноза землетрясений» [Способ прогноза..., 2011] средства также является излучатель электромагнитных импульсов, при помощи которого происходит уточнение места локализации будущего землетрясения и расчет его магнитуды. Подробно это выглядит следующим образом: определяется пространственное распределение плотности потока суммарной сейсмической энергии для

исследуемой территории, которое считается фоновой интенсивностью сейсмичности. Далее облучают земную кору электромагнитными импульсами, после чего определяется интенсивность сейсмичности в период облучения. По этим данным очерчивается область подготовки землетрясения, для нее вычисляются скорость СТД, суммарная СТД и рассчитывается магнитуда прогнозируемого сейсмического события [Способ прогноза..., 2011]. Это позволит улучшить достоверность сейсмопрогноза.

### **1.2.2.3. Возможные механизмы влияния электроразрядов на сейсмичность**

Несмотря на существенный прогресс в исследованиях воздействий электроразрядов на сейсмичность, остается дискуссионным вопрос о ключевых механизмах преобразования энергии электромагнитного поля в первичные подвижки, которые, по-видимому, играют роль триггеров. На данный момент большинство ученых склоняется в пользу преимущественной роли электрокинетических эффектов, усиливающих поступление воды на контактирующие поверхности геоблоков или к устьям трещин [Gabrielov, Keilis-Borok, 1983; Соболев, 2014; Gavrilov et al., 2013; Пантелеев, Гаврилов, 2015; Panteleev, Gavrilov, 2015; Гаврилов и др., 2014; Гаврилов, Пантелеев, 2016]. В силу эффекта Ребиндера это должно приводить к некоторому снижению прочности, и, как следствие, к сейсмическим подвижкам. Однако на фильтрацию воды могут оказывать влияние и другие факторы, и остается непонятным, почему процесс накопления сейсмоструктурных деформаций столь чувствителен именно к электроразрядам.

Попытка объяснить специфику случая электроразрядов с применением мощных источников тока (МГД-генераторами и устройствами типа ЭРГУ) была предпринята в работе [Сычев и др., 2008]. Обращено внимание, что земная кора облучается импульсами с крутыми фронтами, нарастание и спад тока происходит резко. Поскольку электрический ток в геосреде переносится ионами, то процессы электрокинеки заведомо нестационарны. При прохождении фронтов импульсов тока происходят резкие, по меркам электрокинетических эффектов, изменения силы электроосмоса жидкой фазы в трещиновато-пористом скелете геосреды, что равносильно гидроударам на микроуровне. Упругие волны, исходящие из жидкости и распространяющиеся по твердому скелету, могут вызывать в нем развитие трещин, а следовательно, и высвобождение накопленных напряжений [Сычев и др., 2008]. Высказанные авторами предположения в последующем были расширены и обобщены в каналовой модели [Богомолв, 2010; Сычева и др., 2011]. Эта модель также опирается на то, что зондирующие электроимпульсы имеют высокую крутизну фронтов нарастания и убывания, из-за чего могут реализоваться два вида электромеханических эффектов. Первый относится к формированию токового канала при нарастании силы тока в импульсе за счет схлопывания пузырей

насыщенного пара, которые играют роль разделителей отдельных полостей канала с проводящей жидкостью. Второй противоположен первому – происходит разрыв проводящей жидкости в канале за счет образования пузыря при спадающем фронте импульса тока. И тот и другой процесс приводит к вынужденному движению границы жидкости с пузырем, а это вызывает возбуждение звуковых колебаний (гидроударов, вибраций) [Богомолов, 2010]. Учитывая то, что земная кора имеет блочно-иерархическую структуру и обладает свойством самоподобия (фрактальности) [Садовский, 1979; Садовский и др., 1982] и мультифрактальности [Садовский, Писаренко, 1991; Стаховский, 2007] можно провести параллель с возможными механизмами трещинообразования на микроуровне. Динамическое (от гидроудара) разрушение вызывает коррелированное формирование первичных дефектов наноструктурного уровня [Щербаков и др., 2013]. На примере гранита (распространенной породы, слагающей земную кору) стадия коррелированного накопления дефектов сохраняется и на микроструктурном уровне. На макроскопическом уровне (отколы, магистральные трещины) самоорганизация при разрушении или отсутствует или является незначительной при сравнительно малом количестве крупных кластеров дефектов [Щербаков и др. 2013].

В условиях, когда еще не полностью решен вопрос о механизмах воздействия электрозондирований на сейсмичность, и с учетом свойств самоподобия геосреды представляют интерес лабораторные эксперименты на нагруженных породных образцах. В этих экспериментах с воздействием 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). Подобные эксперименты проводились в ИФЗ РАН, ОИВТ РАН и НС РАН в конце 90-х годов и в начале нашего века. В наибольшей степени был исследован вопрос о влиянии электромагнитных полей на накопление дефектов (фактически, неупругую составляющую деформации) по данным акустической эмиссии образцов горных пород. Наиболее важные результаты этих работ обсуждаются ниже в разделе 1.3.

### **1.3. Исследования триггерного влияния ЭМ полей в экспериментах на образцах геоматериалов**

В условиях организационно-технических и экономических затруднений в реализации натуральных экспериментов для исследований электромагнитного влияния на сейсмические процессы в земной коре (всего было создано два полигона, период экспериментов с МГД-генераторами и ЭРГУ составлял более 5 лет) существенный вклад в построение адекватных физических моделей может внести лабораторное моделирование на образцах горных пород.

Моделирование открывает возможности для более глубокого изучения механизмов преобразования электромагнитной энергии в излучаемую дефектами структуры энергию упругих волн. Это возможно за счет вариаций в широких пределах свойств моделей, способов и параметров воздействий и схем нагружения, моделирующих те или иные натурные условия. Постановка лабораторных экспериментов для исследования триггерного влияния электромагнитных полей на деформирование и разрушение нагруженных образцов горных пород включала отработанные подходы испытания горных пород на реологических прессах, организацию дополнительных электромагнитных воздействий с контролем их параметров, регистрацию данных и набор статистики по сериям однотипных экспериментов.

### **1.3.1. Влияние электромагнитных полей на акустическую эмиссию образцов горных пород**

#### ***1.3.1.1. Акустическая эмиссия как метод геофизических исследований***

Начало работ по лабораторному моделированию геофизических эффектов было положено в 30-40-х годах XX века. Оберт и Дюваль [Obert, Duvall, 1942] из Американского бюро горных работ обнаружили излучение акустических волн горными породами, находящимися в напряженном состоянии, позже это явление было названо акустической эмиссией (АЭ). Последующие работы преимущественно относились к практическому применению акустоэмиссионного метода для оценки стабильности напряженных участков горных выработок. И лишь немногочисленные исследования были посвящены проблеме прогноза землетрясений и механике разрушения [Ishimoto, Iida, 1939; Suzuki, 1953, 1955]. Одними из пионерских исследований можно считать работы японского ученого [Mogi, 1962, 1962 a], в которых было проведено качественное сопоставление картин разрушения гомогенных и гетерогенных сред, полученных в лабораторных условиях, с пространственно-временным распределением главного сейсмического очага и его афтершоков. В этих работах сейсмическое событие рассматривалось с позиции хрупкого разрушения в толще земной коры. В зависимости от степени гетерогенности материала, а также расположения и формы источника напряжения менялось распределение афтершоков относительно главного очага. Протообразом формирования разрывов на лабораторном масштабе считались акты (события) возникновения или удлинения микротрещин, регистрируемые методом акустической эмиссии. Значительный вклад в методику экспериментов по регистрации АЭ и ее интерпретации в связи с моделированием сейсмического процесса внесен классическими работами Виноградова С.Д. [Виноградов и др., 1975; Виноградов, 1989]. В одной из них продемонстрирована существенная роль условий на берегах трещины (наличие или отсутствие неоднородностей) в формировании излучаемого сейсмоакустического сигнала (его спектр, сейсмический момент и магнитуда) [Vinogradov,

1978].

В работах [Ohnaka, Mogi, 1981, 1982; Scholz, 1968 и др.] была продемонстрирована стадийность деформирования горных пород по данным о росте активности акустической эмиссии, а также ее частотным характеристикам. Обнаружена закономерность уменьшения  $b$ -value (угла наклона амплитудного распределения сигналов АЭ) при увеличении напряжения и приближении образцов к разрушению. Акустическая эмиссия, выступающая в роли индикатора дефектообразования (неустойчивости), может также служить и своеобразным рычагом – способом управления деформационным режимом при помощи создания обратной связи – поддержания постоянного уровня активности АЭ [Lockner et al., 1991; Smirnov et al., 1995; Kuksenko et al., 2005]. При такой постановке экспериментов разрушение образцов происходит по двухстадийному механизму с формированием одного очага разрушения [Kuksenko et al., 1996]. В продолжении указанных работ, авторами [Куксенко и др., 2011 а] был проведен сравнительный анализ развития дефектной структуры в различных условиях деформирования образцов гранита (сжатие сухого образца, водонасыщенного и скольжение по готовому разлому).

Характерной особенностью перечисленных работ является детальное изучение процесса деформирования образцов горных пород при единственном управляющем параметре – механической нагрузке – в постановке экспериментов, как с простым одноосным сжатием, так и в случае сложного напряженного состояния при неравенстве главных напряжений  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Первыми экспериментами, в которых помимо сжимающей нагрузки было применено дополнительное воздействие, были эксперименты с вибрациями и упругими импульсами (ударами) [Садовский и др., 1981; Мирзоев и др., 1991; Соболев, Пономарев, 2003; Куксенко, 2003]. Было продемонстрировано стимулирующее влияние этих возмущений на прирост деформации и акустическую эмиссию.

### **1.3.1.2. Моделирование электромагнитных воздействий на геоматериалы методом акустической эмиссии**

Первые результаты исследования электромагнитного влияния на акустическую эмиссию модельных образцов были получены в геофизической обсерватории “Борок” Института физики Земли РАН на сервоуправляемом прессе – электрогидравлической системе INOVA [Соболев, Пономарев, 2003]. Эксперименты выполнены на образцах, приготовленных из бетона с примесью кварцевого песка («пьезоэлектрические») и диабазового песка («непьезоэлектрические»), которые 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  $\dot{\epsilon} = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ .

В течение заданного промежутка времени на образец действовало переменное электрическое поле. Несмотря на то, что приращение (отклик) числа сигналов АЭ нагружаемых образцов при возбуждении ее ЭМ полем составило порядка 1% от исходного уровня до воздействия (рисунок 1.16), обнаруженная тенденция увеличения акустической активности оказалась статистически значимой [Соболев, Пономарев, 2003].

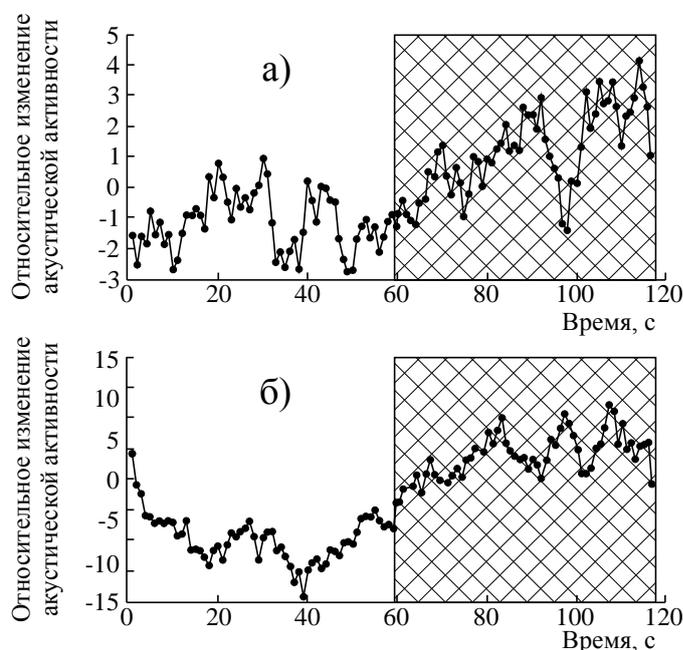


Рисунок 1.16 – Изменение акустической активности при переходе от фазы покоя (1-59 с) к фазе инициирования электрическими импульсами (60-118 с) частотой 250 Гц (а) и 2.5 кГц (б), согласно [Соболев, Пономарев, 2003]. Модель с диабазовым песком.

Несколько позднее большой цикл исследований по этой тематике был проведен в Научной станции РАН на образцах горных пород с различными физико-химическими и реологическими свойствами (обзор всех результатов в [Богомолов и др., 2011]). С учетом того, что триггерный эффект электроимпульсов был достоверно установлен для локальной сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона, в качестве материалов для испытаний были выбраны горные породы, залегающие в области проведения электромагнитных зондирований. Спектр изученных материалов достаточно широк: как искусственные (бетон, керамика), так и горные породы магматического (граниты, гранодиориты, габбро) и метаморфического происхождения (кварцит), а также осадочных пород (галит). Стоит отметить, что для серий образцов гранита, габбро, мрамора и т.п., изготовленных из пород одних и тех же месторождений, достигается лучшая воспроизводимость характеристики нагружения ( $\sigma$ – $\varepsilon$  характеристики) при одноосном сжатии [Куксенко, 1986] по сравнению с искусственными материалами (цементно-песчаные смеси). 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 внимание было уделено образцам магматических горных пород, для которых

исследован эффект электрочувствительности материалов в зависимости от величины сжимающего напряжения и параметров источников ЭМ полей. На образцах гранитов, гранодиоритов и габбро было продемонстрировано, что активность АЭ, обусловленная воздействием ЭМ поля, проявляется при значениях осевого сжимающего напряжения выше 0.7 от разрушения [Закупин и др., 2006, 2006 а; Bogomolov, Zakupin, 2008]. Авторы отмечают, что начало электромагнитных эффектов совпадает с переходом к дилатансионной стадии деформирования. Вариации усредненной активности АЭ при внешних воздействиях отчетливо выделялись визуально на временных графиках (рисунок 1.17), а с применением статистического анализа временных рядов стимулирующий эффект электроимпульсов стал бесспорным [Закупин и др., 2006; Богомолов и др., 2011].

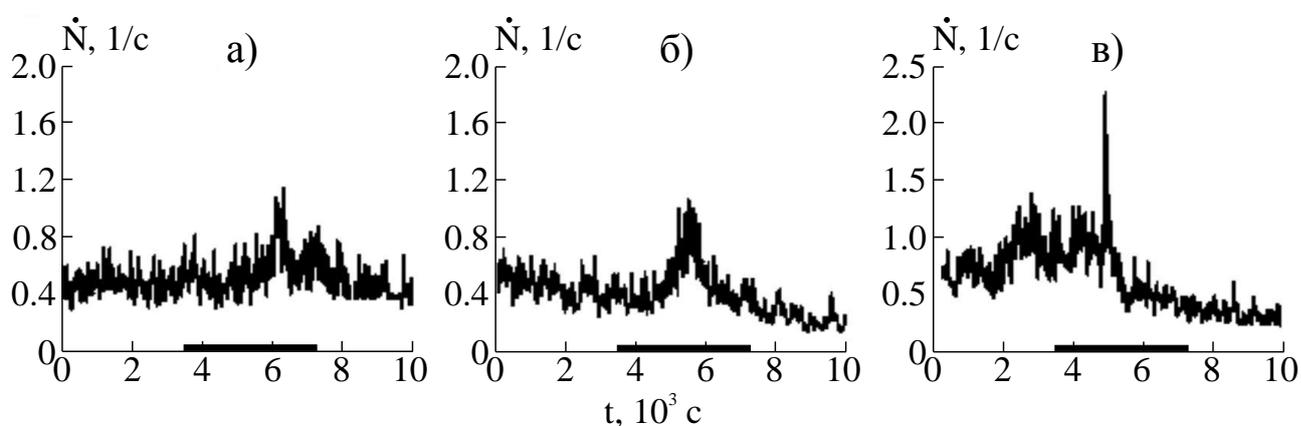


Рисунок 1.17 – Активность АЭ сухого образца гранодиорита при нагрузках: а – 38 т (86% от разрушения); б – 40 т (91% от разрушения); в – 42 т (95% от разрушения), согласно [Закупин и др., 2006]. Воздействие во всех случаях – импульсы Г5-54 с амплитудой 55 В, частотой 2 кГц, длительностью 20 мкс.

При дальнейшем изучении триггерных электромагнитных эффектов в ИТЭС 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 равен  $K_{МЭ}=2.85 \cdot 10^{-2}$  [Авагимов и др., 2006]. Для бетонных образцов с включениями корунда или керамической крошки из двуокиси циркония был рассчитан минимальный уровень энергии триггерного воздействия  $e_{тр}$ , который нелинейно зависит от накопленной потенциальной энергии  $\Pi$ , соответствующей уровням нагрузкам  $k_p$  от 0.3 до 1.0 ( $k_p$  – отношение текущей нагрузки к разрушающей, рисунок 1.18). Полученное соотношение  $k_{тр}=e_{тр}/\Pi$  составило величину порядка  $10^{-7} - 10^{-8}$  для образцов с различными механофизическими свойствами [Авагимов и др., 2008, 2011].

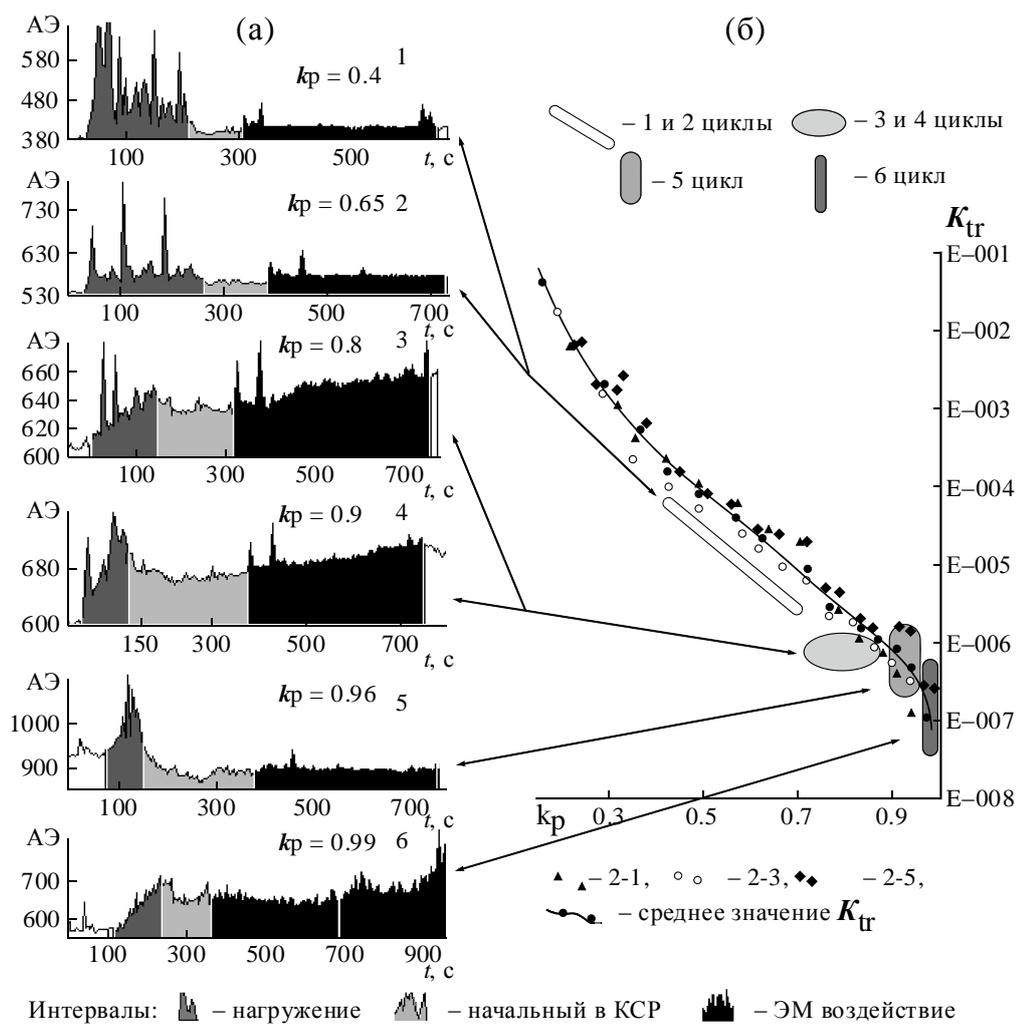


Рисунок 1.18 – Распределения соотношения  $K_{tr}$  в зависимости от  $k_p$  по данным модельных образцов 2-1, 2-3, согласно [Авагимов и др., 2011].

На рисунке 1.18 а, 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 аргументировано, что внешнее электровоздействие является эффективным инструментом для снижения структурных напряжений только на конечном этапе линейного распределения  $K_{tr}$  (рисунок 1.18 б) [Авагимов и др., 2011].

Упомянутые ранее результаты стимулирования движения дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах при совместном действии электрического и магнитного полей, полученные авторами [Альшиц и др., 1998; Урусовская, 2000] побудили сотрудников НС РАН провести подобный эксперимент на образцах гранита Уэстерли (США) [Zakupin et al., 2009]. Источником магнитного поля вместо магнита, как в работах [Альшиц и др., 1998; Урусовская, 2000], служила катушка индуктивности, на которую подавались электрические импульсы.

Электрическое поле создавалось при помощи электродов, прижатых к боковым граням образца, так что направления вектора индукции магнитного поля  $B$  и вектора напряженности электрического поля  $E$  были перпендикулярны друг другу. Такой вид воздействия авторы назвали термином «скрещенные» ЭМ поля. При нагрузке 0.85 от разрушения авторы провели сравнение откликов на скрещенные ЭМ поля и тестовую механическую пригрузку, равную ( $4 \cdot 10^{-3}$  от приложенного усилия, рисунок 1.19 а). Отклик акустической эмиссии на скрещенные ЭМ поля оказалась больше по амплитуде отклика АЭ на тестовую пригрузку. А длительность отклика на воздействие скрещенных ЭМ полей была в 14.7 раза больше (было зарегистрировано последствие ЭМ поля), чем в случае отклика на механическую пригрузку [Zakupin et al., 2009]. Анализ амплитуд зарегистрированных сигналов АЭ показал, что в случае активизации АЭ при механической пригрузке и ЭМ воздействии соотношение условно «крупноамплитудных» и «слабоамплитудных» сигналов было практически равным. Однако спад активности АЭ после отклика на скрещенные ЭМ поля характеризуется резким уменьшением количества «слабых» сигналов практически до нуля [Zakupin et al., 2009].

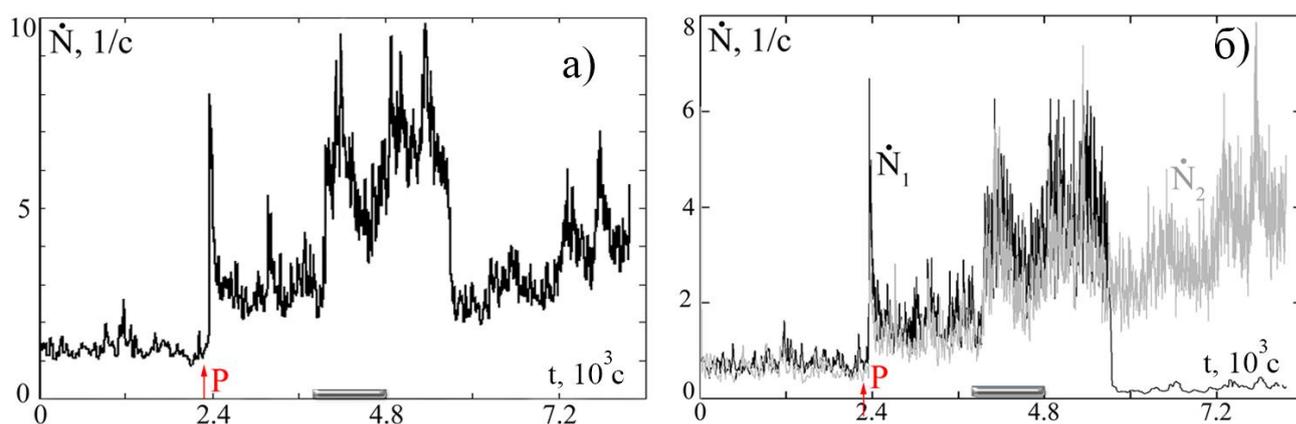


Рисунок 1.19 – Временные зависимости активности АЭ: а – активность всех зарегистрированных сигналов, б – активности сигналов «слабоамплитудных» (черная кривая,  $\dot{N}_1$ ) и «крупноамплитудных» (серая кривая,  $\dot{N}_2$ ) согласно [Zakupin et al., 2009]. Серая линия снизу – интервал воздействия, стрелка и буква P – механическая пригрузка.

### ***1.3.1.3. Случаи особой постановки эксперимента с воздействием электромагнитного поля***

В ряде экспериментов для приближения условий нагружения образцов мрамора на рычажных прессах к натурным (медленному росту напряжения при подготовке очага землетрясения) воздействие ЭМ полем проводилось в период нарастающей нагрузки [Zakupin et al., 2012 а; Zakupin et al., 2012 б].

Использовались различные источники воздействия: электрические импульсы конденсаторного разрядника с крутым фронтом нарастания напряжения порядка 1 мкс и

амплитудой 800 В; импульсы генератора Г5-54 с крутизной фронта нарастания импульсов не более 0.15 мкс, амплитудой 45-50 В и частотой 3 кГц; магнитное поле, создаваемое катушкой индуктивности с индукцией порядка  $\sim 0.004$  Тл у оси катушки. Показано, что как реализация по отдельности воздействия ЭМ поля от того или иного источника, так и комбинация нескольких источников вызывает существенные изменения в акустической эмиссии, а также осевой и поперечной деформации (рисунок 1.20).

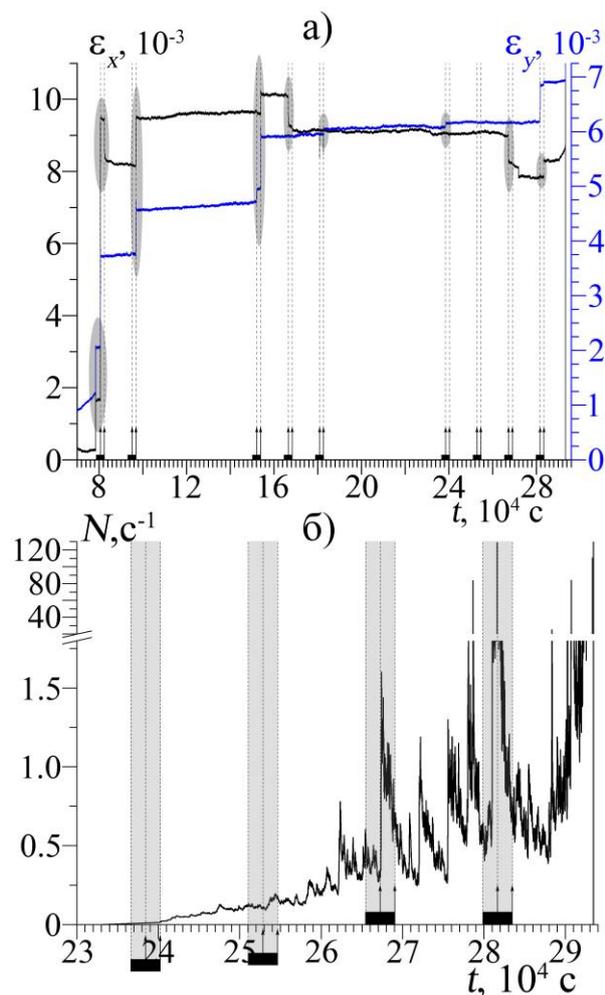


Рисунок 1.20 а – Изменения деформации образца мрамора в поперечных сжатии направлениях (X-компоненты и Y-компоненты деформации) от начала нагружения и до разрушения, б – активность АЭ (вырезка вблизи разрушения), согласно [Zakupin et al., 2012a].

В экспериментах [Лапшин и др., 2016] исследовалось температурно-стимулированное усиление активности АЭ при прохождении электрического тока через флюидонасыщенные образцы песчаника в постановке с гальванической связью электродов с образцом. В периоды прохождения тока также происходило значимое увеличение объемной деформации образцов. Полученные оценки температурного нагрева порядка  $70^{\circ}\text{C}$  позволили сделать вывод, что акустоэмиссионная активизация вызвана температурным расширением флюида в порах и трещинах образца [Лапшин и др., 2016]. В постановке с электростатическим полем, создаваемым разностью потенциалов на электродах, при отсутствии гальванической связи электродов с образцом не наблюдалось усиления акустической эмиссии.

### 1.3.2. 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, на данный момент мировым научным сообществом признается более актуальной модель неустойчивого скольжения, “stick-slip” [Соболев, 1993; Scholz, 1998]. Этот подход начал развиваться в 60-х годах XX века параллельно с “объемной” дилатантно-диффузной моделью очага, предложенной тем же автором (Ch.H. Scholz). Модель “stick-slip” базировалась на упрощенном представлении, что очаг землетрясения является результатом неустойчивой подвижки по поверхностям двух контактирующих блоков [Brace, Byerlee, 1966; Scholz, 1998]. Эта модель принимает во внимание сложный характер зависимости внутреннего трения от скорости и параметров состояния поверхностей, включающий интервал снижения трения при росте скорости относительного перемещения блоков. В лабораторных условиях модель “stick-slip” реализуется при помощи специальных пружинно-блочных установок – слайдеров, – имитирующих прерывистое скольжение по разлому [Кочарян, Новиков, 2015].

В работах [Chelidze et al., 2002, 2004; Chelidze, Lursmanashvili, 2003] описаны эксперименты по воздействию электромагнитного поля на проскальзывание контактирующих блоков. Особенно нагляден эксперимент с простейшим слайдером – соскальзывание одного из блоков по наклонной плоскости другого блока, стимулированное электрическими импульсами [Chelidze et al., 2002]. В качестве материалов блоков (верхний, соскальзывающий и нижний, опорный) авторы использовали стекло, базальт, лабрадорит и гранит. Оба блока были выполнены из одного материала. Получены критические значения угла наклона опорной поверхности для реализации соскальзывания верхнего блока. При уменьшении угла наклона опорного блока на  $0.1-2^\circ$  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 тот факт, что влияние ЭМ поля было зафиксировано и на материалах, не обладающих пьезоэлектрическими свойствами, авторы [Chelidze et al., 2002, 2004] приходят к мнению, что пьезоэлектрический эффект не является определяющим механизмом действия ЭМ поля, а основную роль играют пондеромоторные силы.

В другой постановке [Chelidze, Lursmanashvili, 2003; Chelidze et al., 2016] при тяговом волочении верхнего блока по неподвижному опорному блоку был обнаружен эффект синхронизации микроподвижек с импульсами ЭМ поля, нормально направленного 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. Согласно [Chelidze, Lursmanashvili, 2003; Chelidze et al., 2003], 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 [Chelidze et al., 2004; Novikov et al., 2017; Кочарян, Новиков, 2015; Кочарян и др., 2015].

В работе [Novilov et al., 2017] на слайдере была подтверждена возможность инициирования макроподвижки блока импульсами тока, протекающего вдоль модельной разломной зоны (рисунок 1.21). Резкая подвижка блока была зарегистрирована в области субкритического состояния системы со сдвиговыми напряжениями 0.98-0.99 от максимума. Определен минимальный необходимый уровень плотности тока воздействия, равный 20 А/м<sup>2</sup> для реализации подвижки [Novikov et al., 2017].

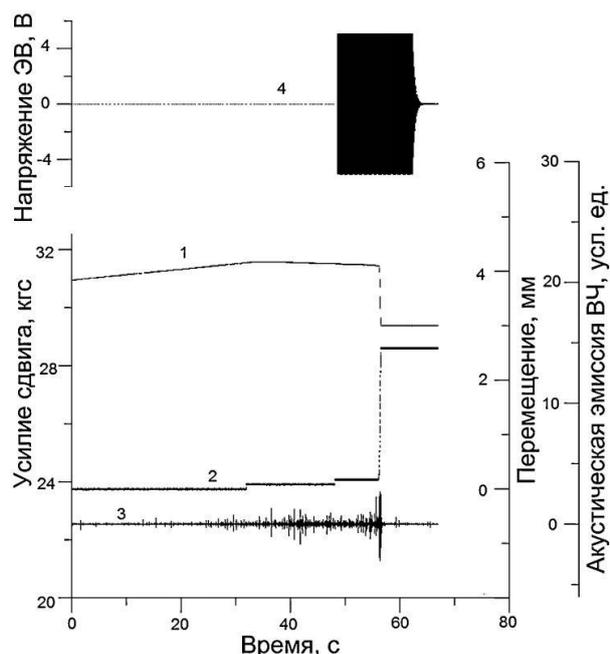


Рисунок 1.21 – Изменение параметров пружинно-блочной установки во время подготовки и инициирования резкой подвижки блока электрическим воздействием (лабораторного «землетрясения»), согласно [Novilov et al., 2017]. Условные обозначения: 1 – усилие сдвига подвижного блока, 2 – перемещение подвижного блока, 3 – высокочастотная акустическая эмиссия, 4 – напряжение электрического воздействия (ЭВ).

При другой постановке экспериментов в работах [Mugele et al., 2005; Arakawa et al.,

2003; Petrenko, 1994, 2003; Petrenko, Whitworth, 2002] 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 удлинняются и растекаются вдоль электродов – наблюдается увеличение смачиваемости поверхности (электросмачиваемость) [Mugele et al., 2005]. При использовании в качестве неподвижной подложки льда 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 (рисунок 1.22 из [Arakawa et al., 2003]). Электрическое поле стимулирует заполнение кристаллами льда пространства у границы раздела метал\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 межграничные пузырьки, нарушающие целостность граничного слоя, что несколько 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, исследования влияния электрических импульсов на трение (сцепление) контактирующих поверхностей имеет свои особенности. Их проведение может считаться самостоятельной задачей (как и дальнейшие эксперименты на цельных образцах, относящиеся к обсуждаемой теме).

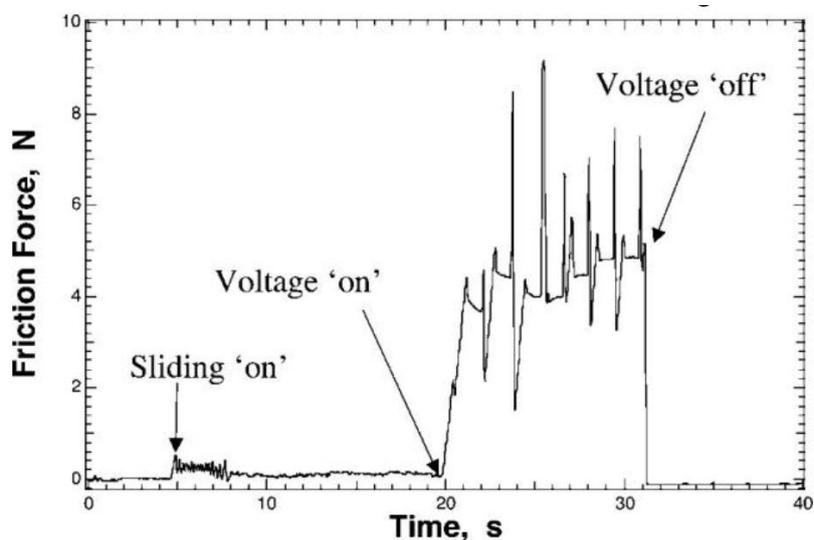


Рисунок 1.22 – Запись силы трения образца из нержавеющей стали, скользящего по ледовой подложке. Величина постоянного напряжения  $U=2$  кВ, температура  $-14^{\circ}\text{C}$ .

### 1.3.3. Физические основы реакции неупругой деформации геоматериалов на воздействие электромагнитных полей

#### 1.3.3.1. Электропластический эффект

Известно, что физико-механические свойства твердых тел определяются упругими и неупругими процессами, протекающими на различных структурно-иерархических уровнях: атомарном, дислокационном, мезоструктурном и макроскопическом. Рассмотренные выше эффекты электромагнитного возбуждения сейсмических и акустоэмиссионных сигналов проявляются на масштабных уровнях двумерных (дислокации) и трехмерных структурных дефектов (двойники, зерна, границы зерен, микротрещины) [Hardy, 2003]. Вместе с тем, с учетом двухстадийной модели разрушения твердых тел [Kuksenko, 1996] и недавним экспериментальным результатам [Дамаскинская, Кадомцев, 2015], можно ожидать первоначальной реализации электромеханических и магнитомеханических явлений и эффектов 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). Эффект Дьюлаи-Хартли связан с возникновением вакансий или атомов в междоузлии при встрече в одной плоскости скольжения краевых или смешанных дислокаций, имеющих ступеньки. Эффект Степанова обусловлен захватом вакансий движущимися дислокациями. Детальный обзор ранних работ, посвященных этим эффектам в щелочно-галогидных кристаллах представлен в [Урусовская, 1968; Тяпунина, Белозерова, 1988; Aaronson, Sanday, 1995].

Подвижность дислокаций в кристаллах NaCl и некоторых мелкозернистых керамиках (MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZrO<sub>2</sub>), помещенных в электрические поля напряженностью  $E \sim 10^2\text{-}10^4$  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-галогидных кристаллов были проведены в работах Зуева Л.Б. (обобщенных в [Зуев, 1990; 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  $E \sim 10^3\text{-}10^4$  кВ/м. Наблюдения существенного увеличения 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 ( $T > 0.5 T_{\text{пл}} \approx 400$  °C) 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZrO<sub>2</sub> отмечено обратимое ускорение деформации, вызванное увеличением скорости скольжения границ зерен, управляемым диффузией катионов не через решетку, а сквозь границы зерен [Conrad, 2000, 2002]. Полученные результаты позволили выделить определяющий механизм электропластического эффекта – уменьшение электрохимического потенциала облака заряженных вакансий вблизи границ зерен [Conrad, 2002], который можно определить:

$$\mu_{\alpha}^* = \mu_{\alpha}^0 + Z_{\alpha} e \varphi_i - \sigma \Omega_{\alpha} - Z_{\alpha} e \varphi_a, \quad (1.3),$$

где  $\varphi_a = E d_{sc}$ , а  $\mu_{\alpha}^*$  – электрохимический потенциал ионных компонентов  $\alpha$ ,  $\mu_{\alpha}^0$  – химический потенциал в нормальном состоянии,  $Z_{\alpha}$  – валентность заряженного иона,  $e$  – амплитуда заряда иона в Кулонах,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_a$  – локальные внутренний и внешний электропотенциалы,  $\sigma$  – приложенное механическое напряжение,  $\Omega_{\alpha}$  – атомный объем,  $d_{sc}$  – 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 также следующими механизмами. При тепловом рассеивании электронов (локальный Джоулев нагрев), происходит ослабление химических связей. Направленное движение электронов (электронный ветер) воздействует на дислокационные линии и создает 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 спиновых

эффектов, [Molotskii, 2000], роль которых подробно будет рассмотрена ниже при обсуждении магнитоэластического эффекта. Учитывая, что величина наведенного тока магнитного поля  $H$  максимальна на поверхности проводника, также как и длина свободных сегментов дислокаций (расстояние между стопорами)  $l_c$  максимальна на поверхности, то магнитное поле увеличивает их длину [Molotskii, 2000], открепляя тем самым дислокации от поверхностных стопоров:

$$l_c(H) = l_{c0} \left( 1 + \frac{H^2}{H_0^2} \right), \quad (1.4),$$

где  $l_{c0}$  – длина свободного сегмента в отсутствии магнитного поля, а  $H_0$  – микроскопический порог магнитоэластичности, при котором происходит открепление дислокаций от стопоров. Переписав (1.4) с учетом соотношения для плотности тока проводника с круглым сечением радиуса  $r$  ( $j_0 = 2H_0/r$ ), можно получить выражение для падения напряжения  $\Delta\sigma$  вследствие пластической деформации в зависимости от плотности тока  $j$ , протекающего через проводник:

$$\Delta\sigma(j) = \sigma^* \frac{j^2}{j^2 + j_0^2}, \quad (1.5),$$

где  $\sigma^*$  – эффективное напряжение – разница между приложенным напряжением и величиной дальнодействующих внутренних напряжений, а  $j_0$  – плотность тока, соответствующего значению  $H_0$ , при котором наблюдается магнитоэластический эффект [Molotskii, 2000]. Выражение (1.5) представляет собой вклад магнитоэластически индуцированных спиновых эффектов в электроэластичность кристаллов.

В экспериментах, проведенных в ФТИ им. Иоффе, показано, что для некоторых диэлектрических материалов, не обладающих пьезоэлектрическими свойствами (стекло, мрамор), механоэлектрические и электромеханические взаимосвязи 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 электрический потенциал [Куксенко и др., 1997; Куксенко, Махмудов, 2004]. По экспериментальным данным была проведена оценка энергии активации движения носителей зарядов. Полученное значение  $\sim 0.1$  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. 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:  $\theta^* = \Delta\varphi_m/\Delta P$ , где  $\varphi_m$  – электрический потенциал, вызванный механической нагрузкой,  $P$  – нагрузка. Таким образом, абсолютные значения электромеханического модуля  $\theta^*$  (В/Па) зависят от характеристик регистрирующего оборудования и условий эксперимента, а величина  $\theta^*$ , оцененная по графику из работы [Куксенко, Махмудов, 2004] порядка 0.05. А по относительному изменению модуля  $\theta^*$  можно оценить влияние механической нагрузки на механоэлектрополяризацию при одновременной электрополяризации материала, [Куксенко, Махмудов, 2004].

### 1.3.3.2. Магнитопластический эффект

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

Начало систематических исследований в этом направлении было положено в Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН с работы [Альшиц и др., 1987], в которой было 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  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $B$  – индукция магнитного поля,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\omega$  – циклотронная частота,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $\omega_c$  – 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) (обзор в [Альшиц и др., 2003, 2017; Головин и др., 2004]) было показано, что величина пробега дислокаций  $l$  достигает сотен микрометров и 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:

$$l = l_0 + k^* B^2 t, \quad (1.6),$$

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 МП также зависит от взаимной ориентации линии дислокации  $l$ , ее вектора Бюргерса  $\mathbf{b}$  и вектора индукции  $\vec{B}$ . В случае дислокаций, ориентированных параллельно полю, пробег равен нулю и достигает максимума при перпендикулярной ориентации линии дислокации и вектора  $\vec{B}$  [Альшиц и др., 1990]. Направление перемещения дислокаций не зависит от смены знака магнитного поля, что позволило авторам исключить возможность объяснения эффекта магнитопластичности действием пондеромоторных сил магнитного поля или создаваемого вихревого электрического поля.

Магнитное поле в сочетании с активным деформированием при  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  (также как и при  $\dot{\sigma} = \text{const}$ ) активизирует дополнительные системы скольжения, что проявилось в уменьшении предела текучести  $\sigma_y$  (в 1.5 раза), а также значений напряжения и деформации на каждой стадии деформирования [Урусовская и др., 1997; Альшиц и др., 2000]. Подобные макроскопические проявления магнитопластичности 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:

$$\sigma_y = (U/\gamma) + [(kT/\gamma)\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (1.7),$$

где  $U$  – энергия активации при отсутствии поля  $B=0$ ,  $\gamma$  – активационный объем,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. Выражение (1.7) по форме аналогично уравнению С.Н. Журкова из кинетической концепции прочности [Zhurkov et al., 1984], причем  $\sigma_y$  сопоставляется с напряжением, при котором частота термофлуктуаций может обеспечить реальную скорость дислокаций.

Влияние приложенного магнитного поля проявляется выше некоторого порогового уровня  $B_c$ , при котором время магнитостимулированного открепления дислокации от центра закрепления  $\tau_{dp} = k^* B^{-2}$  станет меньше времени его термоактивационного преодоления,  $\tau_{th} = l/\dot{\epsilon}$ :

$$\tau_{dp} = k^* B^{-2} \leq l / \dot{\epsilon} \quad (1.8)$$

Отсюда легко понять, что пороговое поле будет пропорционально  $B_c \sim \sqrt{\dot{\epsilon}}$ , 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 с экспериментальными кривыми порог магнитопластического эффекта авторами определен в рамках предложенной кинетической модели следующим выражением:

$$B_c = \begin{cases} B_c^{(0)}, & \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_c \\ B_c^{(0)} \sqrt{\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_c}, & \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_c \end{cases}, \quad (1.9)$$

где  $\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_0 \tau_0 / \tau_{dp}^{\max}$  и  $\tau_{dp}^{\max} = k^* B^{(0)-2}$ .

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; Тяпунина и др., 2003]. 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 авторы подразумевают 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, англ. – *pinning*), приводящей к депиннингу дислокации под действием внутренних напряжений в кристалле. Время спиновой эволюции (время депиннинга  $\tau_{dp}$ ) в системе примесь-дислокация всегда должно быть мало по сравнению со временем  $\tau_{s-1}$  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 Бучаченко А.Л. [Бучаченко, 2006; 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).

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 и являются подвижными 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  $\text{Ca}^{2+}$  превращаются в магнитоактивные  $\text{Ca}^+$ . Авторы [Альшиц и др., 2017] предлагают следующее объяснение: на краю лишней плоскости возле ядра дислокации под действием огромного давления происходит выталкивание иона  $\text{Na}^+$  (с образованием его отрицательно заряженной вакансии  $V_{\text{Na}}^-$ ) на свободное место вблизи иона  $\text{Ca}^{2+}$ . Ближний к образованной вакансии  $V_{\text{Na}}^-$  анион  $\text{Cl}^-$  отдает электрон иону  $\text{Ca}^{2+}$  с образованием магнитоактивного катиона  $\text{Ca}^+$ . Предполагается [Альшиц и др., 2017], что далее ставший нейтральным атом  $\text{Cl}^0$  и соседний анион  $\text{Cl}^-$  образуют в ядре дислокации ковалентный V-центр – заряженную молекулу  $\text{Cl}_2^-$ . Таким образом, в ядре дислокации появляется магнитоактивный комплекс  $\text{Ca}^+\text{Cl}_2^-$ , содержащий радикальную пару спинов, магнитное превращение которой завершается реакцией  $\text{Ca}^+ + \text{Cl}_2^- = \text{CaCl}_2$ . Новая ковалентная молекула является новым центром закрепления  $\text{CaCl}_2$ , 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 предложенной авторами S-T-модели [Molotskii, Fleurov, 1997; Molotskii, 2000; Molotskii, Flerov, 2000].

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

$$v = \frac{2w}{\tau_{dp} \sqrt{2bC_V}} \quad , \quad (1.10)$$

где  $w = n_{\text{act}}/n_{\text{tot}}$  – вероятность того, что данный стопор является центром анзиппинга,  $C_V$  – 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 пробегов дислокаций,  $\Delta l$ , (рисунок 1.21) [Альшиц и др., 2017]. Видно, что на кривой пробегов (треугольники) имеются горизонтальные участки, свидетельствующие о неподвижности (остановке) дислокации, что соответствует картине неизменности позиции ямки травления на поверхности, не охваченной волной анзиппинга. Судя по рисунку 1.21, число центров анзиппинга (пропорциональное  $\Delta l$ ) также невелико, порядка 10%, это также согласуется с оценками, проведенными авторами по экспериментальным результатам [Альшиц и др., 2017].

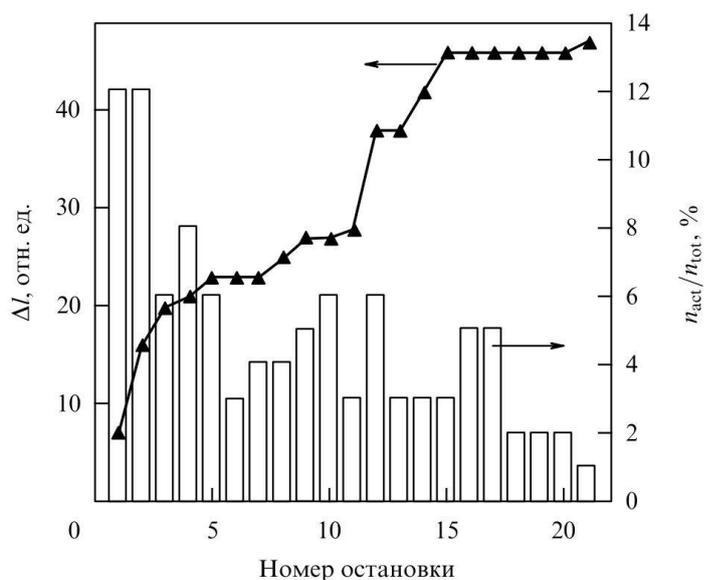


Рисунок 1.21 – Найденные из моделирования последовательные положения дислокации при ее остановках, требующих включения магнитного поля для продолжения движения (левая ось ординат), и относительное число активных центров, преодолеваемых благодаря магнитному полю (правая ось ординат), согласно [Альшиц и др., 2017].

### 1.3.3.2. Особенности совместного воздействия электрического и магнитного полей

В случае совместного действия электрического ( $E = 0.25-1.5$  кВ/м) и магнитного полей ( $B = 0.05-0.3$  Тл) как при активном деформировании образцов с постоянной скоростью деформации  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  [Урусовская и др., 2000], так и при отсутствии механической нагрузки [Альшиц и др., 1998], был обнаружен более сильный магнитопластический эффект в кристаллах NaCl. В этих экспериментах вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$  был направлен перпендикулярно оси нагружения кристалла, вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  – параллельно оси. Таким образом, была реализована ситуация, в которой поток энергии от источников полей  $B$  и  $E$ , т.е. вектор Умова-Пойнтинга  $\vec{S}$  (1.2), проходил через материал испытываемого образца. Было обнаружено, что характерное значение пробега дислокаций достигало сотен микрон (т.е. доли мм), так что можно говорить о макропроявлениях влияния скрещенных (перпендикулярных) электрического и магнитного полей.

Электрическое поле само по себе не обеспечивает открепления дислокаций от точечных дефектов в объеме кристалла, но приводит к увеличению на дислокации активных центров Ca+

[Альшиц и др., 2017]. Авторы предполагают, что происходит термофлуктуационный перескок натриевых вакансий с диполей  $\text{Ca}^{2+}\text{V}_{\text{Na}}^-$  на край экстраплоскости дислокации с одновременным изменением заряда:  $\text{Ca}^{2+}$  превращаются в магнитоактивные  $\text{Ca}^+$ . В результате чего при росте напряженности поля  $E$  экспоненциально растет и число активных центров анзиппинга, а средняя длина между центрами анзиппинга убывает [Альшиц и др., 2017]. Величина пробега дислокации описывается сложной нелинейной зависимостью от приложенного поля  $E$  (рисунок 1.22). Поля напряженностью  $E < 5 \text{ кВ м}^{-1}$  линейно увеличивают пробег дислокации, а при увеличении до  $E < 20 \text{ кВ м}^{-1}$  значение нормированного среднего пробега дислокаций увеличивается по экспоненте, после чего при  $20 \text{ кВ м}^{-1} < E < 25 \text{ кВ м}^{-1}$  наступает «насыщение», см. рисунок 1.22 из работы [Альшиц и др., 2017].

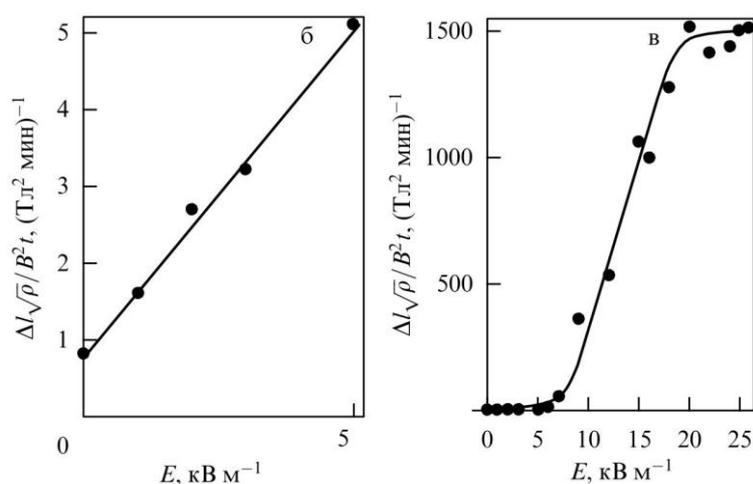


Рисунок 1.22 – Зависимость нормированного среднего пробега дислокаций от напряженности электрического поля  $E$  при его низких (а),  $E < 5 \text{ кВ м}^{-1}$  и принадлежащих более широкому интервалу,  $E < 25 \text{ кВ м}^{-1}$ , величинах, согласно [Альшиц и др., 2017].

Возрастание при совместном действии магнитного и электрического полей коэффициентов деформационного упрочнения  $\Theta_{II}$  авторы [Урусовская и др., 2000] связывают со стимулированием роста плотности дислокаций в соответствии с формулой:

$$\Theta_{II} \sim Gb\sqrt{\rho}, \quad (1.11)$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $b$  – вектор Бюргерса,  $\rho$  – плотность дислокаций.

С ростом напряженности электрического поля  $E$  отмечается снижение предела текучести  $\sigma_y$  и последующее его насыщение при  $E \geq 1-1.5 \text{ кВ/м}$  (крутизна и амплитуда спада  $\sigma_y$  линейно зависят от величины  $B$ ), что наблюдается и при варьировании скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  (скорость и амплитуда падения тем больше, чем ниже  $\dot{\epsilon}$ ). В отсутствие же магнитного поля наблюдение электрической стимуляции подвижности дислокаций в тех же кристаллах  $\text{NaCl}$  требует гораздо более сильных полей  $E \geq 10^3 \text{ кВ/м}$ .

Наряду и со свойствами магнитоэластического эффекта в случае скрещенных полей и объяснением его механизма, для целей настоящей диссертации представляется принципиально

важным один из выводов [Урусовская и др., 2000], что влияние полей  $B$  и  $E$  может быть обнаружено просто по  $\sigma$ - $\varepsilon$  характеристикам, или нагрузочным кривым при испытаниях на одноосное сжатие с линейно нарастающей нагрузкой.

Большая часть зарубежных работ посвящена изучению эффекта магнитной памяти формы различных сплавов (например, Ni-Mn-Ga – ферромагнитных сплавов Гейслера) при их мартенситных превращениях [Kostorz, Müllner, 2005; Müllner et al., 2003, 2007; Boonyongmaneerat et al., 2007]. Эффект сводится к индуцированному магнитным полем перемещению границ двойникования, а при снятии магнитного поля сохраняется новое структурное состояние.

Спиновая природа магнитоэластического эффекта нашла свое подтверждение также в экспериментах с резонансным магнитоэластическим эффектом в скрещенных постоянном,  $B$ , и переменном,  $\tilde{B}$ , магнитном полях с частотой  $\nu$  [Головин и др., 2004; Альшиц и др., 2013]. Электронный парамагнитный резонанс реализуется, когда частота переменного поля  $\nu$  соответствует зеемановскому расщеплению  $\Delta E = h\nu$  спиновых уровней в магнитном поле при условии  $B \approx B_{\text{res}}$  и

$$h\nu = g\mu_B B_{\text{res}}, \quad (1.12)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $g$  – фактор Ланде или  $g$ -фактор, определяющий отношение дипольного магнитного момента к механическому моменту. В стандартных экспериментах при  $\nu \approx 9.5$  ГГц и  $B_{\text{res}} \approx 0.3$  Тл резонансный магнитоэластический эффект возникал при перпендикулярном (скрещенном) расположении векторов индукции  $B \perp \tilde{B}$  и исчезал при  $B \parallel \tilde{B}$ . В работе [Альшиц и др., 2013] подробно изучена анизотропия резонансного магнитоэластического эффекта, когда постоянным полем  $B$  служило магнитное поле Земли  $B = B_{\text{Earth}} \sim 0.4 \cdot 10^{-4}$  Тл. Постановка эксперимента в этой работе обеспечивала ориентировку части дислокаций параллельно одному из ребер образца и всегда ортогонально обоим векторам магнитных полей. В экспериментах проводился плавный переход от случая  $B \perp \tilde{B}$  к случаю  $B \parallel \tilde{B}$ , а также изменение ориентации самого кристалла в поле Земли. Показано, что для дислокаций, ортогональных плоскости  $(B_{\text{Earth}}, \tilde{B})$ , наблюдаются наибольшие амплитуды резонансных пиков нормированных пробегов  $l\sqrt{\rho}$  (отношение среднего пробега  $l$  к среднему расстоянию между всеми дислокациями  $1/\sqrt{\rho}$ ). Для дислокаций, параллельных плоскости магнитных полей  $(B_{\text{Earth}}, \tilde{B})$  резонансные пики имеют меньшие амплитуды и более

широкие спектры [Альшиц и др., 2013]. Наиболее ярко резонансный магнитоэластический эффект проявляется при ортогональной ориентации полей  $B_{\text{Earth}} \perp \tilde{B}$  и практически исчезает при  $B_{\text{Earth}} \parallel \tilde{B}$ . Частота резонансов  $\nu_{\text{res}}$  зависит только от взаимной ориентации кристалла и поля Земли, максимум ее удовлетворяет условию:

$$\nu_{\text{res}}^{\text{max}} = g\mu_B B_{\text{Earth}} / h, \quad g \approx 2, \quad (1.13)$$

При повороте кристалла на угол  $\theta$  вокруг ребра, перпендикулярного  $B_{\text{Earth}}$ , исходный резонансный пик разделяется на два резонанса, описываемых формулой, зависящей от угла  $\theta$  [Альшиц и др., 2013]:

$$\nu_{1,2} \approx \mu_{\text{res}}^{\text{max}} \cos \theta_{1,2}, \quad (1.14),$$

$$\text{где } \theta_1 = 90^\circ - \theta, \text{ а } \theta_2 = \theta$$

Рассмотренные работы наглядно демонстрируют диапазон условий, необходимых для реализации электро- и магнитоэластичности в различных материалах. Известны также результаты эксперимента, проведенного в природных условиях (на поверхности земли вблизи озера Басс, Калифорния) на валуне, содержащем Йосемитский гранит, при разрушении которого были зарегистрированы магнитные пульсации, изменения электропроводности воздуха вокруг валуна, а также увеличение поверхностных зарядов [Bleier et al., 2010]. Магнитные пульсации и вариации электропроводности подобны ранее обнаруженным в лабораторном эксперименте [Freund et al., 2006] и при землетрясении [Blier et al., 2010].

Возможность объяснения влияния электромагнитных полей на возникновение разрывов и подвижек разных масштабов: от источников акустической эмиссии (раздел 1.3.1) до сейсмических очагов (раздел 1.2.2) с точки зрения электроэластических и магнитоэластических эффектов определяется следующими соображениями. Для многих материалов (ряд металлов, бетон, “полухрупкие” горные породы) скорость трещинообразования в определенном диапазоне напряжений и температур контролируется скоростью пластической деформации [Владимиров, 1984; Пуарье, 1988]. Для масштаба сейсмических очагов также известен подход с позиции пластической деформации геосреды [Ребецкий, 2007]. В условиях, когда скорость трещинообразования (активность АЭ) “регулируется” пластической деформацией, механизмы электроэластичности и магнитоэластичности, по-видимому, вносят существенный вклад в возникновение акустоэмиссионных откликов среды на воздействие ЭМ полей. Тем не менее, этот вопрос требует дополнительного анализа, о чем могут свидетельствовать результаты лабораторных экспериментов, проведенных в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред ИС РАН на разных модельных материалах. При обобщении результатов этих экспериментов было обращено внимание на некоторое сходство в реакции активности АЭ на

воздействие электроимпульсов с амплитудой напряженности электрического поля 1-10 кВ/м у самых различных материалов: каменной соли, бетона, пород-гранитоидов [Богомолов и др., 2011]. Отклики (прирост активности на 15-20 % с задержкой от сотен до тысяч секунд от начала воздействия) наблюдались при напряжениях одноосного сжатия больше 70% от уровня разрушения образца данной породы. Наиболее выражено сходство временных зависимостей активностей АЭ разных образцов, когда уровень их фоновой активности до воздействия ЭМ полей был примерно одинаков. Поскольку дислокационные явления весьма чувствительны к виду материала и его молекулярной структуре, примеры сходной реакции АЭ разных материалов на электроимпульсы могут указывать на наличие других механизмов, помимо электропластического и магнитопластического эффекта.

Один из возможных механизмов, описывающий взаимодействие ЭМ волн с колебаниями плотности вещества вблизи растущей трещины обсуждался в [Богомолов, 2010; Zakupin et al., 2012]. Ключевой чертой этого механизма, а, возможно, и других, является воздействие ЭМ поля на неоднородности или структуры с возбужденными степенями свободы (находящиеся в промежуточных состояниях между статикой и динамикой). Для дальнейшего исследования влияния ЭМ полей на накопление дефектов, включая уточнение роли локальных возбуждений, целесообразно использовать скрещенные электрическое и магнитное поля, обеспечивающие повторяемость вектора потока энергии. В лаборатории моделирования энергонасыщенных сред ИС РАН создан задел для испытаний образцов этого материала на рычажно-гравитационном прессе с воздействием ЭМ поля [Боровский и др., 2011; Закупин, 2011; Zakupin et al., 2012, 2012a; Мубассарова, Богомолов, 2010, 2010a; Мубассарова, Закупин, 2013; Мубассарова, 2014].

### **Выводы по главе 1**

Рассмотренные результаты многолетних исследований электромагнитного влияния на сейсмические процессы в земной коре не вызывают сомнений в достоверности наблюдаемого эффекта, тем не менее вопрос о физических механизмах, обуславливающих это влияние, до сих пор является дискуссионным. Это связано с тем, что этот эффект исследован лишь феноменологически, так как тектонические процессы, вызывающие землетрясения, относятся к чрезвычайно медленным, а непрерывные инструментальные сейсмологические наблюдения проводятся всего несколько десятилетий. Реализующиеся землетрясения за редчайшим исключением не повторяются (их механизм и энергия, а также место) в течение интервала времени, который соизмерим с длительностью наблюдений. Таким образом, из результатов натуральных наблюдений на данном этапе очень сложно получить адекватные функциональные зависимости между параметрами электровоздействия и реализуемого землетрясения.

Благодаря некоторому сходству, обнаруженному в проявлениях хрупкого разрушения и

процессах дефектообразования на самых разных масштабах длин, определенный вклад в изучение физических процессов, происходящих в глубинах земной коры, может внести лабораторное моделирование. Более чем 20-летний опыт исследований на образцах горных пород и искусственных материалов продемонстрировал существенное влияние электромагнитных полей на темп накопления дефектов. В экспериментах на образцах “электротриггерный эффект” зарегистрирован, как правило, по увеличению активности акустической эмиссии, отражающей скорость трещинообразования геоматериалов. В большинстве этих работ, в том числе рассмотренных в этой главе, не представлены данные об увеличении деформации  $\delta \epsilon$  в процессе переходов между метастабильными состояниями, который был инициирован электромагнитными полями. В этой связи остался открытым вопрос о деформационных проявлениях влияния электромагнитных полей на нагруженные геоматериалы.

С учетом вышеизложенного, для выявления основного элемента электромеханической взаимосвязи актуально получение количественных данных об изменениях компонент деформации или их скоростей. Представляет интерес постановка новой серии экспериментов на нагруженных образцах горных пород – предпочтительно мрамора как материала, сочетающего свойства пластичности и хрупкого разрушения, а также гранита – референтного материала. Для дальнейшего исследования влияния электромагнитных полей на накопление дефектов, включая уточнение роли локальных возбуждений, целесообразно использовать скрещенные электрическое и магнитное поля, обеспечивающие повторяемость вектора потока энергии. Применение усовершенствованных методов регистрации трех компонент деформации, главного напряжения и акустической эмиссии может обеспечить получение новой информации о реакции нагруженных образцов на внешнее электромагнитное воздействие. Результаты таких экспериментов, проведенных соискателем, представлены в третьей и четвертой главах данной диссертационной работы.

Представленный выше обзор состояния исследований дает основания считать актуальными и интересными для науки такие эксперименты, направленные на установление закономерности влияния электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразование в нагруженных образцах мрамора и гранита, выявление новые характеристики деформационных процессов в присутствии внешних полей на основе усовершенствованной системы измерений деформации и акустической эмиссии.

## **Глава 2. Методика лабораторного моделирования электромагнитных воздействий**

Для исследования влияния электромагнитного воздействия на прочностные и деформационные свойства горных пород важнейшим звеном является методика постановки и проведения лабораторных экспериментов, определяющая воспроизводимость и достоверность полученных результатов. Методические аспекты включают обоснование выбора типов материала для испытаний, испытательных машин, вида и режима нагружения, а также формирование комплекса электромагнитного воздействия и выбор его параметров.

### **2.1. Общая характеристика постановки экспериментов по моделированию электромагнитных воздействий. Режимы деформирования. Испытательные машины**

В постановке любого эксперимента по моделированию процесса разрушения геосреды, в том числе эксперимента с моделированием воздействий электромагнитных (ЭМ) полей на сейсмический процесс, главным вопросом является выбор режима нагружения испытываемых образцов горных пород (и как следствие выбор испытательной машины). Это обусловлено принципами лабораторного моделирования: приближением вида напряженного состояния и характера разрушения испытываемых породных образцов к состоянию массива в реальной геосреде в связи с задачей изучения проблемы вызванной сейсмичности.

В реальной геофизической среде напряженное состояние отдельного массива можно описать как неравномерное трехосное сжатие при значениях главных напряжений  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Однако при попытках реализации в лаборатории сложного напряженного состояния, на фоне которого анализируются дополнительные воздействия внешних факторов, возникают затруднения в интерпретации результатов. Действительно, регистрируемые изменения в системе при наличии большого числа изменяющихся параметров (вариаций трех компонент деформации, параметров акустической эмиссии, АЭ) могут вызываться не только ростом главного напряжения, но и изменением соотношений между  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , а также воздействием внешних полей. При этом привязка реакции материала образца к внешнему воздействию (анализ откликов) требует набора большой статистики экспериментов, что само по себе является технической и организационной проблемой.

Вместе с тем, для образцов горных пород испытание на одноосное сжатие является самым простым в технической реализации и наиболее распространенным режимом. При таких испытаниях внесение в эксперимент дополнительного фактора в виде воздействия ЭМ 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.

Пружинные установки (например, использованная в [Садовский и др., 1981]), и сервоуправляемые прессы (электрогидравлическая система INOVA, [Соболев, Пономарев, 2003]), а также установка длительных испытаний конструкции Ставрогина А.Н. [Ставрогин, Протосеня, 1985]) использовались в первых экспериментах по моделированию влияния вибро- и электровоздействий на образцы гетерогенных материалов. Каждая из упомянутых установок имеет свои ограничения: возможность проведения экспериментов только при квазипостоянном уровне нагрузки, а также падение напряжения на образцах вследствие продольной (вдоль оси сжатия) деформации последних, особенно при внешних воздействиях, которые инициируют образование микротрещин. Еще одно ограничение в сервоуправляемых прессах – это высокий уровень шума при наращивании нагрузки при помощи гидроцилиндра и, следовательно, неосуществимость регистрации акустического излучения в образце в процессе нагружения, что не позволяет судить о целостной картине процесса деформирования.

Применение испытательных машин с гравитационно-рычажной системой является одним из решений, которое расширяет возможности изучения процессов деформирования горных пород с регистрацией акустической эмиссии. По сравнению с пружинными прессами рычажные установки обладают неоспоримым преимуществом – неизменностью уровня нагрузки при осевой деформации образцов и возможностью проводить эксперименты в двух режимах – при постоянной (квазиползучесть) и нарастающей нагрузке. Отметим, что использование установок с рычажной системой в экспериментах по моделированию электромагнитного и вибрационного влияния на модельные нагруженные образцы уже показало свою эффективность [Авагимов, 2006, 2008].

В настоящей диссертационной работе использовалась рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия, которая отвечает всем методическим и технологическим условиям проведения экспериментов с регистрацией акустического излучения в испытываемых модельных образцах [Рычажная..., 2012]. Фотография рычажной установки и схема приведены на рисунке 2.1 и 2.2.

Силовая часть установки выполнена в виде системы трех рычагов 7, передающей усилие от точечной массы 8 (груза, выполненного в виде резервуара для жидкости), приложенной к крайнему рычагу на первый рычаг, т.о. нагрузка через силовой шток 6 передается образцу 3, установленному между давящей пятой 4 и верхней траверсой 2 (рисунки 2.1 и 2.2). Изменение усилия происходит за счет поступления с определенной скоростью воды в резервуар при помощи прецизионной капельной системы регулировки подачи жидкости. Применение рычажной системы, состоящей из трех рычагов, позволяет достигать на образце усилия до 30 кН.

В рычажной установке при осевом укорочении образца давящая пята 4 и силовой шток

6 под действием гравитационной силы поднимаются вслед за образцом, что влечет за собой изменение положения системы рычагов и таким образом сохраняется постоянство нагрузки с высокой точностью в течение длительных испытаний, в том числе и экспериментов на ползучесть. Данная установка позволяет проводить бесшумные испытания модельных образцов в двух режимах: с увеличивающейся с постоянной скоростью нагрузкой, варьируемой в широких пределах, и при постоянном уровне нагрузки, фиксация которой возможна в любой момент испытания.



Рисунок 2.1 – Общий вид рычажной установки [Боровский и др., 2011; Zakupin et al., 2012, 2012 a]. 1 – опорные стойки; 2 – верхняя траверса; 3 – образец горной породы, установленный для испытаний; 4 – давящая пята на сферическом шарнире со встроенным динамометром; 5 – нижняя траверса; 6 – силовой шток; 7 – система трех рычагов; 8 – резервуар для натекания жидкости (воды); 9 – силовая рама.

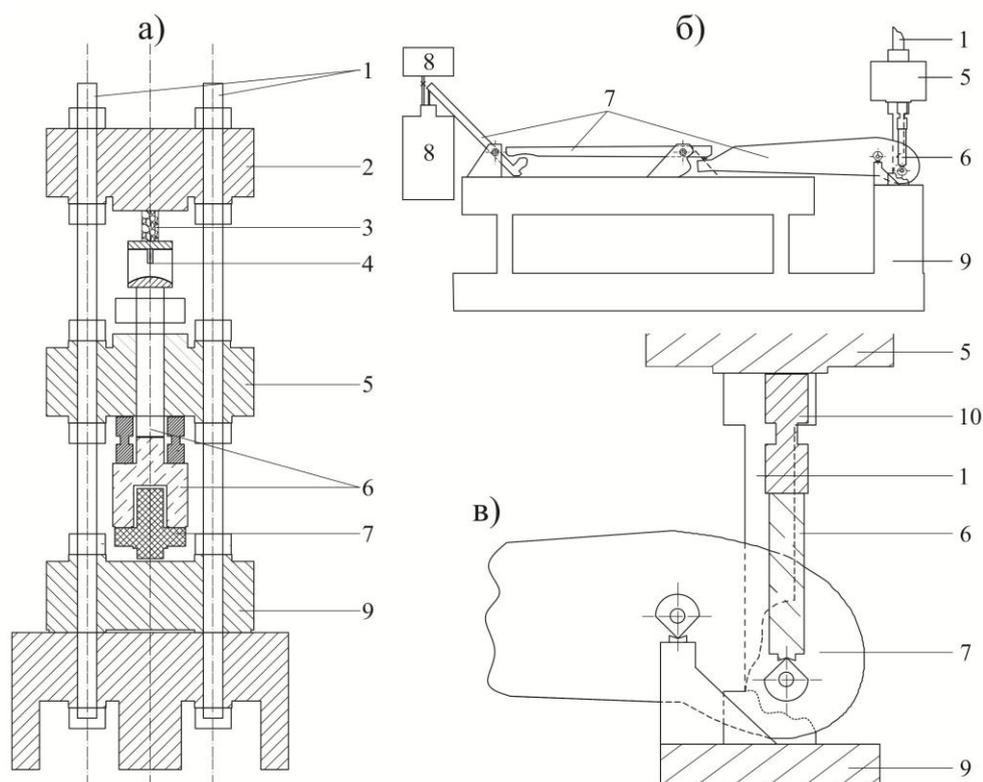


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема рычажной установки для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия согласно [Рычажная..., 2012]: а) фронтальная проекция установки; б) вид сбоку; в) вертикальный разрез части рычажной установки, где показано соединение рычага и силового штока. Условные обозначения: 1 – опорные стойки; 2 – верхняя траверса; 3 – образец горной породы, установленный для испытаний; 4 – давящая пята на сферическом шарнире со встроенным динамометром; 5 – нижняя траверса; 6 – силовой шток; 7 – система трех рычагов; 8 – резервуар для натекания жидкости (воды); 9 – силовая рама; 10 – ограничители хода.

Жесткость испытательной установки описывается следующей калибровочной характеристикой, описывающей величину продольного укорочения образца при изменении усилия (рисунок 2.3). Величина эффективной жесткости рычажной установки составляет 74 кН/мм, что позволяет проводить испытания на образцах всех типов горных пород, для которых эффективная жесткость, определяемая модулем Юнга и площадью поперечного сечения образца, на несколько порядков превышает жесткость установки (модули Юнга для магматических и метаморфических горных пород имеют порядок  $10^4$  МПа).

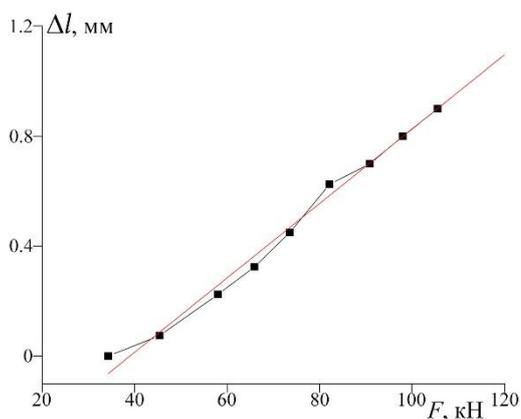


Рисунок 2.3 – Зависимость величины продольного укорочения от создаваемого рычажной установкой усилия.

Типичная диаграмма напряжения-деформации горных пород в экспериментах на одноосное сжатие [Ставрогин, Тарасов, 2001] представлена на рисунке 2.4. Область упругих деформаций в начале диаграммы описывается линейной зависимостью, наклон которой определяется модулем упругости Юнга,  $E$  (рисунок 2.4). При превышении предела упругости  $\sigma_u$  начинается область необратимых деформаций, продолжающаяся до предела прочности  $\sigma_P$ , который равен максимуму нагрузки. После достижения максимума напряжения наблюдается область запредельного деформирования, которая завершается пределом остаточной прочности  $\sigma_0$ . В этой области кривая деформирования часто идет по прямой линии либо по линии, очень близкой к прямой, тангенс угла наклона которой,  $M$ , называется модулем спада (рисунок 2.4). В момент достижения предела остаточной прочности  $\sigma_0$  полностью утрачивается сцепление на плоскости сдвига и образец в этом случае легко разделяется по этой плоскости на части. Линия, касающаяся точки предела прочности  $\sigma_P$ , проходящая под углом, тангенс которого обозначен  $M_B$ , характеризует жесткость испытательной машины. Если жесткость машины такова, как это показано на схеме при  $M > M_B$ , то в этом случае получить ниспадающий участок диаграммы не удастся, так как по достижении предела прочности разрушение образца начинается и завершается за счет упругой энергии  $P_K$ , запасенной в машине (рисунок 2.4 [Ставрогин, Тарасов, 2001]). Экспериментальные установки, имеющиеся в ИС РАН, включая рычажную установку, относятся к ряду “мягких” испытательных машин и все исследования проведены на участке восходящей ветви нагружения до предела прочности  $\sigma_P$ , при котором происходит разрушение образцов.

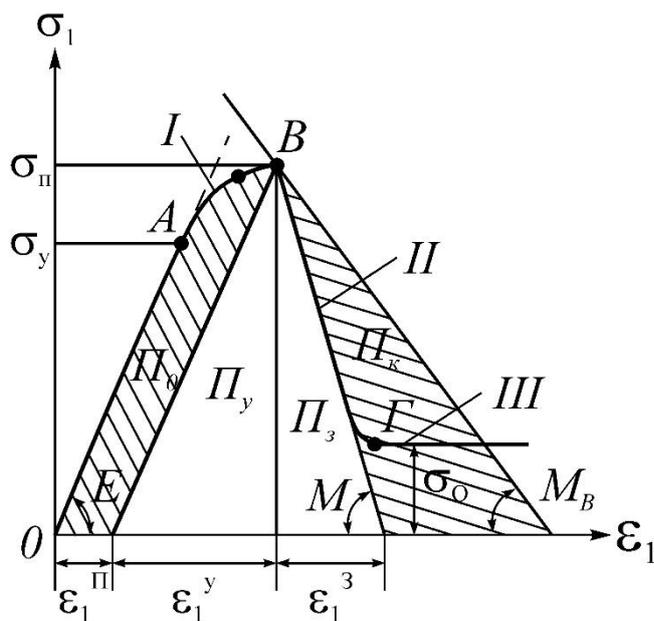


Рисунок 2.4. Полная диаграмма «напряжение-деформация» при одноосном сжатии горных пород, согласно [Ставрогин, Тарасов, 2001]. Обозначения:  $\sigma_y$  – предел упругости,  $\sigma_{II}$  – предел прочности,  $\sigma_o$  – предел остаточной прочности,  $\epsilon_1^{II}$  – необратимая деформация до предела прочности,  $\epsilon_1^y$  – упругая деформация до предела прочности,  $\epsilon_1^3$  – необратимая деформация за пределом прочности;  $P_o$  – работа необратимой деформации на пределе прочности,  $P_y$  – работа упругих деформаций на пределе прочности,  $P_3$  – работа необратимых деформаций в запредельной области;  $P_k$  – работа деформации и разрушения, требующая подвода упругой энергии, запасенной в машине.

Как было отмечено в главе 1, область неустойчивого равновесия, характеризуемая флуктуациями прочности и напряженного состояния, является необходимым условием для реализации триггерных эффектов различной природы за счет притока и диссипации энергии. Применительно к проблеме разработки основ для технологического контроля сейсмических процессов этой фазе можно сопоставить разрушение среды во время самого землетрясения, когда превентивные воздействия для разрядки избыточных напряжений уже запоздали. В связи с этим нас интересует участок АВ, на котором материал находится в области нелинейного деформирования, вблизи порога устойчивости, где могут проявляться триггерные эффекты. Именно в интервале АВ материал при определенных изменениях в условиях деформирования может вести себя самым различным образом. Такими изменениями могут быть внешние возмущения, создаваемые различными физическими полями.

Прочностные и деформационные характеристики пород зависят от скорости нагружения и от длительности их нахождения под нагрузкой (эксперименты на ползучесть) [Прочность..., 1979]. При этом могут реализоваться различные физико-химические процессы, определяющие механизмы воздействия на среду электромагнитного поля. Во-первых, проникновение в раскрывающиеся под нагрузкой микродефекты паров воды и молекул других поверхностно-активных веществ (кислот, щелочей) сопровождается расклиниванием стенок микродефектов и снижением энергии молекулярных связей на контуре микродефектов. Второй причиной (в наибольшей степени это относится к породам глинистого состава) может быть перетекание и отжим поровой воды, причем влияние фильтрационных явлений на прочностные свойства

может быть неоднозначным [Прочность..., 1979]. Вследствие быстрого приложения нагрузки возникает избыточное поровое давление, разгружающее скелет породы. С течением времени влага отфильтровывается и поровое давление падает, что вызывает рост среднего напряжения в скелете. С другой стороны, при быстром нагружении в зонах сдвига наблюдается разрыхление и падает поровое давление, повышающее прочность породы. Со временем поровое давление восстанавливается и прочность породы снижается [Прочность..., 1979].

На рисунке 2.5 приведены характерные для горных пород графики деформирования при некоторой конкретной скорости нагружения (1) и при бесконечно медленном нагружении (2) согласно [Прочность..., 1979]. Точки A, B, C, D – характерные состояния при быстром нагружении, при длительной ползучести, при релаксации напряжений в образце в случае "мягкой" машины, при релаксации напряжений в машине конечной ненулевой жесткости.

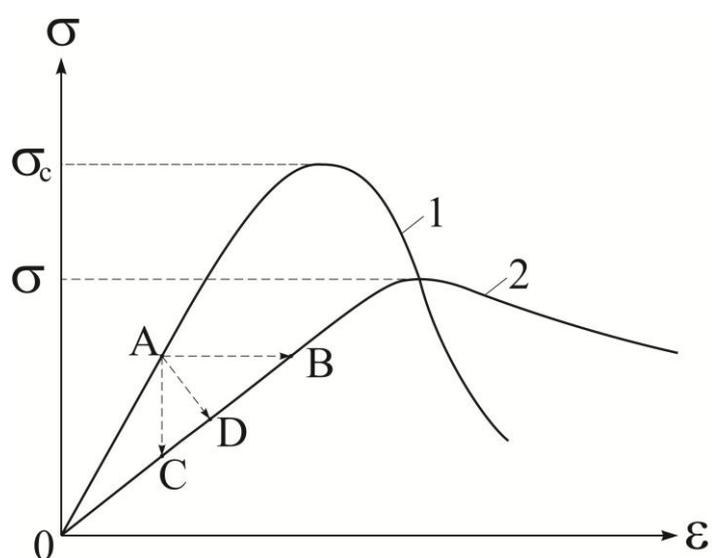


Рисунок 2.5 – Графики деформирования при быстром (кривая 1) и бесконечно медленном нагружении (кривая 2), согласно [Прочность..., 1979].

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. Автор допускает, что именно неспособность к высокой скорости крипа 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 [Vogomolov et al., 2004; Закупин и др., 2006, Vogomolov, Zakupin, 2008; Богомолов и др., 2011], проведенных на образцах с резким ступенчатым нагружением (в течение минуты) и выдержкой образца длительное время (несколько часов) в состоянии

квазиползучести.

Отдельной (обособленной) методической составляющей настоящей диссертационной работы является проверка, будет ли воспроизводиться ранее обнаруженный в НС РАН эффект отклика скорости трещинообразования (активности АЭ) на воздействие электрических импульсов [Закупин и др., 2006, 2006 а; Bogomolov et al., 2004] в другой постановке эксперимента, несколько отличающейся от цитированных работ. Такая проверка имеет важное методологическое значение с точки зрения принципа рандомизации – новые эффекты (физические законы) могут считаться полностью достоверными, если они устойчивы к некоторым изменениям параметров постановки эксперимента. В небольших пределах модификация параметров может быть произвольной, отсюда – рандомизация, дополняющая распространенные критерии статистической достоверности для выборок, полученных при одних и тех же условиях. Принципу рандомизации вполне соответствует постановка экспериментов на образцах горных пород в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) в условиях, максимально приближенных к работам авторов из НС РАН (обзор результатов в разделе 1.3 или [Богомолов и др., 2011]). Эксперименты в ИМСС УрО РАН на установке с расширенными диагностическими возможностями (по сравнению с ранее проведенными экспериментами) предоставили новую информацию о свойствах акустоэмиссионных откликов нагруженных модельных образцов на электромагнитное воздействие. Раздел 4.3 посвящен результатам этих экспериментов, а ниже дано описание испытательного оборудования лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН, с помощью которого проведены упомянутые специальные эксперименты.

Задача дополнительных исследований предопределила выбор условий испытаний: эксперименты проведены в условиях одноосного сжатия при постоянном уровне нагрузки (квазиползучесть) на гидравлическом прессе ОМА, Италия (рисунок 2.6). Пресс ОМА укомплектован ручным приводом и позволяет развивать усилие сжатия до 500 кН. В лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН конструкция пресса была оснащена дополнительными стабилизаторами давления для предотвращения падения усилия при продольной деформации образцов. Максимальное падение усилия в процессе испытаний при этом составило не более 4% от достигнутой величины.

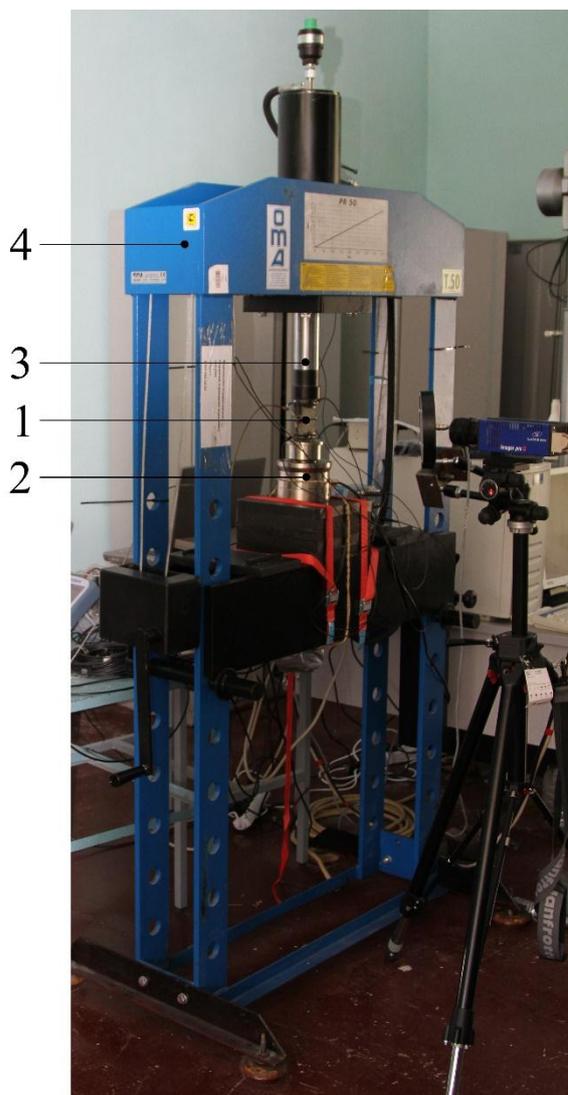


Рисунок 2.6 – Внешний вид гидравлического пресса ОМА согласно [Мубассарова и др., 2014]. 1 – образец горной породы, 2 – опорная пята на сферическом шарнире со встроенным тензорезистивным датчиком, 3 – давящая пята, 4 – корпус пресса.

В процессе нагружения значения усилия с частотой 1 Гц регистрировались при помощи силоизмерительного комплекса, включающего сило- и весоизмерительный цилиндрический тензорезистивный датчик К-С-183-47-С3 и весовой электронный измерительный блок (весовой терминал) КСК52 (производство «Уралвес»), а также специальное программное обеспечение. Принцип работы цилиндрических тензорезистивных датчиков основан на преобразовании механической деформации при сжатии в пропорциональный электрический сигнал. Датчики зарекомендовали себя благодаря надежности работы и стабильности показаний в широком диапазоне рабочих условий. Диапазон измерений нагрузок цилиндрических датчиков: от 1 т до 100 т. Характеристики тензорезистивных датчиков приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики тензорезистивных датчиков.

Рабочий коэффициент передачи (РКП)	2.85 мВ/В
Класс точности (по ГОСТ 30129)	С3
Вид преобразуемой силы	Сжатие
Число поверочных интервалов	3000
Начальный коэффициент передачи (НКП)	2.5 % от РКП
Входное сопротивление	1450 ± 50 Ом

Выходное сопротивление	1400 ± 50 Ом
Сопротивление изоляции	≥ 5000 МОм
Диапазон рабочих температур	от -30 до +50 °С
Допустимая перегрузка в течение не более 1 часа	125 % от НПИ
Разрушающая перегрузка	200% от НПИ
Рекомендуемое напряжение питания	от 5 до 12 В
Максимальное напряжение питания	15 В
Степень защиты (по ГОСТ 14254)	IP 68
Материал корпуса датчика	Легированная сталь

Электрический сигнал с тензорезистивного датчика регистрируется весовым терминалом КСК52 для дальнейшего аналого-цифрового преобразования, обработки и индикации результата взвешивания. Используемый весовой терминал обладает высокой точностью измерений, высокой скоростью обработки сигнала с тензодатчиков и предусматривает фиксацию максимального измеренного значения (технические характеристики приведены в таблице 2.2).

Таблица 2.2 – Технические характеристики весового терминала.

Частота АЦП	120 Гц
Разрядность АЦП	24 бит
Чувствительность	0.6 мкВ/дел
Диапазон входного сигнала	от -40 до 40 мВ
Схема подключения тензодатчика	4-х, 6-проводная
Количество подключаемых тензодатчиков	до 8 шт. по 350 Ом
Интерфейс связи с ПК	RS232
Тип индикаторов	светодиодные
Рекомендуемое расстояние до тензодатчиков (схема подключения)	до 50 м (4-проводная); до 100 м (6-проводная)
Напряжение питания от сети переменного тока, при частоте 50 (±1) Гц	от 187 до 242 В
Потребляемая мощность	до 6 Вт
Напряжение питания тензодатчика	5 В
Дискретные выходы	2 шт. (AC: 7 А/250 В, DC: 12 А/120 В)
Условия эксплуатации: - диапазон рабочих температур - относительная влажность (не более)	от -20°С до +50°С 95%
Материал корпуса	металл
Степень защиты, обеспечиваемая оболочкой	IP 65
Габаритные размеры	170×100×75 мм
Масса	1.8 кг
Тип монтажа	щитовой

Далее оцифрованные значения усилия записываются на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме.

## 2.2. Модельные источники электромагнитных полей. Организация электромагнитных воздействий на нагруженные образцы горных пород

Скрещенные электрическое и магнитное поля, используемые в качестве источника

возбуждения акустоэмиссионной активности некоторых образцов горных пород [Zakupin et al., 2009, 2012, 2012 a] и пластической деформации щелочно-галоидных кристаллов [Альшиц и др., 1998; Урусовская, 2000], уже показали свою эффективность. Подтверждением этого может быть упомянутый в разделе 1.3.1 макроэффект возрастания пластичности щелочно-галоидных кристаллов под влиянием именно скрещенных полей [Урусовская, 2000] в сопоставлении с проявлениями на меньших масштабах воздействия одного лишь электрического поля с той же напряженностью и при тех же механических нагрузках. Показательно также, что в экспериментах [Zakupin et al., 2009, 2012, 2012 a] характерное время задержки откликов АЭ на воздействие скрещенных полей (около 15 минут) было меньше по сравнению со случаем откликов на импульсы электрического поля (15-30 минут). Это дало основания для применения скрещенных электрического и магнитного полей в экспериментах, представляемых в настоящей работе. Для реализации такого усложненного типа воздействия был изготовлен специальный комплекс, в который входят генераторы электрических импульсов, катушка индуктивности, графитовые электроды и синхронизирующее устройство, позволяющее регулировать смещение фаз импульсов обоих генераторов друг относительно друга (рисунок 2.7 б).

В качестве источника электрических импульсов использовался генератор прямоугольных импульсов Г5-54, которые подавались на графитовые электроды, плотно прилегающие к боковым граням образца (рисунок 2.7 а). Контролировались следующие параметры импульсов генератора Г5-54: форма импульсов – прямоугольные однополярные, напряжение – 45-50 В, частота – 3 кГц, длительность импульса – 110 мкс, скважность – 75%. Генератор Г5-54 позволяет формировать импульсы с «крутыми» фронтами, длительность переднего и заднего фронтов – не более 0.15 мкс. В разделе 1.2.2.3. было обращено внимание, что в натуральных условиях земная кора облучалась импульсами с крутыми фронтами нарастания, которые позволяют реализоваться динамическим эффектам согласно каналовой модели [Богомолов, 2010; Сычева и др., 2011; Богомолов, 2012]. Напряженность электрического поля при этом составила  $5 \cdot 10^2$  В/м.

Источником магнитного поля служила катушка индуктивности, сопротивление и индуктивность которой при частоте 1 кГц равны 4.64 Ом и 4.59 мГн. Для возбуждения магнитного поля на катушку подавались синусоидальные электрические импульсы с генератора ГЗ-33, напряжение составляло 20 В, частота – 6 кГц. 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 разделе 1.3.1.2. Все эксперименты в диссертационной работе проведены по одной схеме расположения электродов и магнитной катушки на образце (рисунок 2.7 а).

Схема испытания образцов в условиях одноосного сжатия была однотипной для всех

серийных образцов. После установки образца на рычажном прессе происходил запуск всех систем регистрации (акустической эмиссии и компонент деформации), затем следовала начальная нагрузка образца на 25-30 кН, что в среднем составляло порядка 30% от разрушающей нагрузки для всей серии образцов. Нагружение осуществлялось в связи с особенностью работы рычажной установки и тем обстоятельством, что на участке малых напряжений (до 30%) акустическая эмиссия образцов слабо выражена вследствие так называемого акустоэмиссионного эффекта памяти горных пород (эффект Кайзера) [Лавров и др., 2004]. Это свойство – невозпроизводимость акустической эмиссии горных пород при напряжениях, меньших максимально достигнутого ранее значения и резкое возрастание активности АЭ при превышении этого ранее «запомненного» значения [Лавров и др., 2004]. Учитывая оценки тектонических напряжений, можно считать, что до напряжений порядка 30-40 МПа для образцов отклики на ЭМ воздействие в акустической эмиссии и деформации маловероятны, что позволяет не рассматривать данный диапазон напряжений.

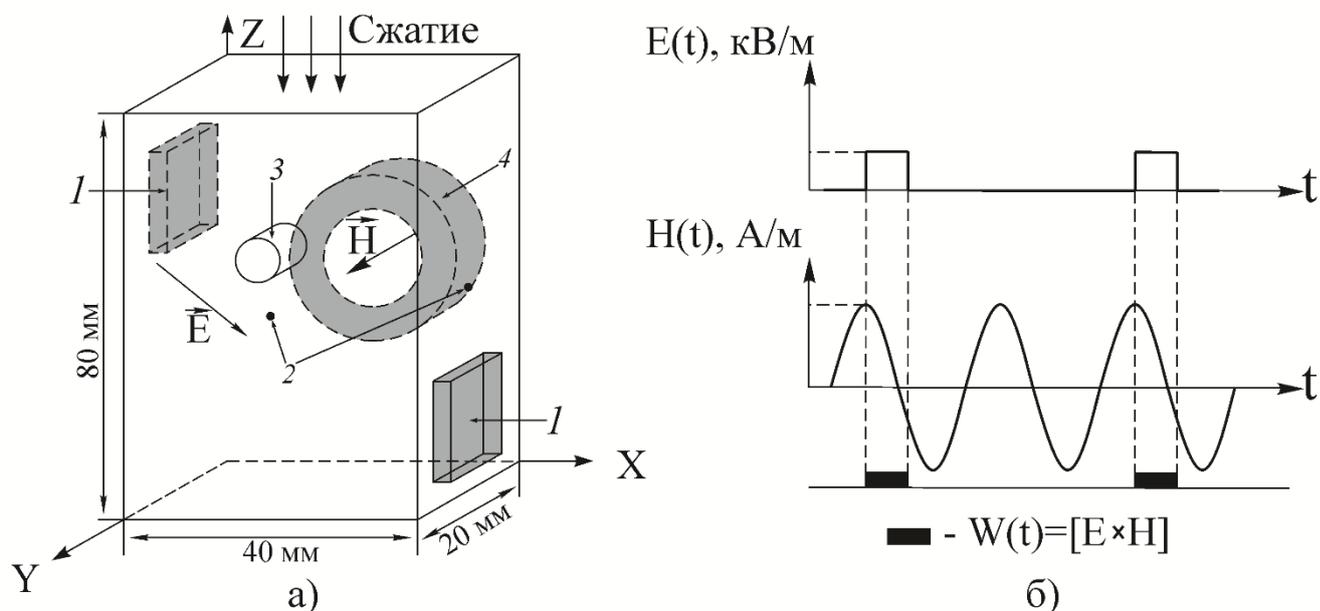


Рисунок 2.7 – Схема эксперимента с воздействием скрещенных ЭМ полей согласно [Боровский и др., 2011]: а – геометрия: направление сжимающего усилия (вертикальное), электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей, 1 – электроды, 2 – точки регистрации компонент деформации, 3 – датчик АЭ, 4 – катушка индуктивности; б – синхронизация периодических электрических импульсов (Г5-54) с импульсами генератора Г3-33, нагружающего магнитную катушку.

После первоначального нагружения до 25-30 кН нагрузка на образце изменялась с постоянной скоростью для всей серии экспериментов 0.5 Н/с. 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]. С учетом оценок прочности образцов, время всего испытания с непрерывным

деформированием, составляло 60-90 часов. Воздействие скрещенными электрическим и магнитным полями осуществлялось периодически в течение всего времени эксперимента через равные интервалы нагрузки 7.85 кН (равные интервалы времени около 4 часов). Схема изменения нагрузки и проведения сеансов электромагнитного воздействия показана на рисунке 2.8. Длительность сеансов воздействия была выбрана 1 час. Анализ накопленного экспериментального материала [Закупин и др., 2006, 2006 а; Zakupin et al., 2012, 2012 а] показал, что такая длительность электромагнитного воздействия оптимальна. Таким образом, в зависимости от предела прочности каждого образца в среднем в ходе одного эксперимента было реализовано от 5 до 10 сеансов ЭМ воздействия.

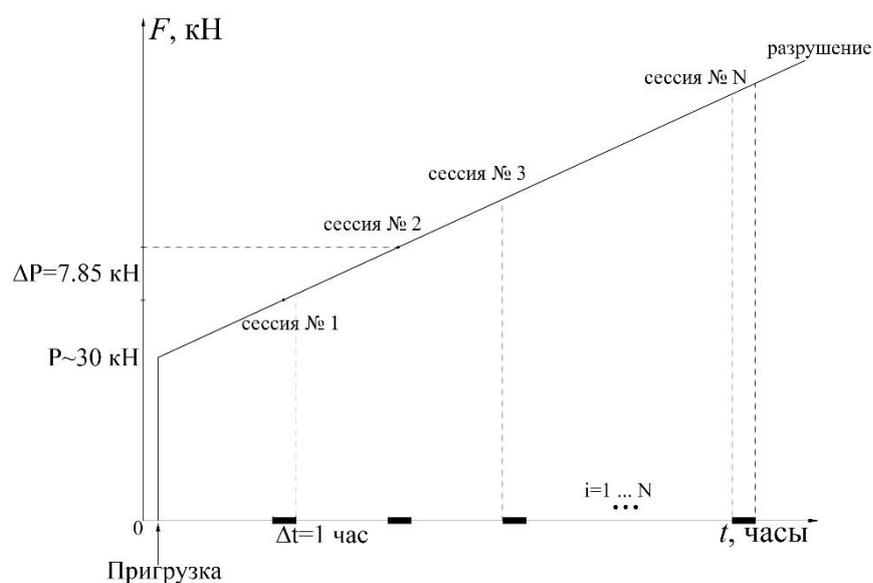


Рисунок 2.8 – Схема испытаний образцов в условиях одноосного сжатия с постоянным ростом нагрузки и сеансами воздействия ЭМ поля, отмеченными черными прямоугольниками снизу.

Для образцов в специальном цикле испытаний в ИМСС УрО РАН использовалась схема электромагнитного воздействия при постоянном уровне нагрузки, используемая в предыдущих исследованиях [Закупин и др., 2006, 2006 а; Мубассарова, Богомолов, 2010, 2010 а]. В ходе экспериментов значение сжимающей нагрузки изменялось дискретно (ступенчато). После нагружения происходила фиксация выбранного значения нагрузки, далее каждый экспериментальный сеанс состоял из следующих трех интервалов длительностью 1 час: время ожидания после нагружения, при котором происходила релаксация переходных процессов, время воздействия электромагнитных полей и последний интервал – регистрация без воздействия (рисунок 2.9).

Выбор такой схемы обусловлен, прежде всего, характером распределения активности АЭ после ступенчатого прироста механической нагрузки (спад активности АЭ сразу после нагружения соответствует закону Омори для афтершоков [Utsu, 1961; Utsu et al., 1995]) и спецификой выделения откликов АЭ на электромагнитное воздействие.

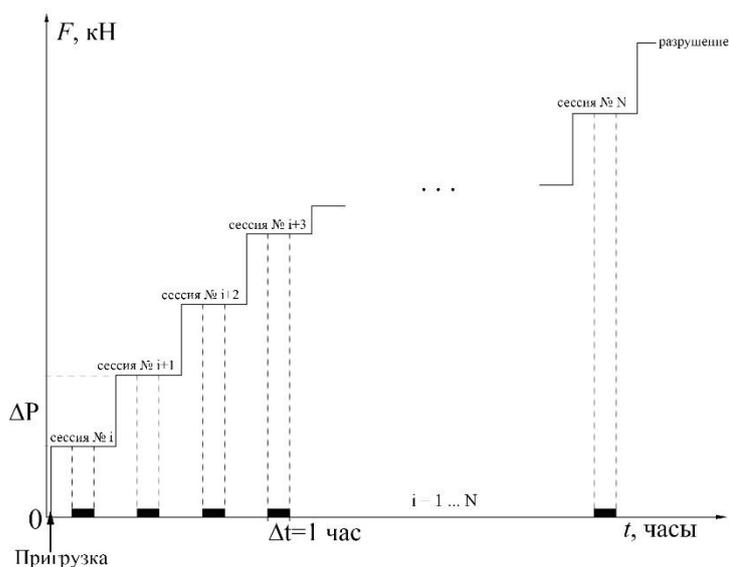


Рисунок 2.9 – Схема испытаний образцов в условиях одноосного сжатия при постоянном уровне нагрузки и сеансами воздействия ЭМ поля, отмеченными черными прямоугольниками снизу.

В отличие от экспериментов с образцами, проведенными со сложным видом воздействия (скрещенные ЭМ поля), в испытаниях в ИМСС УрО РАН было реализовано воздействие электрическими импульсами посредством подачи их на графитовые электроды, также плотно закрепленные на боковых гранях образцов (рисунок 2.23 в разделе 2.4.3). В качестве источника электрических импульсов использовался генератор сигналов произвольной формы АКПП-3407/1А. Параметры электрических импульсов при этом составляли: напряжение – 90 В, частота – 2.5 кГц, длительность – 100 мкс, скважность – 75%; форма – однополярные прямоугольные импульсы положительной полярности.

### 2.3. Системы и методика измерений деформаций и сжимающей нагрузки

В соответствии с задачами экспериментальных исследований, в ИС РАН был разработан и внедрен аппаратно-программный комплекс для прецизионных измерений нагрузки и деформации образцов горных пород.

При работе на прессах основополагающим является стабильность задания нагрузки, для чего необходимо измерение усилия сжатия с высоким разрешением. Обеспечивающий такие измерения динамометр размещен под давящей пятой, как описано в разделе 2.1 (рисунок 2.1, 2.2). Принцип работы динамометра основан на измерении прогиба жесткой упругой мембраны, возникающего под действием приложенной механической силы, при помощи индукционного датчика линейных перемещений (линейные дифференциальные трансформаторы LVDT, Linear Variable Differential Transducers). Ниже представлен принцип работы индукционных датчиков. Исследуемый образец устанавливается между мембраной динамометра и верхней траверсой. Индуктивная катушка датчика линейных перемещений расположена в нижней опоре испытательной конструкции. Сердечник датчика жестко связан с мембраной. Когда мембрана прогибается под действием нагрузки, изменяется положение сердечника внутри датчика.

Соответственно изменяется дифференциальное электрическое напряжение, снимаемое со вторичных обмоток индуктивного трансформатора датчика.

В механике деформируемого твердого тела [Работнов, 1988] известно выражение для прогиба упругой мембраны в зависимости от величины приложенной силы:

$$W = \frac{F}{16 \cdot \pi \cdot D} \cdot \left\{ \frac{3+\nu}{1+\nu} \cdot (a^2 - r^2) + 2 \cdot r^2 \cdot \ln \frac{r}{a} + c^2 \cdot \left[ \ln \frac{c}{a} - \frac{1-\nu}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot \frac{a^2 - r^2}{a^2} \right] \right\} \quad (2.1),$$

где  $W$  – ожидаемый прогиб,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $a$  – радиус мембраны,  $c$  – радиус образца,  $c < r < a$  – размер области плиты, незанятой образцом,  $F$  – сила, действующая на мембрану. Значение коэффициента жесткости мембраны  $D$  определяется по следующей формуле:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot (1-0.3^2)} \cdot h^3 = 0.183 \cdot 10^{-6} \cdot h^3 \quad (2.2);$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $h$  – толщина мембраны.

Из выражения (2.1) видно, что зависимость прогиба мембраны от приложенного усилия является линейной. Благодаря этому можно поставить в соответствие силе, действующей на мембрану, линейное перемещение (величину прогиба этой мембраны).

Калибровка динамометра, встроенного в конструкцию рычажного пресса (рисунок 2.1) производится два раза в год при одинаковых условиях (при постоянстве температуры и влажности) в помещении. Калибровочная характеристика этого динамометра показана на рисунке 2.10, где видно, что на начальном участке характеристики наблюдается нелинейность. Для исключения погрешности в оценке усилия, действующего на образец, нагрузка рассчитывается по двум переходным характеристикам: от 0 до 40 кН коэффициент преобразования  $k^{**}_1 = 97.58$  Н/В, а в диапазоне от 40 кН до 290 кН –  $k^{**}_2 = 145$  Н/В.

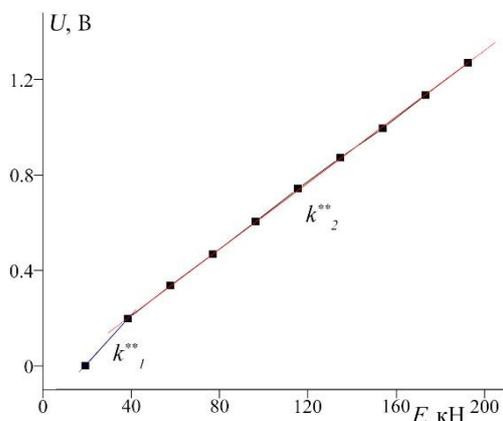


Рисунок 2.10 – Калибровочная характеристика динамометра.  $k^{**}_1$  и  $k^{**}_2$  – коэффициенты преобразования для двух диапазонов нагрузки, отмеченных синей и красной аппроксимационной линиями соответственно.

Наряду с прецизионным измерением усилия сжатия в течение всех экспериментов проводилась регистрация продольной и двух поперечных компонент деформации образцов при

помощи датчиков LVDT. Продольная деформация определялась укорочением рабочего пространства между верхней траверсой и нижней давяльной пятой, в котором устанавливается образец. Измерение поперечных деформаций проводилось в точках – центрах боковых граней образца (отмечены цифрой 2 на рисунке 2.7).

Принцип действия датчиков LVDT основан на явлении электромагнитной индукции. Их выходное напряжение пропорционально положению перемещающегося магнитного сердечника (рисунок 2.11). Первичная обмотка возбуждается источником переменного напряжения, наводя при этом во вторичных обмотках напряжения, которые меняются с изменением положения магнитного сердечника внутри сборки. Вторичные обмотки наматываются встречно, и когда сердечник находится в центре, напряжения на обмотках равны по величине и противоположны по знаку, а выходное результирующее напряжение равно нулю. Когда сердечник смещается от центра, напряжение во вторичной обмотке, в сторону которой он смещается, возрастает. В результате выходное дифференциальное напряжение изменяется линейно в зависимости от положения сердечника (рисунок 2.11).

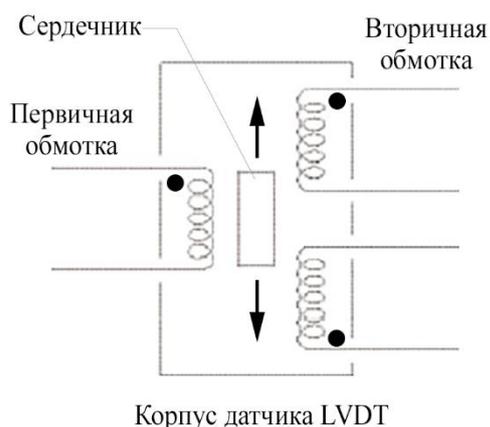


Рисунок 2.11 – Схема индукционного датчика линейных перемещений (LVDT).

Сердечник снабжен изнутри резьбой, чтобы облегчить крепление немагнитного штока (выполненного из капролона), который в свою очередь касается боковой грани образца, перемещение которой будет измеряться. Корпус из нержавеющей стали обеспечивает электромагнитное и электростатическое экранирование. Эти датчики обеспечивают высокоточные измерения во всем диапазоне измерений, обладают высокой чувствительностью и разрешением. В настоящей работе для экспериментов использовались датчики LVDT фирмы Lucas Shaevitz трех типов: MHR 005, MHR 010 и MHR 050, обладающие следующими диапазонами регистрируемых линейных перемещений:  $\pm 0.13$  мм,  $\pm 0.25$  мм и  $\pm 1.27$  мм соответственно [Pallas-Areny, Webster, 1991; Schmidt, 2016].

Сигналы с датчиков деформации и нагрузки поступают на вход аналогового блока преобразования и усиления сигналов, состоящего из шести идентичных по своей структуре каналов. Структура одного канала представлена на рисунке 2.12.

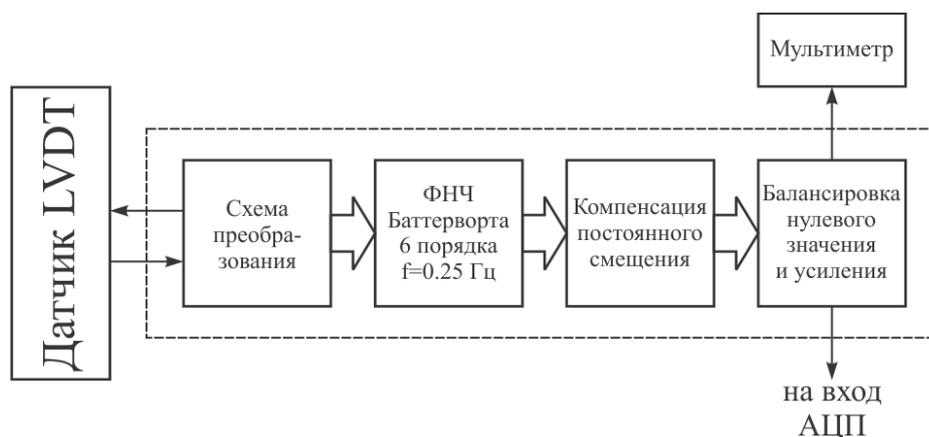


Рисунок 2.12 – Структура измерительного канала блока преобразования и усиления сигналов датчиков LVDT.

Остановимся подробнее на принципе работы блока преобразования, технические параметры которого представлены в таблице 2.3. Первичная обмотка датчика возбуждается переменным напряжением синусоидальной формы с частотой 25 кГц и амплитудой 3 В, вырабатываемым схемой преобразования. Частота возбуждения первичной обмотки определяется времязадающими резистором и конденсатором в схеме. На выводах вторичной обмотки возникает индуцированное напряжение, амплитуда которого зависит от расположения магнитного сердечника внутри обмоток. Это напряжение подается на схему преобразования, где посредством специальной микросхемы [Rahim, 1988] происходит его демодуляция (двухполупериодное выпрямление). Выпрямленное напряжение поступает на следующий узел схемы, представленный фильтром низких частот Баттерворта 6-го порядка с частотой среза 0.25 Гц, созданный по схеме с обратной связью [Джонсон, 1983; Гутников, 1988]. Частота среза выбрана согласно теореме Найквиста-Шеннона из расчета того, что частота дискретизации составляет 1 Гц. Выходной сигнал с микросхемы преобразования имеет постоянное смещение +5 В (половина опорного напряжения), а после узла фильтрации сигнал инвертируется, и смещение становится равным (-5 В). Для компенсации этого напряжения предусмотрен специальный узел, в котором сигнал поступает на вход сумматора, где складывается с постоянным стабильным напряжением от источника стабильного напряжения.

Таблица 2.3 – Технические параметры блока преобразования и усиления.

Количество измерительных каналов	6
Полоса пропускания изм. каналов по уровню минус 3 дБ, Гц	0.25
Диапазон выходных напряжений, В	±2.5
Диапазон измеряемых деформаций, мкм	0÷2000
Диапазон измеряемых усилий сжатия, т	0÷60
Коэффициент преобразования усилия сжатия (датчик MHR050), мВ/т	64.64
Коэффициент преобразования деформации (датчик MHR050), мВ/мкм	0.5034
Коэффициент преобразования деформации (датчик MHR010), мВ/мкм	0.9469
Напряжение питания от источника стабилизированного напряжения, В	±12
Максимальный ток потребления (+12В), А	0.4
Максимальный ток потребления (-12В), А.	0.3

Производителем предусмотрено, что когда сердечник датчика находится в центре

катушки, то выходное напряжение равно нулю, таким образом, напряжение на выходе изменяется в обе стороны от нуля. Для удобства измерения деформации при испытаниях горных пород диапазон выходных напряжений был смещен на половину шкалы, чтобы крайнее положение сердечника соответствовало нулевому значению напряжения на выходе. Выходной каскад представлен микросхемой AD845JN для согласования с низкоомным входным сопротивлением, кроме того, данный каскад выполняет функцию усилителя с коэффициентами усиления: 22 и 1.95 раза для измерения нагрузки и деформации соответственно (см. таблицу 2.3). Напряжения, получаемые с каналов блока преобразования и усиления сигналов датчиков LVDT поступают на вход аналого-цифровой преобразователя (АЦП) ЛА-И24 USB, где происходит их оцифровка, и далее запись в двоичном формате в ОЗУ компьютера в заданном промежутке времени (рисунок 2.13).

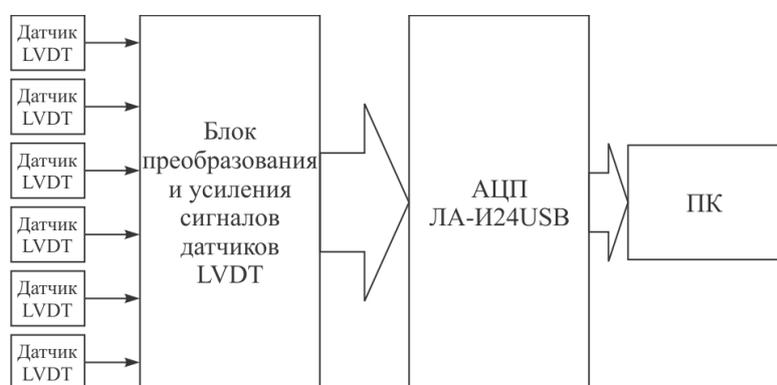


Рисунок 2.13 – Структурная схема регистрации деформационных параметров образцов горных пород.

В тестовых экспериментах были опробованы периоды до семи суток непрерывной записи. Стабильность питания обеспечивалась тем, что регистратор был подключен к энергонезависимому ноутбуку, что служило страховкой на случай выключения или сбоя в подаче электроэнергии. Удобство работы с программными средствами ЛА-И24 USB обеспечивается сохранением записанных данных в любой момент времени [Внешнее...].

Для определения коэффициентов преобразования измерительных каналов с датчиками MHR005, MHR010 и MHR050 были проведены тестовые калибровочные испытания системы регистрации деформаций. Коэффициент преобразования определялся при непосредственном измерении выходного напряжения в зависимости от смещения сердечника внутри катушки, которое независимо определялось с помощью микрометра МК-25-2. Микрометр МК-25-2 предназначен для измерений деталей размером от 0 до 25 мм, точность которого равна 0.01 мм, а погрешность измерений составляет не более  $\pm 4$  мкм. Калибровочные кривые для каждого датчика представлены на рисунке 2.14.

Для статистической достоверности коэффициентов преобразования калибровка каждого датчика проводилась три раза, результаты представлены на рисунке 2.15, 2.16, 2.17. Среднее значение коэффициента преобразования по трем калибровочным кривым для датчика MHR005,

с помощью которого регистрировалась поперечная деформация в направлении оси X, равна 1.522 В/мм, среднее смещение составляет 29.8 мВ (рисунок 2.15). Погрешность оценки коэффициента преобразования по трем измерениям  $\Delta a_i = a_i/a_{\text{mean}}$  не превышает 0.7%, погрешности смещения равны 4%, 9% и 5% для каждого измерения соответственно.

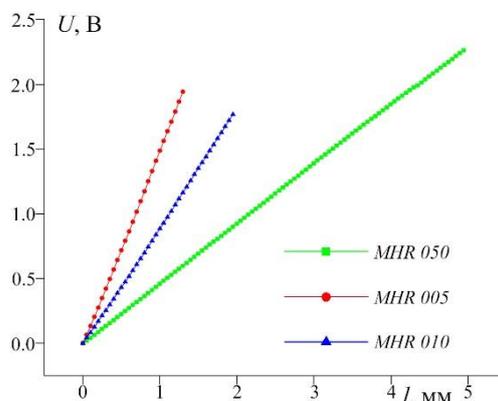


Рисунок 2.14. Калибровочные характеристики датчиков LVDT.

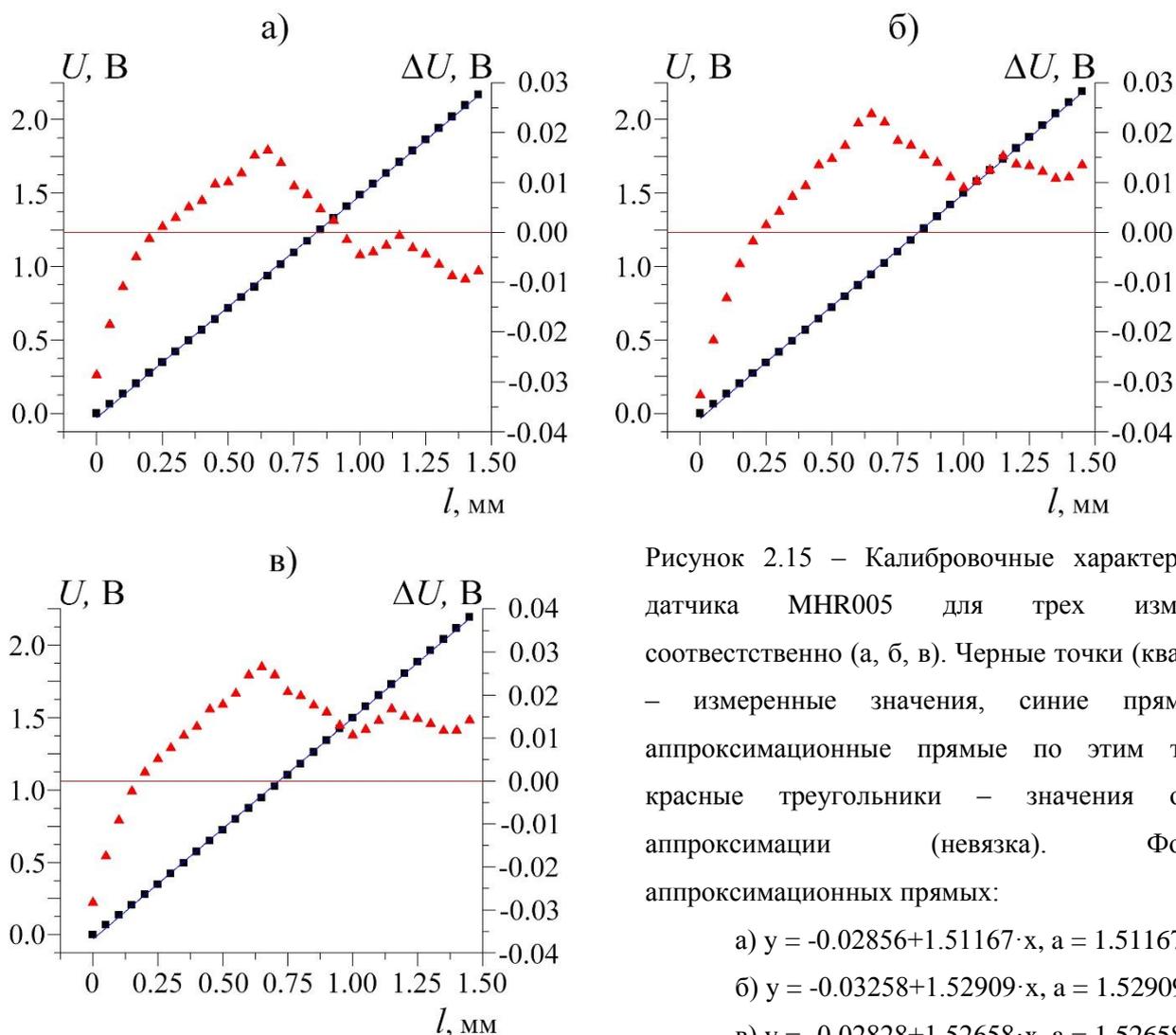
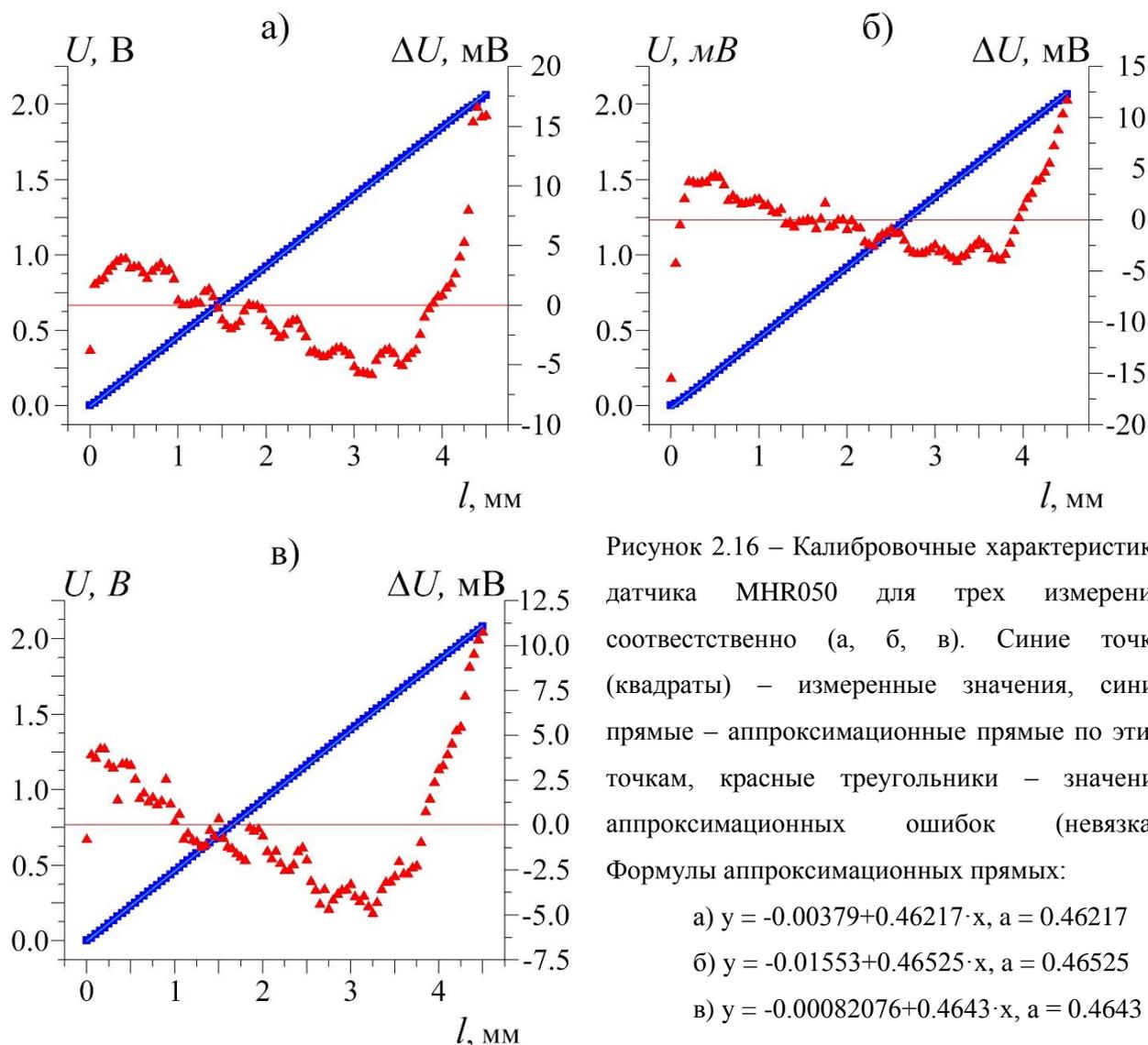


Рисунок 2.15 – Калибровочные характеристики датчика MHR005 для трех измерений соответственно (а, б, в). Черные точки (квадраты) – измеренные значения, синие прямые – аппроксимационные прямые по этим точкам, красные треугольники – значения ошибок аппроксимации (невязка). Формулы аппроксимационных прямых:

- а)  $y = -0.02856 + 1.51167 \cdot x$ ,  $a = 1.51167$
- б)  $y = -0.03258 + 1.52909 \cdot x$ ,  $a = 1.52909$
- в)  $y = -0.02828 + 1.52658 \cdot x$ ,  $a = 1.52658$

Регистрация продольной (осевой) деформации проводилась при помощи датчика

MHR050 с наибольшим диапазоном измерения  $\pm 1.27$  мм. Среднее значение коэффициента преобразования по трем калибровочным кривым составило 0.4639 В/мм, среднее смещение составляет 6.7 мВ (рисунок 2.16). Погрешность оценки коэффициента преобразования по трем измерениям  $\Delta a_i = a_i/a_{\text{mean}}$  не превышает 0.4%.



Калибровка датчика MHR010, использовавшегося для измерения деформации в направлении оси Y, осуществлялась дважды (рисунок 2.17). Коэффициент преобразования составил 0.90992 В/мм, среднее смещение составляет 50 мВ. Погрешность оценки коэффициента преобразования  $\Delta a_i = a_i/a_{\text{mean}}$  не превышает 0.04%, максимальная погрешность смещения равна 2%.

Таким образом, для каналов измерения деформаций были получены линейные зависимости со следующими коэффициентами преобразования: для датчиков MHR050:  $k_Z = 2.1$  мкм/В, для MHR010:  $k_Y = 1.1$  мкм/В и MHR005:  $k_X = 0.66$  мкм/В. Калибровочная характеристика датчика LVDT, встроенного в динамометр, была приведена ранее на рисунке

2.10.

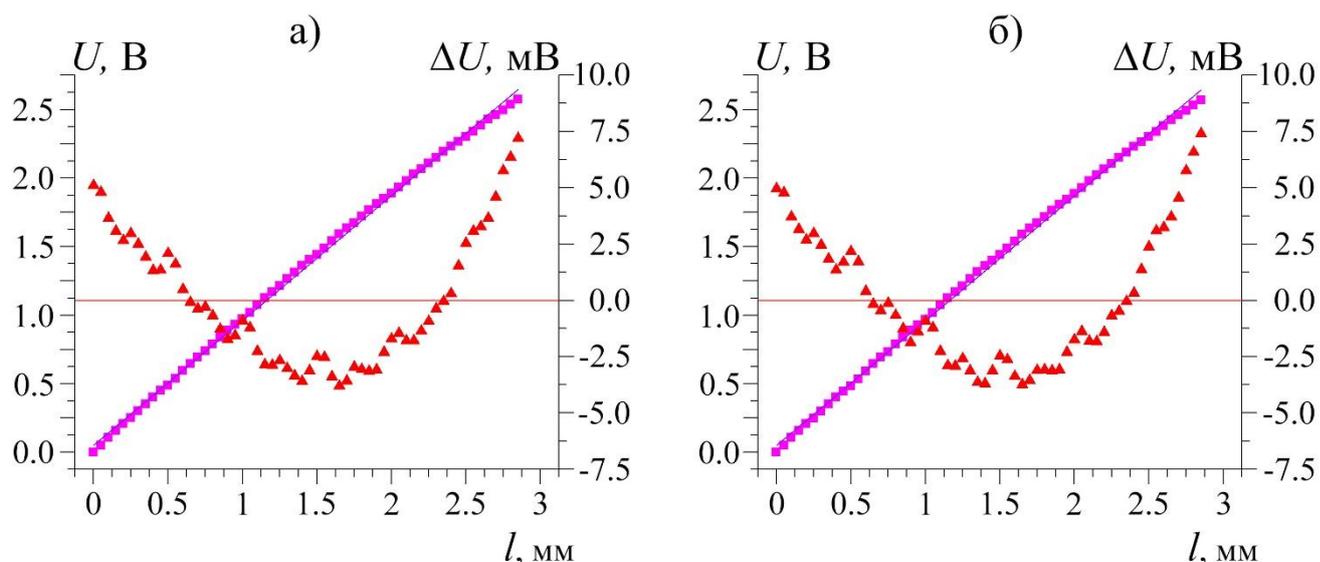


Рисунок 2.17 – Калибровочные характеристики датчика MHR010 для двух измерений соответственно (а, б). Розовые точки (квадраты) – измеренные значения, синие прямые – аппроксимационные прямые по этим точкам, красные треугольники – значения аппроксимационных ошибок (невязка). Формулы аппроксимационных прямых: а)  $y = 0.05098 + 0.91026 \cdot x$ ,  $a = 0.91026$ ; б)  $y = 0.04952 + 0.90958 \cdot x$ ,  $a = 0.90958$ .

## 2.4. Регистрация акустической эмиссии

### 2.4.1. Методика регистрации акустической эмиссии в одноканальном режиме

В соответствии с целью исследования основной цикл экспериментов, проведенных в ИС РАН, включал определение реакции в сигналах акустической эмиссии при воздействии электромагнитного поля, наряду с регистрацией деформационных характеристик. Для этого был разработан и реализован аппаратно-программный комплекс для широкополосной регистрации акустической эмиссии, работающий в одноканальном режиме.

Как было отмечено в разделе 1.3.1.1, акустическая эмиссия представляет собой явление излучения упругих волн, возникающее в результате необратимых или частично обратимых изменений структуры твердых тел под влиянием внешних и внутренних факторов различной физической природы [Hardy, 2003; Lockner et al., 1991; Kuksenko et al., 1996; Виноградов и др., 1975; Виноградов, 1989]. Сигналы акустической эмиссии представляют собой поток случайных импульсных цугов упругих колебаний поверхности исследуемого образца. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении геоматериалов может быть условно классифицирована на 2 типа – дискретную и непрерывную. К дискретной относится АЭ, сигналы которой состоят из отдельно различимых импульсов, когда время между двумя "срабатываниями" источника будет больше времени установления переходных процессов в исследуемом материале. Непрерывной же называется АЭ, сигналы которой представляют собой

непрерывное волновое поле или регистрируются как единый непрерывный сигнал шумового типа. По диапазону измерения сигналов (и, соответственно, приложениям) первичные преобразователи АЭ классифицируют по 4 типам: низкочастотные (20 кГц – 100 кГц), стандартного типа (100 кГц – 400 кГц), высокочастотные (>400 кГц) и широкополосные. Большинство датчиков являются датчиками резонансного типа, кроме широкополосных, и в основном используются в тех случаях, когда представляют интерес такие параметры сигналов, как амплитуда, время прибытия сигнала и его энергия, но не спектральные характеристики сигналов АЭ. Спектр и динамический диапазон сигналов акустической эмиссии горных пород очень широки, поэтому для их регистрации необходимо применять широкополосные датчики и малошумящие измерительные усилители.

Сигналы АЭ регистрировались датчиками SE-2MEG-P производства компании DECI, США, располагаемыми на исследуемом образце, в частотном диапазоне от 200 кГц до 2 МГц. Датчики SE-2MEG-P представляют собой широкополосные миниатюрные пьезоэлектрические преобразователи, которые переводят поле нормальных давлений при колебаниях поверхности образца в электрический сигнал.

Аппаратная часть комплекса позволяет проводить регистрацию сигналов, поступающих от датчика АЭ, и включает в себя специально спроектированные предварительный усилитель и блок синхронизации, выполняющий функцию основного усилителя и порогового дискриминатора. Схема акустоэмиссионной системы регистрации представлена на рисунке 2.18. Предварительные усилители выполнены в виде отдельных устройств и для снижения влияния внешних помех размещаются в непосредственной близости от первичных преобразователей. Предварительные усилители предназначены для усиления сигнала от датчиков АЭ и согласования высокоомного выходного сопротивления датчиков с низкоомным входным сопротивлением блока синхронизации для передачи неискаженного сигнала по кабелю на большие расстояния при максимально возможном соотношении уровня сигнал/шум на выходе предусилителя. Различают 2 вида предусилителей – внешние и встроенные в датчики АЭ. Использование внешних предусилителей более эффективно как с точки зрения удобства применения датчиков меньших размеров, так и с позиции комбинирования предусилителя с различными типами датчиков. Внешние предусилители также бывают 2-х типов: предназначенные для работы как с однополярными датчиками, так и с дифференциальными. Преимущества дифференциальных предусилителей проявляются в защите от электромагнитных наводок и тока в заземляющем контуре, однако они значительно дороже. В экспериментах использовался внешний предусилитель, полоса пропускания которого в области высоких частот повторяет частотный диапазон преобразователей (2 МГц), а в области низких частот ограничена 80 кГц, что обеспечивает подавление непрерывных помех промышленного

происхождения частотой 50 Гц и их гармоник.

Дальнейшее усиление и фильтрация сигнала АЭ происходит в блоке синхронизации, коэффициент усиления канала встроенного усилителя равен 100, а полоса пропускания составляет 80 кГц – 2.5 МГц. Сигнал, приходящий от основного усилителя и превышающий по амплитуде некоторый порог, устанавливаемый оператором, подается на амплитудный дискриминатор, который выдает импульс, запускающий запись волновой формы сигнала в АЦП.

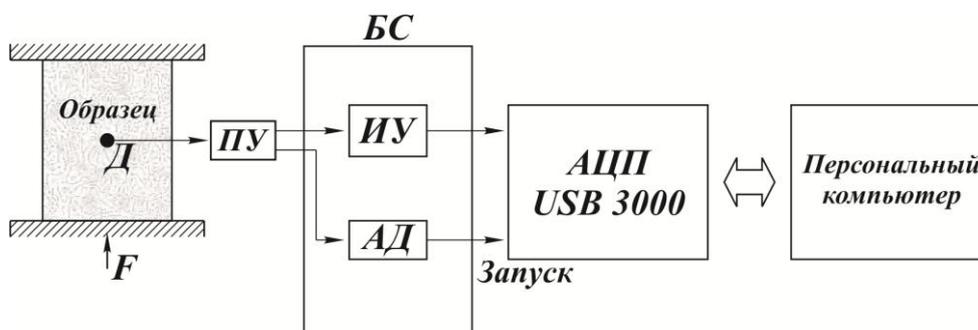


Рисунок 2.18 – Схема измерительного тракта АЭ. Д – датчик акустической эмиссии, ПУ – предварительный усилитель, БС – блок синхронизации, ИУ – измерительный усилитель, АД – амплитудный дискриминатор.

Таким образом, регистрация сигналов АЭ осуществляется в ждущем режиме. Запуск системы регистрации происходит автоматически при условии превышения амплитуды сигнала заранее установленного порога дискриминатора и в течение интервала времени, определяемого объемом буфера памяти АЦП и периодом дискретизации сигналов. Перед началом эксперимента задается порог амплитудного дискриминатора, оценивается устойчивость срабатывания системы запуска и ее нечувствительность к шумам и наводкам от комплекса электромагнитного воздействия. Далее сигналы АЭ оцифровываются быстродействующим 8-канальным блоком АЦП USB 3000 (разрядность 14 бит, максимальная частота 3 МГц) и записываются на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме. В отличие от программного обеспечения, используемого ведущими мировыми производителями АЭ оборудования, разработанный набор программных средств регистрации акустической эмиссии, используемый в ИС РАН, не позволяет вычислять параметры сигналов АЭ в режиме реального времени. Однако он имеет ряд преимуществ, к примеру, дает возможность определять и фиксировать единый волновой процесс, не подвергая его разбиению на отдельные каскады импульсов (рисунок 2.19).

Для предварительной обработки собранной информации используется программа просмотра и корректировки полученного набора сигналов, позволяющая проводить отбраковку ложных сигналов, которые могут «наводиться» от источников электромагнитных воздействий.

Критерием отбраковки является много меньшая длительность таких сигналов, фактически представляющих собой уединенный импульс, а также узкополосный спектр или, напротив, спектр, близкий к белому шуму. Таким образом, в дальнейшей обработке при построении графиков активности АЭ подобные ложные сигналы не учитываются.

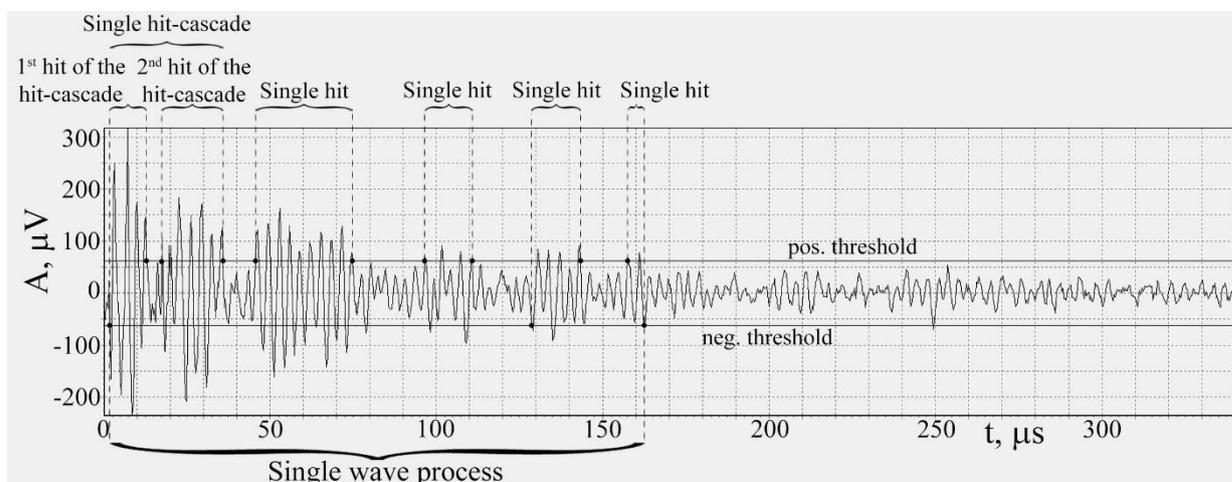


Рисунок 2.19 – Акселерограмма единого колебательного процесса (акустической эмиссии).

Для вычисления активности АЭ, отражающей скорость дефектообразования материала, разработана программа пакетной обработки и формирования единого временного ряда активности по всей серии данных, полученных с одного образца [Бобровский, 2004]. Для построения активности вначале вычисляется кривая накопления событий АЭ  $n(t)$ , за весь период измерений. Активность потока сигналов АЭ вычисляется как численная производная от функции  $n(t)$ . После дифференцирования к временному ряду активности АЭ применяется процедура сглаживания при помощи скользящего окна Лапласа с настраиваемым размером окна.

#### 2.4.2. Методика выделения акустоэмиссионных откликов образцов горных пород на электромагнитное воздействие

Интерпретация экспериментальных данных проводилась на основе анализа графиков временной зависимости активности АЭ, по которым устанавливалось наличие или отсутствие вариаций, свидетельствующих о реакции (или, другими словами, откликах АЭ) нагруженного образца на внешнее воздействие. Эта реакция обычно выражается в приросте усредненной активности АЭ после включения источника электромагнитного поля, превышающего по амплитуде величину  $3\sigma^*$ , где  $\sigma^*$  – среднеквадратическое отклонение активности АЭ, определяемое по некоторому фоновому уровню до включения источника воздействия. В условиях одноосного сжатия при увеличении напряжений в образце рост числа событий АЭ происходит линейно с некоторой скоростью при превышении максимального ранее

достигнутого напряжения (рисунок 2.20 а) [Лавров, Шкуратник, 2005]. Производную от накопления сигналов АЭ также можно аппроксимировать линейной зависимостью (рисунок 2.20 б). Отсюда следует, что при обнаружении отклика среды на воздействие в активности АЭ можно воспользоваться опытом авторов [Соболев, Пономарев, 2003]: провести вычитание линейного тренда (рисунок 2.21) и далее рассчитать величину среднеквадратического отклонения. На рисунке 2.21 проиллюстрирована методика выделения откликов активности АЭ на воздействие электромагнитного поля на примере образца мрамора. Черная кривая на рисунке 2.21 б – активность сигналов АЭ, зарегистрированная в эксперименте.

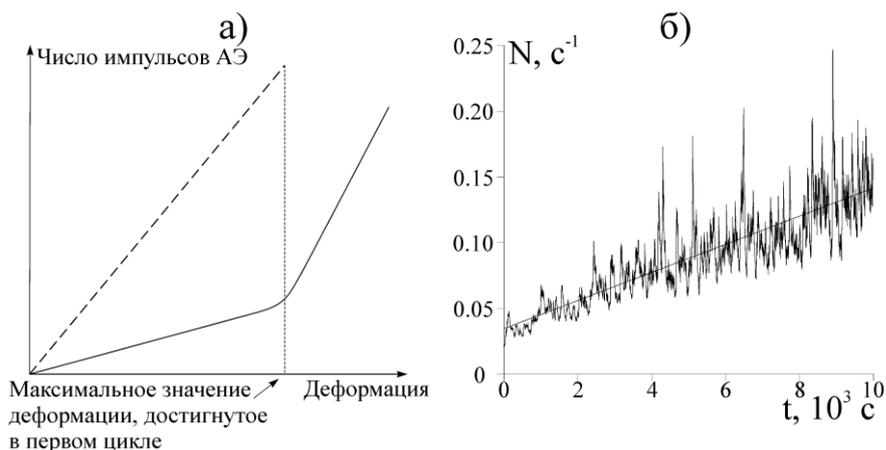


Рисунок 2.20 а – Схематически обобщенные графики зависимостей числа АЭ от деформации в первом (штрихпунктирная линия) и втором (сплошная линия) циклах нагружения [Лавров, Шкуратник, 2005]; б – зависимость активности АЭ от времени при линейном росте нагрузки и ее линейная аппроксимация (черная прямая).

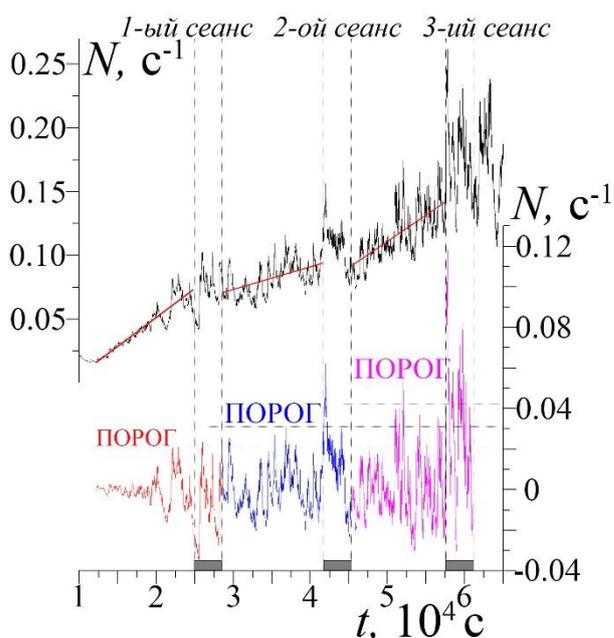


Рисунок 2.21 – Методика обнаружения откликов активности АЭ. Черная кривая – активность сигналов АЭ, зарегистрированная в эксперименте. Красными линиями обозначены аппроксимационные прямые активности до каждого из трех сеансов воздействия. Красной, синей, пурпурной кривой представлены активности АЭ с вычетом линейного тренда, рассчитанного по активности до каждого сеанса воздействия. Штрихпунктирные линии и серые прямоугольники снизу – сеансы воздействия.

Для определения линейного тренда использовался промежуток времени около трех часов до начала сеанса воздействия (рисунок 2.21 красные линии на верхнем графике для трех

интервалов времени). Затем происходило вычитание тренда для каждого периода до и во время воздействия – красная, синяя и пурпурная кривые, для которых определялось среднеквадратическое отклонение  $\sigma^*$ . Превышение активностью во время сеанса (из которой вычли линейный тренд до воздействия) значения  $3\sigma^*$  определяло отклик на воздействие. Как видно из рисунка 2.21 (нижний график) в первом сеансе воздействия отклик трудно идентифицировать, а во втором и третьем сеансе отклики на воздействие уже значительно превышают по амплитуде порог обнаружения, и их появление можно считать достоверным. При этом под откликами активности АЭ подразумевались лишь вариации акустоэмиссионной активности, произошедшие с временными задержками, не превышающими длительности воздействия.

Методика выделения откликов акустической эмиссии в экспериментах в ИМСС УрО РАН практически не отличается от вышеописанной. Разница состоит лишь в характере изменения активности АЭ при ступенчатом изменении нагрузки и проведении сеансов электромагнитного воздействия при постоянном уровне нагрузки. На рисунке 2.22 а показано схематическое представление графика АЭ в режиме со ступенчатым изменением нагрузки [Лавров, Шкуратник, 2005]. Отметим, что при ступенчатом нагружении горных пород после фиксации нагрузки спад активности АЭ на каждой ступени (т.е. при постоянной приложенной нагрузке) обычно описывается степенным распределением, подобным закону Омори для афтершоковой активности:

$$N = \frac{N_0}{(t + c)^a} \quad (2.3),$$

где  $N_0$ ,  $c$ ,  $a$  – постоянные.

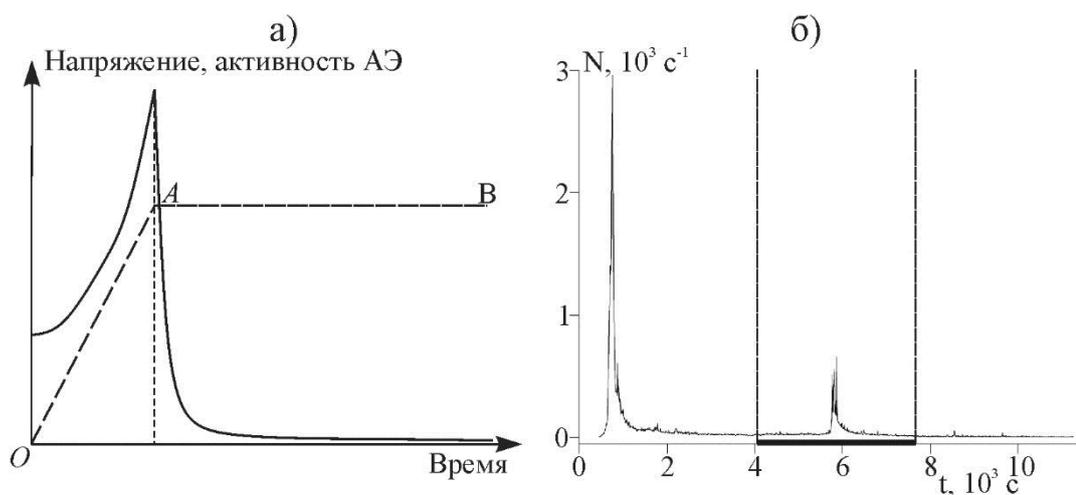


Рисунок 2.22 а – Схематические обобщенные графики зависимостей напряжения (штрихпунктирная линия) и сглаженной активности АЭ (сплошная линия) от времени в процессе монотонного нагружения (участок ОА) и последующего деформирования в режиме ползучести (участок

АВ) согласно [Лавров, Шкуратник, 2005]; б – активность АЭ гранита в эксперименте с воздействием электрическими импульсами.

По мере приближения к макроразрушению величина  $N_0$  увеличивается, а показатель степени  $\alpha$  уменьшается. 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 (рисунок 2.22). Для большинства горных пород и композитных материалов длительность участка спада активности АЭ не превышает 30-60 минут [Закупин и др., 2006]. Опираясь в свое время на этот результат длительность интервалов выдержки образца после нагружения, интервал воздействия и интервал последствия были выбраны равными 1 час каждый.

### **2.4.3. Применение многоканальной системы регистрации АЭ Vallen Amsy-5**

В ряде специальных экспериментов, проведенных в ИМСС УрО РАН с целью выявить новые закономерности электромагнитного влияния на дефектообразование (АЭ), и подтвердить высокую степень воспроизводимости этого эффекта применялась другая система измерений акустической эмиссии. Существенным отличием от измерительной системы, описанной выше в разделе 2.4.1 и использованной в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред в ИС РАН, было применение современной диагностической системы Amsy-5, разработанной и изготовленной мировым производителем акустоэмиссионного оборудования компанией Vallen System, Германия [Vallen, 2016]. Система Amsy-5, использованная в экспериментах в ИМСС УрО РАН, состоит из восьми параллельных измерительных каналов и применяется для обнаружения, измерения характеристик и определения расположения источников АЭ. Один измерительный канал представляет собой комплект из датчика АЭ, предусилителя типа АЕР4 и одного канала ASIP-2 (двухканального процессора обработки акустических сигналов).

Как было отмечено в предыдущем разделе данной главы, акустоэмиссионные сигналы регистрируются с помощью пьезоэлектрических датчиков, преобразующих колебания поверхности материала в электрический сигнал. Для максимального приближения к предыдущим исследованиям в качестве датчиков использовались рассмотренные ранее широкополосные преобразователи SE-2MEG-P, а также стандартного типа датчики компании Vallen System типа AE104A, работающие в диапазоне частот 100-400 кГц.

После регистрации датчиком электрический сигнал, являющийся аналогом акустоэмиссионного, поступает на вход предусилителя. Как в случае одноканальной системы регистрации АЭ в ИС РАН, в многоканальной системе Amsy-5 также использовались внешние

предусилители типа АЕР4, имеющие диапазон коэффициента усиления от 34 дБ до 49 дБ с шагом 3 дБ, причем коэффициент может быть изменен вручную при помощи джампера внутри предусилителя. Наиболее распространенными являются предусилители, работающие в широком частотном диапазоне (обычно от единиц кГц до единиц МГц), а фильтрация происходит в платах ASIP-2. В комплектации Amsy-5 используются широкополосные предусилители, так как уже отмечалось ранее, частотный диапазон акустической эмиссии горных пород варьируется от единиц кГц до единиц МГц.

Усиленный АЭ сигнал по длинному кабелю поступает на вход платы ASIP-2 многоканальной системы Amsy-5. Плата ASIP-2 представляет собой двухканальную плату-процессор обработки сигналов АЭ, которая устанавливается в любом блоке, связанном через интерфейс USB с персональным компьютером. Каждая плата ASIP-2 и каждый канал на плате обрабатывают данные независимо друг от друга. Существуют две модификации ASIP-2: ASIP-2/S (стандартный вариант) и ASIP-2/A (усовершенствованный вариант). ASIP-2S сочетает в себе звено аналоговой регистрации и блока цифровой обработки сигналов. Аналоговое звено включает в себя регистрацию сигналов и фильтрацию при помощи переключаемых аналоговых полосовых фильтров с диапазонами частот: 1.6 кГц-2.4 МГц или 18 кГц-2.4 МГц. Блок цифровой обработки сигналов включает в себя АЦП (с частотой дискретизации 40 МГц при 16 бит на канал) и набор из 8 специализированных цифровых полосовых фильтров. Кроме перечисленного платы ASIP-2 содержат модуль запоминающего устройства записи волновых форм сигналов АЭ VisualTR, что было реализовано в специальных экспериментах настоящей работы и позволило в том числе гарантировать отсутствие ложных сигналов (помех, наводок) от комплекса электромагнитного воздействия.

Измерительная система Amsy-5 регистрирует сигналы АЭ при превышении некоторого порогового уровня (задаваемого исследователем) индивидуально каждым каналом и независимо от других каналов. Независимость измерений акустической эмиссии каждым каналом позволила осуществить настройку уровня порогового значения регистрации сигналов АЭ: минимальный порог 6 мкВ был установлен на каналах с датчиками частотного диапазона (100-400 кГц), более высокий порог выставлен на уровне 100 мкВ для широкополосных каналов. Это обеспечило регистрацию максимально возможного количества сигналов АЭ (в том числе с низким значением амплитуды). Высокий уровень порога для каналов с широкополосными датчиками обусловлен импульсными помехами, идущими от системы электромагнитного воздействия.

На персональном компьютере осуществляется функционирование системы обработки сигналов АЭ и сохранения результатов измерений благодаря специализированному программному обеспечению VisualAE, VisualTR и VisualClass. Обработка сигналов АЭ в

VisualAE Amsy-5 производится в режиме реального времени и содержит в себе такие функции, как: определение времени первого пересечения порога (время прибытия сигнала), времени нарастания сигнала, его длительности, амплитуды и энергии [Vallen AE Suite V6, 2010]. Энергия сигналов АЭ рассчитывается по огибающей модуля амплитуды электрического сигнала на выходе пьезопреобразователя в нВс (с точностью до 1 нВс).

При использовании нескольких каналов регистрации АЭ возможно определение местоположения источника сигнала, для этого используются импульсы, зарегистрированные по нескольким каналам в течение заданного интервала времени (не менее длительности сигнала). Импульсы идентифицируются и группируются в набор данных записи события, включающий информацию о первом и последующих превышениях порога, разнице времени регистрации и количестве превышений порога в интервале времени, соответствующем событию. К этому набору данных применяется алгоритм расчета месторасположения источника (локации), который выбирается в зависимости от геометрии конструкции/образца, количества и принципа размещения на нем датчиков АЭ. В системе Amsy-5 предусмотрены следующие алгоритмы локации: линейная локация, планарная/цилиндрическая, локация для контроля днищ резервуаров, алгоритмы трех мерной локации (локация в объеме) и сферическая локация.

В специальном цикле экспериментов для расширения диапазона получаемой акустоэмиссионной информации была реализована запись АЭ сигналов в шестиканальном режиме, геометрия расположения датчиков изображена на рисунке 2.23.

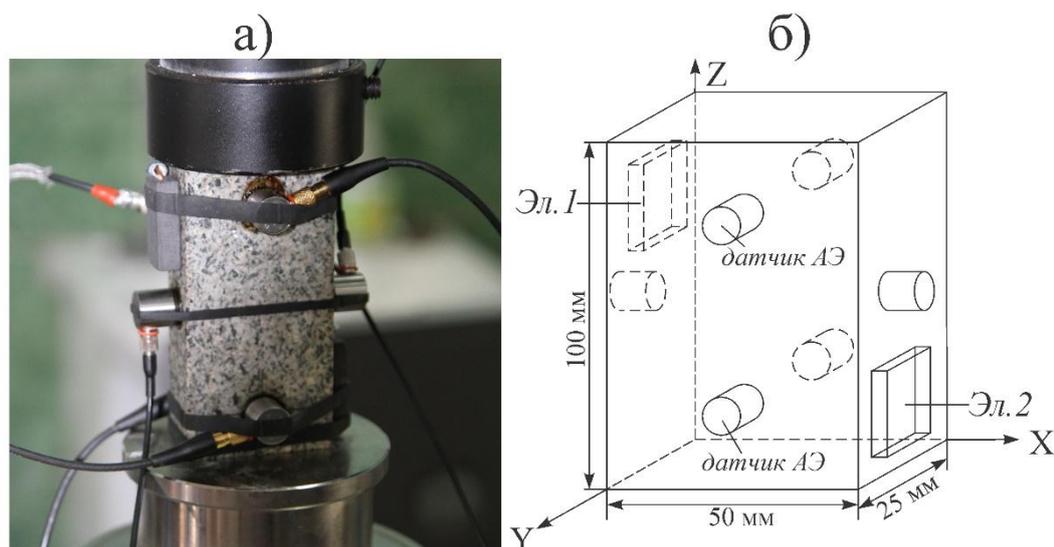


Рисунок 2.23 а – Фотография образца гранита Каиндинского месторождения, установленного для испытаний с шестью датчиками АЭ и электродами воздействия; б) схематическое расположение электродов и датчиков АЭ на образце, согласно [Мубассарова и др., 2014].

Для выполнения локационных расчетов скорость звука в материале (граните) задавалась равной 5350-5600 м/с [Добрынин и др., 1991; Физические..., 1984]. Для расчета координат

источника АЭ был применен пошаговый метод трехмерной локации, который базируется на численном пошаговом итерационном алгоритме, специально применяющемся для сплошных объектов (твердых или наполненных жидкостью) с распространением звука в трех измерениях. Суть алгоритма состоит в следующем: первоначально определяется предположительное местоположение источника АЭ, затем строится куб с определенной длиной стороны, центром которого является предположительное местоположение источника. В центре каждой грани куба задаются шесть новых виртуальных источников, для каждого из которых вычисляется значение показателя неопределенности локации (стандартное отклонение вычисленных расстояний от датчика АЭ до источника и этого расстояния в соответствии с зарегистрированной разницей времени прихода сигнала). Решение с наименьшим значением показателя неопределенности становится новой позицией источника. Затем процедура повторяется, пока позиция источника в центре куба не будет иметь наименьшее значение показателя неопределенности. После чего длина стороны куба уменьшается и шаги повторяются, пока длина стороны куба не достигнет определенного минимального значения. Координаты центра куба являются результатом расчета источника акустоэмиссионного события.

## **2.5. Выбор модельных материалов**

Процессы деформирования земной коры и образования в ней разрывов, вызывающие их силы и физико-механические свойства горных пород характеризуются большим числом физических величин [Гзовский, 1975]. При постановке вопросов, решаемых методом моделирования, во время испытания моделей и при последующем использовании результатов экспериментов необходимо учитывать ряд общих принципов, одним из которых является принцип подобия моделей природным объектам. При выборе материала испытаний для моделирования влияния ЭМ поля на деформационный (сейсмический) процесс в настоящей работе опирались (помимо соображений подобия) на результаты, полученные в предыдущих исследованиях [Закупин и др., 2006, 2006 а; Боголомов и др., 2011]. Первое – это тип горных пород (магматические, метаморфические или осадочные), залегающих на территории, для которой первоначально был установлен эффект электровоздействия на прирост локальной сейсмичности и сейсмотектонических деформаций [Тарасов, Тарасова, 2011, 2016]. Также использование метода акустической эмиссии предопределило выбор горных пород – наличие у них 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 связи с вышеизложенным, для испытаний были подобраны образцы мрамора,

месторождение Ак-Таш (Киргизия), изготовленные из монолитного блока породы. Цвет мрамора – белый. Для специального цикла экспериментов в ИМСС УрО РАН в качестве материала для испытаний был выбран гранит Каиндинского месторождения. При испытаниях серий образцов этого гранита в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред ИС РАН было получено наибольшее количество данных об откликах активности АЭ для широкого диапазона нагрузок и типов внешних воздействий [Закупин и др., 2006, 2006 а; Bogomolov et al., 2004; Богомолов и др., 2011].

Мрамор – это полнокристаллическая метаморфическая карбонатная горная порода, образовавшаяся в результате перекристаллизации известняка или доломита. Мрамор состоит из карбоната (кальция и магния) или кальцита (карбоната кальция), или из обоих минералов. Обычно мрамор содержит большое количество примесей других минералов (кварц, халцедон, полевой шпат, лимонит, гематит, пирит и др.) и органических соединений, которые различно влияют на его качество.

При изучении влияния электромагнитного поля на напряженное состояние модельных образцов важнейшей характеристикой материала является упругость, которая определяется кинематическими параметрами – скоростью распространения продольных и поперечных волн, а также модулем продольной упругости  $E$  (модулем Юнга), коэффициентом поперечного сжатия  $\nu$  (коэффициентом Пуассона), константой Ламе  $\lambda$  и модулем сдвига  $G$ . Для мрамора скорость продольных волн варьируется в диапазоне: 3.75-6.94 км/с, скорость поперечных волн равна: 2.02-3.86 км/с, модуль Юнга:  $2.3-9.8 \cdot 10^4$  МПа, модуль сдвига:  $2.8-3.6 \cdot 10^4$  МПа и коэффициент Пуассона: 0.22-0.4. Физико-механические свойства мраморов следующие: объемный вес – 2590-2740 кг/м<sup>3</sup>; пористость – не более 4%; водопоглощение – 2%. Прочность в воздушно-сухом состоянии – 80-110 МПа, в водонасыщенном – 45-105 МПа.

Большое значение также играют электрические и магнитные свойства материала. Минералы, слагающие мрамор, относятся к веществам – диэлектрикам, в большинстве своем обладающим ионной проводимостью. Удельное электрическое сопротивление мрамора меняется от  $10^6$  до  $10^7$  Ом·м; диэлектрическая проницаемость варьируется в пределах 8.3-13.5, удельная объемная магнитная восприимчивость меняется в диапазоне  $2.5-6.0 \cdot 10^{-5}$ , пробивное напряжение – от  $10^3$  до  $4.5 \cdot 10^3$  кВ/м [Добрынин и др., 1991, Корбанова, 1986; Справочник..., 1975].

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, проведенных как на сухих образцах мрамора (комнатной влажности, не подвергаемых сушке), так и водонасыщенных. Водонасыщение образцов мрамора производилось природной минерализованной водой (Урочище "Ала-Куш", родник "Ала-Арча", состав приведен в таблице 2.4) в течение нескольких

суток в специальном резервуаре. Степень водонасыщения составила 2% от массы образцов до водонасыщения. Для предотвращения испарения влаги в процессе деформации образцы сразу после водонасыщения обмазывались силиконовой смазкой, тем самым минимизируя изменения удельного сопротивления (удельное сопротивление водонасыщенного мрамора в 10 раз меньше соответствующего значения у сухих образцов [Корбанова, 1986]).

Таблица 2.4 – Состав минерализованной воды для водонасыщения образцов мрамора.

Анионы:	Содержание
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10-30 мг\дм <sup>3</sup>
HCO <sub>3</sub>	50-80 мг\дм <sup>3</sup>
Cl <sup>-</sup>	2-10 мг\дм <sup>3</sup>
Катионы:	
Ca <sup>2+</sup>	20-30 мг\дм <sup>3</sup>
Mg <sup>2+</sup>	2-10 мг\дм <sup>3</sup>
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	2-10 мг\дм <sup>3</sup>
Минерализация	80-250 мг\дм <sup>3</sup>

Гранит является кислой магматической интрузивной горной породой. Состоит из кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата и слюд – биотита и/или мусковита (химический состав гранита Каиндинского месторождения приведен в таблице 2.5). Цвет гранита серый, по размеру зерна относится к среднезернистым. При деформировании и разрушении в условиях одноосного сжатия гранит проявляет упругие свойства и характеризуется хрупким типом разрушения (основные физико-механические характеристики гранита Каиндинского месторождения приведены в таблице 2.6). Модуль упругости (модуль Юнга) для гранитов лежит в интервале 2.0-8.5·10<sup>4</sup> МПа, модуль сдвига равен 1.6-2.8·10<sup>4</sup> МПа, коэффициент Пуассона: 0.08-0.34. Скорости продольных и поперечных волн лежат в диапазонах 3.7-6.51 км/с и 2.7-3.8 км/с соответственно [Корбанова, 1986].

Таблица 2.5 – Химический состав гранита Каиндинского месторождения.

Содержание	Единица измерения	Показатель
Калишпат	%	45÷50
Биотит	%	5÷10
Плагиоклаз	%	15÷20
Акцессорные	%	5
Кварц	%	25÷30

Основные минералы, слагающие граниты, относятся к минералам третьей группы (диэлектрикам), удельное сопротивление которых изменяется от 5·10<sup>7</sup> до 2.7·10<sup>16</sup> Ом·м и обычно больше 10<sup>11</sup> Ом·м. Минералы рассматриваемой группы (кварц, полевые шпаты, слюды и др.) являются слабополяризующимися диэлектриками, для которых характерен ионный механизм поляризации. Значения диэлектрической проницаемости меняется от 4.5 до 11.1, удельное электрическое сопротивление – от 10<sup>6</sup> до 8·10<sup>7</sup> Ом·м; удельная объемная магнитная восприимчивость  $\chi$  меняется в диапазоне – 0-7.5·10<sup>-2</sup>, [Добрынин и др., 1991, Корбанова, 1986].

Кроме этого, основной слагающий породу минерал кварц (25-30%) имеет пьезоэлектрический модуль, который варьируется в интервале  $0.6 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  Кл/Н и обуславливает наличие в материале пьезоэлектрических свойств.

Размеры образцов были выбраны согласно исследованиям [Прочность..., 1979], в которых изучалось влияние формы и размеров образцов горных пород на результаты механических испытаний, и рекомендуемым условиям для проведения испытаний на одноосное сжатие [Dudley et al., 2016]. Для цилиндрических образцов было показано, что при отношении размеров образца (высоты к диаметру)  $h/d \geq 2$  практически не изменяются и не зависят от торцевых условий коэффициенты жесткости и поперечного расширения (условно пересчитываемые на модуль упругости и коэффициент Пуассона в приближении однородной деформации). Кроме этого, до величины  $h/d \approx 1/5-2$  по мере роста этого отношения происходит довольно быстрое снижение прочности. Повышенная прочность "низких" образцов объясняется тем, что зоны влияния торцевого трения у них смыкаются, в теле образцов преобладающим является напряженное состояние трехосного сжатия. При отношении  $h/d \geq 2$  в средней части образца уже формируется область однородного сжатия и эффективная жесткость образцов при дальнейшем увеличении уже не зависит от трения на торцах.

Таблица 2.6 – Физико-механические характеристики гранита (Каинда).

Наименование свойств	Единица измерения	Значение
Предел прочности на сжатие в сухом состоянии	МПа	191.17
Предел прочности в водонасыщенном состоянии	МПа	173.56
Коэффициент размягчения (коэффициент снижения прочности при насыщении водой)		0.92
Истинная плотность	г/см <sup>3</sup>	2.79
Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	2.77
Пористость	%	1.13
Водопоглощение	%	0.19
Радиационный фон	МПа	10

Образцы мрамора были выполнены в форме параллелепипеда с размерами 40×20×80 мм. Образцы гранита были изготовлены из монолитного камня размером 25×50×100 мм. Линейные размеры отклоняются от заданных в пределах  $\pm 0.1$  мм, отклонение от параллельности граней не превышает 0.1 мм.

## Выводы по главе 2

Разработана и отлажена методика проведения экспериментов на рычажном прессе для выявления реакции нагруженной среды на воздействие электромагнитного поля (по данным о скорости деформаций и активности АЭ). Обоснован выбор материала и формы образцов для

испытаний, режима нагружения (одноосное сжатие) и скорости роста сжимающей нагрузки. Подготовлена система для электромагнитных воздействий на нагруженные образцы горных пород, включающая генераторы импульсов, графитовые электроды и магнитную катушку индуктивности, с параметрами: напряженность электрического поля, индукция магнитного поля и др., необходимыми для исследований по теме настоящей работы. Подтверждена работоспособность и эффективность аппаратно-программных систем для широкополосных измерений акустической эмиссии в одноканальном и многоканальном исполнении, а также прецизионных измерений деформации. Отлажена методика интерпретации экспериментальных данных для выявления отклика активности акустической эмиссии нагруженной среды на воздействие электромагнитного поля.

## **Глава 3. Вариации скорости деформации и параметров акустической эмиссии нагруженных образцов мрамора при воздействиях взаимоперпендикулярных (скрещенных) электрического и магнитного полей**

### **3.1. Методические эксперименты по одноосному сжатию образцов мрамора в режиме с постоянной скоростью нагружения (без воздействия электромагнитных полей)**

#### **3.1.1. Измерения деформаций, нагрузки и акустической эмиссии при одноосном сжатии в отсутствие электромагнитных воздействий**

Для анализа результатов экспериментов на образцах горных пород, испытываемых с воздействием электромагнитного поля, и приближения к пониманию и теоретическому описанию механизмов преобразования энергии ЭМ поля в упругую энергию необходимо предварительно изучить типичный характер деформирования материала, когда на образец действует только один фактор – сила 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. Дополнительно определялись основные механические характеристики (пределы упругости и прочности, модули Юнга и Пуассона). Также оптимизировалась постановка эксперимента, описанная в разделах 2.3 и 2.4.1, с отработкой технических деталей: синхронизации процесса нагружения с измерением нагрузки, трех компонент деформации и регистрацией АЭ материала в условиях одноосного сжатия. Как было отмечено выше в разделе 2.3, продольная деформация определялась укорочением рабочего пространства между верхней траверсой и нижней давящей пятой, в котором устанавливается образец. Измерение поперечных деформаций производилось в точках – центрах боковых граней образца (отмечены цифрой 2 на рисунке 2.7, стр. 75).

Рассмотрим типичный пример деформирования образца мрамора в условиях одноосного сжатия. В течение эксперимента напряжение, рассчитанное с учетом начальной площади торцов, на образце изменялось линейно, флуктуации (стандартное отклонение при вычете линейного тренда) не превышали 0.6 МПа. Образец разрушился при напряжении 152.5 МПа. На рисунке 3.1 показаны временная зависимость изменения силы сжатия (а) и диаграмма деформирования (б) образца в координатах напряжение-деформация. Как видно из рисунка 3.1 а после стартовой нагрузки до 25 кН на начальном участке графика скорость изменения усилия меньше, чем 0.5 Н/с. Это связано с особенностями работы рычажной установки при малых нагрузках. Далее наклон графика увеличивается до значения 0.5 Н/с и вплоть до разрушения остается неизменным. Зависимость напряжения от деформации (рисунок 3.1 б) демонстрирует

типичную картину одноосного сжатия горной породы и характеризуется тремя участками. До значения 63.4 МПа зависимость напряжения от деформации изменяется нелинейно, что является типичным для большинства горных пород и вызвано процессом уплотнения. Уплотнение происходит за счет смыкания различных пустот (пор, трещин), расположенных преимущественно перпендикулярно направлению сжатия, и характеризуется наличием упругой и неупругой составляющих [Лавров и др., 2004]. В данном случае наличие нелинейности говорит о преобладании в данном материале неупругой компоненты уплотнения. Неупругая составляющая обусловлена разрушением перемычек, имеющихся между начальными пустотами (порами и трещинами) и расположенных обычно вдоль границ зерен, что приводит к их необратимому закрытию. Далее деформирование образца происходит по закону Гука, а при относительных значениях нагрузки свыше  $k^*=0.7$  ( $k^*$  – отношение текущей нагрузки к разрушающей) процесс деформирования вновь приобретает нелинейный характер с ростом продольной деформации вплоть до момента разрушения.

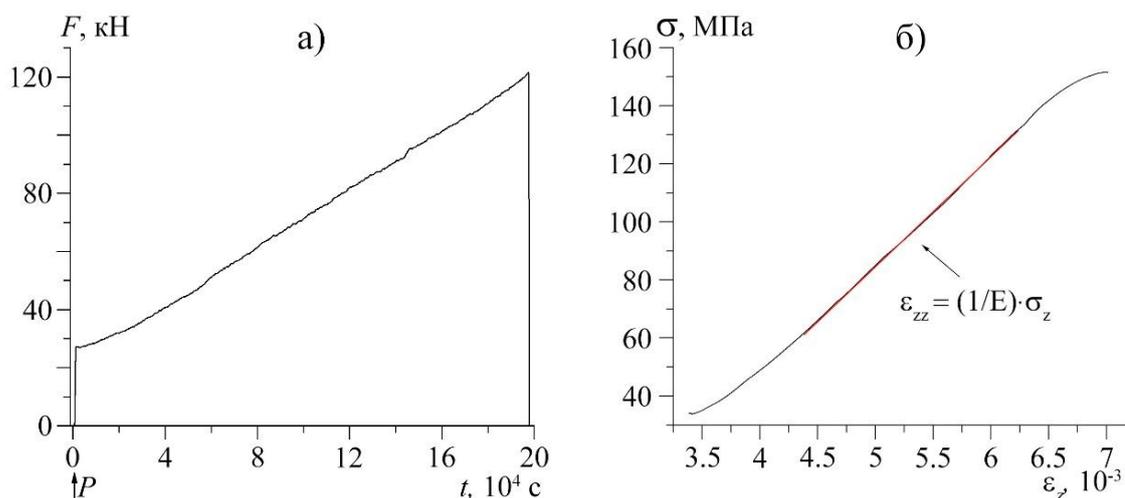


Рисунок 3.1 – Графики: а – изменения усилия сжатия, б – напряжения-деформации образца мрамора, сглаженные во времени. Красной линией отмечена аппроксимационная линия, демонстрирующая участок упругих деформаций.

Рассмотрим временные зависимости продольной  $\epsilon_{ZZ}$  и поперечных деформаций  $\epsilon_{XX}$ ,  $\epsilon_{YY}$  (далее просто  $\epsilon_Z$ ,  $\epsilon_X$ ,  $\epsilon_Y$ ) и активности АЭ, полученные в этом эксперименте и отражающие характер деформирования всех образцов, испытанных без ЭМ воздействия (рисунок 3.2). Как видно из графиков, продольная  $\epsilon_Z$  и поперечная  $\epsilon_Y$  деформации увеличиваются по мере роста напряжения:  $\epsilon_Z$  – линейно,  $\epsilon_Y$  – нелинейно. Наилучшей аппроксимацией зависимости  $\epsilon_Y(t)$  является логарифмическая функция вида  $\epsilon_Y = a - b \cdot \ln(c + t)$ , где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты.

Изменения поперечной деформации  $\epsilon_X$  незначительны до момента  $t \approx 12 \cdot 10^4$  с (цифра 3 на рисунке 3.2 а), когда произошел резкий скачок  $\epsilon_X$  в течение  $\Delta t = 3.36$  с с приростом

деформации на  $\Delta\varepsilon_x=10^{-3}$ , соответствующий 34.5% от общей деформации в этом направлении (или  $\Delta l_x=40$  мкм). Напряжение на образце при этом соответствовало коэффициенту нагрузки  $k^*=0.68$ . Синхронно наблюдается прирост и продольной деформации, однако он менее выражен ( $\Delta\varepsilon_z=3.65 \cdot 10^{-5}$ ) и начинается на 0.64 с позже роста поперечной деформации  $\varepsilon_x$ . Значительные по амплитуде приращения  $\Delta\varepsilon_z=2.8 \cdot 10^{-4}$  и  $\Delta\varepsilon_z=5.6 \cdot 10^{-4}$  наблюдаются дважды за период испытания при напряжении  $k^*=0.4$  и  $k^*=0.76$  от разрушения соответственно, длительность первого составляет  $\Delta t_1=110.5$  минут, второго –  $\Delta t_2=148$  минут (обозначения 2 и 4 на рисунке 3.2 а). Во втором случае изменение продольной деформации сопровождается уменьшением амплитуд поперечных деформаций:  $\varepsilon_x$  начинает уменьшаться спустя 5.5 минут, а  $\varepsilon_y$  – спустя 23 минуты. Деформация образца за весь период испытаний в трех направлениях составляет:  $\varepsilon_x = 2.8 \cdot 10^{-3}$ ,  $\varepsilon_y = 36.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $\varepsilon_z = 7 \cdot 10^{-3}$ .

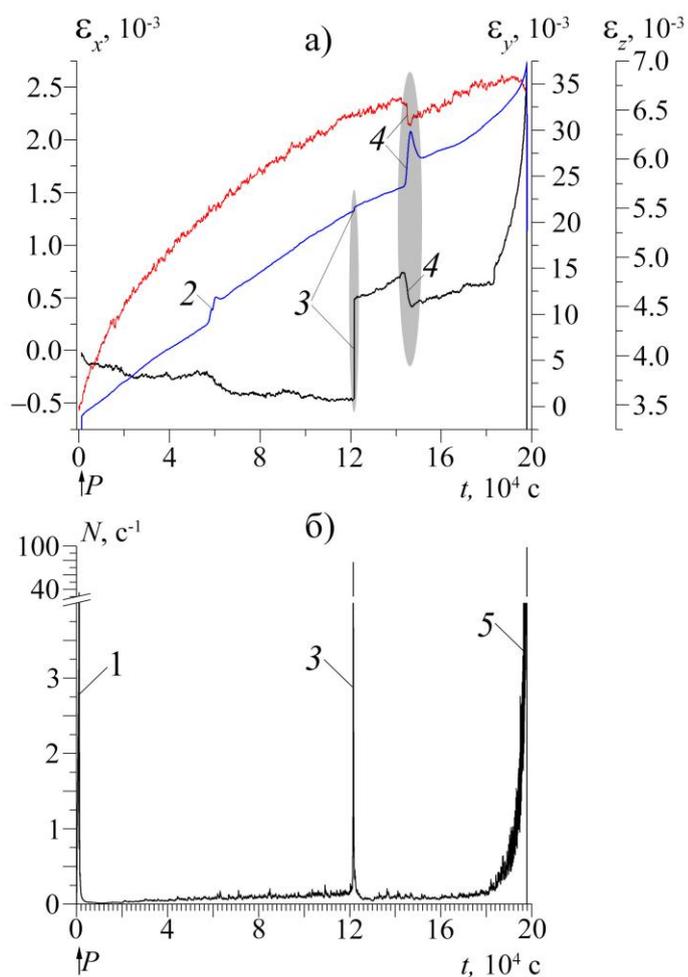


Рисунок 3.2 – Графики: а – изменения трех компонент деформаций, черный график –  $\varepsilon_x$ , красный график –  $\varepsilon_y$ , синий график –  $\varepsilon_z$ ; б – активности АЭ. Р – нагрузка; 1 – максимальное значение активности АЭ при после стартовой нагрузки  $35.7 c^{-1}$ ; 2 ÷ 4 – приращение компонент деформаций; 3 – прирост компонент деформаций  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_z$  и активности АЭ до  $77 c^{-1}$ ; 5 – максимальное значение активности АЭ при разрушении  $98 c^{-1}$  согласно [Богомолов и др., 2017].

Рассмотрим график активности АЭ в этом эксперименте. Как видно из рисунка 3.2 б после релаксационного процесса вслед за стартовой нагрузкой наблюдается линейный тренд увеличения активности АЭ с  $0.025 c^{-1}$  до  $0.2 c^{-1}$  вплоть до времени  $t \approx 12 \cdot 10^4$  с, когда произошел

лавинообразный прирост активности сигналов акустической эмиссии до  $77 \text{ с}^{-1}$  (цифра 3 на рисунке 3.2 б). Средняя скорость накопления событий АЭ на участке от нагрузки до этого момента равна  $0.074 \text{ с}^{-1}$ . Вышеупомянутый прирост числа событий АЭ (цифра 3 на рисунке 3.2 б) составил 2134 сигнала за 30 минут активизации АЭ и произошел почти синхронно со скачком продольной  $\varepsilon_z$  и поперечной  $\varepsilon_x$  деформации (рисунок 3.2). Далее активность спала до уровня  $0.1 \text{ с}^{-1}$ , который сохранялся на протяжении  $t=5.6 \cdot 10^4 \text{ с}$ . Перед разрушением образца скорость накопления событий АЭ составила 98 событий в секунду. За время испытания было зарегистрировано 38844 сигнала АЭ, амплитуда которых (в электрических единицах на выходе первичного преобразователя) изменялась в пределах от 20 до 2091 мкВ.

По известным значениям амплитуд сигналов АЭ, используя упрощенную формулу для расчета энергии сигналов  $E = A^2$  [Соболев, Пономарев, 2003], было построено кумулятивное распределение сигналов по условным энергиям (рисунок 3.3 а). Как видно из графика, распределение сигналов АЭ подчиняется закону повторяемости (аналогично закону Гутенберга-Рихтера для сейсмических событий), угол наклона графика равен  $b = 2.5$ . При использовании известного выражения для оценки энергетического класса события  $K = \lg E = 2 \cdot \lg A$  [Соболев, Пономарев, 2003] в другом диапазоне энергий (т.е. для сигналов АЭ), было получено, что значения  $K$  лежат в интервале величин 2.63-6.64 условных единиц. Для последующего выявления реакции материала на внешнее электромагнитное воздействие был проведен расчет угла наклона графика повторяемости  $b$  в скользящем временном окне (рисунок 3.3 б). Выборкой служили все зарегистрированные события, а оценка тангенса угла наклона производилась за 1 час, сдвиг окна производился на каждую секунду (рисунок 3.3 б).

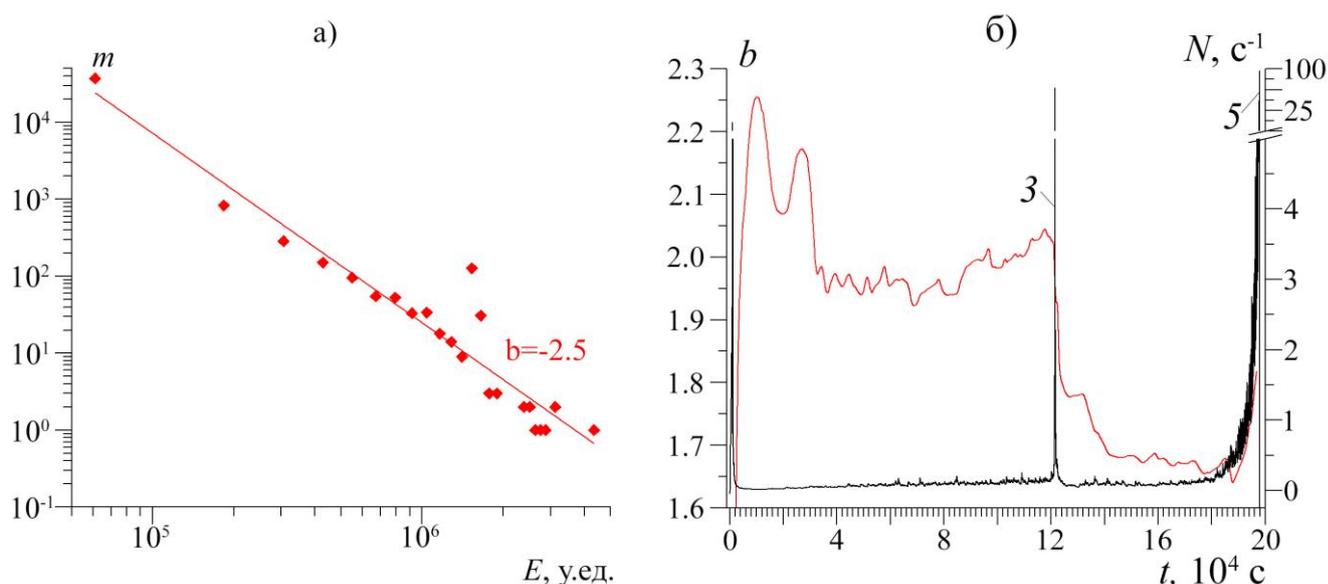


Рисунок 3.3 – Энергетические характеристики сигналов АЭ образца мрамора: а – кумулятивное распределение сигналов АЭ по энергиям,  $m$  – количество сигналов АЭ, б – изменение во времени

углового коэффициента  $b$ , вычисленного в скользящем окне величиной 1 час.

В связи с тем, что на начальном участке деформирования ( $k^* < 0.30-0.35$ ) после стартовой нагрузки количество сигналов АЭ очень мало, на графике изменения углового коэффициента  $b$  наблюдается сильный разброс значений, поэтому до  $t = 4 \cdot 10^4$  с значения  $b$  не будем учитывать. Установившееся значение  $b = 1.95$  сохранялось в течение порядка 14 часов до  $t \sim 9 \cdot 10^4$  с. Затем наблюдался небольшой рост до  $b = 2.03$ , а в момент прироста активности АЭ, обозначенного на рисунке 3.3 б цифрой 3, доля сигналов с большими энергиями увеличилась –  $b$  уменьшилось на 5%. Дальнейшее уменьшение коэффициента  $b$  продолжается вплоть до этапа предразрушения (в общей сложности составило 18% от значения  $b$  при  $t \approx 12 \cdot 10^4$  с). На последнем этапе, когда стремительно увеличивается активность АЭ, коэффициент  $b$  вновь растет (рисунок 3.3 б).

Таким образом, картина распределения сигналов АЭ в эксперименте выглядит следующим образом: в диапазоне относительных нагрузок  $k^* < 0.65-0.75$  значение  $b$  сохраняется квазипостоянным: соотношение сигналов с большими и меньшими энергиями изменяется незначительно в ходе нарастания напряжения. При  $k^* > 0.65-0.75$  и до предразрушения количество сигналов АЭ с большими энергиями увеличивается на примерно 18%. Сам процесс разрушения характеризуется увеличением количества сигналов с меньшими энергиями.

Остановимся на подробностях вышеупомянутого синхронного прироста деформации и акустической эмиссии (цифра 3 на рисунке 3.2), для этого дополнительно построим график накопления событий АЭ (рисунок 3.4 б).

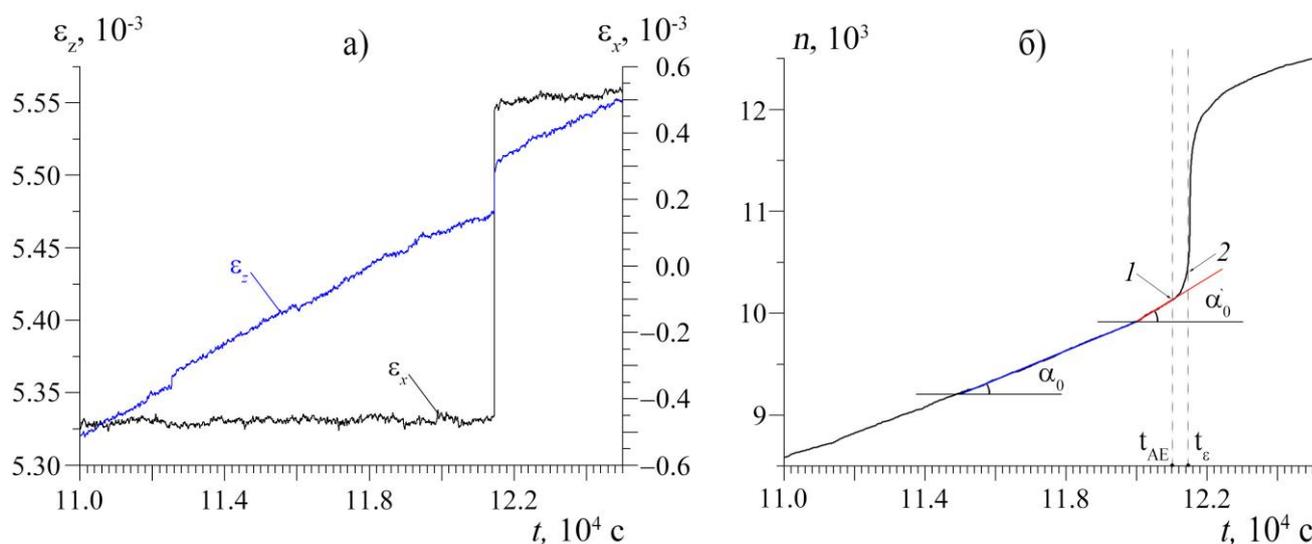


Рисунок 3.4 – Масштабированные по времени графики: а – изменения 2-х компонент деформаций, б – накопления сигналов АЭ.

В течение как минимум 1 часа 30 минут в образце возникали сигналы АЭ с постоянной скоростью их накопления ( $\alpha_0 = 0.14 \text{ с}^{-1}$ ), затем угол наклона графика накопления сигналов незначительно увеличился до  $\alpha_0' = 0.21 \text{ с}^{-1}$  и сохранялся на этом уровне в течение 18 минут. Наблюдаемое резкое увеличение скорости накопления событий АЭ (в момент времени  $t_{AE}$ ) произошло на 367 секунд раньше синхронного прироста в продольной и поперечной деформации (рисунок 3.4). Отметим, что в совокупности прирост деформации  $\varepsilon_x$  на 34.5%, а также продольной деформации  $\varepsilon_z$ , но значительно меньший по амплитуде, и 2134 сигнала АЭ за 30 минут позволяют говорить о едином процессе, который мы регистрируем при помощи двух методов – непосредственного измерения деформации и метода АЭ, которые в сочетании дополняют друг друга.

По результатам цикла из четырех экспериментов получено: предел прочности варьируется в диапазоне 130-150 МПа, предел упругости, определенный по отклонению графика напряжения-деформации от линейного тренда, составляет при этом 60-75% от предела прочности (таблица 3.1). Коэффициент Пуассона и модуль Юнга для серии образцов определялись на участке упругих деформаций, исходя из сигма-эпсилон характеристики каждого образца. Модуль Юнга определялся как угловой коэффициент графика напряжения-деформации, а коэффициент Пуассона как отношение значений поперечной деформации к продольной. Для определения коэффициента Пуассона была использована запатентованная методика [Способ..., 2009], заключающаяся в измерении поперечных и продольных деформаций на временном интервале механического нагружения, на котором активность АЭ минимальна. Так как все образцы имели форму параллелепипеда с разным размером сторон (высота  $h=80$  мм, длина  $a=40$  мм, ширина  $c=20$  мм), то определялись отношения обеих поперечных компонент деформаций к продольной, имеющие смысл аналогичный коэффициенту Пуассона.

Таблица 3.1. Основные механические характеристики образцов мрамора.

Образец	ЭМВ	$\sigma_z(\varepsilon_z) = E \cdot \varepsilon_z$ Стадия упругого деформирования			$\sigma_{разр},$ МПа	$\varepsilon_x,$ $10^{-3}$	$\varepsilon_y,$ $10^{-3}$	$\varepsilon_z,$ $10^{-3}$	Параметры перехода в область неупругих деформаций	
		$\mu_x$	$\mu_y$	E, ГПа					$\sigma_{упр},$ МПа	$k_{упр},$ %
1	-	0.08	2.8	32.9	134.3	0.17	8.0	5.34	n/a	n/a
2	-	0.02	0.2	25.9	84	0.3	4.9	12.5	50.9	60.6
3	-	0.08	5.5	40.1	152.5	2.8	36.7	6.97	102.8	67.5
4	-	0.6	4.3	40.6	149.5	3.7	17.7	5.3	107.9	72.2

Модуль Юнга варьируется в пределах 2.9-4.1  $10^2$  ГПа. Разброс значений коэффициентов

поперечной деформации для всех образцов большой, выделить можно одну характерную особенность:  $\mu_x$  на порядок меньше  $\mu_y$ . Образец № 2 отличается от других образцов серии низким пределом прочности, меньшим модулем Юнга, большой деформацией в осевом направлении, незначительной деформацией в поперечных направлениях и значительно меньшими коэффициентами поперечной деформации. Для остальных образцов наблюдаются близкие значения для всех параметров.

Особенности деформирования образцов мрамора (по диаграмме напряжения-деформации, рисунок 3.1, графикам трех компонент деформации и активности АЭ, рисунок 3.2) демонстрируют сильную неоднородность напряженного состояния. Известно, что многочисленные испытания горных пород были выполнены в рамках изучения проблем горных ударов, внезапных выбросов породы, угля и газа, а также устойчивости выработок скважин на больших глубинах. В контексте указанных проблем исследователями был определен список физико-механических характеристик горных пород, необходимых для изучения, и выработаны основные требования к испытаниям [Dudley et al., 2016]. В этой связи абсолютное большинство исследований было проведено на образцах цилиндрической формы или правильной призмы с квадратным сечением, а влияние формы образца на прочностные свойства горных пород изучалось при варьировании соотношения высоты образцов к их диаметру  $h/d$  (или к ребру в случае квадратного сечения  $h/a$ ) [Фадеев, 1979]. Однако даже в условиях неравенства размеров ребер (при соотношении размеров 4:2:1 в нашем случае) образца призматической формы при одноосном сжатии в центрах граней образца изменение поперечных деформаций до предела прочности характеризуется линейным ростом, так как именно в центральном сечении образца состояние материала близко к однородному напряженному состоянию (рисунок 3.5), [Ставрогин, Протосеня, 2001].

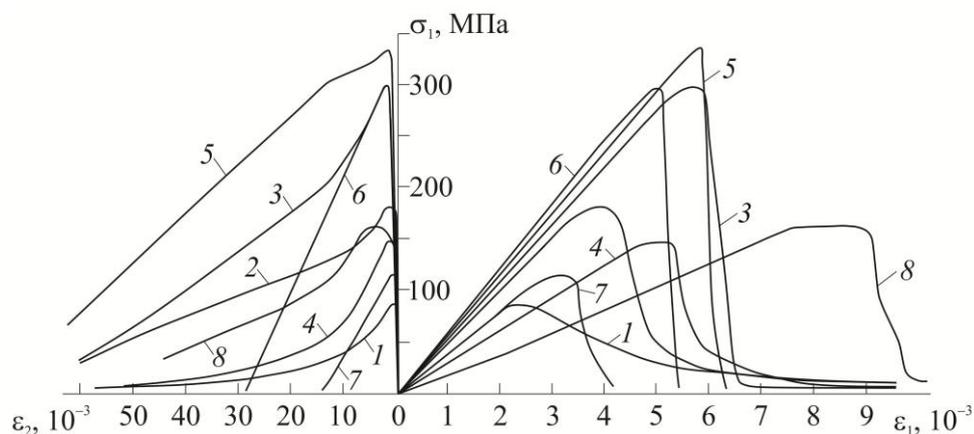


Рисунок 3.5 – Полные диаграммы "напряжение-деформация" для серии горных пород, испытанных при одноосном сжатии согласно [Ставрогин, Протосеня, 2001]. 1 – мрамор (Коелга); 2 – биотитовый гранит (Карелия); 3 – биотитовый плагиогранит (Южуралзолото); 4 – песчаник 1 (Донбасс);

5 – плагиогранит (Южуралзолото); 6 – диабаз (Братская ГЭС); 7 – талькохлорит (Сегозеро); 8 – песчаник 2 (Донбасс).

В случае испытаний на образцах мрамора поперечные деформации развиваются неравномерно, что отражается в нелинейном изменении объемной деформаций образца на протяжении всего времени деформирования, то есть до предела прочности. С учетом знака значение объемной деформации рассчитывалось по формуле:

$$\theta = \varepsilon_z + \varepsilon_x + \varepsilon_y, \quad (3.1).$$

За положительное направление было выбрано направление сжатия. На рисунке 3.6 представлены временная зависимость объемной деформации и график напряжения от объемной деформации, сглаженные по времени.

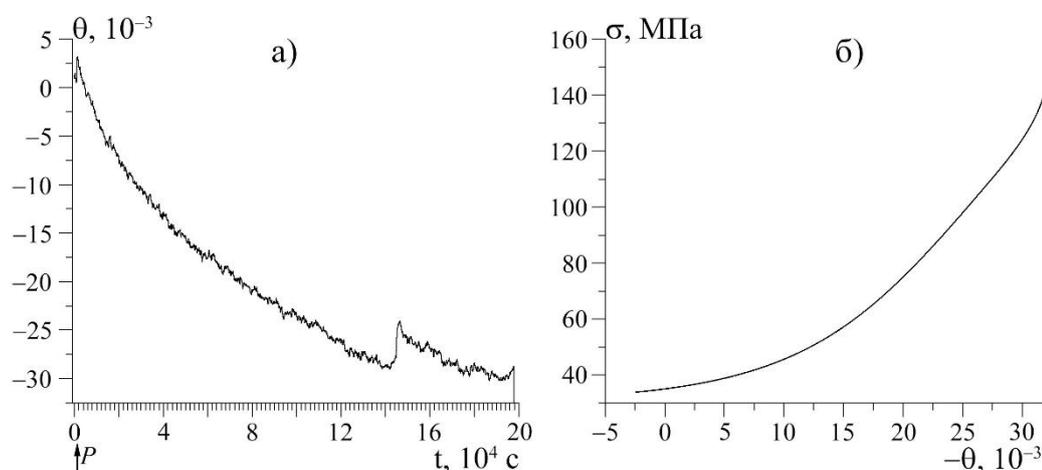


Рисунок 3.6 – Зависимость объемной деформации образца мрамора от времени (а) и от уровня осевого напряжения (б), сглаженные при помощи метода скользящего среднего.

Оценка стандартного отклонения величины объемной деформации для всего периода времени составляет  $8.6 \cdot 10^{-4}$ . Доверительный интервал значений  $\theta$  для напряжения в 1 МПа составляет 10 %. Вариации напряжения, равные 3 МПа, соответствуют величине флуктуаций объемной деформации  $10^{-3}$ .

### 3.1.2. Определение скоростей деформаций (или методика расчета скоростей деформаций)

Напряженное состояние большинства горных пород, близкое к однородному одноосному сжатию, характеризуется объемными деформациями, линейно возрастающими до предела упругости (рисунок 3.7) [Ставрогин, Протосеня, 2001]. Вместе с тем, для исследования влияния электромагнитного поля наиболее важным фактором является воспроизводимость этого напряженного состояния, что в данной серии экспериментов выполняется с высокой точностью.

Следующим шагом в анализе качественных и количественных критериев реакции

материала на воздействие ЭМ поля является определение скорости деформаций нагруженных образцов и ее изменения в ходе эксперимента (критерии оценки активности АЭ описаны в разделе 2.4.2).

Как известно (раздел 1.3.1), отклики акустической эмиссии на ЭМ воздействие преимущественно имели место сразу после включения источников воздействия, или с задержками, не превышающими длительности воздействия (обычно 1 час). Таким образом, можно предположить, что с откликами на ЭМ воздействие можно связывать быстрые изменения скорости дефектообразования, а с упрочнением – более медленные. Для подтверждения этой гипотезы будем анализировать не только значения поперечных и продольной компонент деформации от времени, но и их скорости. В данной постановке экспериментов скорость деформации можно оценивать как тангенс угла наклона графика деформации от времени или как первую производную от времени. Будем использовать угловой коэффициент графика деформации, так как он дает сглаженную картину, а отклики на воздействие могут проявиться в его изменении (как в увеличении, так и в уменьшении).

Из работ, посвященных свойствам откликов АЭ на электромагнитное воздействие (раздел 1.3.1), вытекает также выбор интервала времени, на котором следует оценивать скорость деформации – 1 час. Это время превышает характерную длительность откликов АЭ, свидетельствующих о реакции среды на внешнее воздействие. Поясним выбор часовых интервалов. В предшествующих работах (обзор в [Богомолов и др., 2011]) установлено возможное последствие ЭМ полей на активность АЭ при постоянном уровне нагрузки. Отсюда следует, что интервалы для оценки изменений скорости деформаций должны с запасом превышать характерную длительность акустоэмиссионных откликов на ЭМ воздействие. Вместе с тем, в случае режима роста нагрузки с постоянной скоростью за 1 час нагрузка на образце увеличивается на 1.8 кН. В отличие от режима квазиползучести при фиксированной нагрузке, изменения скоростей деформации после выключения источника электромагнитного воздействия могут быть связаны просто с ростом напряжений, но не с последствием ЭМ поля. Из-за этого использовать более длинные интервалы вряд ли целесообразно.

Для повышения точности расчетов будем использовать 2 метода определения скорости деформации. Первый состоит в разбиении всего временного интервала испытания на часовые периоды, на которых производилась аппроксимация изменения продольной деформации линейной зависимостью с вычислением тангенса угла наклона этой зависимости (рисунок 3.8). Второй метод предполагает линейную аппроксимацию и расчет углового коэффициента этой прямой в скользящем окне произвольной длины. Вычисления коэффициента линейной аппроксимационной зависимости по первой методике выполнялись средствами программного пакета Origin 9.0. Расчеты коэффициентов линейной зависимости по второй методике были

реализованы с помощью метода наименьших квадратов.

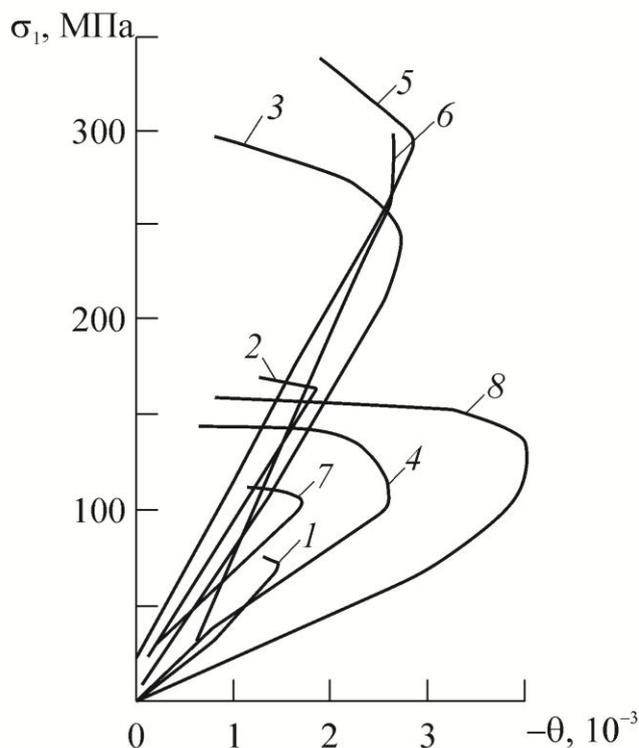


Рисунок 3.7 – Зависимость объемных деформаций от уровня осевого напряжения для восьми разновидностей пород до предела прочности согласно [Ставрогин, Протосеня, 2001]. 1 – мрамор (Коелга); 2 – биотитовый гранит (Карелия); 3 – биотитовый плагиогранит (Южуралзолото); 4 – песчаник 1 (Донбасс); 5 – плагиогранит (Южуралзолото); 6 – диабаз (Братская ГЭС); 7 – талькохлорит (Сегозеро); 8 – песчаник 2 (Донбасс).

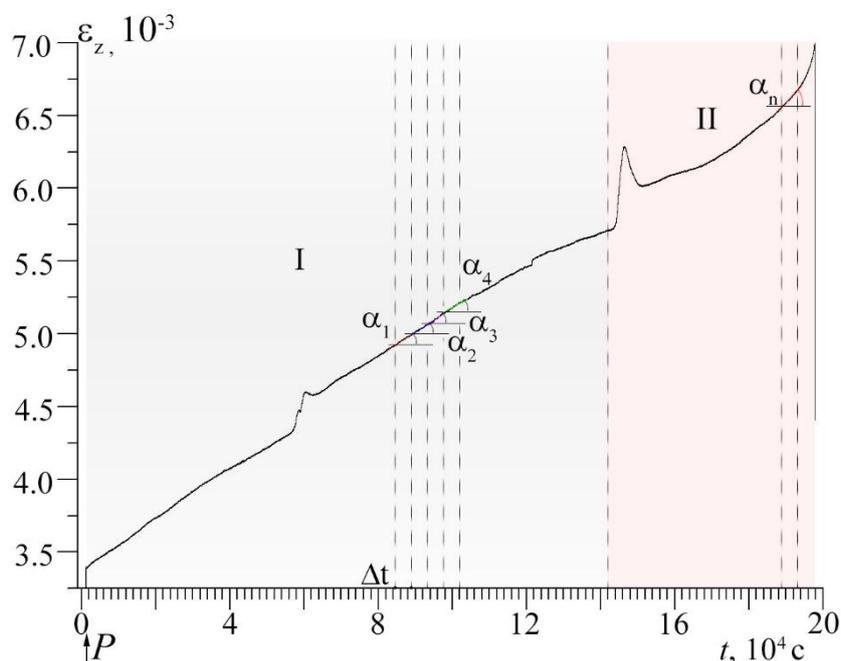


Рисунок 3.8. Схема первой методики определения скорости продольной деформации. Штрихпунктирными линиями отмечены интервалы длительностью  $\Delta t=1$  час, по которым вычислялись углы  $\alpha_n$ . I, II – области значений  $k^*<0.7$  и  $k^*>0.7$  соответственно.

Выделим на графике продольной деформации на рисунке 3.8 два участка, соответствующие областям I (при  $k^*<0.7$ ) и II (при  $k^*>0.7$ ) деформаций (согласно  $\sigma$ - $\varepsilon$  характеристике). Отдельно для каждой области продольная деформация аппроксимируется линейной зависимостью на одночасовых интервалах и определяются ее коэффициенты (рисунок 3.8). В области выше предела упругости данная методика расчета скорости

деформации как тангенса угла наклона также может быть использована, поскольку в течение часа продольная деформация изменяется линейно, несмотря на общую тенденцию нелинейной зависимости. По данным 4-х экспериментов оценки углового коэффициента графика продольной деформации показали, что при нагружении образцов мрамора в режиме активного нагружения одноосным сжатием со скоростью 0.5 Н/с скорость продольной деформации  $\dot{\varepsilon}_z$  имеет порядок  $10^{-8} \text{ с}^{-1}$ , за исключением трех периодов времени, обозначенных цифрами 2-4 на рисунке 3.9.

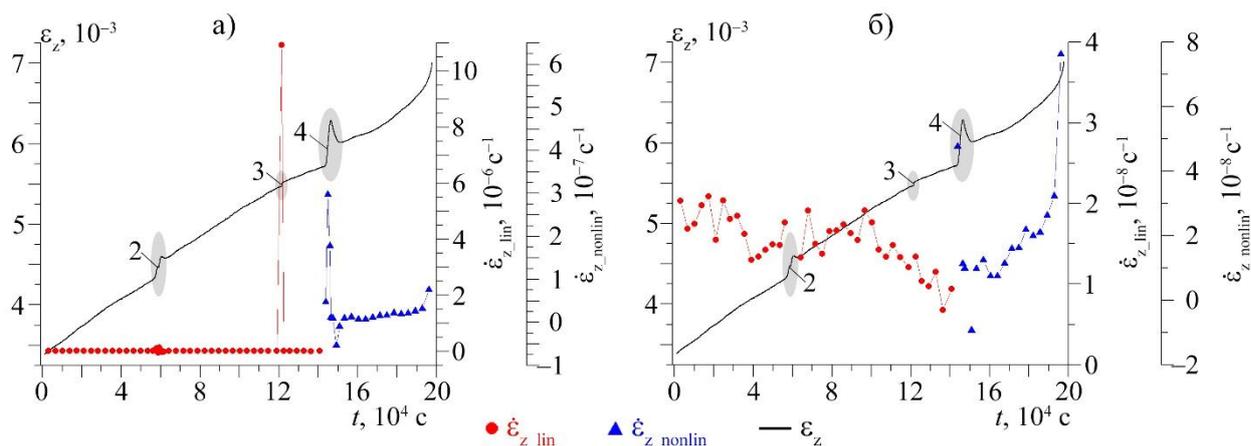


Рисунок 3.9 а – Графики изменения продольной деформации и ее скорости, оцененные за 1-часовой период времени, б – то же в масштабированном виде. Красные точки – область I ( $k^* < 0.7$ ), синие треугольники – область II ( $k^* > 0.7$ ).

Изменения продольной деформации от времени на участках 2 и 4 сходны между собой: скорость деформации имеет порядок  $10^{-7} \text{ с}^{-1}$ , абсолютный прирост деформации составляет порядка  $2.8-5.6 \cdot 10^{-4}$ , а длительности обоих процессов во времени также значительны и составляют  $\Delta t_1 = 110.5$  мин и  $\Delta t_2 = 148$  мин. При этом оба процесса не сопровождаются каким-либо значительным акустоэмиссионным излучением, так как в АЭ сохраняется фоновый линейный тренд (рисунок 3.2 б). Изменения деформации в области 3 были подробно рассмотрены в начале данного раздела, здесь лишь стоит отметить, что оцененная в данный период времени скорость деформации составляет  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

Аналогичные результаты были получены при использовании методики расчета угла наклона графика продольной деформации в скользящем окне варьируемой величины (рисунок 3.10, рисунок 3.11). Средняя скорость продольной деформации, оцененная за 1 час в скользящем окне в области I (исключая моменты 2-3) составляет  $1.9 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ , ее стандартное отклонение –  $2.3 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Средняя скорость продольной деформации, также оцененная за 1 час в скользящем окне в области деформирования II (исключая момент 4) меньше и равна  $1.8 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ , а ее стандартное отклонение, наоборот, выше –  $1.05 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ . Увеличение на порядок стандартного отклонения в области деформирования II связано прежде всего с

экспоненциальным ростом деформации на стадии предразрушения за 1-1.5 часа до непосредственного момента разрушения. Исключив и стадию предразрушения из рассмотрения (что согласуется с тем фактом, что на стадии предразрушения ЭМ воздействие играет роль «катализатора» разрушения, а не превентивного фактора), средняя величина скорости осевой деформации составляет  $1.1 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ , а стандартное отклонение –  $3.9 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$ .

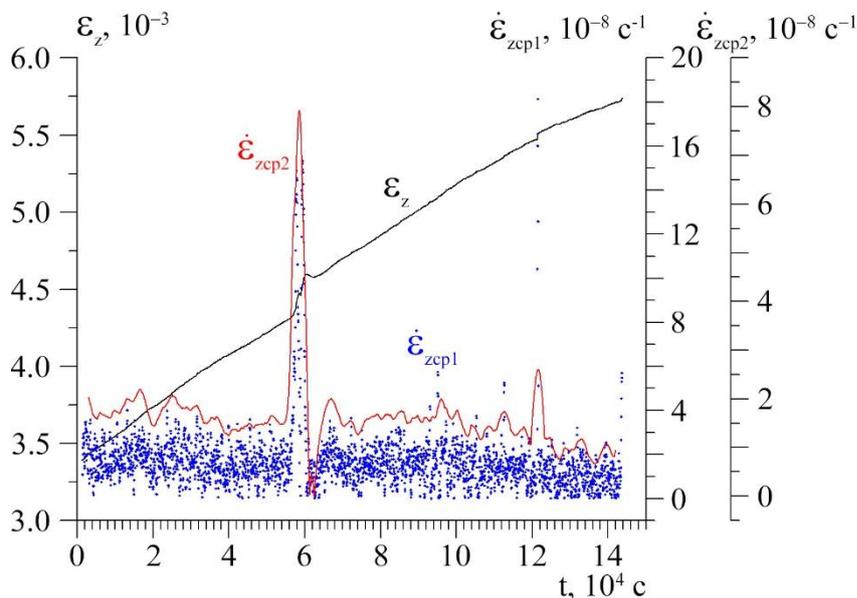


Рисунок 3.10 – Временные зависимости продольной деформации, скорости продольной деформации (по модулю), вычисленной в скользящем окне величиной 5 минут  $\dot{\epsilon}_{Zmean1}$  (синие точки) и скорости продольной деформации (по модулю), вычисленной в скользящем окне размером 1 час  $\dot{\epsilon}_{Zmean2}$  (красная кривая) в области I при  $k^* < 0.7$ .

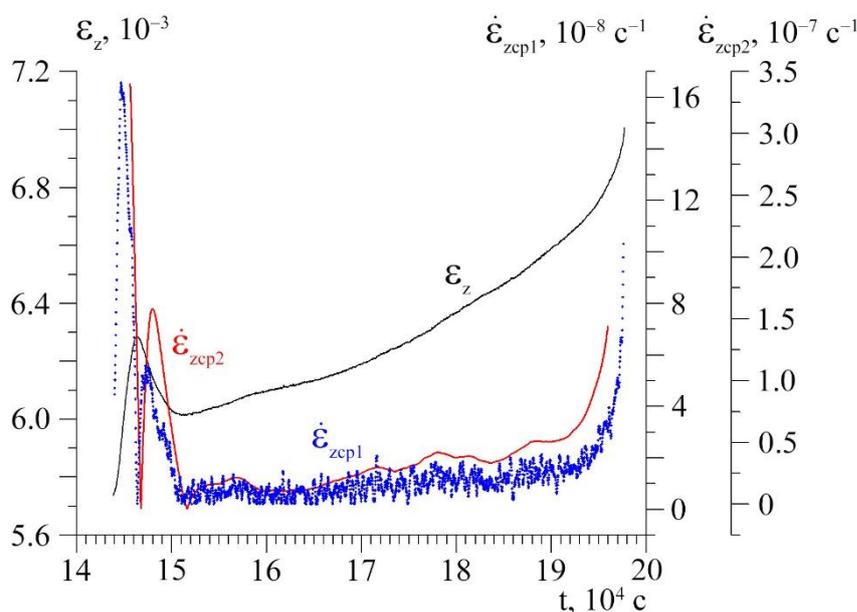


Рисунок 3.11 – Временные зависимости продольной деформации, модуля скорости продольной деформации, вычисленной в скользящем окне величиной 5 минут  $\dot{\epsilon}_{Zmean1}$  (синие точки) и модуля скорости продольной деформации, вычисленной в скользящем окне размером 1 час  $\dot{\epsilon}_{Zmean2}$  (красная кривая) в области II выше предела упругости.

Дополнительно построим статистические распределения скорости деформации для областей деформирования I и II (рисунок 3.12). В области I скорость продольной деформации варьируется в узком диапазоне значений от  $5 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  до  $2.4 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ . В области деформирования II дисперсия скорости значительно больше, однако преобладающее большинство значений скорости также укладываются в диапазон  $5 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  до  $2.4 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ .

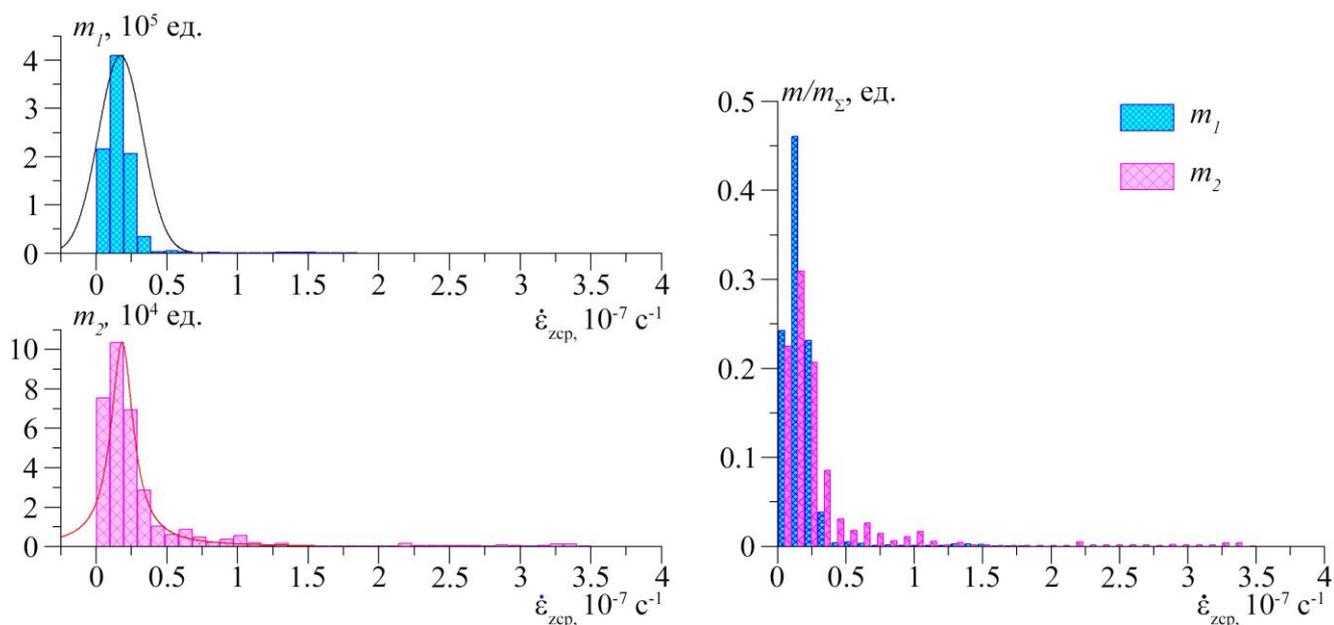


Рисунок 3.12 – Статистические распределения скорости продольной деформации при  $k^* < 0.7$  (голубой график) и при  $k^* > 0.7$  (пурпурный график).

При проведении аналогичных оценок скоростей поперечных деформаций, получим следующие величины (рисунок 3.13). Средняя скорость поперечной деформации на стадии I равна  $\dot{\epsilon}_{Xmean} = 1.5 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$ , а ее стандартное отклонение составляет  $10^{-8} \text{ c}^{-1}$ . В области деформирования II скорость деформации  $\dot{\epsilon}_{Xmean} = 1.3 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ , а ее стандартное отклонение –  $3.7 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ .

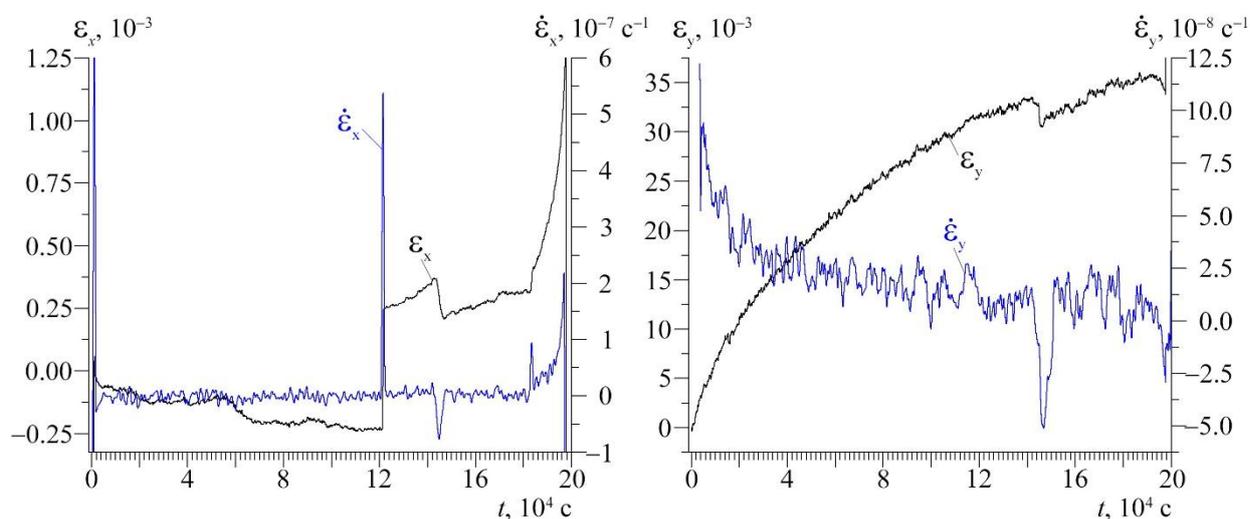


Рисунок 3.13. Изменения поперечных деформаций и их скоростей: а)  $\epsilon_x$  и  $\dot{\epsilon}_x$ , б)  $\epsilon_y$  и  $\dot{\epsilon}_y$ , вычисленные в скользящем окне размером 10 минут.

В связи с тем, что в изменении деформации  $\epsilon_y$  на протяжении всего эксперимента не наблюдается выраженных переходов вблизи предела упругости и ее можно описать логарифмическим уравнением, то оценивалась скорость деформации за весь период испытания.

Средняя скорость поперечной деформации в направлении оси Y, оцененная на протяжении всего времени нагружения, равна  $\dot{\varepsilon}_{Ymean} = 3.7 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ , а ее стандартное отклонение –  $4 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ .

### 3.2. Влияние кратковременных сеансов электромагнитных воздействий на скорость деформации и дефектообразование (акустическую эмиссию) образцов мрамора

В данном разделе представлены результаты экспериментов на образцах мрамора, на которые в течение часовых сеансов воздействовали скрещенные электрическое и магнитное поля (методические аспекты сеансов ЭМ воздействий описаны в разделе 2.2).

Рассмотрим результаты испытаний образца № 1. Графики нагрузки и зависимость напряжения от деформации приведены на рисунке 3.14, а изменения компонент деформации и активности акустической эмиссии от времени представлены на рисунке 3.15. В ходе эксперимента было реализовано 10 сеансов воздействия.

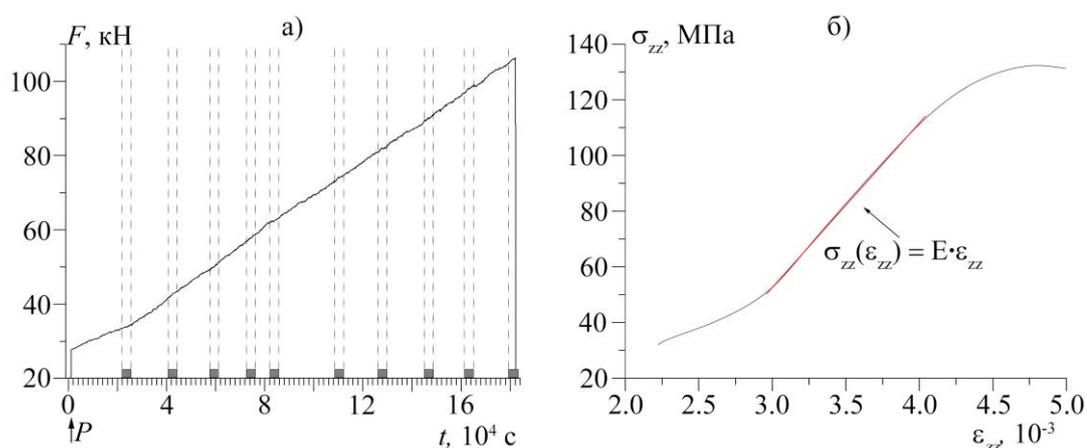


Рисунок 3.14 – Графики а – нагрузки, б – напряжения-деформации образца мрамора № 1. Штрихпунктирными линиями с серыми прямоугольниками снизу выделены временные интервалы сеансов воздействия скрещенными электрическим и магнитным полями.

Как и в случае образцов, испытанных без воздействия и рассмотренных в разделе 3.1, на графике напряжения-деформации наблюдается область, описываемая законом Гука (выделенная красной линией) и область выше предела упругости, на которой доля неупругих деформаций возрастает, что выражается отклонением  $\sigma$ - $\varepsilon$  характеристики от линейного тренда (рисунок 3.14 б). Предел прочности для данного образца близок к нижнему пределу прочности образцов, испытанных без электромагнитного воздействия (ЭМВ), и составляет 133.2 МПа.

Как видно из графиков на рисунке 3.15, продольная деформация  $\varepsilon_z$  изменяется преимущественно линейно, наблюдаются вариации ее скорости (заметные по изменению угла наклона графика). Отмечается небольшое приращение при  $t \approx 13.9 \cdot 10^4 \text{ с}$  в течение  $\Delta t = 4.6 \text{ с}$  и выраженный переход к псевдопластическому деформированию перед разрушением

(увеличение скорости деформации при  $t > 16.47 \cdot 10^4$  с). Поперечная деформация  $\varepsilon_Y$  в течение всего эксперимента демонстрирует рост как в экспериментах без ЭМВ (рисунок 3.15 а). При аппроксимации  $\varepsilon_Y$  логарифмической функцией вида  $\varepsilon_Y = a - b \cdot \ln(t + c)$  были получены следующие коэффициенты:  $a = -0.14$ ,  $b = -0.0015$ ,  $c = 9 \cdot 10^4$ , при этом скорректированный коэффициент детерминации (точность аппроксимации)  $R^2 = 0.92$ . При напряжении 108 МПа (при  $t = 13.9 \cdot 10^4$  с и  $k^* = 0.81$ ) произошло увеличение деформаций  $\varepsilon_X$  и  $\varepsilon_Z$ , причем абсолютная деформация в поперечном направлении составила  $\Delta l_X = 26$  мкм или в относительных единицах  $\varepsilon_X = 8 \cdot 10^{-4}$ , что равно 21.7% от максимального значения в данном направлении.

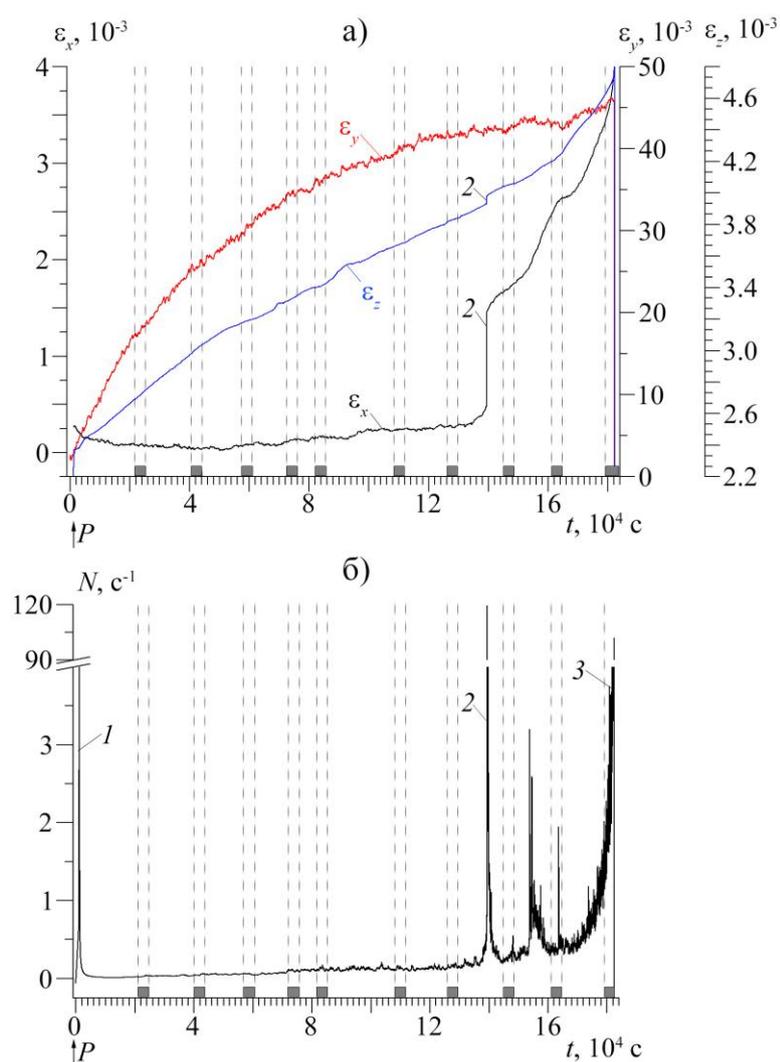


Рисунок 3.15 – Графики а – изменения трех компонент деформации, б – активности АЭ. Р – начальная нагрузка. Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем выделены штрихпунктирными прямыми и серыми прямоугольниками снизу. Максимум активности: 1 – при нагрузке –  $84 \text{ c}^{-1}$ , 2 –  $120 \text{ c}^{-1}$  и 3 –  $102 \text{ c}^{-1}$  при разрушении образца.

Отличительными особенностями деформирования данного образца в присутствии ЭМ поля от образцов, испытанных без ЭМ воздействия (описанных в разделе 3.1), является отсутствие процессов, продолжительных во времени и значительных по приращению продольной деформации и обозначенных цифрами 2 и 4 на рисунке 3.16 а (повтор рисунка 3.2 а из раздела 3.1). В поперечных направлениях также отсутствуют значительные приращения

(пронумерованные цифрой 4 на рисунке 3.16). Это свидетельствует о том, что скрещенное ЭМ поле вносит изменения в деформационный режим образцов, частично устраняя значительные по амплитуде приросты деформации (рисунок 3.16 б).

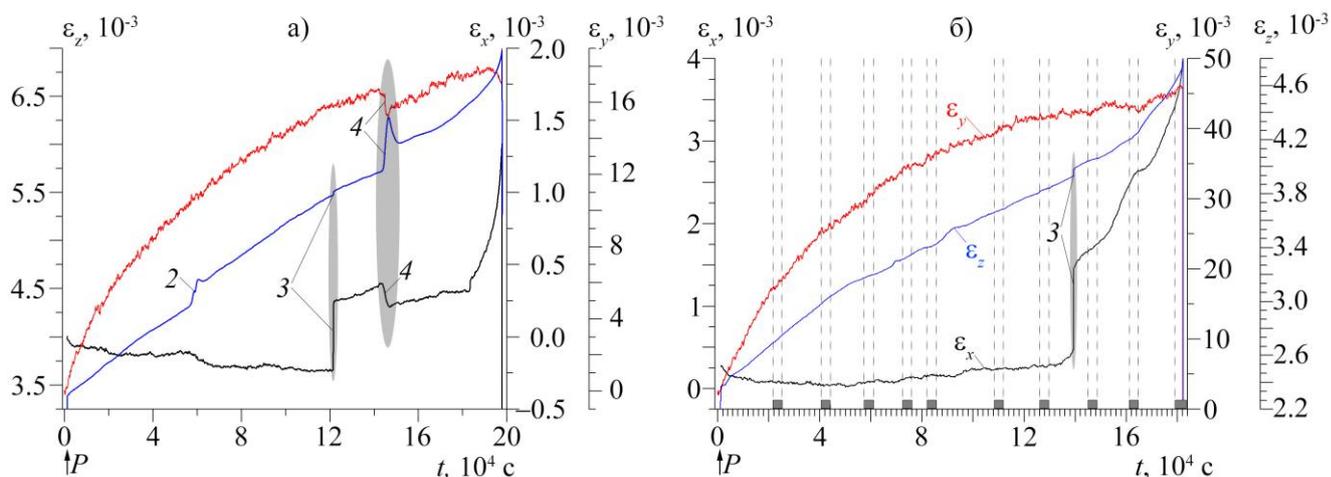


Рисунок 3.16. Графики изменения трех компонент деформации образцов, испытанных: а – без воздействия и б – с воздействием ЭМ поля. Интервалы воздействия выделены штрихпунктирными прямыми и серыми прямоугольниками снизу.

Приращение деформации и акустической эмиссии, обозначенное цифрой 2 на рисунке 3.15, имеет сходство с процессом, происходящем в образцах мрамора, испытанных без воздействия. Для подтверждения идентичности этого процесса, проведем анализ данных, аналогично проделанному в разделе 3.1. Как видно из рисунка 3.17, значительное увеличение числа событий АЭ началось задолго до начала роста деформации (за 25 минут), как и в случае образцов, испытанных без воздействия.

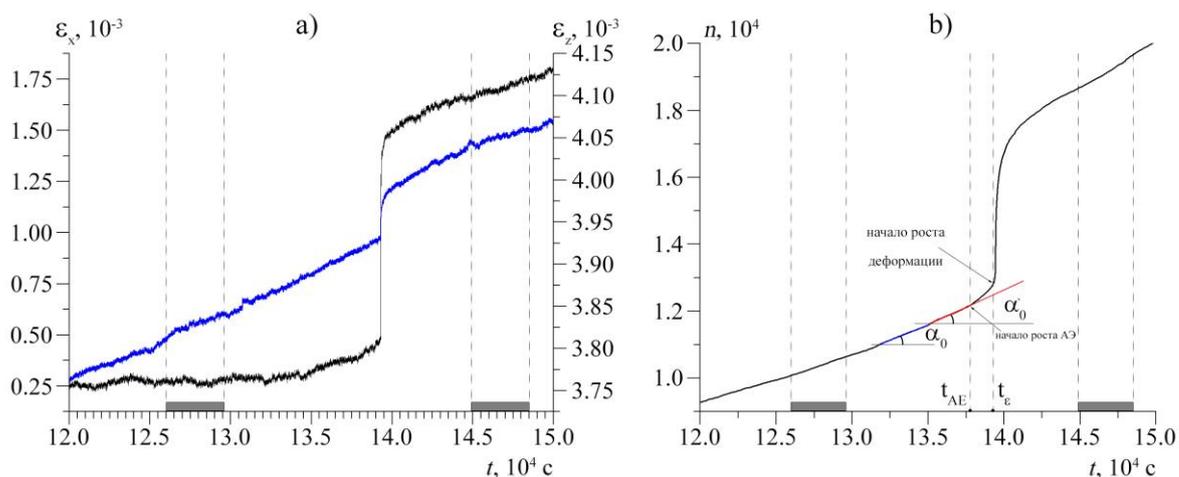


Рисунок 3.17. Масштабированные графики а – изменения трех компонент деформаций, б – накопления сигналов АЭ. Черный график – поперечная деформация в направлении оси X, синий график – продольная деформация. Синей и красной линиями обозначены линейные аппроксимационные кривые накопления сигналов АЭ.  $t_{AE}$  и  $t_{\epsilon}$  – времена начала роста АЭ и деформации соответственно.

Это свидетельствует о том, что независимо от того, деформируется образец без электромагнитного воздействия или совместно с ним, указанный процесс реализуется, и ЭМ поле не вносит в него существенных изменений. В этой связи в дальнейшем анализе скорости деформации и влияния на нее сеансов ЭМВ данный процесс рассматриваться не будет.

Для оценки скорости деформации (продольной и двух поперечных) в случае сеансов ЭМ поля были использованы обе методики, описанные в разделе 3.1. Первая методика предполагает вычисление угла наклона временной зависимости деформации для двух периодов времени: во время сеанса воздействия и в интервале за 1.5-2 часа до начала воздействия. Полученные значения сравнивались между собой, и вычислялось относительное изменение в процентах по отношению к значению до воздействия. Вторая методика подразумевала расчет угла наклона в скользящем окне варьируемой величины.

Рассмотрим отдельно графики скорости продольной деформации для областей при  $k^* < 0.7$  и  $k^* > 0.7$  (рисунок 3.18). До середины второго сеанса ЭМ воздействия наблюдаются незначительные флуктуации скорости деформации ( $\Delta \dot{\epsilon}_z = 1.7 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$ ) относительно среднего значения  $\dot{\epsilon}_{z\text{mean}} = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ , после чего скорость деформации спадает до уровня  $\dot{\epsilon}_z = 0.4 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$  (черная прямая на рисунке 3.18 а). К концу третьего сеанса спад завершился и далее скорость деформации увеличилась. Значительные флуктуации скорости отмечаются как в промежутках между воздействиями, например, между третьим и четвертым сеансом (выделенная область 1), так и в течение сеансов (выделенная область 2). В начале пятого сеанса ЭМ поле стимулировало рост скорости продольной деформации, продолжавшийся 2 часа (выделенная область 2). Несмотря на большие флуктуации, после третьего сеанса наблюдается стабилизация тренда и среднее значение скорости составило  $\dot{\epsilon}_{z\text{mean}} = 9.1 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  (синяя линия на рисунке 3.18 а).

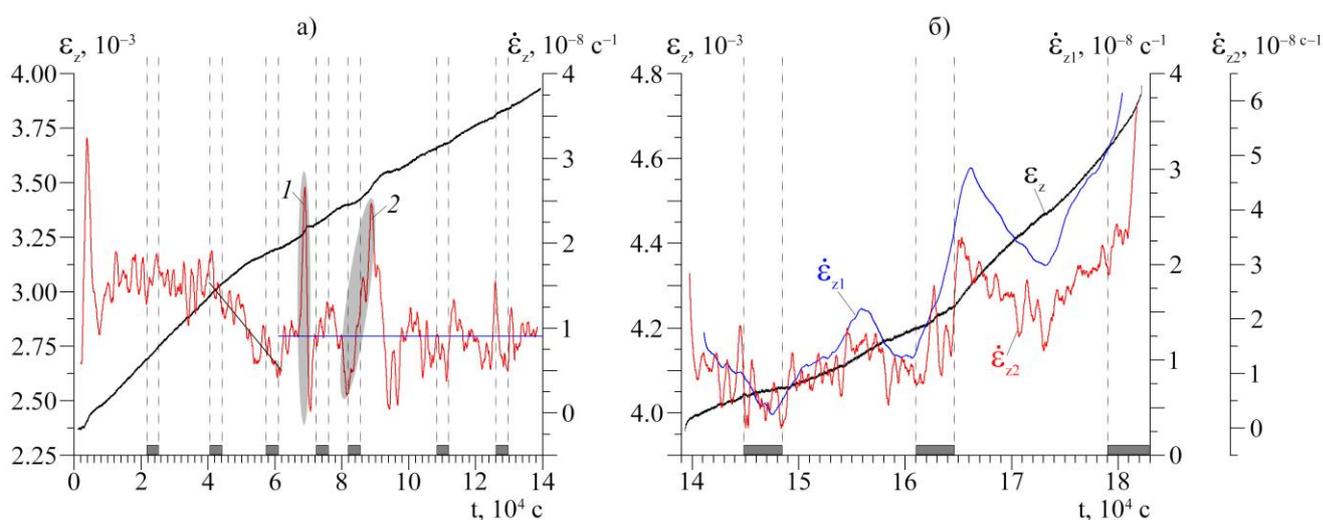


Рисунок 3.18 – Продольная деформация (черная кривая) и ее скорость за весь эксперимент (красная кривая) (а) и при напряжениях  $k^* > 0.7$  (б). Черной и синей прямой на рисунке (а) обозначены убывающий и квазистационарный тренды. На рисунке б – красная кривая – скорость, оцененная в скользящем окне величиной полчаса, синий график – то же за 1 час.

При напряжениях  $k^* > 0.7$  изменения скорости продольной деформации, вызванные действием ЭМ поля проявляются более отчетливо. Убывающий тренд  $\dot{\epsilon}_z$  наблюдается перед восьмым сеансом, к концу которого  $\dot{\epsilon}_z$  начинает увеличиваться, и еще больший рост  $\dot{\epsilon}_z$  начинается сразу после включения источника ЭМ поля в девятом сеансе (рисунок 3.18 б). Во время 10-го сеанса воздействия образец разрушился.

При напряжениях  $k^* < 0.7$  скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  обнаруживает небольшие флуктуации относительно некоторого уровня (рисунок 3.19 б). При  $k^* > 0.7$  в восьмом сеансе  $\dot{\epsilon}_x$  стабилизировалась с дальнейшим ростом после завершения сеанса, а девятый сеанс вызвал обратную реакцию – торможение поперечной деформации (рисунок 3.19 б). После выключения источника ЭМ поля возобновилось увеличение  $\dot{\epsilon}_x$ , а десятый сеанс привел к резкому росту  $\dot{\epsilon}_x$  и разрушению образца.

При напряжениях  $k^* < 0.7$  достоверно выявить реакцию на ЭМ воздействие в скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_y$ , используя вычисления в скользящем окне, не представляется возможным вследствие высоких флуктуаций ее значения  $\Delta\dot{\epsilon}_y = 1.1 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$  при средней скорости за час равной  $\dot{\epsilon}_{y_{mean}} = 1.3 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$  (рисунок 3.19 в). При напряжении  $k^* > 0.7$  изменения, вызванные сеансами скрещенного ЭМ поля, наблюдались в двух сеансах (рост  $\dot{\epsilon}_y$  в восьмом и десятом сеансах, рисунок 3.19 в). Максимальные значения компонент деформации в этом эксперименте составляют:  $\epsilon_x = 3.97 \cdot 10^{-3}$ ,  $\epsilon_y = 46.9 \cdot 10^{-3}$ ,  $\epsilon_z = 4.75 \cdot 10^{-3}$ .

Также были вычислены значения скоростей продольной и поперечных деформаций ( $\dot{\epsilon}_z, \dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y$ ) по первой методике. В таблице 3.2 приведены те значения скоростей, относительные изменения которых превышают 10%, и могут быть связаны с воздействием ЭМ полей, прочерк – отсутствие изменений, т.е. реакции на ЭМВ (где  $\sigma_{ЭМВ}$  – среднее значение напряжения во время сеанса воздействия).

Таблица 3.2 – Значения скоростей деформации, полученные до и во время сеансов ЭМВ образца мрамора № 1.

Номер сеанса воздействия (всего 10)	$\sigma_{ЭМВ}$ , МПа	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	$\dot{\epsilon}_z, 10^{-8} \text{ c}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_x, 10^{-8} \text{ c}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_y, 10^{-8} \text{ c}^{-1}$	
			до ЭМВ	во время	до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время

сеансов)		%		ЭМВ					ЭМВ
1	42.2	0.32	-	-	-	-	-	-	-
2	53.1	0.40	-	-	-	-	-	-	-
3	62.6	0.47	0.75	0.67	-	-	-	-	-
4	72.4	0.54	0.36	1.0	-	-	-	-	-
5	78.3	0.59	-	-	-	-	-	-	-
6	92.7	0.70	-	-	-	-	-	-	-
7	102.3	0.77	-	-	-	-	-	-	-
8	112.4	0.85	1.0	0.5	-	-	-	0.9	1.3
9	122.5	0.92	1.1	1.7	3.4	3.1	1.8	0.5	31.6
10	132.6	0.99	2.9	3.9	3.8	5.6	12.6	11.5	45.6

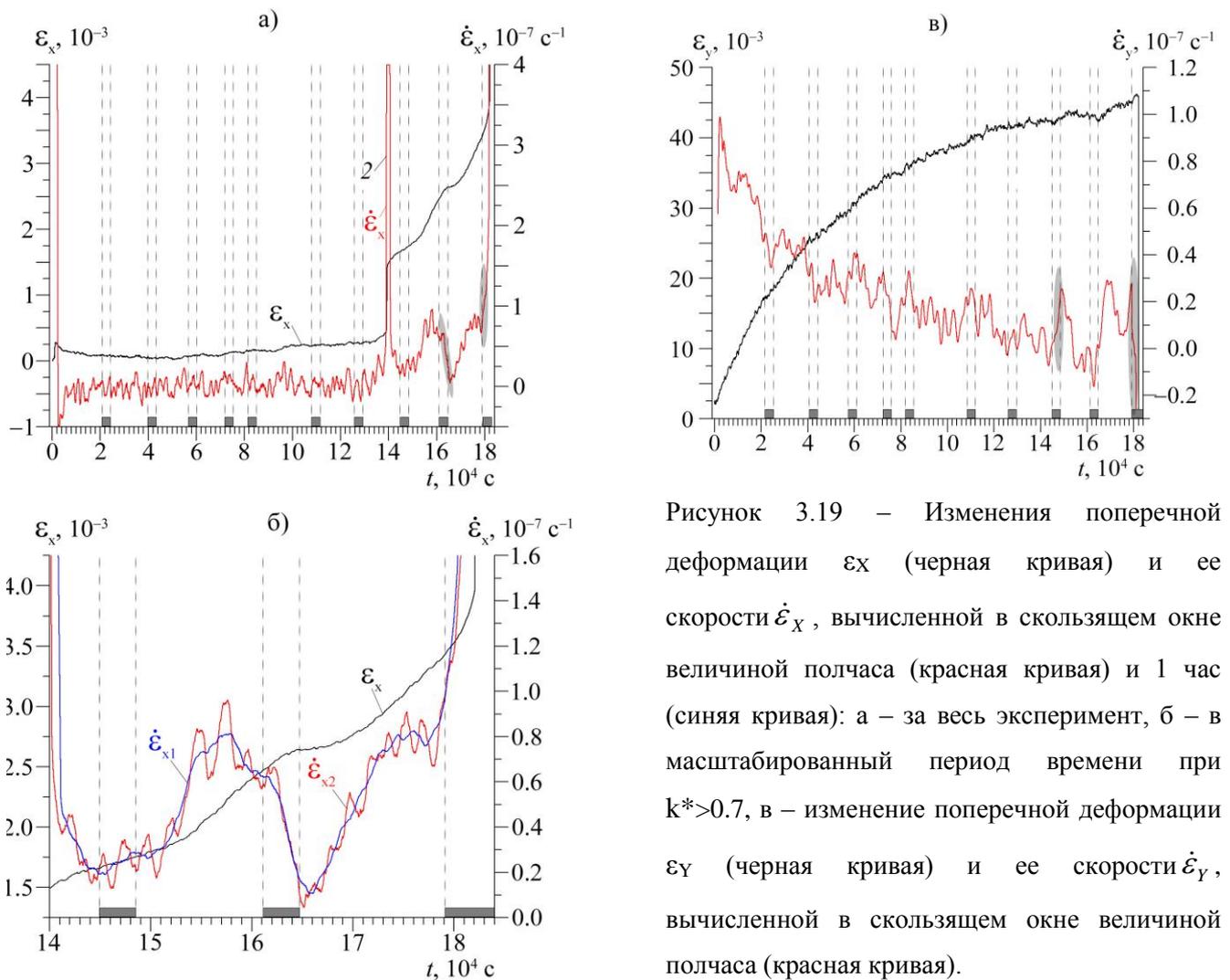


Рисунок 3.19 – Изменения поперечной деформации  $\epsilon_x$  (черная кривая) и ее скорости  $\dot{\epsilon}_x$ , вычисленной в скользящем окне величиной полчаса (красная кривая) и 1 час (синяя кривая): а – за весь эксперимент, б – в масштабированный период времени при  $k^* > 0.7$ , в – изменение поперечной деформации  $\epsilon_y$  (черная кривая) и ее скорости  $\dot{\epsilon}_y$ , вычисленной в скользящем окне величиной полчаса (красная кривая).

Обратимся к зависимостям активности АЭ, полученным в этом эксперименте и представленным на рисунке 3.15. Отклики в акустической эмиссии зафиксированы в восьми из десяти сеансов, первый отклик зарегистрирован в первом сеансе при напряжении 42.2 МПа ( $k^* = 0.32$ , рисунок 3.20 а). Критериями идентификации отклика на воздействие, напомним (см. раздел 2.4.2), являются: 1) – превышение активности во время ЭМВ порогового уровня  $3\sigma^*$  (где

$\sigma^*$  – среднеквадратическое отклонение, определенное до воздействия) и 2) – временной интервал сеанса воздействия (задержка отклика не должна превышать длительность сеанса – 1 час). В связи с этим, значительный прирост активности АЭ до 120 событий в секунду при  $t \approx 13.9 \cdot 10^4$  с, сопровождавшийся изменениями в продольной и поперечной деформации (обозначенный цифрой 2 на рисунке 3.15), не может считаться откликом на воздействие седьмого сеанса из-за длительной задержки, превышающей длительность сеанса. Кроме критерия задержки, указанный прирост активности АЭ наблюдается во всех испытаниях образцов мрамора, деформируемых в отсутствие ЭМ поля (рассмотренных в разделе 3.1). Таким образом, на участке деформирования при  $k^* < 0.7$ , в четырех из пяти сеансов электромагнитное поле вызвало увеличение количества сигналов АЭ.

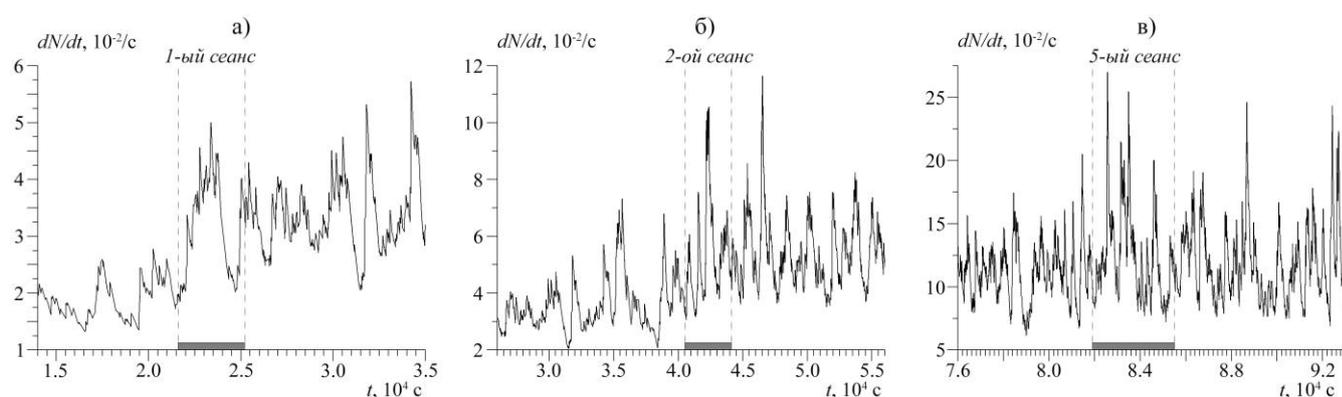


Рисунок 3.20 – Временные зависимости активности АЭ: а – в масштабе показан первый сеанс ЭМВ при  $k^*=0.32$ , б – в масштабе продемонстрирована часть эксперимента со вторым сеансом ЭМВ при  $k^*=0.4$ , в – в масштабе показан пятый сеанс ЭМВ при  $k^*=0.59$ . Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены штрихпунктирными линиями и серыми линиями внизу.

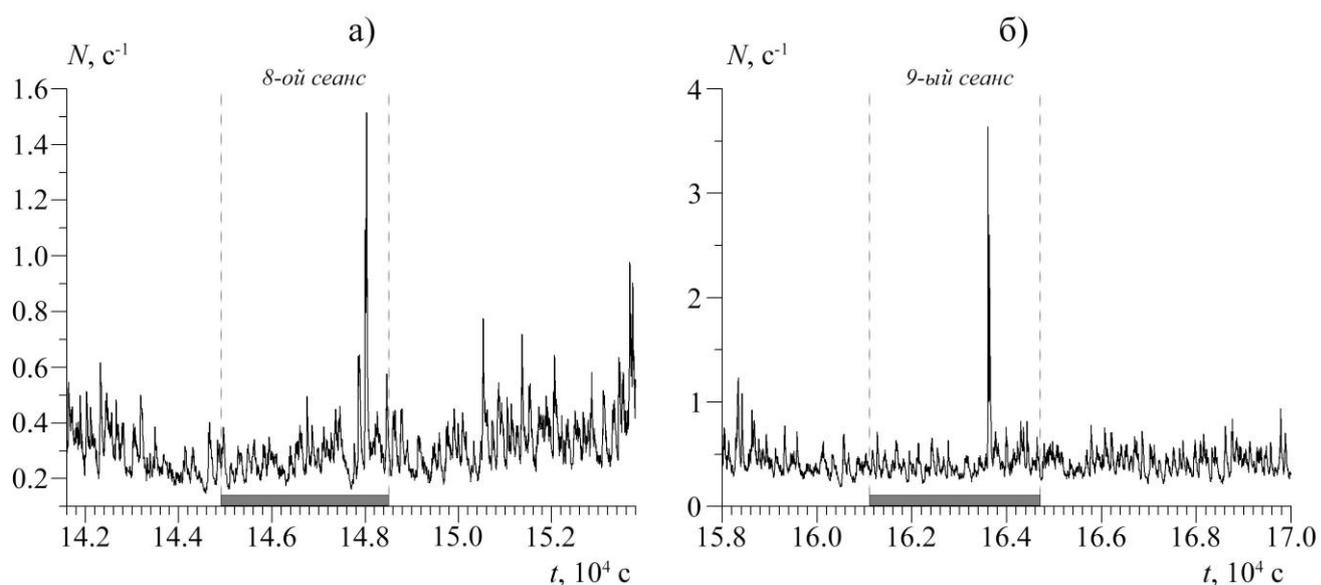


Рисунок 3.21 – Временные зависимости активности АЭ: а – в масштабе показан восьмой сеанс при  $k^*=0.92$ , б – в масштабе продемонстрирован отклик на девятый сеанс ЭМВ при  $k^*=0.99$ . Интервалы

воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу.

При напряжениях, соответствующих  $k^* > 0.7$  в восьмом и девятом сеансах воздействия отклики АЭ на воздействие ЭМ поля обнаружены с длительными задержками от начала воздействия (50 и 40 минут) и превышают фоновый уровень по максимальному значению более чем в 5 и 10 раз соответственно (рисунок 3.21 а, б). Данные об амплитуде откликов АЭ, их длительности и величины задержки сведены в таблицу 3.3. В процессе электромагнитного воздействия в течение десятого сеанса произошло разрушение образца, поэтому в таблицу внесены все события АЭ, произошедшие в течение этого сеанса.

Таблица 3.3. Характеристики откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с образцом мрамора № 1.

№ сеанса	$\sigma_{ЭМВ}$ , МПа	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	Кол-во инициированных событий АЭ	Длительность отклика, с	Величина задержки отклика
1	42.2	0.32	56	1490	826 с
2	53.1	0.4	28	391	1658 с
3	62.6	0.47	-	-	-
4	72.4	0.54	42	131	918 с
5	78.3	0.59	49	1011	643 с
6	92.7	0.7	-	-	-
7	102.3	0.77	51	141	1822 с
8	112.4	0.85	110	653	2949 с
9	122.5	0.92	90	74	2499 с
10	132.6	0.99	10702	194400	-

Дополнительно был проведен анализ кумулятивного распределения акустоэмиссионных сигналов по энергиям по методике, описанной и примененной в разделе 3.1. Динамика изменения углового коэффициента  $b$  кумулятивного распределения представлена на рисунке 3.22. Аналогично образцу, испытанному без воздействия, во время начальной нагрузки коэффициент  $b$  был максимальным, с уменьшением числа сигналов в процессе релаксации напряжений после начальной нагрузки значение  $b$  уменьшилось. По мере увеличения нагрузки и количества сигналов после второго сеанса наблюдается стабилизация значения коэффициента на уровне  $b=1.59$  (рисунок 3.22). А во время третьего сеанса  $b$  увеличилось на величину, превышающую флуктуации  $b$  до воздействия. В отличие от образца, испытанного без воздействия, в данном эксперименте при  $0.5 < k^* < 0.8$  наблюдается увеличение коэффициента  $b$  (в интервале  $t=7 \cdot 10^4 \div 140 \cdot 10^4$  с). При  $k^* > 0.8$  коэффициент  $b$  незначительно уменьшается – на 5%. Локальные изменения угла наклона наблюдаются в четырех сеансах ЭМВ. Во всех сеансах: в третьем, пятом, шестом и в десятом при разрушении произошло увеличение углового коэффициента  $b$ .

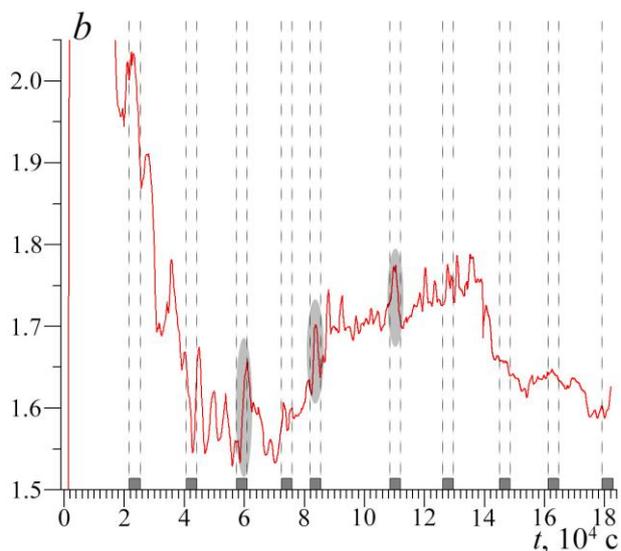


Рисунок 3.22 – Временная зависимость углового коэффициента  $b$  графика повторяемости сигналов АЭ по энергиям образца № 1. Штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу отмечены интервалы воздействия ЭМ полем. Серыми овалами обозначены изменения, вызванные ЭМ полем.

Перейдем к результатам следующего из серии эксперимента с электромагнитным воздействием. На рисунке 3.23 представлены график нагружения и  $\sigma$ - $\epsilon$  характеристика образца № 2, изменения компонент деформации и активности акустической эмиссии во время всего эксперимента продемонстрированы на рисунке 3.24.

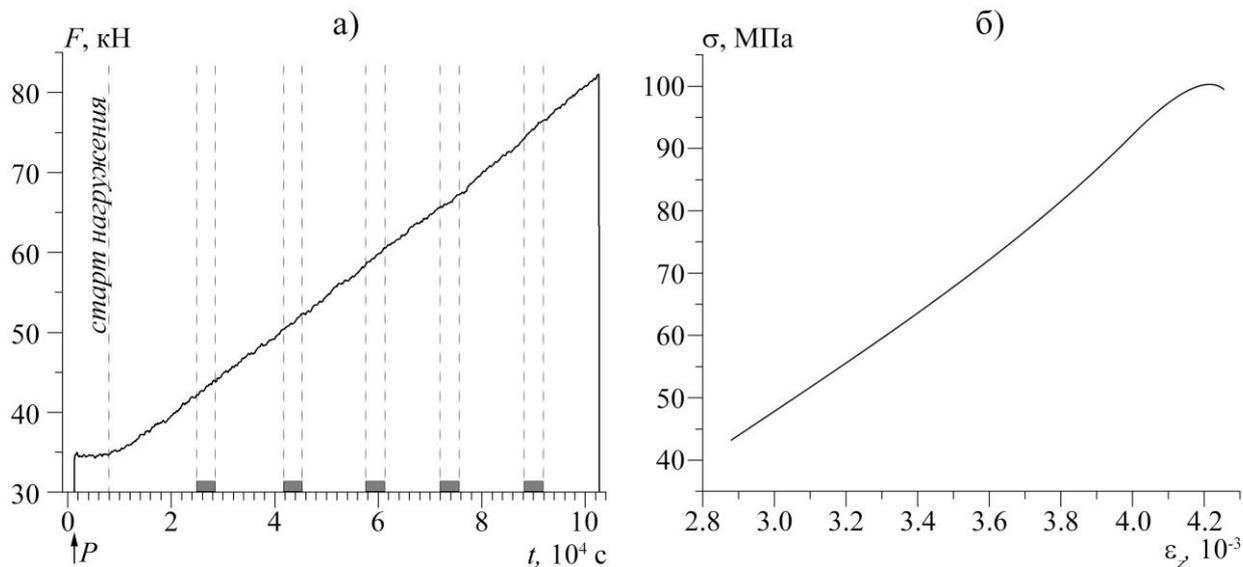


Рисунок 3.23 а – График нагрузки, б – сглаженный график напряжения-деформации образца мрамора № 2. Штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками обозначены сеансы воздействия скрещенным ЭМ полем.  $P$  – начальная нагрузка.

Предел прочности данного образца оказался существенно ниже, чем у предыдущего и равен 103 МПа, в процессе испытаний было проведено 5 сеансов с воздействием скрещенного ЭМ поля.

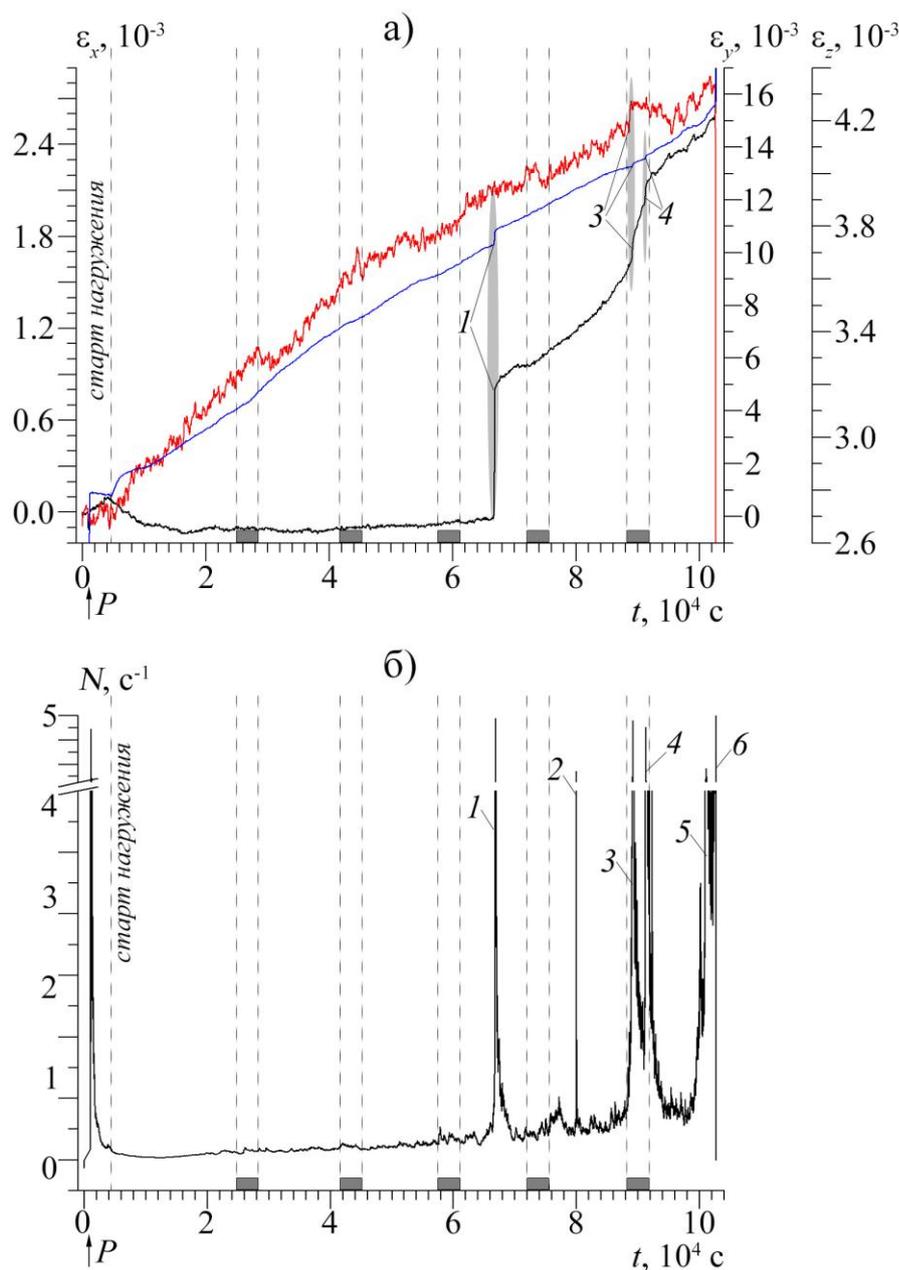


Рисунок 3.24 – Графики а – изменения трех компонент деформации, б – активность АЭ образца мрамора №2. Цифрами обозначены синхронные изменения деформации и активности АЭ согласно [Богомолов и др., 2017]. Максимальные значения активности АЭ: 1 – 115  $c^{-1}$ , 2 – 28  $c^{-1}$ , 3 – 111  $c^{-1}$ , 4 – 100  $c^{-1}$ , 5 – 32  $c^{-1}$ , 6 – 121  $c^{-1}$ . Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу. P – начальная нагрузка.

Как видно из рисунка 3.24 а, временные зависимости компонент деформации демонстрируют тенденции, обнаруженные в предыдущих экспериментах. Продольная деформация  $\varepsilon_z$  возрастает по закону, близкому к линейному, а поперечная  $\varepsilon_y$  деформация возрастает по логарифмическому закону вида  $\varepsilon_y = a - b \cdot \ln(t + c)$ . Поперечная  $\varepsilon_x$  компонента деформации не демонстрирует значительных изменений до момента времени, обозначенного цифрой 1 на рисунке 3.24. При напряжении 79.2 МПа ( $k^*=0.77$ ) наблюдается резкий прирост (в течение четырех секунд) значений продольной  $\varepsilon_z$  и поперечной  $\varepsilon_x$  деформаций, в случае  $\varepsilon_x$  прирост составляет 28% от максимальной деформации образца в данном направлении (цифра 1 на рисунке 3.24). Продольное укорочение образца составило  $\Delta l_z=3.2$  мкм, а поперечное удлинение  $\Delta l_x=14.8$  мкм. Как и в случае образца № 1 и образцов, испытанных без

электромагнитного поля и описанных в разделе 3.1, данный прирост сопровождался интенсивным акустическим излучением (до 115 событий в секунду, рисунок 3.24 б). При сопоставлении графиков деформации от времени и накопления событий АЭ отмечено, что изменение угла наклона графика накопления АЭ, который отражает режим деформирования, произошло раньше на 1188 секунд, чем это проявилось в продольной и поперечной деформации (прирост, обозначенный цифрой 1 на рисунке 3.24).

Воздействие электромагнитного поля изменило скорости продольной и поперечных деформаций во всех пяти сеансах, усредненные за 1 час значения скоростей приведены в таблице 3.4, а динамика изменения представлена на рисунке 3.25 и рисунке 3.26.

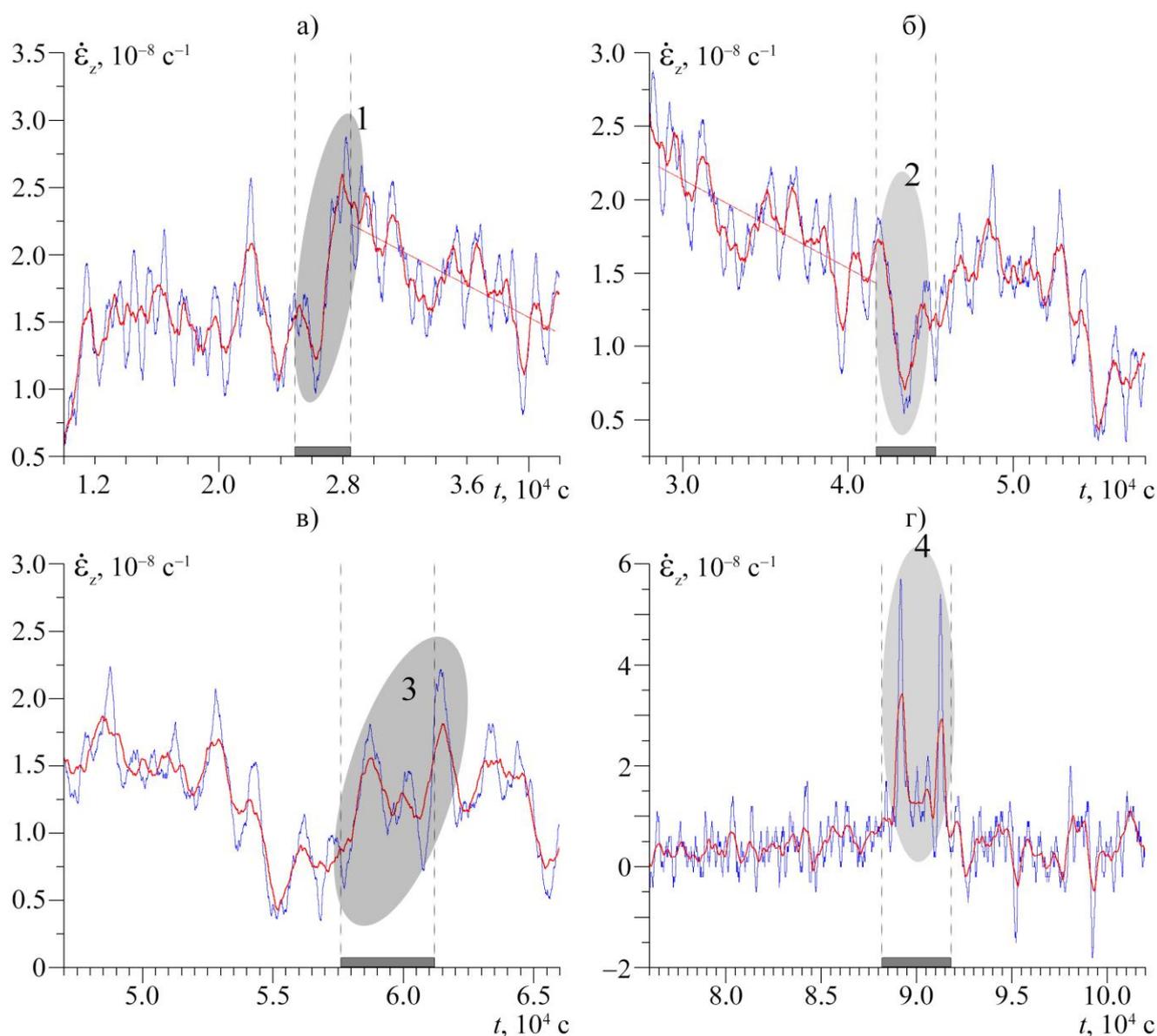


Рисунок 3.25. Скорость продольной деформации, оцененная в скользящем окне величиной: синяя кривая – 900 секунд, красная кривая – полчаса, масштабированные по времени электромагнитных сеансов: а – при  $k^*=0.51$ ; б – при  $k^*=0.61$ ; в – при  $k^*=0.71$  и г – при  $k^*=0.9$ . Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу.

Как видно из рисунка 3.25 на начальном участке скорость продольной деформации значительно меняется, это связано с пригрузкой, выдержкой образца в режиме стабилизации уровня нагрузки и последующим нагружением с постоянной скоростью. Начиная с момента времени  $t=11000$  с скорость деформации стабилизировалась на уровне  $\dot{\epsilon}_z=1.6 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ , стандартное отклонение при этом составляет  $\Delta\dot{\epsilon}_z=3.2 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ , а в течение 1-го сеанса ЭМВ скорость увеличилась до значения  $\dot{\epsilon}_z=2.9 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  (рисунок 3.25). Далее наблюдается спадающий тренд с флуктуациями на уровне  $\Delta\dot{\epsilon}_z=2.8 \cdot 10^{-9}$ , который усиливается во втором сеансе воздействия. Третий сеанс ЭМВ вызвал обратную реакцию – скорость продольной деформации начала расти, во время четвертого сеанса слабый возрастающий тренд сменяется длительным (около 3 часов) квазистационарным уровнем (рисунок 3.25). Наибольшее изменение скорости вызвал пятый сеанс электромагнитного воздействия – скорость продольной деформации  $\dot{\epsilon}_z$  изменялась четырежды за сеанс при том, что перед началом сеанса наблюдался ее спад в течение 1 часа.

Таблица 3.4. Значения скоростей деформации, полученные до и во время сеансов ЭМВ для образца мрамора № 2.

№ ЭМВ	kЭМВ	$\dot{\epsilon}_z, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$					$\dot{\epsilon}_x, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$					$\dot{\epsilon}_y, 10^{-7} \text{ с}^{-1}$				
		до ЭМВ	во время ЭМВ				до ЭМВ	во время ЭМВ				до ЭМВ	во время ЭМВ			
1	0.51	1.4	1.7	1.3	2.4	-	-				1.0	1.5				
2	0.61	1.5	1.3	0.7		-	-				0.8	1.3				
3	0.71	0.8	1.4			-	-				0.5	0.7				
4	0.8	1.1	1.3			0.2	1.7				0.4	-1.0				
5	0.9	0.7	0.3	14.8	1.0	7.6	1.0	2.7	2.7	27	0.7	48	5.1	1.0	19.2	0.2

При анализе скоростей поперечных деформаций также были выявлены изменения, вызванные ЭМ полем (рисунок 3.26). Несмотря на значительные флуктуации скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_y$  можно выделить следующие особенности: сразу после выключения источника ЭМ поля в первом сеансе  $\dot{\epsilon}_y$  уменьшается до уровня  $\dot{\epsilon}_y=-1.6 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ , причем эта величина значительно превышает стандартное отклонение скорости до ЭМВ, равное  $9.7 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  (рисунок 3.26 а). Во время второго сеанса скорость деформации  $\dot{\epsilon}_y$  сначала падает на величину, равную стандартному отклонению, а затем кратковременно возрастает и данный прирост в 1.8 раза больше максимального уровня до ЭМВ. Указанный прирост завершается спадом до уровня  $\dot{\epsilon}_y=-2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ .

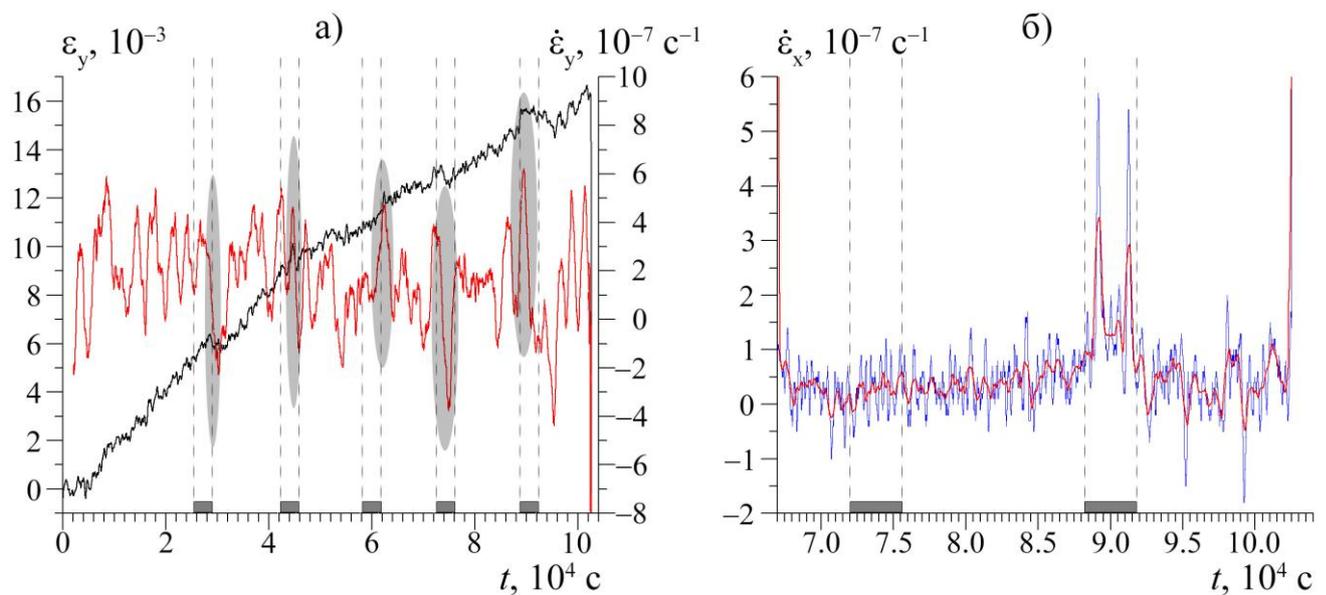


Рисунок 3.26 а – Графики поперечной деформации  $\varepsilon_y$  (сглаженной методом скользящего среднего, черная кривая) и ее скорости  $\dot{\varepsilon}_y$ , вычисленной в скользящем окне величиной 15 минут – красная кривая; б – изменение скорости поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_x$  при  $k^* > 0.7$ , оцененной в скользящем окне размером 15 минут (синяя кривая) и полчаса (красная кривая).

До третьего сеанса и 26 минут в его течении флуктуации скорости поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_y$  значительно уменьшились ( $\Delta\dot{\varepsilon}_y = 4.7 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ ) наряду со стабилизацией среднего значения на уровне  $\dot{\varepsilon}_{y_{cp}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ . После чего ЭМ поле стимулировало рост скорости до значения  $\dot{\varepsilon}_y = 3.1 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ . Рост скорости  $\dot{\varepsilon}_y$ , начавшийся за 10 минут до четвертого сеанса и не превышающий размер флуктуаций, после подачи на образец ЭМ поля завершился и далее значение  $\dot{\varepsilon}_y$  оставалось постоянным в течение 24 минут. После этого скорость поперечной деформации упала до значения  $\dot{\varepsilon}_y = -2.5 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$  (рисунок 3.26 а). С незначительной задержкой (8 минут) от начала пятого сеанса  $\dot{\varepsilon}_y$  увеличилась до значения  $\dot{\varepsilon}_y = 3.7 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ , это в 2 раза больше максимального значения скорости до пятого сеанса ЭМВ.

Изменения скорости поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_x$ , инициированные ЭМ полем выявлены в четвертом и пятом сеансах (рисунок 3.26 б). В течение часа до начала 4-го сеанса  $\dot{\varepsilon}_x$  незначительно уменьшалась, а в период действия ЭМВ отмечается ее рост. Электромагнитное поле в период пятого сеанса при напряжении  $k^* = 0.92$  оказало воздействие на все три компоненты деформации и на акустическую эмиссию. Подробно рассмотрим этот случай (рисунок 3.27).

С задержкой 8 минут от начала сеанса отмечено первое изменение скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_y$  (цифра 1 на рисунке 3.27 а). С большей задержкой в 15 минут от начала ЭМВ произошло

синхронное увеличение скорости продольной  $\dot{\epsilon}_z$  и поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$ , длительностью 50 секунд:  $\dot{\epsilon}_x = 2.7 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon}_z = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  (обозначен цифрой 2 на рисунке 3.27). За это время продольное укорочение образца составило  $\Delta l_z = 0.8 \text{ мкм}$ , а поперечное удлинение –  $\Delta l_x = 0.9 \text{ мкм}$ . Далее синхронно рост  $\dot{\epsilon}_z$  и  $\dot{\epsilon}_x$  замедлился и скорости сохранялись неизменными в течение 35 минут на уровне  $\dot{\epsilon}_z = 9.8 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  и  $\dot{\epsilon}_x = 7 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  соответственно.

Второй прирост скоростей деформации наблюдается за 10 минут до окончания сеанса воздействия (обозначен цифрой 3 на рисунке 3.27): в продольном направлении скорость деформации увеличилась и при этом была равна  $\dot{\epsilon}_z = 7.6 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  и постоянна на протяжении 209 секунд. В то же время скорость поперечной  $\dot{\epsilon}_x$  деформации 2 раза кратковременно (в течение 6 минут) и незначительно менялась, затем за 4 секунды последовало резкое удлинение образца на  $\Delta l_x = 0.9 \text{ мкм}$ , которое произошло на 51 секунду позже, чем начала возрастать продольная деформация. Аналогично предыдущему приросту осевое укорочение и поперечное удлинение в данном случае не превысили 1 мкм.

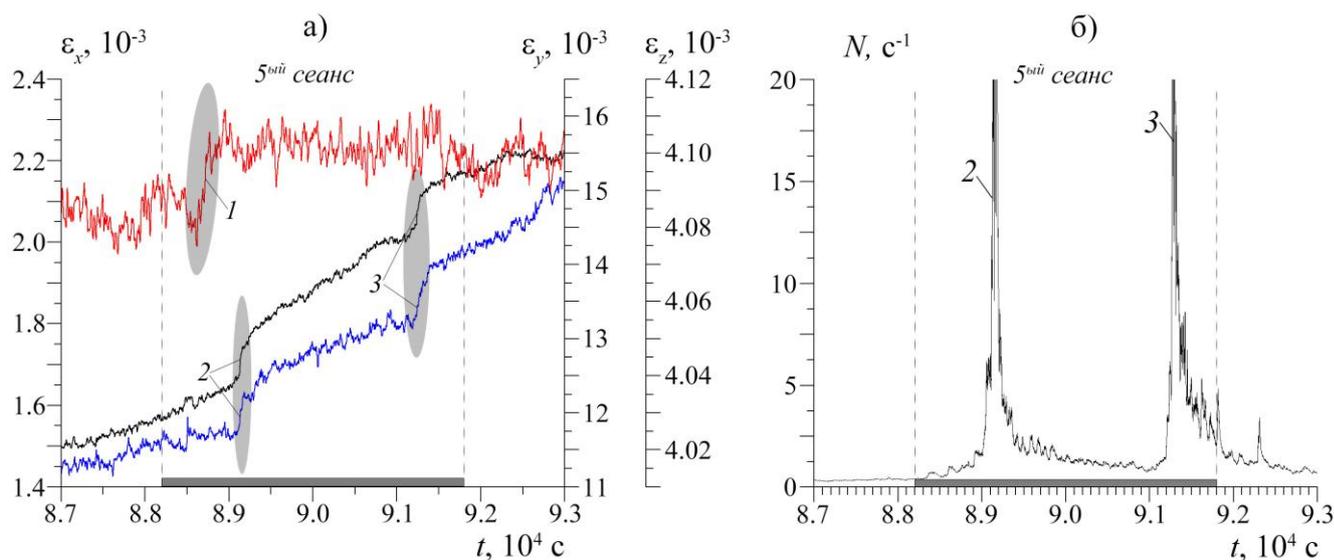


Рисунок 3.27 – Масштабированные графики: а – изменения трех компонент деформации, сглаженные методом скользящего среднего: черная кривая –  $\epsilon_x$ , красная –  $\epsilon_y$ , синяя –  $\epsilon_z$ ; б – активности АЭ образца мрамора № 2 в период пятого сеанса ЭМВ. Штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками отмечены интервалы ЭМВ. Максимальные значения активности АЭ: 2 –  $111 \text{ с}^{-1}$ , 3 –  $100 \text{ с}^{-1}$ .

Описанные процессы сопровождалась интенсивным акустическим излучением, анализ которого представлен на рисунке 3.28. В отличие от временных зависимостей компонент деформаций и их скоростей, интенсивный рост акустической эмиссии, обозначенный цифрой 2 на рисунке 3.27 начался сразу после включения источника ЭМ воздействия. Количество выделившихся сигналов составляет порядка 3800.

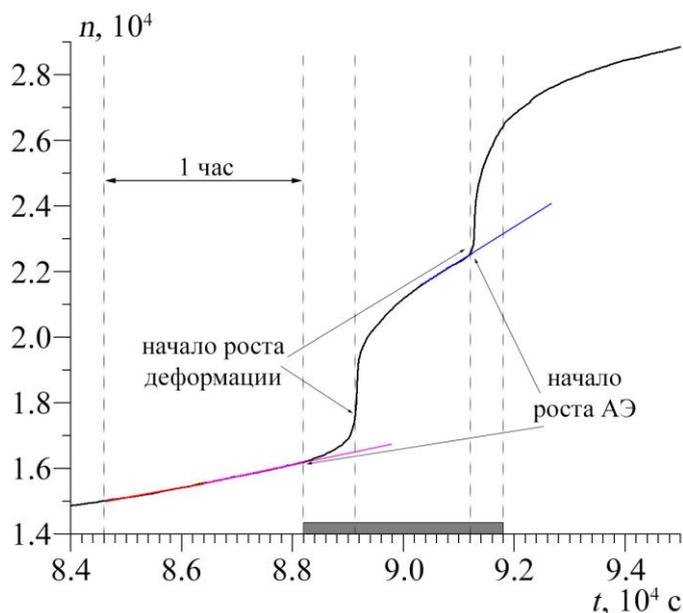


Рисунок 3.28 – Накопление сигналов АЭ образца мрамора №2 (часть эксперимента, демонстрирующая пятый сеанс ЭМВ).

Второй прирост сигналов АЭ начался синхронно с ростом скорости продольной деформации (рисунок 3.27 а), а уж затем спустя 51 секунду произошло изменение поперечной деформации  $\epsilon_x$ . В течение данного процесса выделилось 3920 сигналов (до выключения ЭМ поля). Всего за 1 час ЭМВ было зарегистрировано 10237 событий, в то время как за 1 час до него выделилось всего 1182 сигнала АЭ (прирост по количеству сигналов в 8.7 раза). Следует отметить, что после выключения источника ЭМ поля наблюдается последствие в акустической эмиссии. Возврат активности АЭ к пороговому уровню обнаружения откликов на ЭМВ произошел через 1962 секунды после окончания сеанса (определяемый, как известно, превышением по правилу  $3\sigma^*$ , где  $\sigma^*$  – среднеквадратическое отклонение активности АЭ до сеанса за вычетом тренда, рисунок 3.27 б). Для сравнения также приведем скорость накопления сигналов АЭ до пятого сеанса: за 1 час до начала ЭМВ активность АЭ была равна  $0.3 \text{ с}^{-1}$  и в течение часа изменилась не более, чем на 20%, в то время как максимальные значения активности АЭ в течение сеанса достигали значения более 100 событий в секунду.

Анализ активности АЭ в четырех других сеансах также позволил выявить отклики АЭ в четырех из пяти сеансов ЭМВ. В таблице 3.5 сведены данные об откликах активности АЭ на каждый сеанс воздействия. Как видно из таблицы, первый прирост акустоэмиссионных сигналов имел место при напряжении  $k^*=0.62$  (рисунок 3.29). На графике отчетливо обнаруживается возрастающий линейный тренд активности АЭ, на фоне которого значительно выделяются отклики АЭ на сеансы ЭМВ.

Таблица 3.5. Данные откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с образцом мрамора № 2.

№ сеанса	$\sigma_{ЭМВ}$	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$ , %	Кол-во инициированных событий АЭ	Длительность отклика, с	Величина задержки отклика, с
1	54	0.52	-	-	-
2	64	0.62	48	394	95
3	74.4	0.72	271	1130	-
4	83	0.8	35	31	3035
5	94.3	0.91	12132	5562	0

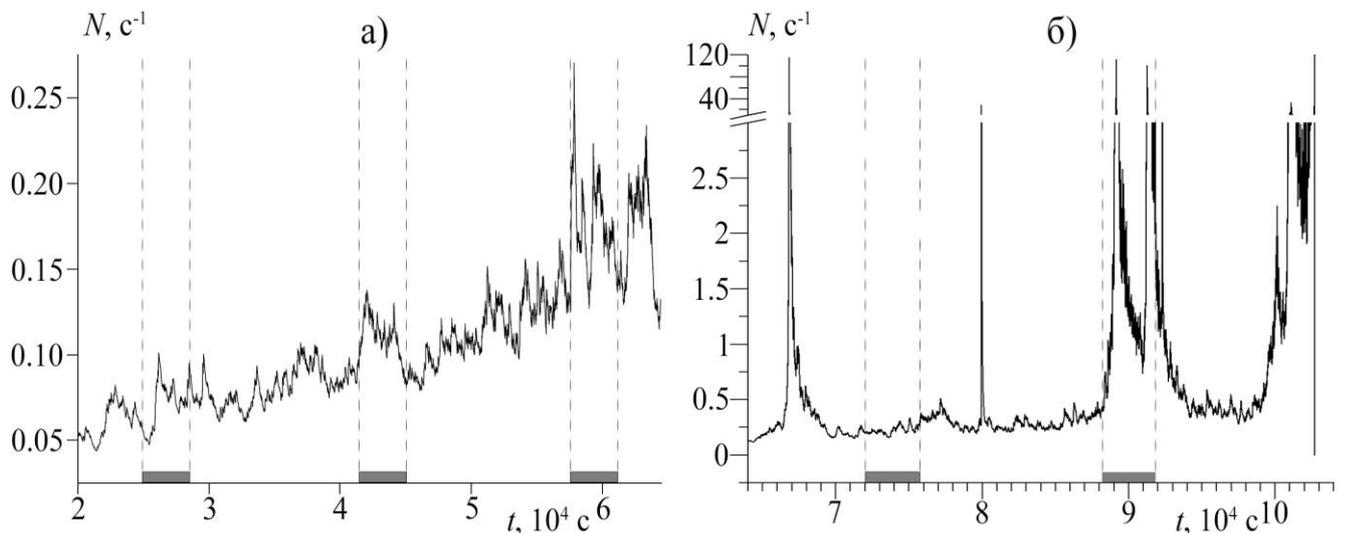


Рисунок 3.29 – Активность акустической эмиссии: а – начальный период эксперимента, показаны первые 3 сеанса ЭМВ; б – при напряжении  $k^* > 0.61$  МПа и вплоть до разрушения согласно [Мубассарова, 2013]. Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены серыми прямоугольниками снизу и штрихпунктирными линиями.

Анализ распределения сигналов АЭ по энергиям показал, что в случае образца мрамора №2 энергия всех зарегистрированных событий АЭ располагалась в диапазоне условных классов  $K=2.7 \div 6.6$ . При построении графика повторяемости всех событий АЭ по энергиям (подобно графику повторяемости для землетрясений), была получена линейная убывающая зависимость между количеством сигналов и их энергией, при этом угловой коэффициент был равен  $b=2.66$ . Детальный анализ влияния ЭМ поля на распределение сигналов по энергиям был проведен с помощью вычисления величины  $b$  в скользящем окне, результат представлен на рисунке 3.30. Начальный участок деформирования характерен низким значением напряжения и, соответственно, низким уровнем активности АЭ, из-за чего в изменении коэффициента  $b$  наблюдаются сильные флуктуации как до сеансов ЭМВ, так и во время действия ЭМ поля. В этой связи в первых двух сеансах достоверно выявить изменения, связанные с ЭМ полем, не представляется возможным. В остальных трех сеансах ЭМ поле способствовало изменению углового коэффициента  $b$ . В случае третьего сеанса коэффициент  $b$  уменьшился на 3% от значения  $b=1.99$  до величины  $b=1.92$  (рисунок 3.30, цифра 1). В четвертом сеансе спад

коэффициента  $b$ , начавшийся до сеанса приостановился, а по окончании сеанса продолжился. В данном случае можно говорить о стабилизации соотношения сигналов с меньшей энергией и сигналов с большей энергией под воздействием ЭМ поля. Перед началом пятого сеанса значение  $b$  уменьшается, что означает, что доля сигналов с большими энергиями растет, а прирост АЭ в пятого сеансе произошел за счет увеличения количества низкоэнергетических сигналов. Во время второго прироста АЭ доля сигналов с меньшими энергиями опять возросла, а сам процесс разрушения характерен увеличением количества низкоэнергетических сигналов.

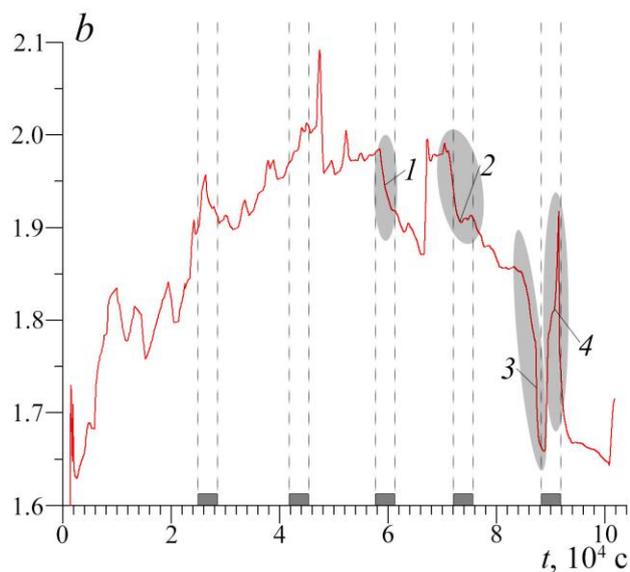


Рисунок 3.30. Временная зависимость углового коэффициента графика повторяемости сигналов АЭ образца № 2. Штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу отмечены интервалы воздействия ЭМ полем. Серыми овалами обозначены изменения, вызванные ЭМ полем.

Рассмотрим пример влияния электромагнитного поля на скорость деформации и акустическую эмиссию образца мрамора № 3. Постановка эксперимента была аналогичной предыдущим образцам мрамора №1 и №2. Длительность эксперимента составила 28.3 часа, предел прочности для образца оказался выше предыдущего – 138 МПа и в течение испытаний было реализовано 9 сеансов воздействия.

Проанализируем графики активности АЭ и трех компонент деформации для этого образца (рисунок 3.31).

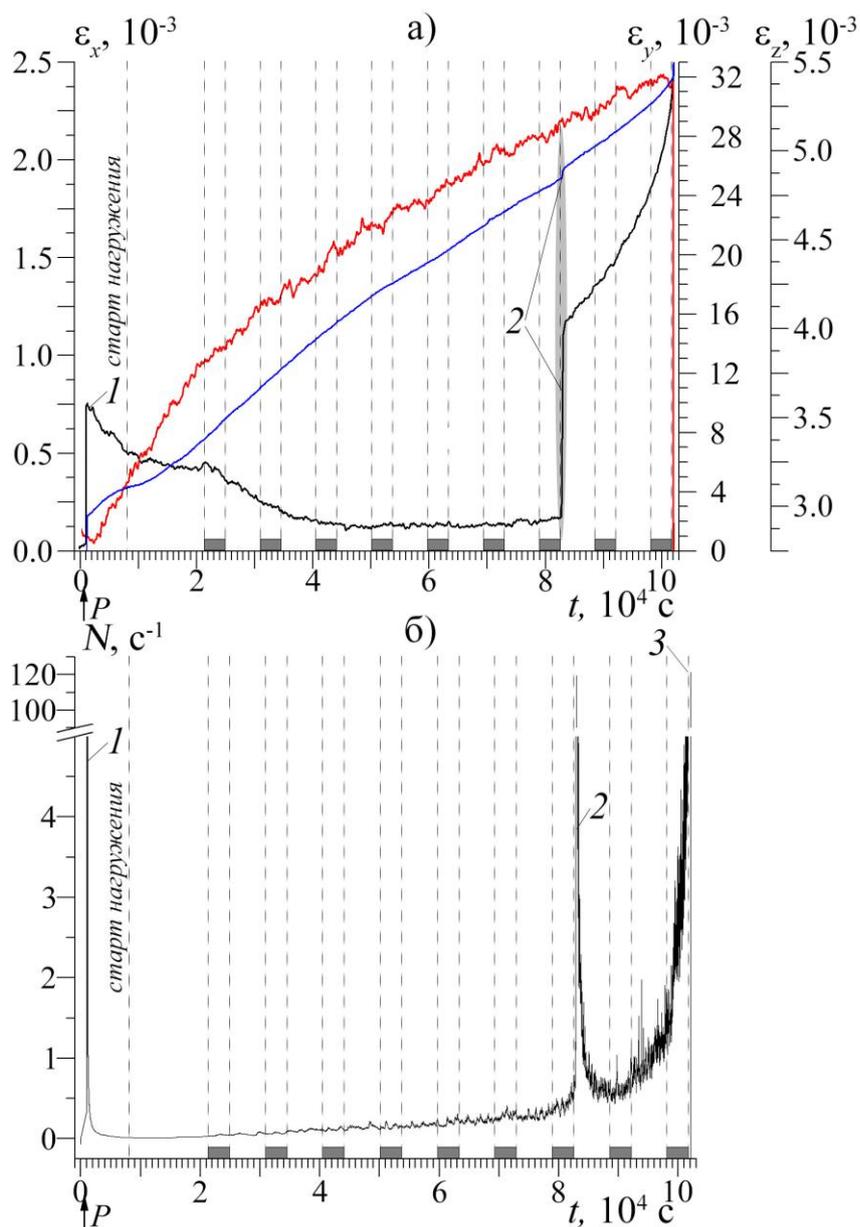


Рисунок 3.31 а – Изменение трех компонент деформации во времени, б – активность АЭ образца мрамора № 3. Р – начальная нагрузка, максимумы активности: 1 – при начальной нагрузке  $66.7 \text{ c}^{-1}$ , 2 – 118 событий в секунду, 3 – при разрушении 121 событие в секунду.

Особенности изменения компонент деформаций данного образца сходны с предыдущими, т.е. экспериментально достигается высокая воспроизводимость напряженного состояния. Рост продольной  $\epsilon_z$  и поперечной  $\epsilon_x$  деформации и активности акустической эмиссии, обозначенный цифрой 2 на рисунке 3.31, наблюдается спустя 372 секунды после седьмого сеанса ЭМВ. В поперечном направлении прирост составил  $\Delta l_x = 0.02$  мм. В продольном направлении в этот момент происходит укорочение образца на  $\Delta l_z = 1.3$  мкм, а активность акустической эмиссии при этом возрастает до 118 событий в секунду. Т.к. данный прирост АЭ и деформаций произошел спустя 6.2 минуты после выключения источника ЭМ поля, проанализируем, стимулирован ли этот процесс ЭМ полем. Для этого рассмотрим график накопления сигналов АЭ: в течение 2.4 часа скорость накопления сигналов была  $0.29 \text{ c}^{-1}$  (синяя прямая на рисунке 3.32 а), затем за 200 секунд до начала седьмого сеанса она увеличилась до

уровня  $0.4 \text{ с}^{-1}$  (красная прямая на рисунке 3.32 а), который сохранялся постоянным в течение 3024 секунды. Начало активизации АЭ произошло во время седьмого сеанса ЭМВ за 9.6 минут до его окончания. Таким образом процесс увеличения деформации и АЭ, обозначенный цифрой 2 на рисунке 3.31 а, можно считать откликом на ЭМ поле. Разница состоит лишь в том, что активизация АЭ начинается раньше на 948.5 секунды по отношению к началу роста деформации.

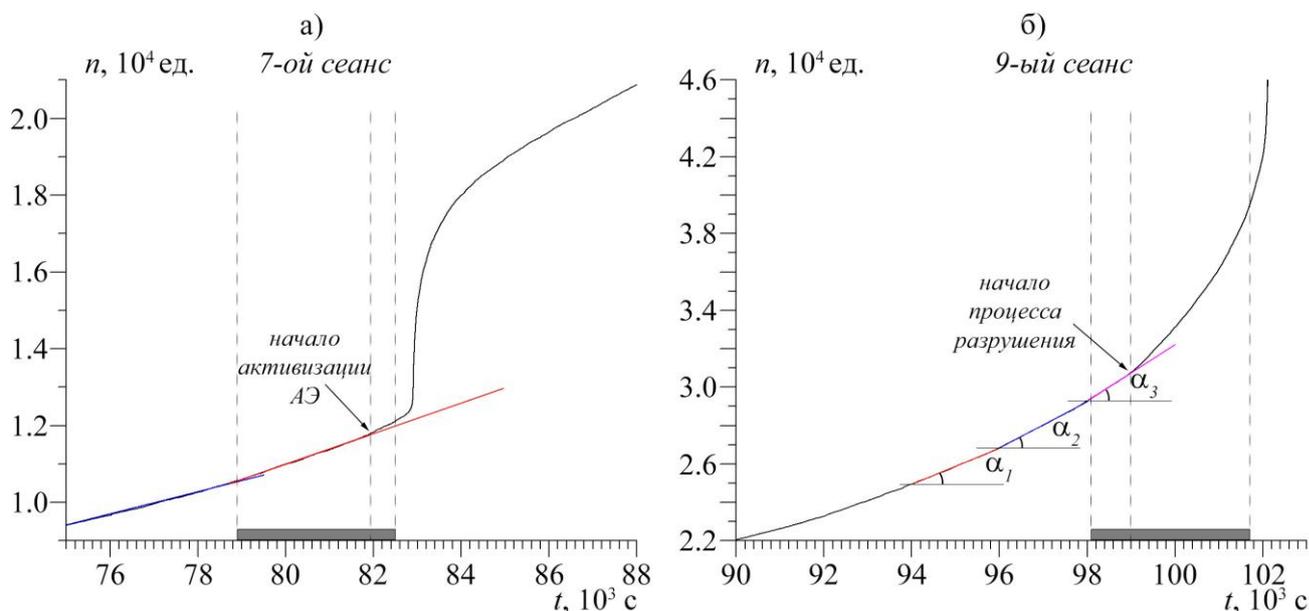


Рисунок 3.32 – Графики накопления сигналов АЭ, масштабированные по времени: а – седьмого сеанса, б – девятого сеанса ЭМВ. Цветными прямыми проиллюстрировано изменение скорости накопления сигналов.

Применив методику определения усредненной за 1 час скорости деформаций как угла наклона графиков трех компонент деформаций, получим следующие результаты (таблица 3.6). Изменение скорости продольной деформации, превышающее 10% и связанное с влиянием ЭМВ, зафиксировано в пяти из девяти сеансов воздействия, при этом в четырех случаях прирост скорости составил от 1.1 до 1.14 раза. Максимальные изменения  $\dot{\epsilon}_z$  наблюдались в шестом и седьмом сеансе и составляли 2.5 и 2.9 раза.

Детальный анализ скоростей продольной и поперечных деформаций проведем с помощью второй методики (вычисления в скользящем окне). На рисунке 3.33 представлено изменение скорости продольной деформации во времени, вычисленной в скользящем окне размером полчаса. Как видно из графика, увеличение скорости продольной деформации наблюдается в пяти из девяти сеансов воздействия, два из них приходятся на область деформирования при  $k^* < 0.7$ .

Таблица 3.6. Скорости трех компонент деформации, оцененные за 1 час до и во время действия электромагнитного поля.

№ сеанса возд-я (всего 5 сеансов)	$\sigma_{ЭМВ}$ , МПа	$k_{ЭМВ}$	$\dot{\epsilon}_z, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$			$\dot{\epsilon}_x, 10^{-9} \text{ с}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_y, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$			
			до ЭМВ	во время ЭМВ		до ЭМВ	во время ЭМВ		до ЭМВ	во время ЭМВ	
1	57.8	0.42	-	-		-	-		-	-	
2	66.5	0.48	-	-		-	-		-	-	
3	76.3	0.55	2.8	2.5		-	-		-	-	
4	86	0.62	2.5	2.1	1.4	-	-		-	-	
5	96.6	0.7	-	-		-	-		-	-	
6	106.3	0.77	2.2	5.5	1.9	-	-		-	-	
7	115.6	0.85	1.7	1.9	572.8	1.2	2.7	$1.5 \cdot 10^5$		-	-
8	125	0.91									
9	135.2	0.98	2.7	3.2	4.3					-	-

Для наглядности проиллюстрируем (рисунок 3.34) дважды произошедшее изменение скорости продольной деформации образца мрамора № 3 дважды за период воздействия ЭМ полем и прирост активности АЭ, отмеченный во время ЭМВ при  $k^*=0.77$  (шестой сеанс).

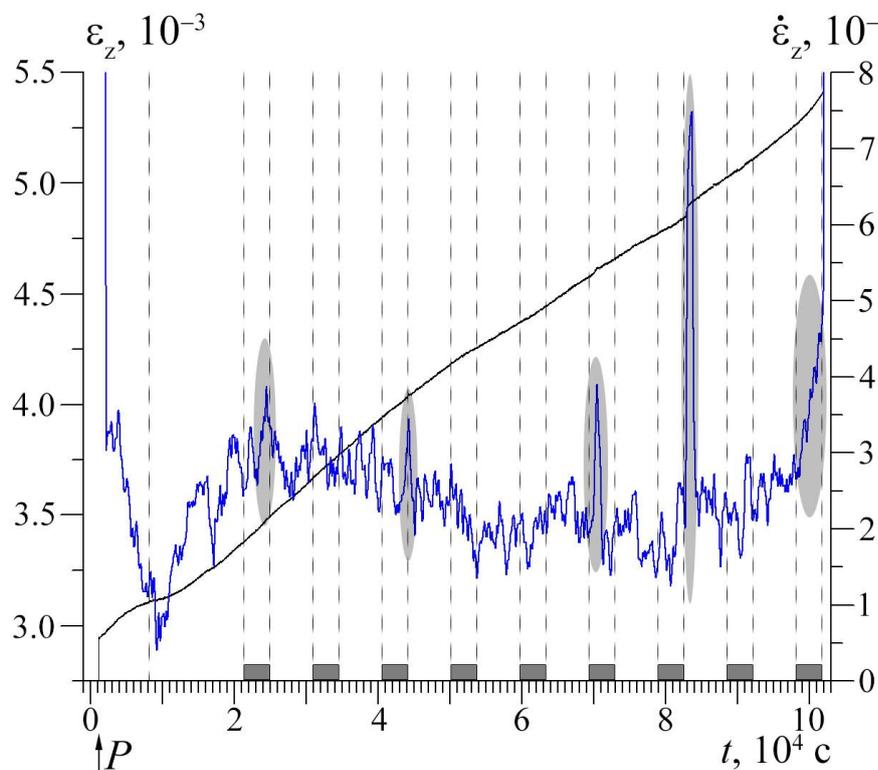


Рисунок 3.33 – График продольной деформации (черная кривая) и ее скорость (синяя кривая), оцененная в скользящем окне величиной 900 секунд. Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу. Момент пригрузки обозначен стрелкой и буквой P.

Как и до воздействия первые 13 минут сеанса ЭМВ скорость  $\dot{\epsilon}_z$  оставалась постоянной ( $\dot{\epsilon}_z=2.15 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ ), затем произошло ее увеличение в 2.5 раза, после чего скорость продольной деформации снизилась до уровня  $\dot{\epsilon}_z=1.87 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  и не изменялась до конца сеанса и в течение еще трех часов после ЭМВ (рисунок 3.33). Прирост активности АЭ, превышающий уровень  $3\sigma^*$ , произошел с задержкой 1711 с, а количество сигналов АЭ, выделившихся сверх этого уровня составляет 204 события. Во время последнего девятого сеанса начинается процесс разрушения – значительно возрастает скорость продольной деформации (рисунок 3.33).

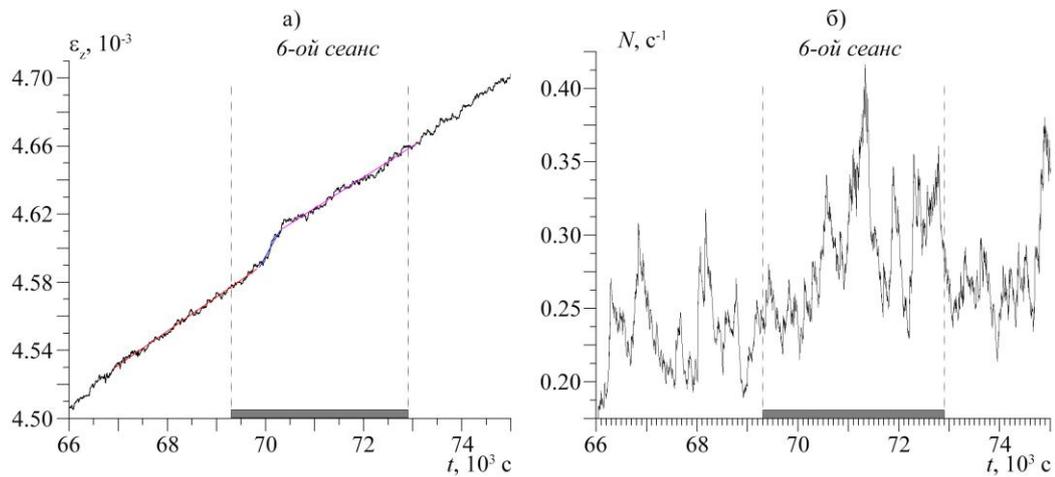


Рисунок 3.34 – Масштабированные по времени шестого сеанса воздействия графики: а – изменения продольной деформации от времени, б – активности акустической эмиссии образца за тот же период времени. Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены штрихпунктирными прямыми и серыми линиями снизу.

Проанализируем скорости поперечных деформаций (рисунок 3.35). В графике скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  изменения, превышающие ее флуктуации, когда на образец не действовало ЭМ поле, наблюдаются в двух сеансах. В первом сеансе возрастающий тренд при ЭМВ сменяется убывающим, а в седьмом сеансе скорость увеличивается в 57 раз со значения  $\dot{\epsilon}_x = 4.9 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  до  $\dot{\epsilon}_x = 2.8 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$  (рисунок 3.35). При оценке скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_y$  был выявлен убывающий тренд на протяжении всего времени испытаний с флуктуациями, не превышающими  $\Delta \dot{\epsilon}_y = 9.4 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ , которые наблюдались как во время сеансов ЭМВ, так и в течение времени, когда ЭМ поле на образец не действовало, в связи с чем идентифицировать какие-то из них как реакцию на воздействие не представляется возможным (рисунок 3.35).

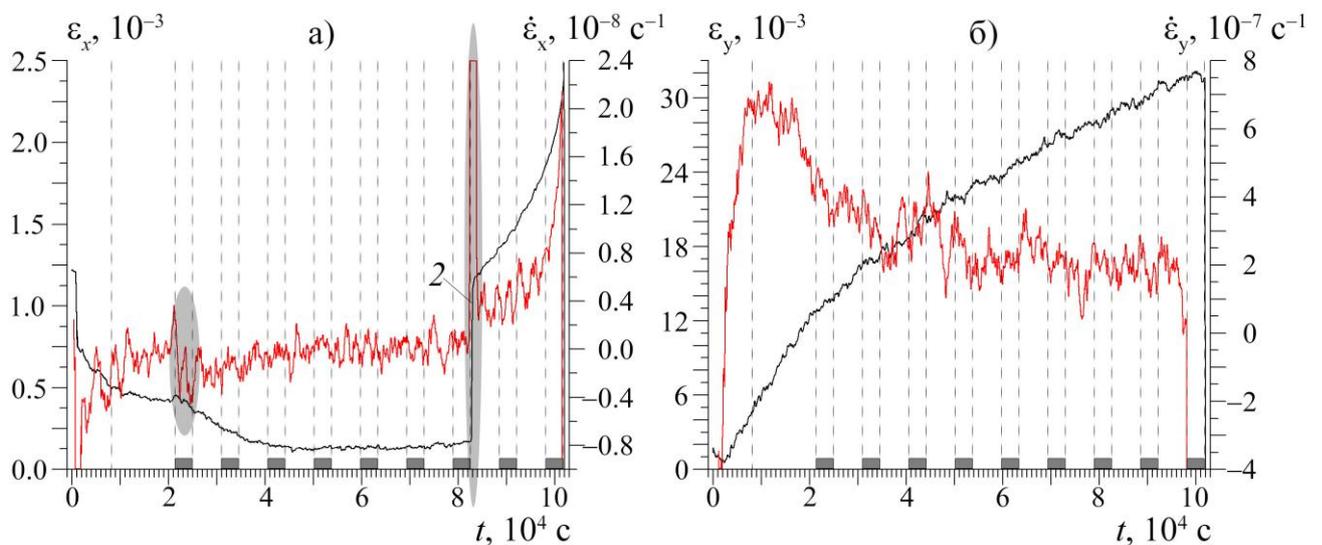


Рисунок 3.35 а – Графики поперечной деформации  $\varepsilon_x$  (сглаженной методом скользящего среднего, черная кривая) и ее скорости  $\dot{\varepsilon}_x$ , вычисленной в скользящем окне величиной 15 минут, красная кривая; б – изменение деформации  $\varepsilon_y$  (черная кривая) и ее скорости  $\dot{\varepsilon}_y$ , оцененной в скользящем окне размером 30 минут (красная кривая).

Выполнив анализ активности АЭ в этом эксперименте, составим таблицу, в которой внесена информация об откликах АЭ в этом эксперименте (таблица 3.7). В 6 из 10 сеансов наблюдались отклики АЭ различной величины. Максимальный отклик зарегистрирован в седьмом сеансе, который был подробно рассмотрен ранее, и в девятом, который стимулировал разрушение образца спустя 14 минут после подачи на него ЭМ поля.

Таблица 3.7. Данные откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с образцом мрамора № 3.

№ сеанса	$\sigma_{ЭМВ}$	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	Кол-во инициированных событий АЭ	Длительность отклика, с	Величина задержки отклика, с
1	57.8	0.42	44	718 с	1001 с
2	66.5	0.48	-	-	-
3	76.3	0.55	-	-	-
4	86	0.62	18	70 с	816 с
5	96.6	0.7	-	-	-
6	106.3	0.77	204	422 с	1711 с
7	115.6	0.85	7255	3196 с	3024 с
8	125	0.91	109	138 с	1177 с
9	135.2	0.98	15430	3202 с	827 с

Результаты оценки углового коэффициента графика повторяемости сигналов АЭ по энергиям приведены на рисунке 3.36. Кумулятивное распределение сигналов акустической эмиссии по энергиям соответствуют графику повторяемости, по аналогии с законом Гутенберга-Рихтера для сейсмических событий (рисунок 3.36 а). Значение коэффициента  $b$  при этом составляет 1.85. Проведя оценку изменения коэффициента  $b$  в скользящем окне, выделились следующие тенденции. Опуская начальный интервал активного нагружения до  $t=4 \cdot 10^5$  с, когда происходит стабилизация значения  $b$ , можно выделить 4 сеанса ЭМВ, которые изменили соотношение низко- и высокоэнергетических событий АЭ в пользу увеличения количества сигналов с меньшими энергиями. Исключением является девятый сеанс, в течение которого произошло разрушение образца – количество высокоэнергетических сигналов увеличилось.

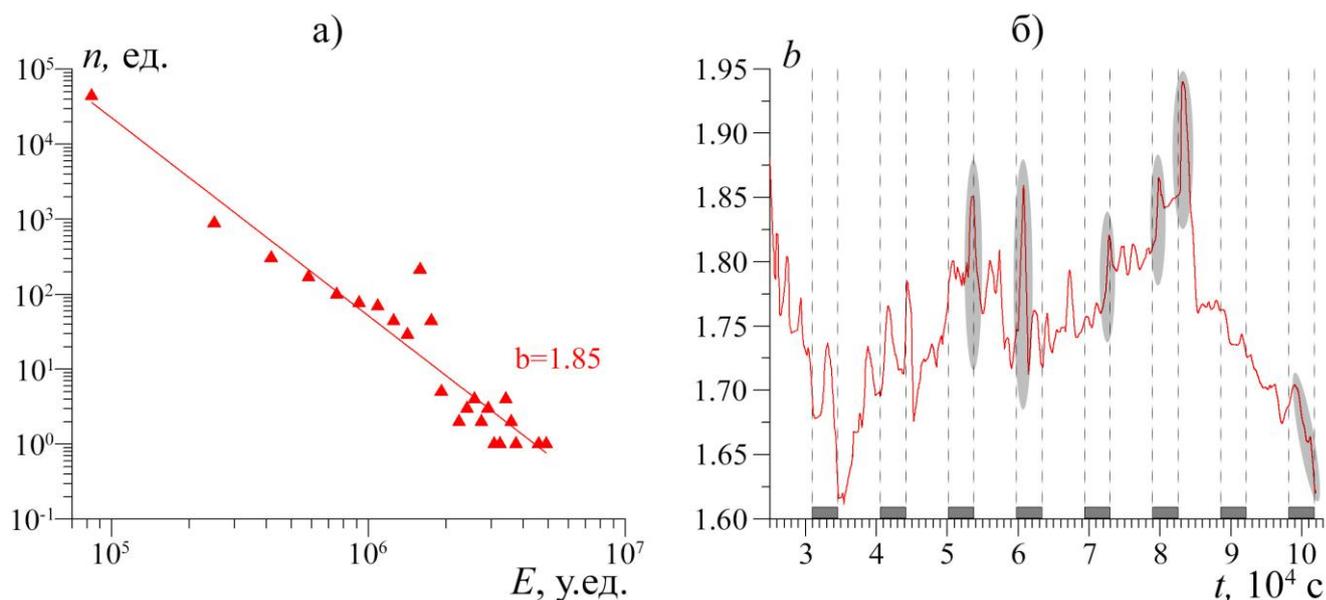


Рисунок 3.36 а – График повторяемости событий АЭ, зарегистрированных в эксперименте, б – временная зависимость углового коэффициента  $b$  графика повторяемости сигналов АЭ, вычисленная в скользящем окне величиной 10 минут. Штрихпунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу отмечены интервалы воздействия ЭМ полем. Серыми овалами обозначены изменения, вызванные ЭМ полем.

### 3.3. Обсуждение результатов

Выделим общие черты среди результатов серии экспериментов с воздействием ЭМ поля (таблица 3.8). Сначала рассмотрим механические характеристики образцов и сравним их с характеристиками образцов, которые не подвергались действию электромагнитного поля (описанные в разделе 3.1). Электромагнитное воздействие снизило предел прочности материала на 12%, при этом диапазон значений модуля упругости увеличился (таблица 3.9). Образцы мрамора, деформированные без ЭМ поля, имели диапазон модуля Юнга равный 32.9 ГПа – 40.6 ГПа. В присутствии ЭМ поля модуль упругости образцов мрамора составил 39.4 ГПа – 60.1 ГПа. Предел упругости увеличился со среднего по серии без воздействия  $k^*=0.67$  до  $k^*=0.80$  для серии образцов с ЭМВ. Обращает на себя внимание увеличение как продольной, так и поперечных деформаций по сравнению с их максимальными значениями для образцов, деформированных без воздействия (таблица 3.9).

Таблица 3.8. Основные механические характеристики образцов мрамора, испытанных с воздействием электромагнитного поля.

Образец	ЭМВ	$\sigma_z(\varepsilon_z) = E \cdot \varepsilon_z$ Стадия упругого деформирования			$\sigma_{п.п.},$ МПа	$\varepsilon_x,$ $10^{-3}$	$\varepsilon_y,$ $10^{-3}$	$\varepsilon_z,$ $10^{-3}$	Параметры перехода в область неупругих деформаций	
		$\nu_x$	$\nu_y$	E, ГПа					$\sigma_{упр},$ МПа	$k_{упр}$

1	+	0.027	5.3	60.1	132.5	1.88	23.4	4.75	108.3	0.82
2	+	0.016	1.1	39.4	102.9	1.3	8.4	4.30	79.2	0.77
3	+	0.022	2.6	42.4	137.7	6.04	16.0	5.40	117.5	0.85

Таблица 3.9. Сравнительная таблица механических характеристик образцов мрамора, испытанных без воздействия и с сеансами ЭМ поля.

Параметр	Образцы без ЭМВ	Образцы с ЭМВ
Модуль упругости Юнга, диапазон изменений, ГПа	25.9-40.6	39.4-60.1
Предел упругости, МПа	87.2	102.8
Относительный предел упругости, среднее значение $\sigma_{\text{упр.}} / \sigma_{\text{п.п.}}$	0.67	0.8
Предел прочности, МПа	84-152.5	102.9-138.9
Максимальные значения продольной деформации, $\epsilon_z$	$4.3-5.4 \cdot 10^{-3}$	$5.3-12.5 \cdot 10^{-3}$
Максимальные значения продольной деформации, $\epsilon_x$	$0.17-3.7 \cdot 10^{-3}$	$1.15-6.04 \cdot 10^{-3}$
Максимальные значения продольной деформации, $\epsilon_y$	$4.9-36.7 \cdot 10^{-3}$	$8.4-23.4 \cdot 10^{-3}$

Для сведения воедино результатов, полученных по серии образцов, составим обобщенную таблицу, включающую оценки трех компонент деформации и их скоростей, а также активности и углового коэффициента  $b$  графика повторяемости событий АЭ (таблица 3.10). Также построим диаграмму изменения скоростей всех трех компонент деформации (в относительных единицах) и нормированной активности АЭ, в периоды с воздействиями электромагнитных полей (рисунки 3.37 и 3.38).

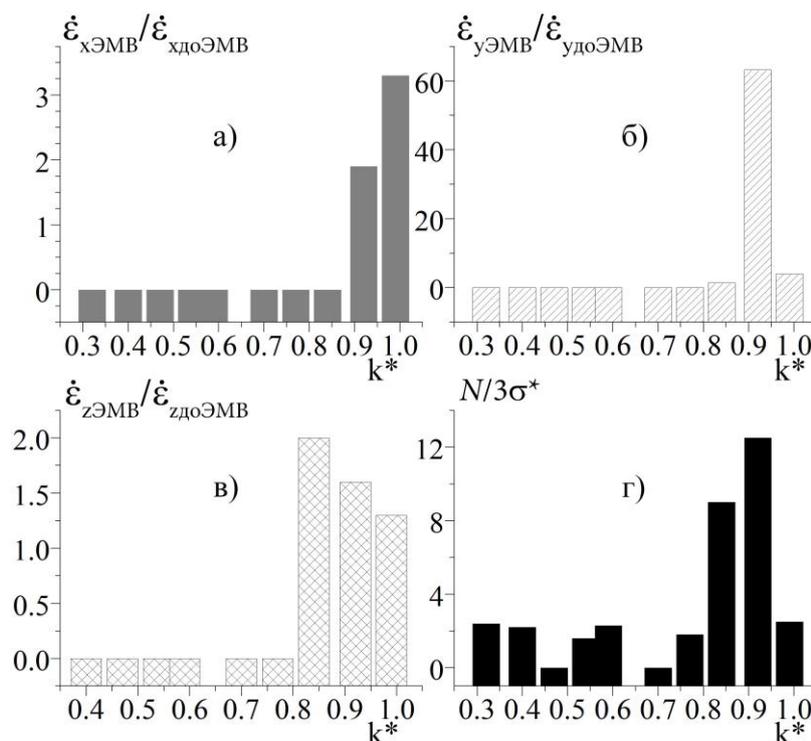


Рисунок 3.37 – Относительное изменение скоростей деформации: а – поперечной  $\dot{\epsilon}_x$ , б – поперечной  $\dot{\epsilon}_y$  и в – продольной  $\dot{\epsilon}_z$ , а также прирост активности АЭ (г) образца мрамора №1, при воздействиях скрещенных электрического и магнитного полей при разных коэффициентах одноосного сжатия,  $k^*$ .

Таблица 3.10 – Отклики трех компонент скоростей деформации, активности АЭ для серии образцов, деформируемых в присутствии скрещенных электрического и магнитного полей.

	Мрамор № 1				Мрамор № 2				Мрамор № 3			
	$\frac{\dot{\epsilon}_{Z\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Z\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{X\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{X\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Y\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Y\text{доЭМВ}}}$	$N_{\text{ЭМВ}}/3\sigma^*$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Z\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Z\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{X\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{X\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Y\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Y\text{доЭМВ}}}$	$N_{\text{ЭМВ}}/3\sigma^*$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Z\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Z\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{X\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{X\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Y\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Y\text{доЭМВ}}}$	$N_{\text{ЭМВ}}/3\sigma^*$
$k^* < 0.4$	1.12	-	-	2.4	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а
$0.4 < k^* < 0.5$	2.8	-	-	2.2	н/а	н/а	н/а	н/а	-	-	-	1.7
$0.5 < k^* < 0.6$	-	-	-	1.6	1.4	-	1.5	1.12	1.12	-	-	-
	-	-	-	2.3								
$0.6 < k^* < 0.7$	-	-	-	-	2.1	-	1.63	2	1.8	-	-	1.3
$0.7 < k^* < 0.8$	-	-	-	1.8	1.75	-	1.4	2.8	2.5	-	-	5
$0.8 < k^* < 0.9$	2.0	-	1.4	9	1.18	8.5	2.5	1.3	337	$12.5 \cdot 10^3$	-	444
$k^* > 0.9$	1.6	1.9	63.2	12.5	21.1	17.8	19.2	780	-	-	-	7.5
	1.3	3.3	4.0	2.5					1.6	-	-	70

н/а – отсутствовали сеансы при данном уровне нагрузки

- отсутствие изменений в скоростях деформации и откликов активности АЭ, связанных с электромагнитным воздействием

Как видно из гистограмм (на рисунках 3.37 а-в и 3.38 а-в), значимые приращения скоростей деформации наблюдаются при напряжениях сжатия с  $k^* > 0.7$  от уровня разрушения. Приросты активности АЭ отмечаются при более низких значениях напряжений (рисунок 3.37 г и 3.38 г). Вместе с тем, рисунок 3.37 г показывает снова, что наиболее контрастные отклики активности АЭ на электромагнитные воздействия имеют место при  $k^* > 0.7$ . С учетом этих результатов, а также опыта предыдущих исследований (обзор в [Богомолов и др., 2011]), реакцию материала целесообразно анализировать отдельно в области деформирования при напряжениях ниже 0.7 от разрушения (область I) и при  $k^* > 0.7$  (область II). Для каждой из этих областей будем рассматривать приросты компонент деформации  $\varepsilon_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y$  и их скоростей  $\dot{\varepsilon}_z, \dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y$ , а также активности АЭ (отклики АЭ) и изменения углового коэффициента  $b$ .

В области деформирования I проведено 11 сеансов, а процент сеансов ЭМВ, в которых обнаружено влияние ЭМВ на скорость продольной деформации составляет 54% от общего количества сеансов в этой серии экспериментов. Величина относительного изменения усредненной за час скорости продольной деформации варьируется от 1.1 до 2.9 раз, а среднее за 6 сеансов изменение  $\dot{\varepsilon}_z$  составляет 1.75 раза.

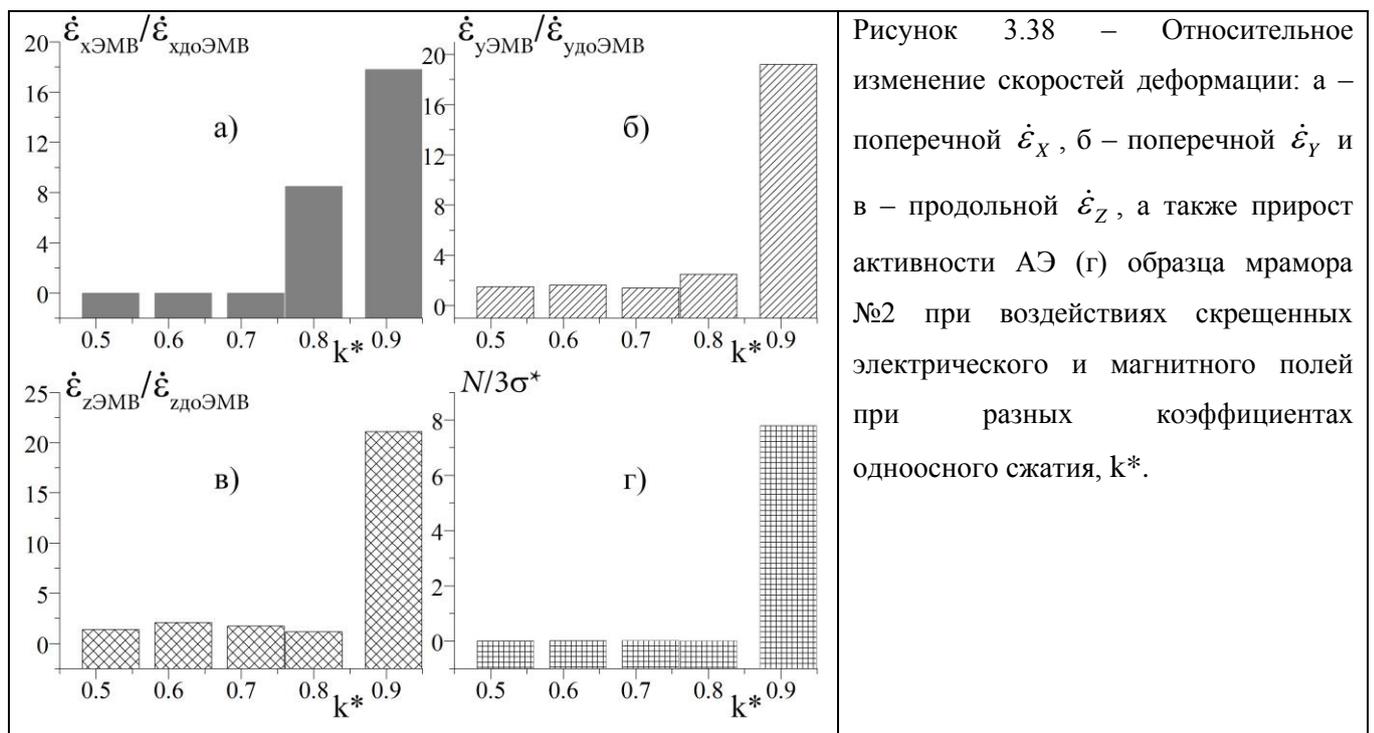


Рисунок 3.38 – Относительное изменение скоростей деформации: а – поперечной  $\dot{\varepsilon}_x$ , б – поперечной  $\dot{\varepsilon}_y$  и в – продольной  $\dot{\varepsilon}_z$ , а также прирост активности АЭ (г) образца мрамора №2 при воздействиях скрещенных электрического и магнитного полей при разных коэффициентах одноосного сжатия,  $k^*$ .

В целом по серии из трех экспериментов в области деформирования I изменения скорости поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_y$  выявлены в двух из одиннадцати сеансов ЭМВ, а скорости поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_x$  не обнаружены вовсе (рисунок 3.39 а-в). В восьми сеансах из одиннадцати (73%) в этой области установлено влияние ЭМ поля на активность АЭ,

причем в пяти из них наблюдаются одновременно изменения в скорости продольной деформации  $\dot{\epsilon}_z$ .

Зная количество инициированных ЭМ воздействием сигналов АЭ, можно сделать вывод, что отклики активности в области деформирования I имеют небольшую амплитуду, минимальный прирост составил 1.1, максимальный – 2.4 раза (в среднем же увеличение АЭ равнялось 1.8 раза, рисунок 3.39 г). Обобщим результаты откликов коэффициента  $b$ , учитывая, что пять сеансов из одиннадцати пришлись на начальный участок деформирования, когда активность АЭ была близка к нулю, и в них не представлялось возможным выделение откликов в угловом коэффициенте. Из остальных шести сеансов изменение коэффициента  $b$  выявлено в трех случаях, два из которых коррелирует с приростами активности АЭ.

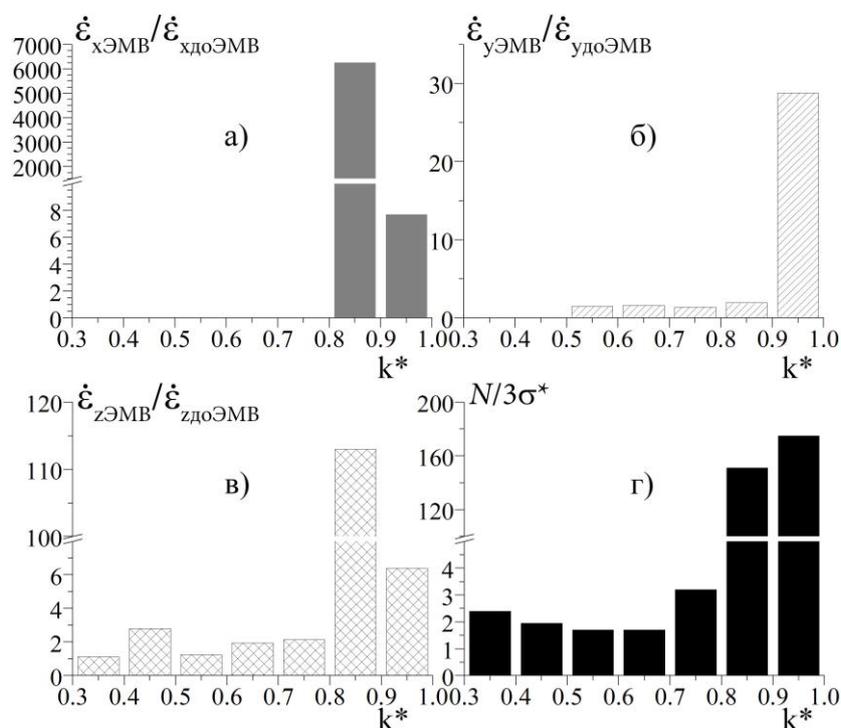


Рисунок 3.39 – Усредненное по всей серии экспериментов относительное изменение скоростей деформации: а – поперечной  $\dot{\epsilon}_x$ , б – поперечной  $\dot{\epsilon}_y$  и в – продольной  $\dot{\epsilon}_z$ , а также прирост активности АЭ (г) образцов мрамора при воздействиях скрещенных электрического и магнитного полей при разных коэффициентах одноосного сжатия,  $k^*$ .

В области деформирования II ( $k^* > 0.7$ ) было проведено 13 сеансов ЭМВ, а процентное соотношение сеансов, в которых идентифицировано влияние ЭМВ на скорость продольной деформации, составляет 69% от общего числа проведенных сеансов воздействия. Относительное изменение усредненной за 1 час скорости продольной деформации на данной стадии выше и варьируется от 1.2 до 337 раз (рисунок 3.39 в). Максимальное изменение в 337 раз, вызванное ЭМ полем, зарегистрировано однажды, скорость продольной деформации увеличилась со значения  $\dot{\epsilon}_z = 1.9 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  до уровня  $\dot{\epsilon}_z = 5.7 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , укорочение при этом составило  $\Delta l_z = 1.3 \text{ мкм}$ . Скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  при этом выросла на 4 порядка (в  $12.5 \cdot 10^3$  раза), а поперечное удлинение составило  $\Delta l_x = 20 \text{ мкм}$ . Важно, что на этой стадии нагружения при изменениях скорости продольной деформации как правило происходили изменения

скоростей поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  (отмечено в пяти из девяти сеансов, рисунок 3.39 а) и  $\dot{\epsilon}_y$  (шести из девяти сеансов, рисунок 3.39 б). Изменение скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  варьировались от 1.9 раза до  $12.5 \cdot 10^3$  раз. Изменение скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_y$  варьировались от 1.4 раз до 63.2 раз, среднее приращение составило 15.3 раза (рисунок 3.39 б).

Акустическая эмиссия оказалась более чувствительным параметром, чем деформация и ее скорости, т.к. приросты активности зарегистрированы в одиннадцати сеансах из двенадцати (85%), против 69%, в которых наблюдались вариации скорости деформации (рисунок 3.39 г). Также необходимо отметить, что акустоэмиссионные отклики в диапазоне нагрузок при  $k^* > 0.7$  отличаются большей амплитудой прироста активности АЭ. В трех экспериментах из серии образцы разрушились в течение сеанса воздействия. В этих случае прирост АЭ носит лавинообразный характер с выделением порядка 10 тысяч сигналов сверх фонового уровня активности АЭ до воздействия. Средний прирост активности АЭ составил 110.7 раз выше трехкратного среднеквадратического отклонения активности АЭ до сеансов (рисунок 3.39 г).

Для получения целостной картины характера взаимодействия электромагнитных полей с полями напряжений в образцах мрамора рассмотрим эксперименты в условиях непрерывного (непрекращающегося в течение всего времени испытания) воздействия. В данном случае электромагнитное поле будет играть роль скорее не триггера (спускового крючка некоего большого по энергетике события, предваряемого длительным накоплением напряжений), а “соучастником” деформационного процесса на всех его стадиях. Как показали эксперименты, можно выделить результаты двух типов. На рисунке 3.40 показаны изменения компонент деформации и активность АЭ для первого примера. Поперечная деформация  $\epsilon_y$  и продольная деформация  $\epsilon_z$  в течение всего эксперимента увеличивались линейно, в отличие от предшествующих экспериментов сколь либо значимых приростов деформации наблюдается всего два. Максимальное изменение скорости продольной деформации произошло при  $k^* = 0.91$  ( $t \approx 17.1 \cdot 10^4$  с) и составило 3.6 раза (рисунок 3.40 а). Одновременно с этим скорость поперечной деформации упала со значения  $\dot{\epsilon}_y = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  до уровня  $\dot{\epsilon}_y = -3 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ .

Активность АЭ отражала процесс деформирования: с начала испытаний постепенно линейно возрастала без лавинообразных выбросов, характерных для образцов, испытанных в режиме с сеансами воздействия. Перед разрушением с момента времени  $t \approx 17.9 \cdot 10^4$  с согласно увеличению скорости деформации  $\epsilon_y$  на графике активности наблюдается плавный рост до 4 событий в секунду, такой темп накопления дефектов сохранялся в течение порядка 2-х часов, после чего при разрушении активность возросла до 87 событий в секунду (цифра 1 на рис. 3.40 б).

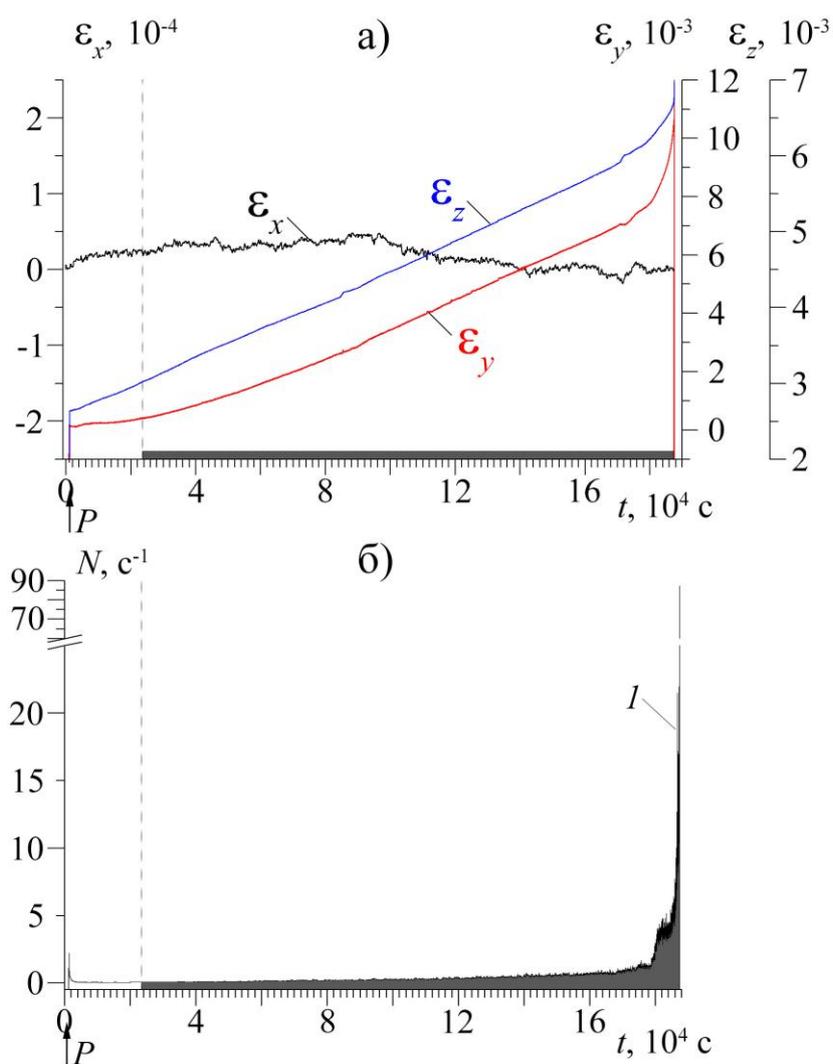
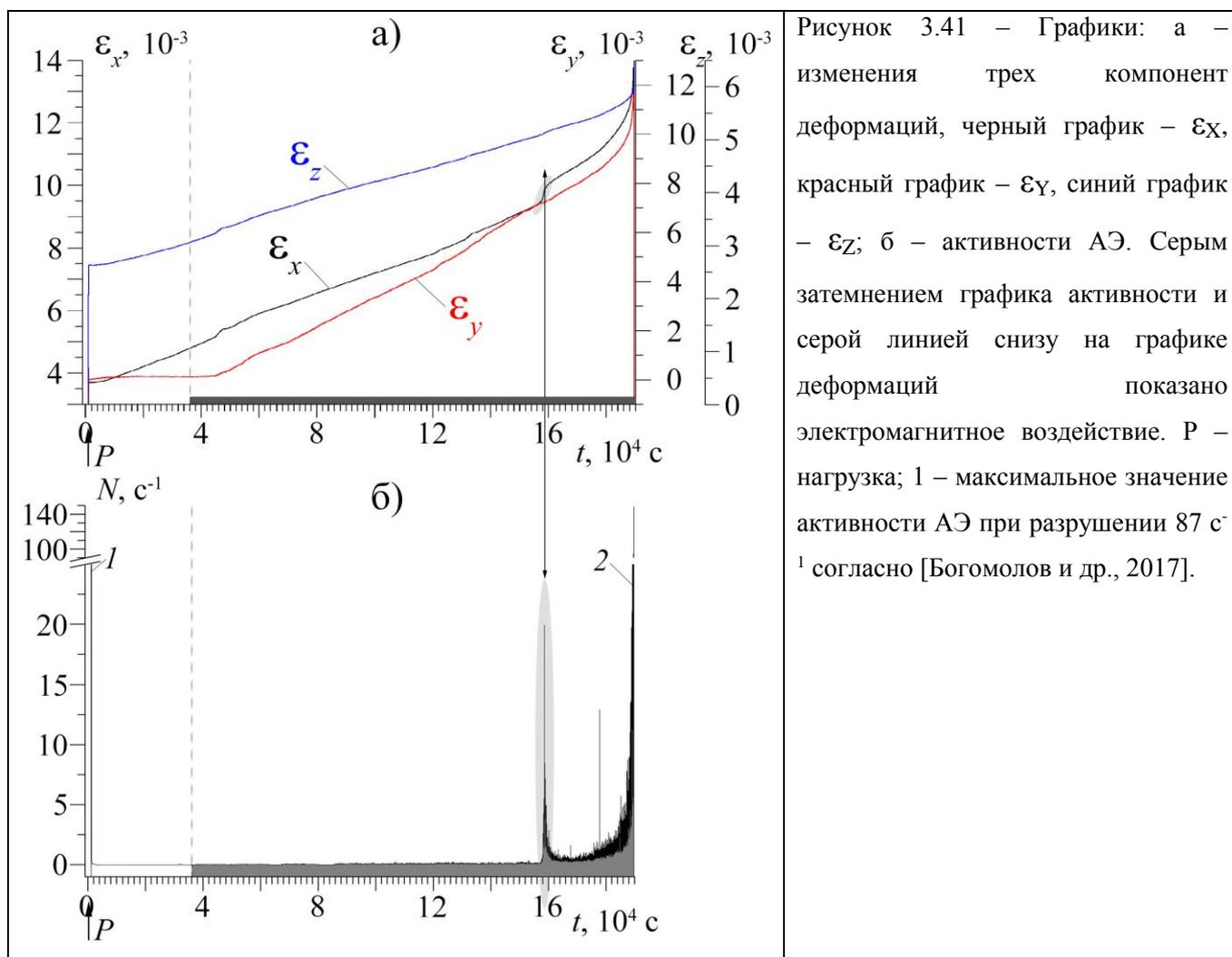


Рисунок 3.40 – Графики: а – изменения трех компонент деформаций, черный график –  $\epsilon_x$ , красный график –  $\epsilon_y$ , синий график –  $\epsilon_z$ ; б – активности АЭ. Серым затемнением графика активности и серой линией снизу на графике деформаций показано электромагнитное воздействие. P – нагрузка; 1 – максимальное значение активности АЭ при разрушении  $87 \text{ c}^{-1}$  согласно [Богомолов и др., 2017].

Во втором эксперименте активными оказались все компоненты деформации, но  $\epsilon_y$  начала меняться не сразу, в отличие от двух других, а только с некоторой задержкой после включения поля (рис. 3.41 а). Отметим небольшой всплеск АЭ (до 20 событий в секунду), который произошел при  $k^*=0.87$  (выделенная область на рис. 3.41 б). Этот всплеск сопровождался приростом  $\epsilon_x$  (выделенные области на рис. 3.41), но менее резким по амплитуде и скорости нарастания, чем изменения в предыдущих экспериментах. Кроме этого длительность прироста составила порядка 2770 секунд, что не наблюдалось в предыдущих экспериментах. Анализ показал, что после включения поля спустя некоторое время (2.5 часа) возрастает скорость поперечной деформации на два порядка – от среднего значения до начала электромагнитного воздействия  $\dot{\epsilon}_{ymean} = 5.9 \cdot 10^{-10} \text{ c}^{-1}$  до среднего во время воздействия  $\dot{\epsilon}_{ymean} = 6.3 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ . Это позволяет понять, почему в экспериментах с часовыми сеансами такого деформационного эффекта не наблюдалось, и заметные приросты деформации в условно «упругой» области (до напряжений с  $k^* < 0.7$ ) появлялись лишь к концу сеансов. Продольная деформация и активность АЭ в случае непрерывного электромагнитного воздействия имеют устойчивую тенденцию к

росту. В случае рисунка 3.41 б активность АЭ увеличивается сильнее, чем в эксперименте на рис. 3.40 б. В обычных экспериментах (сеансовые ЭМВ и без воздействия) до нагрузок, соответствующих  $k^* < 0.7$ , активность колеблется на уровне близком к  $0.3 \text{ с}^{-1}$  и растет при увеличении нагрузки.



Отметим важный результат: в приведенных на рисунках 3.40 и 3.41 экспериментах не наблюдается значительных изменений трех компонент деформации и отмечаются заметно меньшие по количеству и амплитуде приросты активности АЭ (а где-то и вовсе отсутствуют). Следует отметить то, что предел прочности образцов, испытанных с сеансовыми воздействиями, ниже предела прочности образцов серии без воздействия. Для серии образцов, которые подвергались действию электромагнитного поля в течение всего времени испытания, предел прочности сравним с пределом прочности материала (разница не более 6%), испытываемого без воздействия.

### Выводы по главе 3

При испытаниях образцов мрамора в отсутствие электромагнитного воздействия установлены характерные временные зависимости продольной и поперечных деформаций и их

скоростей. По этим зависимостям определены параметры, которые можно рассматривать как фоновые (т.е. параметры сравнения) для экспериментов на образцах мрамора этой же серии, но с воздействием электромагнитных полей: среднечасовое относительное изменение скоростей продольной и поперечных деформаций и их среднеквадратические отклонения.

В экспериментах на образцах мрамора, деформируемых в режиме роста нагрузки в присутствии скрещенных электрического и магнитного полей, обнаружены превышения этих значений. Тем самым установлено влияние скрещенных электрического и магнитного полей на скорость деформации образцов мрамора. В области напряжений ниже 0.7 от уровня разрушения приросты скорости деформации отмечены в половине случаев, а при более высоких значениях напряжения – в большинстве сеансов с ЭМ воздействиями. Величина изменений скоростей деформации, являющихся реакцией материала на воздействие, варьируется от минимальных значений (десяти процентов) до нескольких порядков. Отклики активности акустической эмиссии при напряжениях ниже 0.7 от уровня разрушения зарегистрированы в 73% случаев и имеют небольшую амплитуду прироста. При более высоких сжимающих напряжениях процент сеансов с откликами АЭ возрастает до 85%, причем амплитуда откликов становится в разы и десятки раз больше.

Результаты экспериментов, проведенных с непрерывно действующим в течение всего испытания электромагнитным полем, продемонстрировали существенное отличие и от экспериментов без воздействия и от испытаний с сеансовыми электромагнитными воздействиями. В них практически отсутствуют значительные приращения деформации, а приросты активности акустической эмиссии редки и имеют меньшую амплитуду прироста, чем в случае сеансовых воздействий. Увеличение скорости деформации наблюдается с большой задержкой, что позволяет объяснить почему в экспериментах с сеансовым типом воздействия приросты скоростей деформации отмечаются при высоких значениях напряжения и с задержками, близкими к длительности сеанса. Изложенные результаты позволяют обосновать защищаемые научные положения 1, 2 (Введение, стр. 6, 7).

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 4. Особенности реакции образцов мрамора и гранита на воздействия электромагнитных полей. Различная постановка эксперимента

В данной главе представлены результаты специальных экспериментов на водонасыщенных образцах мрамора, нацеленных на уточнение роли воды в эффекте электростимулирования сейсмических подвижек в земной коре (раздел 4.1). Разделы 4.2 и 4.3 посвящены исследованию реакции образцов мрамора и гранита на воздействие электромагнитных полей при квазистационарном уровне нагрузки (по данным о скоростях продольной и поперечных деформаций и активности АЭ). Проведение экспериментов с ЭМ воздействием на образцах геоматериалов при фиксированном уровне нагрузки важно для сравнения с ранее полученными результатами. Также представлены новые результаты об изменениях углового коэффициента  $\nu$  для образцов гранита под влиянием электрических импульсов.

### 4.1. Вариации скорости деформации и активности АЭ водонасыщенных образцов мрамора при воздействиях скрещенных электрического и магнитного полей

С учетом известного факта наличия физико-химических процессов, протекающих на границах твердой и жидкой фаз и приводящих к адсорбционному понижению прочности твердого скелета, которое носит название эффекта Ребиндера, можно полагать, что роль воды определяет не только прочностные характеристики материала, но и вносит вклад в электростимулирование деформации и акустической эмиссии образцов мрамора. Для подтверждения этого рассмотрим результаты экспериментов на водонасыщенных образцах мрамора, проведенные по стандартной схеме, описанной в разделе 2.2.

Продемонстрируем пример воздействия скрещенного ЭМ поля на водонасыщенный образец мрамора №1, графики нагружения и напряжения-деформации которого представлены на рисунке 4.1.

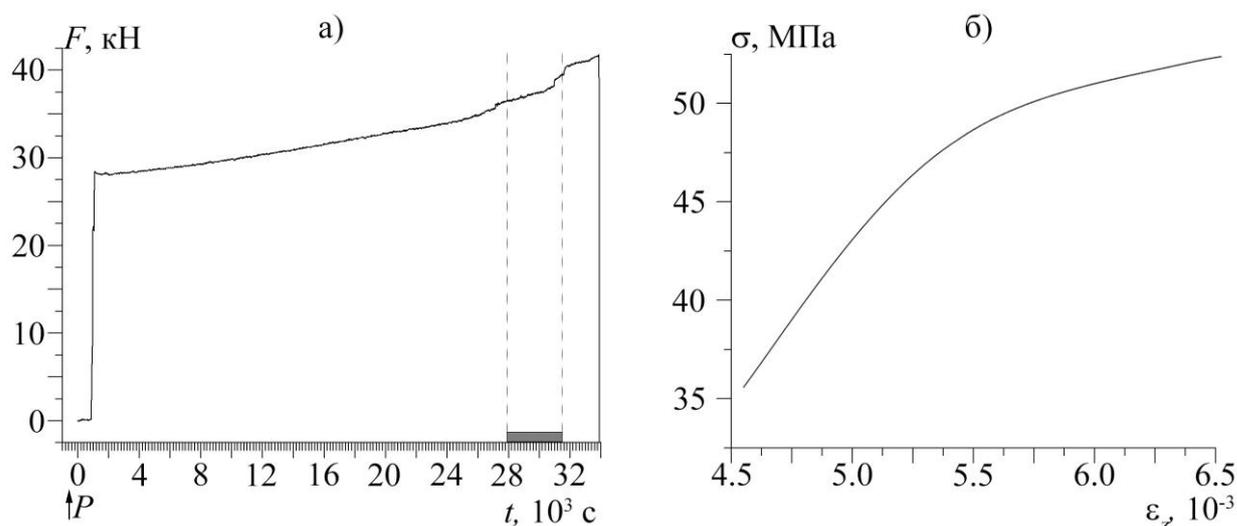


Рисунок 4.1 а – Диаграмма нагружения и б – график напряжения-деформации образца водонасыщенного мрамора №1.

При деформировании данного образца наглядно проявился эффект Ребиндера [Ребиндер, 1979], т.е. произошло значительное (в 2.4 раза) уменьшение предела прочности мрамора (рисунок 4.1 а) по сравнению с усредненным значением для образцов, не подвергавшихся водонасыщению. Диаграмма напряжения-деформации характеризуется, во-первых, низким значением модуля Юнга, равным 16 ГПа, а во-вторых, большими значениями продольной деформации в диапазоне напряжений  $k^* > 0.8$  (рисунок 4.1 б).

Рассмотрим изменения во времени активности акустической эмиссии и компонент деформации во времени этого образца (рисунок 4.2), опустив начальный этап нагружения, не представляющий интереса ввиду его однотипности с предыдущими образцами, описанными в главе 3.

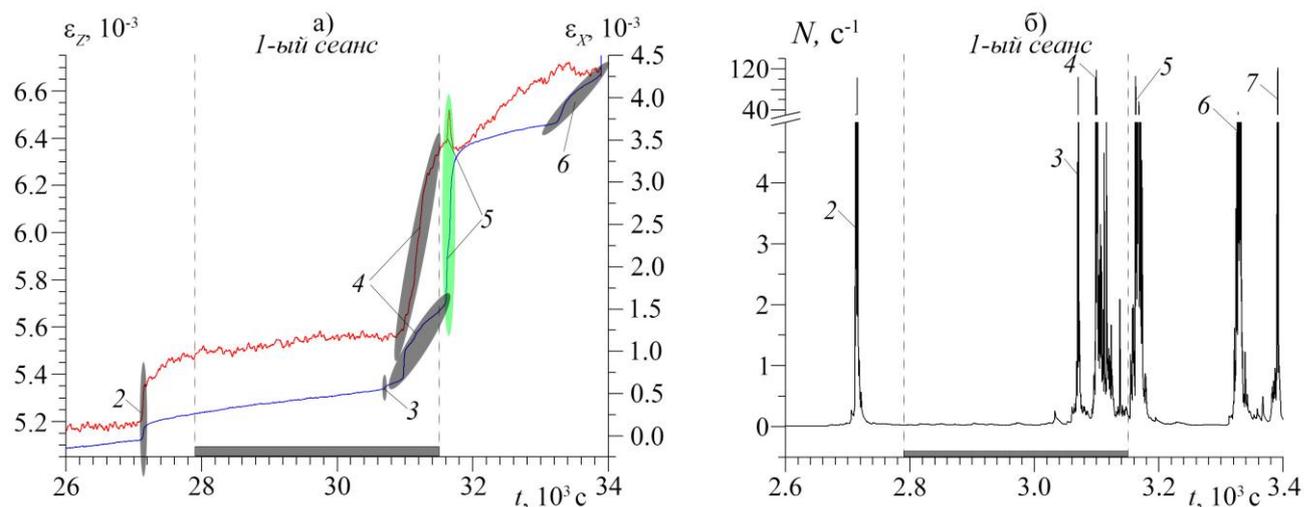


Рисунок 4.2 – Графики изменения компонент деформации (а) и активности акустической эмиссии (б) водонасыщенного образца мрамора № 1 согласно [Мубассарова, Закупин, 2013]. Интервал воздействия скрещенным ЭМ полем обозначен пунктирными линиями и серой чертой снизу. Цифровые обозначения – изменения компонент деформации, соответствующие максимальным значениям активности АЭ: 2 –  $103 \text{ с}^{-1}$ , 3 –  $104 \text{ с}^{-1}$ , 4 –  $119 \text{ с}^{-1}$ , 5 –  $106 \text{ с}^{-1}$ , 6 –  $36 \text{ с}^{-1}$ , 7 –  $123 \text{ с}^{-1}$ .

Перед единственным сеансом воздействия скрещенного ЭМ поля при напряжении 44.6 МПа ( $k^*=0.85$ ) наблюдается резкое увеличение активности АЭ до 103 событий в секунду, что соответствует приросту деформации  $\epsilon_x$  на  $4.6 \cdot 10^{-5}$  и  $\epsilon_z$  на  $5.6 \cdot 10^{-5}$  (цифра 2 на рисунке 4.2) В случае поперечной деформации  $\epsilon_x$  этот прирост не превысил 10% от максимального значения в эксперименте, в то время как на сухих образцах этот прирост был порядка 30% от максимума. Затем в течение 16 минут до начала сеанса воздействия поперечная  $\epsilon_x$  деформация уменьшается и стабилизируется на уровне  $1.1 \cdot 10^{-4}$ , который не меняется на протяжении 47

минут в период подачи скрещенных электрического и магнитного полей. В течение этого часа скорость продольной деформации замедляется на 40%.

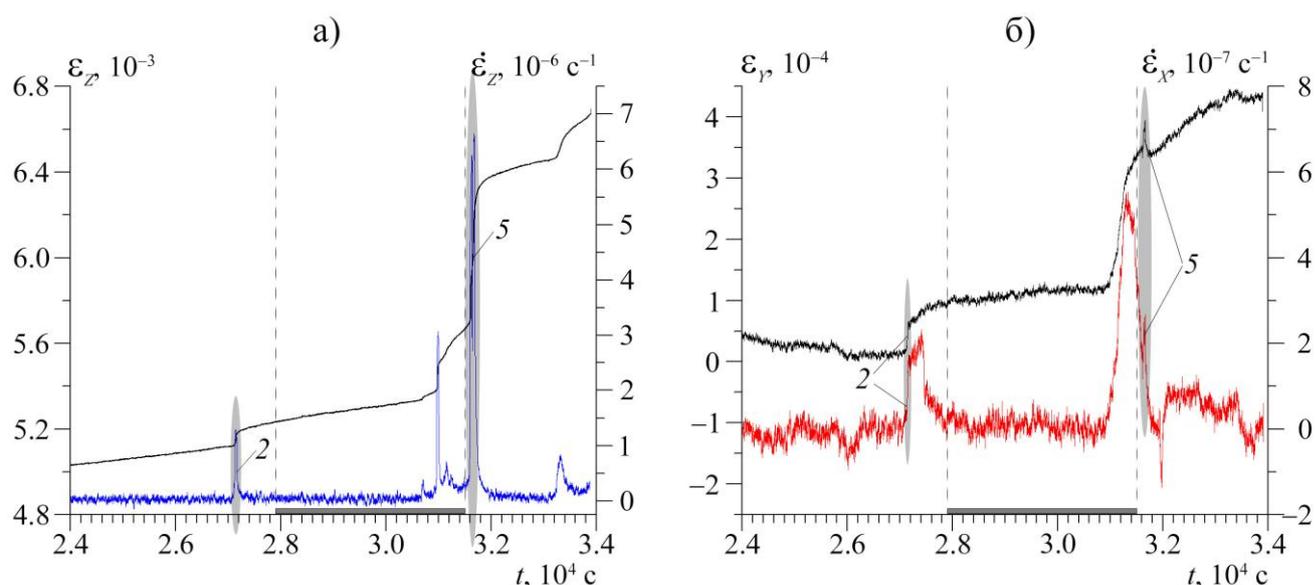


Рисунок 4.3 а – Продольная деформация (черная кривая) и ее скорость (синяя кривая) в зависимости от времени, б – поперечная  $\epsilon_x$  деформация (черная кривая) и ее скорость (красная кривая) от времени водонасыщенного образца мрамора № 1. Интервал воздействия отмечен пунктирными линиями и серой чертой на шкале времени. Овалами выделены синхронные изменения скоростей компонент деформаций.

Значительные изменения скоростей обеих деформаций начались при  $t=30691.52$  с и продолжились после выключения источника электромагнитного воздействия (рисунок 4.3). Осевое укорочение образца на  $\Delta l_z=0.9$  мкм (выделенная область 3 на рисунке 4.2 а) сопровождалось приростом активности АЭ до 104 событий в секунду в течение 100 секунд. Затем скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  характеризуется нелинейным ростом, а в продольном направлении наблюдается серия резких (кратковременных не более 40 секунд) чередующихся приростов скорости деформации, после которых наблюдается более медленное убывание скорости до уровня, превышающего таковой до прироста. При этом амплитуда прироста относительно фоновому уровню  $\dot{\epsilon}_z=3.8 \cdot 10^{-8}$  с<sup>-1</sup> составляет от 2.6 раз до 100 раз. В отличие от медленного роста скорости поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$ , каждый из резких кратковременных приростов скорости  $\dot{\epsilon}_z$  отмечается чуть опережающим (от 65 до 395 секунд) откликом в активности АЭ амплитудой не ниже 100 событий в секунду (рисунок 4.2). Лишь единожды резкий прирост скорости  $\dot{\epsilon}_z$ , составивший 26 раз и отмеченный на рисунке 4.3 цифрой 5, произошел синхронно с приростом скорости поперечной деформации. За 2060 секунд активизации процесса дефектообразования образец уменьшился в осевом направлении на

$\Delta l_z=83$  мкм, а в поперечном вырос на  $\Delta l_x=4.6$  мкм, при этом выделилось 2190 сигналов АЭ (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Данные откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с водонасыщенным образцом мрамора № 1.

№ сеанса	$\sigma_{ЭМВ}$	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	Кол-во инициированных событий АЭ	Длительность отклика, мин/с	Величина задержки отклика, мин/с
1	45.6	0.87	2190	2060 с	2396 с

Следующие 22 минуты скорость продольной деформации снизилась до значения  $\dot{\epsilon}_z=6.4 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  и перед самым разрушением сначала на порядок увеличилась, сопровождаемая выделением акустических сигналов до  $36 \text{ с}^{-1}$  (цифра 6 на рисунке 4.2), а затем установилась на уровне  $\dot{\epsilon}_z=19.7 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ , который сохранялся вплоть до разрушения образца. Величины скоростей деформаций, вызванные электромагнитным воздействием, приведены в таблице 4.2. Согласно табличным значениям минимальное изменение скорости компонент деформации вследствие ЭМВ составило 22%, а максимальный прирост – почти на 2 порядка.

Таблица 4.2. Компоненты скорости деформации водонасыщенного образца мрамора, оцененные за 1 час до и во время действия электромагнитного поля.

№ сеанса возд-я (всего 1 сеанс)	$\sigma_{ЭМВ}$ , МПа	$k^*_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	$\dot{\epsilon}_y, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_z, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_x, 10^{-8} \text{ с}^{-1}$	
			до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ
1	45.6	0.87	-	-	5.8	1). 4.4 2). 3.4 3). 109 4). 12.4 5). 115 6). 1660 7). 350 8). 89.6 9). 35.9 10). 27.2	4.7	1). 0.8 2). 28.3 3). 69.8 4). 16.1

Рассмотрим пример деформирования другого водонасыщенного образца мрамора № 2, характеристика напряжения-деформации и график нагрузки которого изображены на рисунке 4.4.

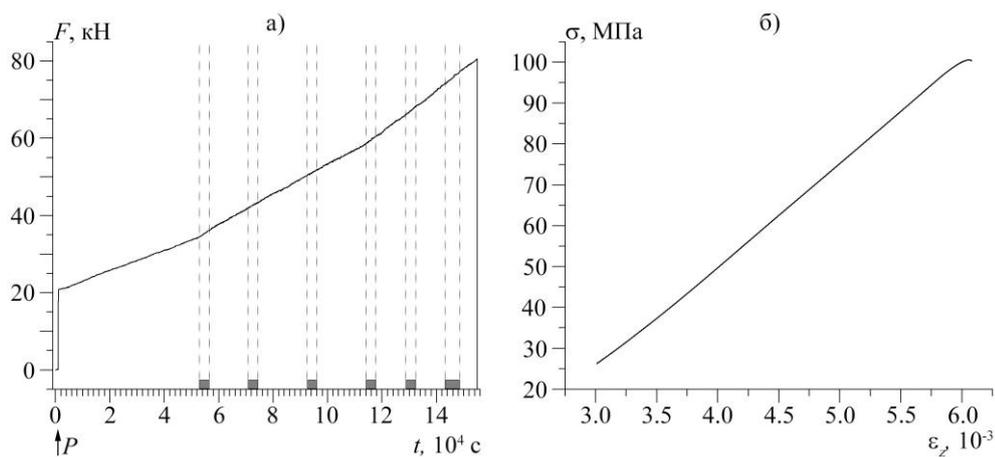


Рисунок 4.4 а – График нагрузки от времени и б – зависимость напряжения от осевой деформации образца водонасыщенного мрамора № 2.

Прочность образца оказалась выше почти в 2 раза, чем у первого, однако по сравнению с сериями экспериментов с сухими образцами, как испытанными без ЭМВ, так и с воздействием, ниже на 30%. В ходе испытания 6 раз осуществлялись сеансы скрещенных электрического и магнитного полей.

Проанализируем графики компонент деформации от времени в совокупности с активностью акустической эмиссии (рисунок 4.5). Характерной особенностью данного образца является ступенчатое изменение поперечной деформации  $\epsilon_x$  на протяжении всего времени деформирования, в том числе во время проведения сеансов ЭМ поля. Некоторое сходство наблюдается с изменениями продольной деформации водонасыщенного образца № 1 (рисунок 4.3 а). В случае образца № 2 резкие приросты деформации встречаются также и в осевом ( $\epsilon_z$ ) и другом поперечном направлении –  $\epsilon_y$ , однако они менее выражены (рисунок 4.5 а).

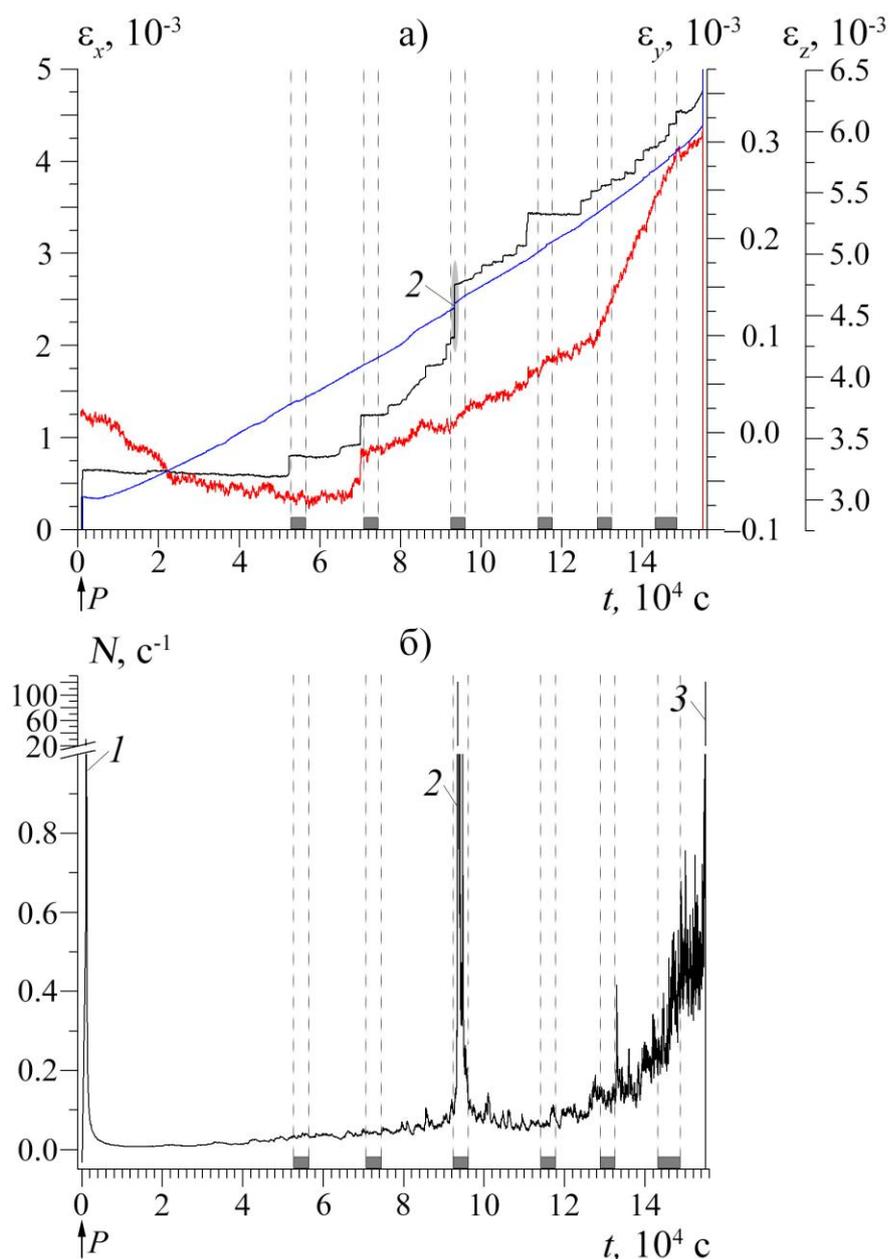


Рисунок 4.5 – Графики изменения компонент деформации (а) и активности акустической эмиссии (б) водонасыщенного образца мрамора № 2 согласно [Мубассарова, Закупин, 2013]. Интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем обозначены серыми прямоугольниками и пунктирными линиями. Максимумы активности: 1 – 30 событий в секунду при начальной нагрузке, 2 – 121  $c^{-1}$ , 3 – 120 событий в секунду при разрушении.

Усредненная за 356 секунд скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  представлена на рисунке 4.6 а. Максимальный прирост поперечной деформации  $\epsilon_x$  при напряжении 63 МПа ( $k^*=0.63$ ) составляет  $\epsilon_x=5 \cdot 10^{-4}$  (в абсолютных значениях  $\Delta l_x=21$  мкм) и приходится на время электромагнитного воздействия (цифра 2 на рисунке 4.6 а). Синхронно происходит продольное укорочение образца на  $\Delta l_z=1.7$  мкм, а активность АЭ увеличивается в 1200 раз, достигая максимума в 120 событий в секунду. Возбуждение акустической эмиссии произошло без задержки по времени от начала этого сеанса (рисунок 4.5, таблица 4.4). Скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  в этот момент составила  $\dot{\epsilon}_x=2.2 \cdot 10^{-4} c^{-1}$  и, как видно из рисунка 4.6 а, на порядка превышает максимальные значения в отсутствии воздействия. Отметим, что при

увеличении напряжения значения максимумов скорости  $\dot{\varepsilon}_x$  снижаются, а частота их появления увеличивается.

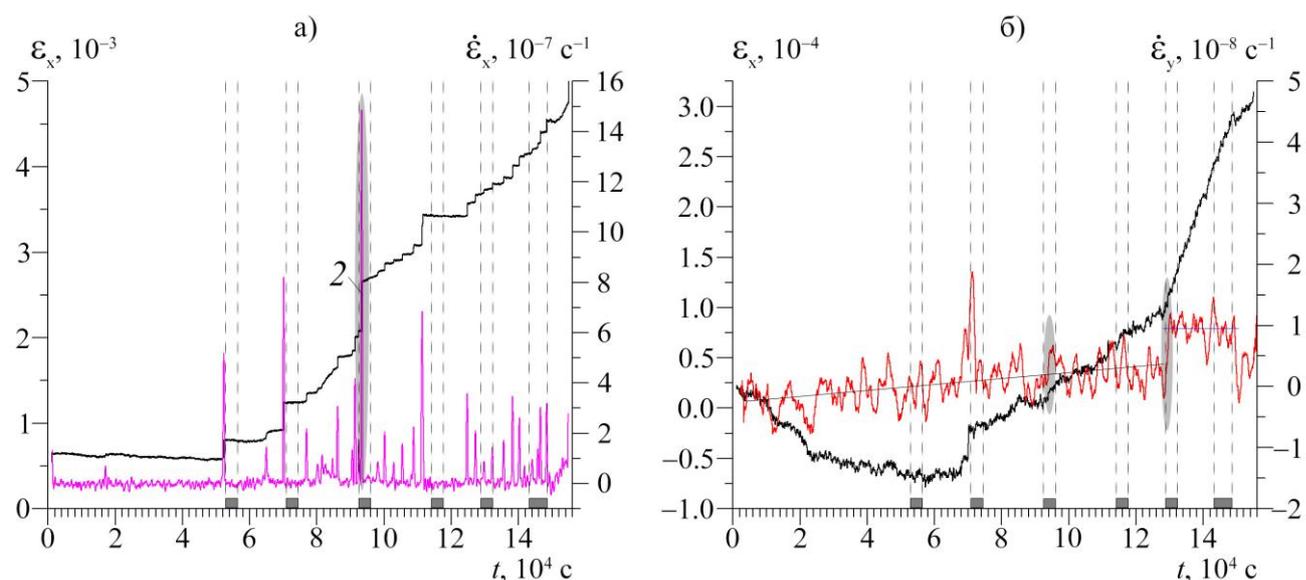


Рисунок 4.6 а – Изменение поперечной деформации  $\varepsilon_x$  (сглаженной методом скользящего среднего, черная кривая) и ее скорости, вычисленной в скользящем окне величиной 10 минут (пурпурная кривая); б – изменение поперечной деформации  $\varepsilon_y$  (черная кривая) и ее скорости (красная кривая), оцененной в скользящем окне размером 10 минут.

Скорость поперечной деформации  $\dot{\varepsilon}_y$  отличается значительными флуктуациями  $\Delta \dot{\varepsilon}_x = 3.1 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  на протяжении большей части испытания до напряжения  $k^* = 0.83$  – начала пятого сеанса воздействия (рисунок 4.6 б). Скорость  $\dot{\varepsilon}_y$  растет очень медленно от начала эксперимента и до момента пятого сеанса со значения  $\dot{\varepsilon}_y = -2.4 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  до  $\dot{\varepsilon}_y = 3.7 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  за почти 34.7 часов (черная аппроксимационная прямая на рисунке 4.6 б). С задержкой 760 секунд от начала 5 сеанса скорость поперечной деформации поднялась до уровня  $\dot{\varepsilon}_y = 9.6 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$ , сохранявшегося на протяжении 4.8 часа постоянным – ЭМ поле оказало пролонгированное воздействие (синяя аппроксимационная прямая на рисунке 4.6 б). Торможение деформации  $\varepsilon_y$  произошло после завершения последнего сеанса воздействия – за 2.5 часа до разрушения образца.

Скорость продольной деформации  $\dot{\varepsilon}_z$ , усредненная за 470 секунд, представлена на рисунке 4.7. Приросты деформации (и ее скорости) во время сеансов ЭМВ отмечались в трех сеансах из шести. При напряжениях, соответствующих  $k^* > 0.63$ , они носят кратковременный характер и обладают большей амплитудой в сравнении с подобными приростами вне сеансов

ЭМВ (последний шестой сеанс и приросты скорости деформации до него). В таблице 4.3 приведены данные о вариациях скорости продольной деформации в период воздействия.

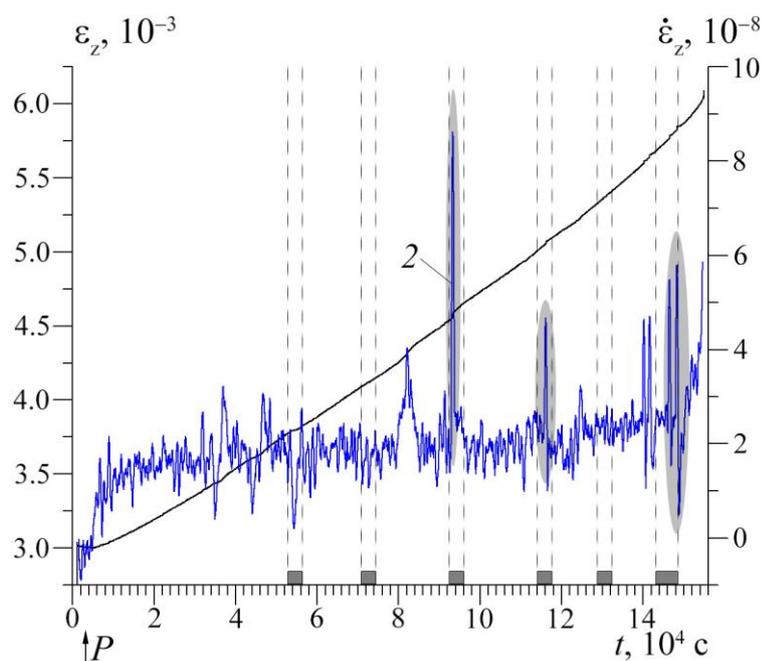


Рисунок 4.7 – Продольная деформация (черная кривая) и ее скорость (синяя кривая) в зависимости от времени. Пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу обозначены интервалы воздействия скрещенными электрическим и магнитным полями.

Таблица 4.3 – Три компоненты скорости деформации, оцененные за 1 час до и во время действия электромагнитного поля.

№ сеанса возд-я (всего 6 сеансов)	$\sigma_{ЭМВ}$	$k^*_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	$\dot{\epsilon}_z, 10^{-8} \text{ 1/с}$		$\dot{\epsilon}_x, 10^{-8} \text{ 1/с}$		$\dot{\epsilon}_y, 10^{-9} \text{ 1/с}$	
			до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ
1	44.2	0.44			-	-		
2	53.5	0.53	1.9	1.6	-	-	-	-
3	63.7	0.63	1.9	1). 2.0 2). 572.4 3). 2.4	0.2	1). 2276 2). 0.5 3). 21946.7 4). 0.8 5). 2.5	-0.7	4.6
4	74.1	0.73	2.1	1). 2.3 2). 511.6 3). 2.0				
5	84	0.83	-	-	0.5	1). 2.1 2). 16.8 3). 0.8 4). 121.5	2.1	9.8
6	94.6	0.94	1.7	1). 2.6 2). 644.2 3). 2.5 4). 541 5). 1.4	0.7	1). 3.4 2). 42.7 3). 1.3 4). 198.8 5). 2.0 6). 5018 7). 0.6 8). 5784 9). 0.6		

Рассмотрим подробно отклики активности АЭ на электромагнитное воздействие (рисунки 4.5 б, 4.8). Первый отклик активности АЭ произошел в третьем сеансе воздействия при напряжении, соответствующем  $k^*=0.63$ . Средний уровень активности до воздействия не превышал значение  $0.1 \text{ с}^{-1}$  и сразу после включения источника скрещенных ЭМ полей стал лавинообразно возрастать до максимума  $121 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4.5 б). Длительность отклика составляла 3587 с (практически весь сеанс воздействия) и за это время было зарегистрировано 2931 инициированное событие (таблица 4.4). Следующий сеанс воздействия оказал значительно меньшее влияние на акустическую эмиссию: с задержкой порядка 2500 с было инициировано всего 72 события АЭ (рисунок 4.8 а). Увеличение активности также произошло в последнем сеансе воздействия при  $k^*=0.94$  (рисунок 4.8 б). В отличие от кратковременных приростов с последующим спадом до нового фонового уровня, в данном сеансе активность АЭ демонстрирует медленный неуклонный рост в течение часа ЭМ воздействия и некоторое время после выключения источника ЭМ полей (рисунок 4.8 б).

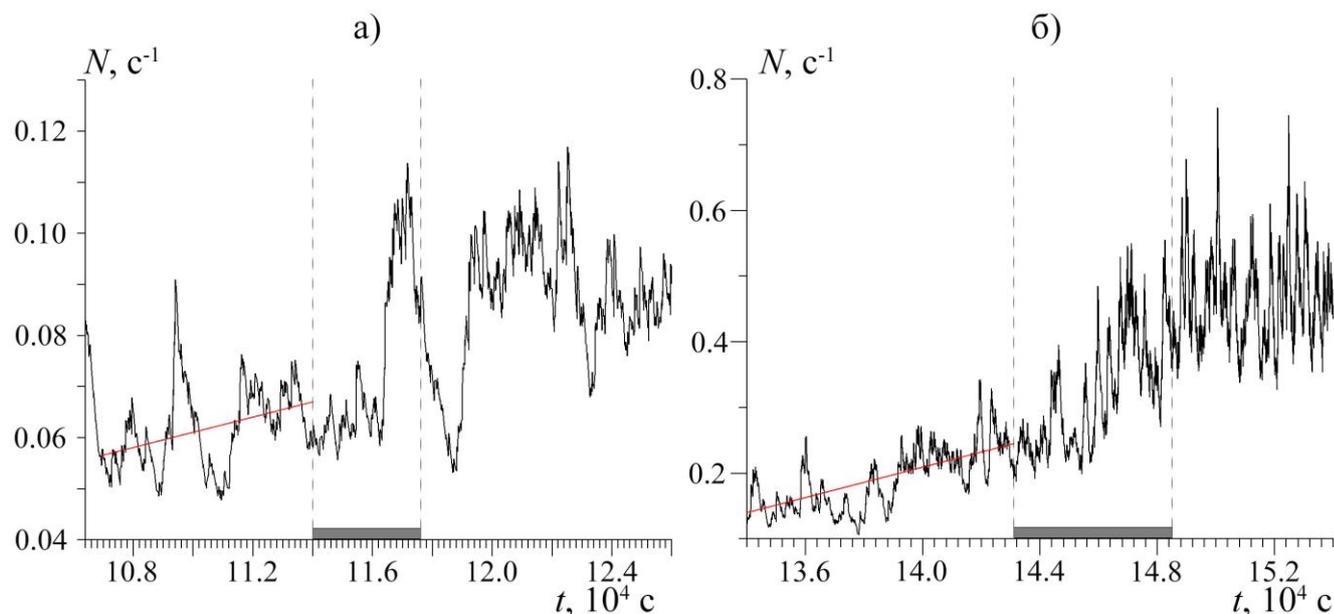


Рисунок 4.8 – Активность АЭ водонасыщенного образца мрамора № 2: а – в масштабе показан 4ый сеанс воздействия при  $k^*=0.63$ , б – масштабированная относительно шестого сеанса ЭМВ при  $k^*=0.94$ . Воздействие скрещенным ЭМ полем показано серыми прямоугольниками снизу и пунктирными линиями.

Информация о каждом отклике активности АЭ, его длительности и задержке относительно начала сеанса сведена в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Данные откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с водонасыщенным образцом мрамора № 2.

№ сеанса	$\sigma_{ЭМВ}$	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	Кол-во инициированных событий АЭ	Длительность отклика, с	Величина задержки отклика, мин/с
----------	----------------	--	----------------------------------	-------------------------	----------------------------------

		%			
1	44.2	0.44	-	-	-
2	53.5	0.53	-	-	-
3	63.7	0.63	2931	3587	0
4	74.1	0.73	72	834	2568
5	84	0.83	-	-	-
6	94.6	0.94	952	2504	2834

Подводя итоги по результатам экспериментов с водонасыщенными образцами мрамора, стоит подчеркнуть следующее: предел прочности образцов водонасыщенной горной породы значительно ниже, нежели соответствующее значение для сухих образцов. Средний предел прочности для сухих образцов равен 128 МПа, в то время как аналогичное значение для водонасыщенных составляет 76.6 МПа. Для водонасыщенных образцов отмечено уменьшение модуля Юнга в 2 раза в сравнении с сухими образцами (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Основные механические характеристики образцов мрамора, испытанных с воздействием электромагнитного поля.

Образец	ЭМВ	$\sigma(\varepsilon) = E \cdot \varepsilon$ Стадия упругого деформирования			$\sigma_{п.п.},$ МПа	$\varepsilon_x,$ $10^{-3}$	$\varepsilon_y,$ $10^{-3}$	$\varepsilon_z,$ $10^{-3}$	Параметры перехода в область неупругих деформаций	
		$v_x$	$v_y$	E, ГПа					$\sigma_{упр},$ МПа	$k_{упр}$
1	+	0.025	$2.2 \cdot 10^{-6}$	16.0	52.3	0.15	0.5	6.7	44.6	0.85
2	+	0.3	$1.3 \cdot 10^{-3}$	24.8	100.9	4.8	0.3	6.0	63.3	0.63

Наблюдаемое понижение прочности, значительная деформация и характер разрушения водонасыщенных образцов – следствие эффекта Ребиндера. Эффект Ребиндера отражает изменение механических свойств твёрдых тел вследствие физико-химических процессов, которые, в свою очередь, способствуют уменьшению поверхностной (межфазной) энергии тела. Главными условиями реализации эффекта Ребиндера является наличие растягивающих напряжений, что выполняется при одноосном сжатии, и наличие соприкосновения твердой и жидкой фазы, что тоже выполняется при водонасыщении образцов горной породы.

Для семи сеансов скрещенных электрического и магнитного полей, проведенных на двух водонасыщенных образцах мрамора приросты скорости продольной деформации  $\dot{\varepsilon}_z$  были получены в 71% случаев, причем все в области напряжений  $k^* > 0.5$  (таблица 4.6). Величина относительного изменения усредненной за час скорости продольной деформации, определенной как реакция на воздействие, варьируется от 1.2 до 286 раз. Наиболее длительное по времени изменение в 286 раз, вызванное скрещенными электрическим и магнитным полями, зарегистрировано, когда скорость продольной деформации изменялась несколько раз в течение сеанса и продолжила свой рост после завершения сеанса вплоть до разрушения образца. В данном случае наблюдалось характерное последствие электромагнитного поля. Значение

$\dot{\epsilon}_z = 5.8 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$  до начала воздействия увеличилось в 286 раз до максимального уровня в сеансе  $\dot{\epsilon}_z = 1.66 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ , при этом общая деформация составила  $\Delta l_z = 95$  мкм. Скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  во время этого сеанса выросла в 15 раз, а поперечное удлинение составило  $\Delta l_x = 6$  мкм. Рост деформации сопровождался синхронным акустоэмиссионным приростом активности АЭ, который также происходил лавинообразно, длительность отклика составила 2060 секунд и было инициировано 2190 сигналов АЭ. В 57% сеансов изменения происходили одновременно в скоростях двух и трех компонент деформации. Минимальное изменение  $\dot{\epsilon}_x$  было 14.9, а максимальный рост – на пять порядков. Скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_y$  увеличивалась в двух сеансах в 4.6 и 6.7 раз (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Отклики трех компонент скоростей деформации, активности для серии водонасыщенных образцов, деформируемых в присутствии скрещенных электрического и магнитного полей.

	Мрамор № 1				Мрамор № 2			
	$\frac{\dot{\epsilon}_{Z\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Z\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{X\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{X\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Y\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Y\text{доЭМВ}}}$	$N_{\text{ЭМВ}}/3\sigma^*$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Z\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Z\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{X\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{X\text{доЭМВ}}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{Y\text{ЭМВ}}}{\dot{\epsilon}_{Y\text{доЭМВ}}}$	$N_{\text{ЭМВ}}/3\sigma^*$
$k^* < 0.4$	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а
$0.4 < k^* < 0.5$	н/а	н/а	н/а	н/а	-	-	-	-
$0.5 < k^* < 0.6$	н/а	н/а	н/а	н/а	1.19	-	-	-
$0.6 < k^* < 0.7$	н/а	н/а	н/а	н/а	301	109733.5	6.6	3265
$0.7 < k^* < 0.8$	н/а	н/а	н/а	н/а	243	-	-	1.9
$0.8 < k^* < 0.9$	286	14.85	-	2514	-	243	4.7	-
$k^* > 0.9$	н/а	н/а	н/а	н/а	379	$12.5 \cdot 10^3$	-	2.6

Примечание к таблице: н/а – отсутствовали сеансы при данном уровне нагрузки; – отсутствие изменений в скоростях деформации и откликов активности АЭ, связанных с электромагнитным воздействием.

Отличием процесса деформирования водонасыщенной породы от случая неводонасыщенной также является ступенчатый характер изменения деформации. Для водонасыщенных образцов эти изменения могут происходить резкими скачками, что, возможно, свидетельствует о дислокационном скольжении, двойниковании (именно эти механизмы являются доминантными для мрамора), проскальзывании контактирующих поверхностей зерен, блоков относительно друг друга, а роль смазки между ними играет вода.

Значительные изменения скоростей деформаций в вышеописанных экспериментах по всей видимости объясняются влиянием воды. Помимо эффекта смазки наличие воды может

изменить электрическую поляризацию, возникающую при наложении ЭМ поля и вносящую вклад в образование новых поверхностей разрыва.

#### 4.2. Воздействие скрещенных электрического и магнитного полей на скорость деформации образцов мрамора при фиксированном уровне напряжений

В данном разделе представлены результаты экспериментов на образцах мрамора, на которые в течение часовых сеансов воздействовало электромагнитное поле в режиме постоянства нагрузки (квазиползучесть). Методика нагружения и дополнительные аспекты ЭМ воздействий описаны в разделе 2.2.

Рассмотрим результаты эксперимента со ступенчатым нагружением на образце мрамора № 1 с шагом изменения напряжения 20 МПа. При постоянной нагрузке образец дважды подвергался действию скрещенного ЭМ поля. Подробно схема постановки эксперимента выглядит следующим образом: после пригрузки сжимающее усилие фиксируется на протяжении 7 часов, из которых в первый час наблюдается релаксационный спад активности акустической эмиссии до некоторого квазипостоянного уровня. Затем в течение часа образец выдерживается в поле скрещенного электрического и магнитного полей, после чего следует длительный трехчасовой перерыв. Второй сеанс воздействия следует после трехчасового перерыва, завершающийся часом ожидания возможного отклика АЭ с задержкой. Далее следует новая пригрузка и шаги повторяются по той же схеме (рисунок 4.9). Подобное повторное воздействие электромагнитным полем осуществлено для проверки эффекта Кайзера [Kaiser, 1953]. Как известно [Лавров, Шкуратник, 2003], акустоэмиссионный эффект памяти присущ горным породам и заключается в невозможности активности АЭ при циклическом нагружении при величинах напряжений, которые превышают максимально достигнутый ранее уровень. Таким образом, повторное воздействие спустя 3 часа призвано играть роль проверочного к эффекту памяти, но уже не к напряжению, а воздействию электромагнитного поля.

Предел прочности образца № 1 составил 138.5 МПа, было реализовано 5 квазистационарных уровней нагрузки с десятью сеансами воздействия. Графики изменения напряжения и продольной деформации приведены на рисунке 4.10.



Рисунок 4.9 – Схематическое обозначение одного квазистационарного уровня нагрузки и следования двух сеансов воздействия.

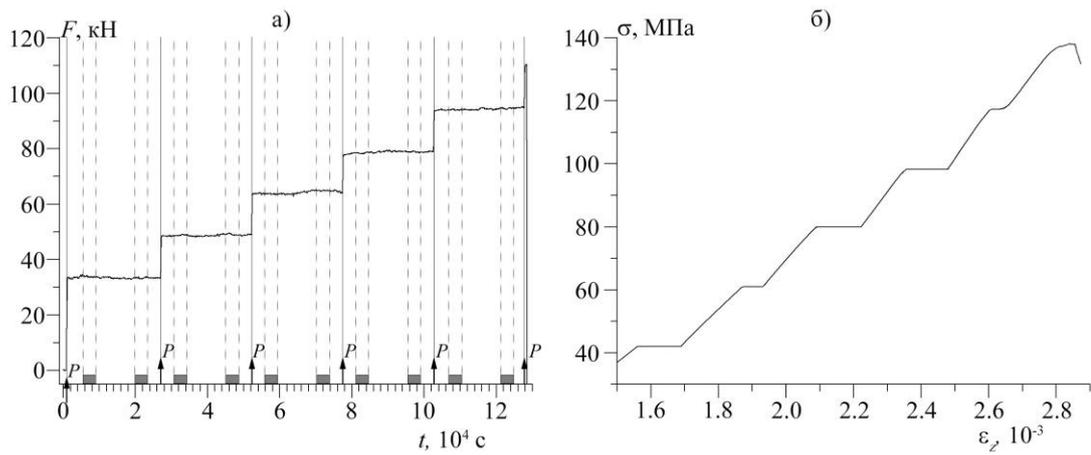


Рисунок 4.10 – Графики нагрузки и напряжения-деформации образца мрамора №1 согласно [Мубассарова, 2013]. Пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу обозначены сеансы ЭМВ, а стрелками с буквой P – моменты нагружения.

В режиме постоянства нагрузки колебания напряжения на образце в течение семи часов не превышало 0.7 МПа. При этом осевая деформация в процессе квазиползучести составила значения, лежащие в диапазоне от  $\epsilon_z=5.5 \cdot 10^{-5}$  до  $\epsilon_z=1.4 \cdot 10^{-4}$  (или от  $\Delta l_z=4.4$  мкм до  $\Delta l_z=11.2$  мкм). Рассмотрим графики компонент деформаций, представленные на рисунке 4.11. Осевая деформация  $\epsilon_z$  изменяется ступенчато, подобно нагрузке, и именно  $\epsilon_z$  оказалась наиболее чувствительной к воздействиям электромагнитного поля. Реакция на воздействие была обнаружена в 6 из 10 сеансов. Рассмотрим более подробно изменения продольной деформации и ее скорости в периоды сеансов.

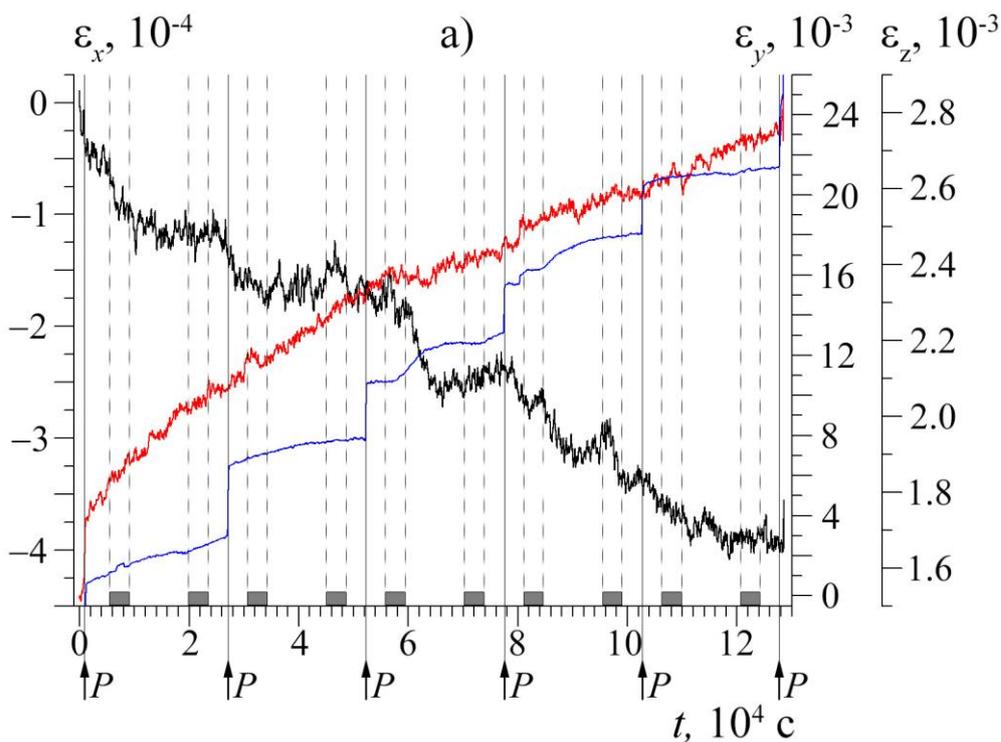


Рисунок 4.11 – Графики изменения трех компонент деформации образца мрамора № 1. Интервалы ЭМВ обозначены серыми прямоугольниками и пунктирными линиями. Стрелками, сплошными вертикальными линиями и буквами P показаны моменты нагружки.

Как видно из рисунка 4.11 а, реакция на ЭМВ в виде кратковременного прироста  $\dot{\varepsilon}_z$  в 1.6 раза с последующим уменьшением до уровня  $\dot{\varepsilon}_z = 5.5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  произошла при напряжении, соответствующем  $k^* = 0.3$  (выделенная область). В дальнейшем при повторном воздействии на данной нагрузке после небольшого снижения скорости деформации почти до нулевого значения, при включении источника воздействия сразу наблюдается резкая смена тренда на возрастающий (выделенная область 2 на рисунке 4.11 а). К середине сеанса скорость деформации стабилизировалась на уровне  $\dot{\varepsilon}_z = 6 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Подобные кратковременные приросты значения деформации и изменения ее скорости при воздействиях скрещенным ЭМ полем обнаруживаются и при более высоких значениях напряжения как с задержкой после включения источника ЭВ, так и без задержки. Примером реакции скорости деформации с задержкой от начала воздействия служат 2 прироста скорости осевой деформации на рисунке 4.11 б: первый наблюдается спустя 21 минуту после начала первого сеанса (выделенная область 1), при этом увеличение скорости деформации составило 11 раз. А повторный сеанс на той же нагрузке вызвал несколько меньшее по амплитуде увеличение скорости деформации (от нулевого значения до  $\dot{\varepsilon}_z = 7.5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ ) с более длительной задержкой, равной 55 минутам (выделенная область 2 на рисунке 4.11 б).

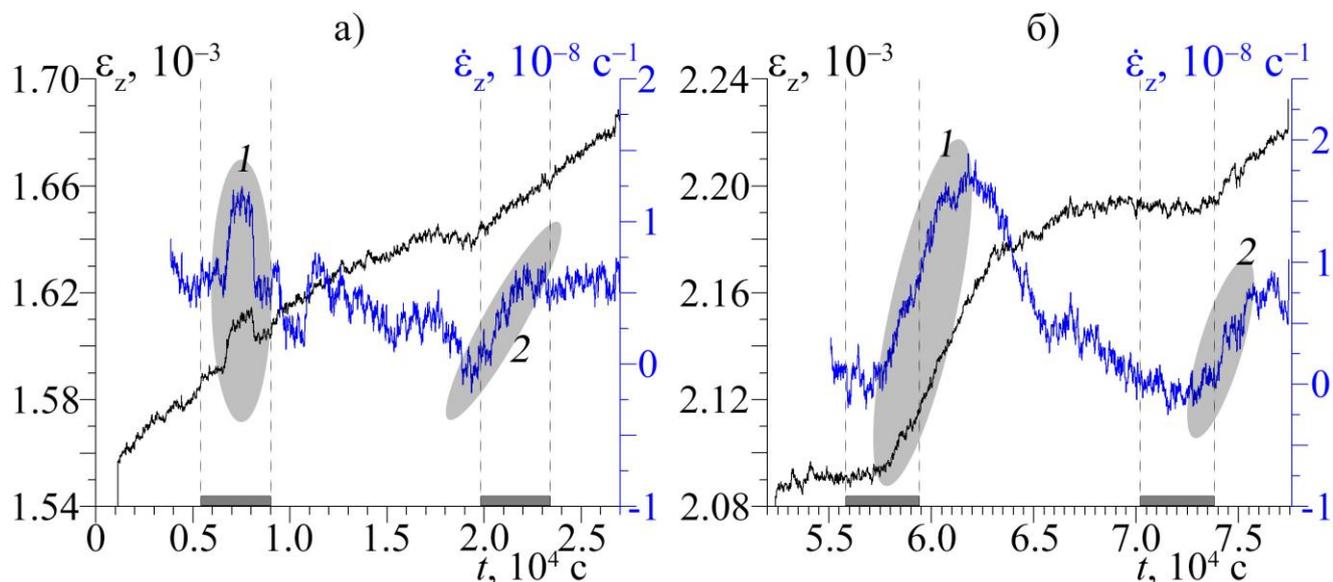


Рисунок 4.11 – Изменения продольной деформации (черная зависимость) и ее скорости (синяя зависимость) образца мрамора при напряжении, соответствующем: а –  $k^* = 0.3$ , б –  $k^* = 0.58$  согласно [Zakupin et al., 2012; Мубассарова, 2014]. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано серыми прямоугольниками снизу и вертикальными пунктирными линиями.

Торможение скорости деформации в период сеанса воздействия наблюдается для сеанса, проведенного, когда коэффициент нагрузки имел значение  $k^* = 0.71$ : рост скорости деформации, начавшийся до первого воздействия, с задержкой 9 минут от начала сеанса резко прекратился и

скорость деформации стабилизировалась на уровне  $\dot{\varepsilon}_z = 8 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$  в течение 36 минут (рисунок 4.12 а, выделенная область). За 15 минут до завершения сеанса постоянство скорости деформации сменилось ее ростом до первоначального «фонового» значения до сеанса  $\dot{\varepsilon}_z = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ .

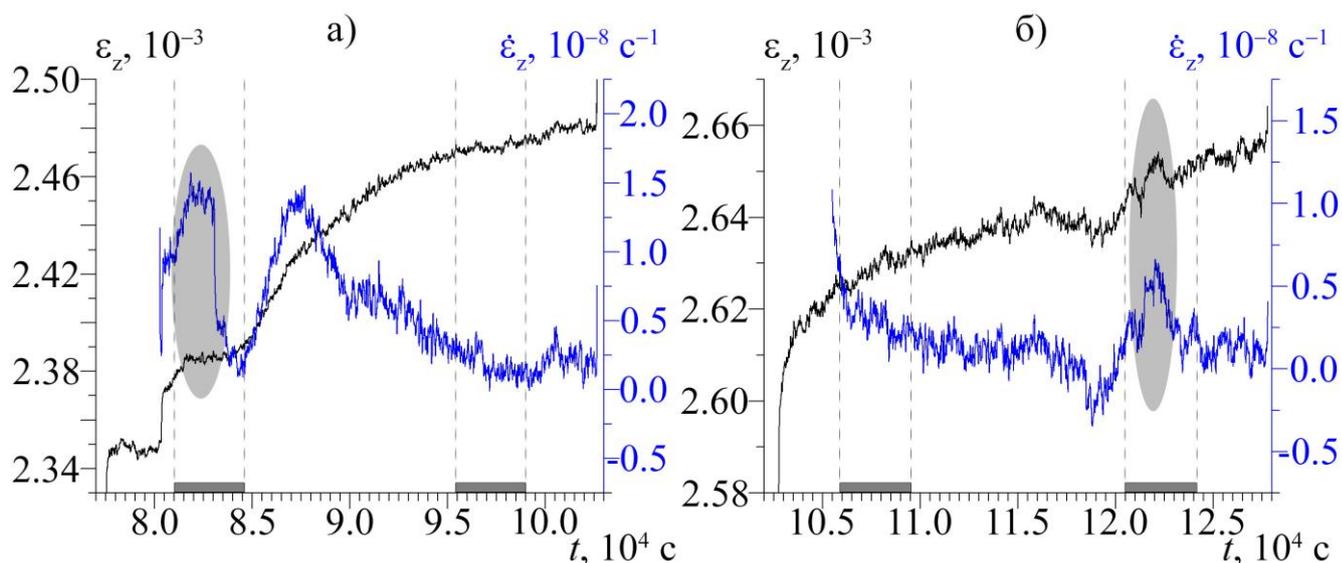


Рисунок 4.12 – Масштабированные графики продольной деформации (черная кривая) ее скорости (синяя кривая) при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.71$  и б –  $k^*=0.85$  от разрушения согласно [Мубассарова, 2013]. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу.

В сеансе при напряжении, для которого  $k^*=0.85$ , повторное воздействие оказало влияние на скорость деформации (рисунок 4.12 б). Здесь наблюдается как небольшое торможение деформации (подобно предыдущему случаю) с задержкой 15 минут от начала ЭМВ, так и прирост ее скорости в 2.5 раза с последующим спадом (выделенная область на рисунке 4.12 б). Значения скоростей деформации, оцененные в периоды квазистатических уровней нагрузки до и во время воздействия приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Скорости трех компонент деформации, оцененные за 1 час до и во время действия электромагнитного поля и отмеченные как реакция на воздействие.

№ сеанса возд-я (всего 10 сеансов)	$\sigma_{ЭМВ}$ , МПа	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	$\dot{\varepsilon}_z, 10^{-8} \text{ 1/с}$		$\dot{\varepsilon}_x, 10^{-8} \text{ 1/с}$		$\dot{\varepsilon}_y, 10^{-9} \text{ 1/с}$	
			до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ
1	41.8	0.3	0.6	1). 3.6 2). 0.6 3). -5.7 4). 0.2	-	-	-	-
2	41.8	0.3	-0.025	0.5	-	-	-	-
3	61.0	0.44	-	-	-	-	-	-
4	61.0	0.44	-	-	-	-	-	-
5	80.3	0.58	0.1	1.6	-	-	-	-
6	80.3	0.58	-	-	-	-	-	-

7	98.4	0.71	1.2	1). 0.08 2). 1.4	-	-	-	-
8	98.4	0.71	-	-	-	-	-	-
9	117.9	0.85	-	-	-	-	-	-
10	117.9	0.85	0.5	0.3	-	-	-	-

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при одном и том же уровне напряжений в образце повторное воздействие электромагнитным полем, проведенное через определенное достаточно длительное время, способно вызвать дополнительное увеличение скорости деформации. Примечательно, что изменения скорости происходят преимущественно плавно в течение единиц-десятков минут, а начавшийся до сеанса рост самой деформации может быть усилен подачей на образец ЭМ поля.

Характерным отличием мрамора от испытанных ранее гранитов, гранодиоритов, габбро и других материалов [Закупин и др., 2006; 2006а; Богомолов и др., 2011] является более длительный релаксационный процесс активности акустической эмиссии после пригрузки – более 1 часа. Отмечено, что при увеличении напряжения релаксационный процесс удлиняется во времени от 1 часа при первоначальной нагрузке ( $k^* \approx 0.3$ ) до почти 7 часов при нагрузке, составляющей 0.85 от разрушения.

Отчасти, возможно, именно из-за продолжительного релаксационного процесса отклики АЭ на первичное воздействие были чрезвычайно слабо выраженными, по сравнению с откликами других горных пород [Закупин и др., 2006; 2006а; Богомолов и др., 2011]. Тем не менее, при анализе графика активности акустической эмиссии слабые отклики все же были зарегистрированы как при первом сеансе воздействия после пригрузки, так и при повторном (рисунок 4.13). Отметим, что наиболее высокоамплитудным был зарегистрирован отклик на повторное действие ЭМ поля при напряжении  $k^* = 0.71$  от разрушения (рисунок 4.13, г). Он произошел с задержкой 53 минуты от начала сеанса и кратковременное увеличение активности АЭ составило 17.9 раза по сравнению с трехкратным среднеквадратическим отклонением активности АЭ до сеанса (рисунок 4.13, г). В таблицу 4.8 сведены полные данные об откликах акустической эмиссии.

Таблица 4.8. Данные откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с образцом мрамора № 1.

№ сеанса	$\sigma_{ЭМВ}$	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$ , %	Кол-во инициированных событий АЭ	Длительность отклика, мин/с	Величина задержки отклика, мин/с
1	41.8	0.3	12	952 с	467 с
2	41.8	0.3	-	-	-
3	61	0.44	35	317 с	0
4	61	0.44	-	-	-
5	80.3	0.58	7	49.7 с	2591 с
6	80.3	0.58	-	-	-

7	98.4	0.71	-	-	-
8	98.4	0.71	31	330 с	3200 с
9	117.9	0.85	-	-	-
10	117.9	0.85	-	-	-

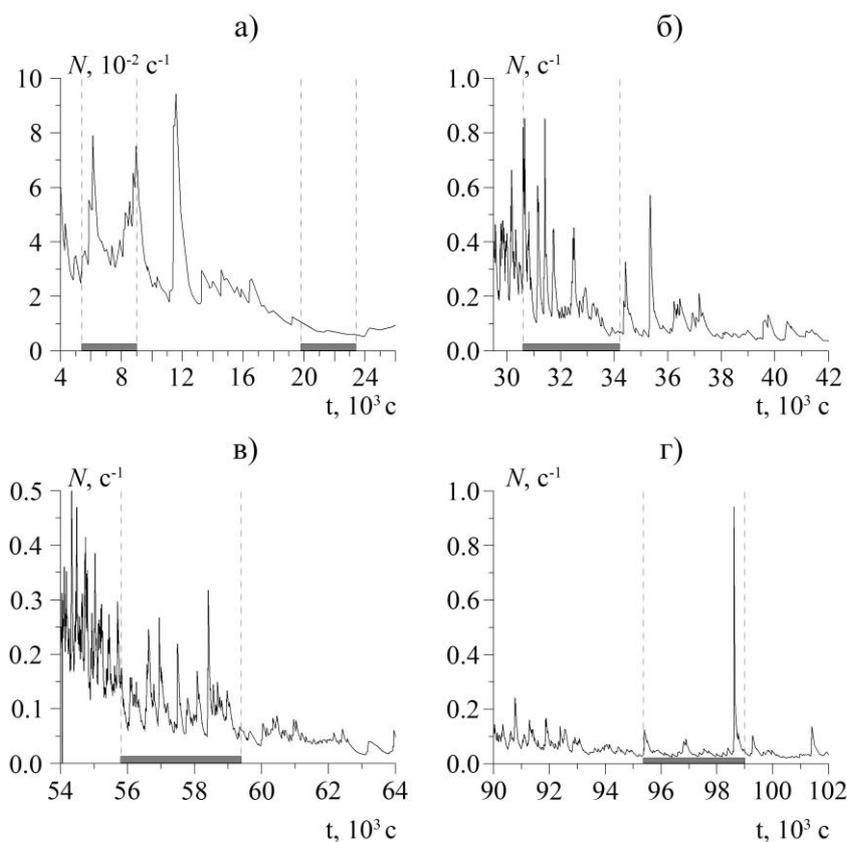


Рисунок 4.13 – Активность АЭ образца мрамора согласно [Мубассарова, Закупин, 2013]. Масштабированные примеры откликов на воздействие при напряжении: а –  $k^*=0.3$  (оба сеанса ЭМВ); б –  $k^*=0.44$  (первый сеанс); в –  $k^*=0.58$  (первый сеанс) и г –  $k^*=0.71$  (повторный сеанс) от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано серыми прямоугольниками снизу и пунктирными линиями.

Рассмотрим результаты другого эксперимента со ступенчатым нагружением на образце мрамора №2 с шагом изменения нагрузки 7.85 кН. Учитывая предыдущий результат – длительный (более 1 часа) релаксационный спад активности АЭ по закону Омори после пригрузки для мрамора, – была несколько изменена постановка эксперимента. Длительность выдержки образца после пригрузки до воздействия была увеличена до трех часов, а повторное воздействие при данном уровне нагрузки не проводилось. Таким образом, была принята следующая схема: нагрузка на 7.85 кН, регистрация деформации и акустической эмиссии без ЭМ поля в течение трех часов, затем один час воздействия и еще один час для реализации возможного последствия ЭМ поля, после чего проводилась следующая пригрузка и процедура повторялась вплоть до разрушения образца. На рисунке 4.14 представлена диаграмма нагружения с отмеченными сеансами ЭМВ, а также график напряжения-деформации.

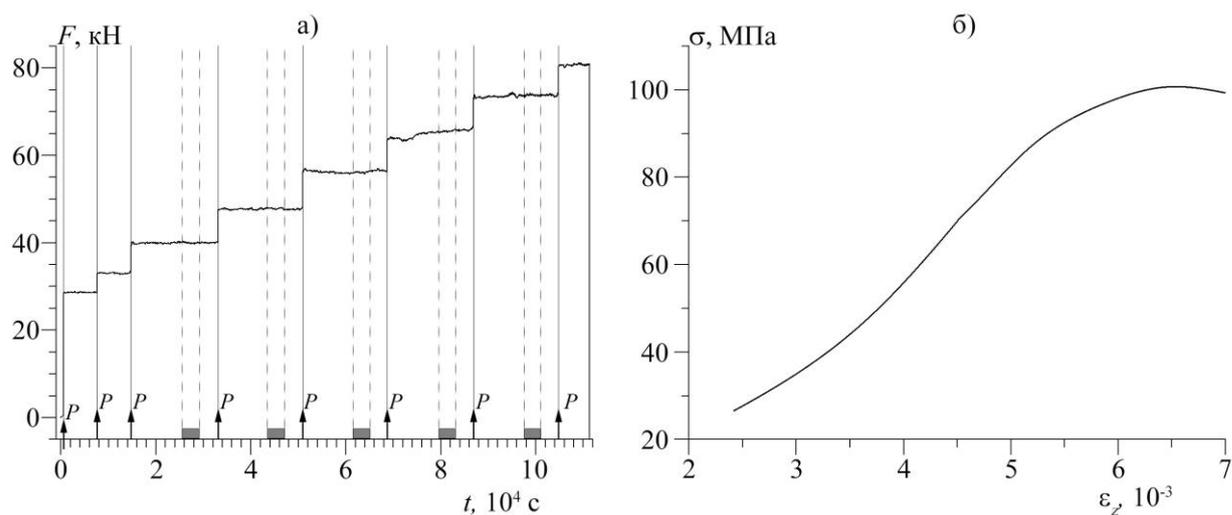


Рисунок 4.14 а – Диаграмма нагружения образца №2 с отмеченными сеансами ЭМВ пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу, моменты пригрузки обозначены стрелочками с подписью P; б – график напряжения-деформации.

Предел прочности образца составил 101.9 МПа, было проведено пять сеансов электромагнитного воздействия. При анализе временных зависимостей трех компонент деформации и их скоростей в трех сеансах из пяти были выявлены изменения, вызванные ЭМ полем. Рассмотрим их подробно. Увеличение скорости продольной деформации почти в 10 раз наблюдалось при напряжении с  $k^*=0.49$  в период первого сеанса (выделенная область на рисунке 4.15 а). Рост скорости деформации произошел с небольшой задержкой 520 секунд, сменяя спадающий до нулевого значения тренд до ЭМВ. На следующей ступени нагрузки ( $k^*=0.69$ ) тенденция роста скорости  $\dot{\epsilon}_z$  (зеленая аппроксимационная прямая) сменилась устойчивым почти квазистационарным уровнем (красная прямая), причем размер флуктуаций стал значительно ниже (рисунок 4.15 б). О том, что это является результатом действия ЭМ поля может свидетельствовать как увеличение скорости, так и ее флуктуаций сразу после сеанса воздействия. Если до воздействия стандартное отклонение от тренда составляло  $\Delta\dot{\epsilon}_z = 1.5 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$ , то в период воздействия оно уменьшилось почти в 2 раза до значения  $\Delta\dot{\epsilon}_z = 8.9 \cdot 10^{-10} \text{ c}^{-1}$  (рисунок 4.15 б).

Скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  лишь однажды увеличилась в течение третьего сеанса при относительном напряжении 0.69 от разрушения. Стабильный уровень  $\dot{\epsilon}_x = -6 \cdot 10^{-11} \text{ c}^{-1}$  сменился ростом при включении источников воздействия (рисунок 4.16). Реакция деформации на ЭМВ была продолжительной (в течение 40 минут), затем скорость деформации уменьшилась со значения  $\dot{\epsilon}_x = 10.3 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  до  $\dot{\epsilon}_x = 7.4 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  (рисунок 4.16).

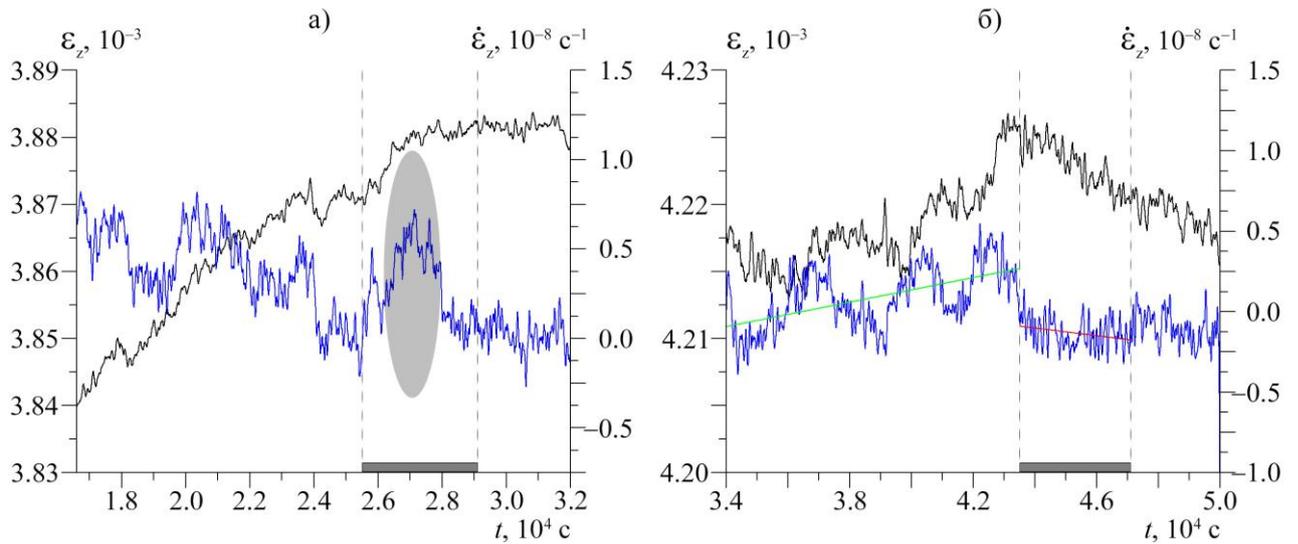


Рисунок 4.15 – Масштабированные графики продольной деформации (черная кривая) ее скорости (синяя кривая) при значениях коэффициента нагрузки: а –  $k^*=0.49$  и б –  $k^*=0.59$  от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серыми прямоугольниками внизу. Зеленая и красная – аппроксимационные прямые, демонстрирующие тренд изменения скорости деформации до и во время воздействия.

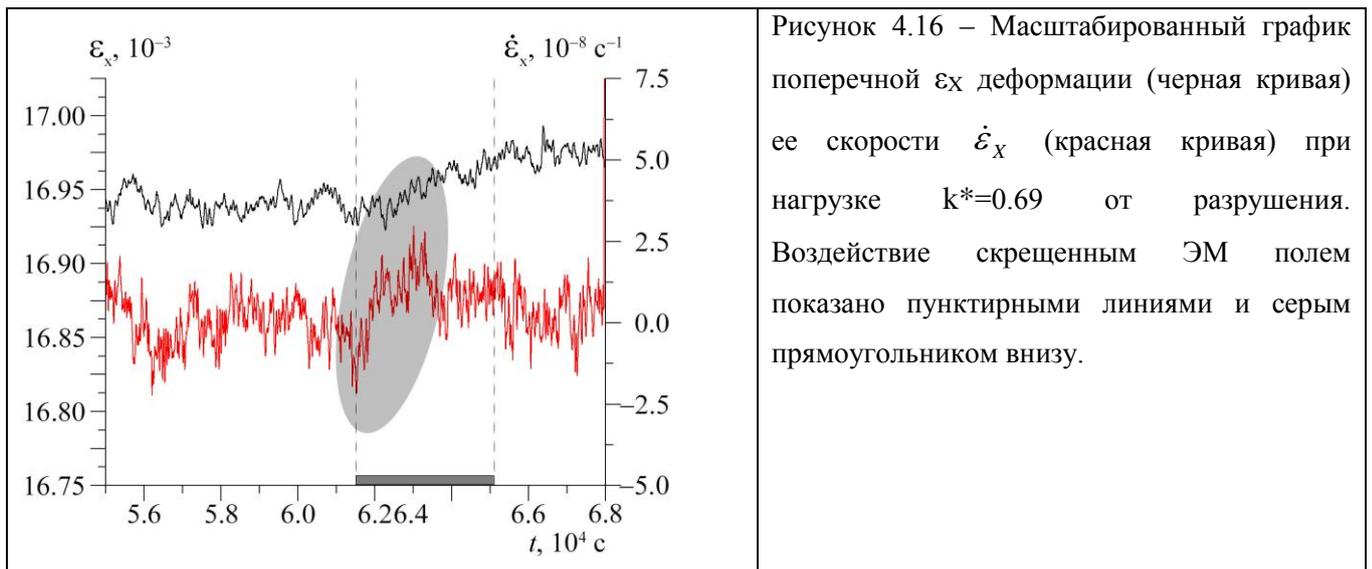


Рисунок 4.16 – Масштабированный график поперечной  $\epsilon_x$  деформации (черная кривая) ее скорости  $\dot{\epsilon}_x$  (красная кривая) при нагрузке  $k^*=0.69$  от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серым прямоугольником внизу.

При ступенчатом увеличении напряжения было реализовано еще 2 сеанса, в течение которых образец также подвергался действию скрещенных ЭМ полей, однако изменений в скоростях компонент деформации не было выявлено. Значения скоростей деформации, определенные как реакция на ЭМВ приведены в таблице 4.9 и выделены серым цветом.

Таблица 4.9. Скорости трех компонент деформации, оцененные за 1 час до и во время действия электромагнитного поля.

№ сеанса возд-я (всего 5 сеансов)	$\sigma_{ЭМВ}$	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	$\dot{\epsilon}_z, 10^{-9} 1/c$		$\dot{\epsilon}_x, 10^{-9} 1/c$		$\dot{\epsilon}_y, 10^{-9} 1/c$	
			до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ

1	50.0	0.49	1.8	1). 6.9 2). 0.4		-	-	-
2	60.0	0.59	0.75	-1.2	-	-	-	-
3	70.3	0.69	-1.9	-4.1	0.7	10.3	-	-
4	81.2	0.8	-	-	-	-	-	-
5	92.0	0.9	-	-	-	-	-	-

Для всех пяти сеансов (от малых нагрузок до предразрушения) отмечено необычное поведение активности АЭ. Вся упругая энергия была реализована в виде АЭ сигналов в периоды пригрузок. После чего активность АЭ спадала до фонового уровня по релаксационному закону Омори в течение около трех часов. Начиная с малых квазистационарных нагрузок при  $k^*=0.49$  от разрушения фоновый уровень активности возрастал от  $0.01 \text{ с}^{-1}$  до  $0.08 \text{ с}^{-1}$  при относительной нагрузке  $k^*=0.9$ . Длительность спадающего тренда также увеличивался от 2 часов (при нагрузках меньше 50%) до 4.2 часа в стадии предразрушения. В течение сеансов ЭМВ не было получено ни одного отклика акустоэмиссионной активности.

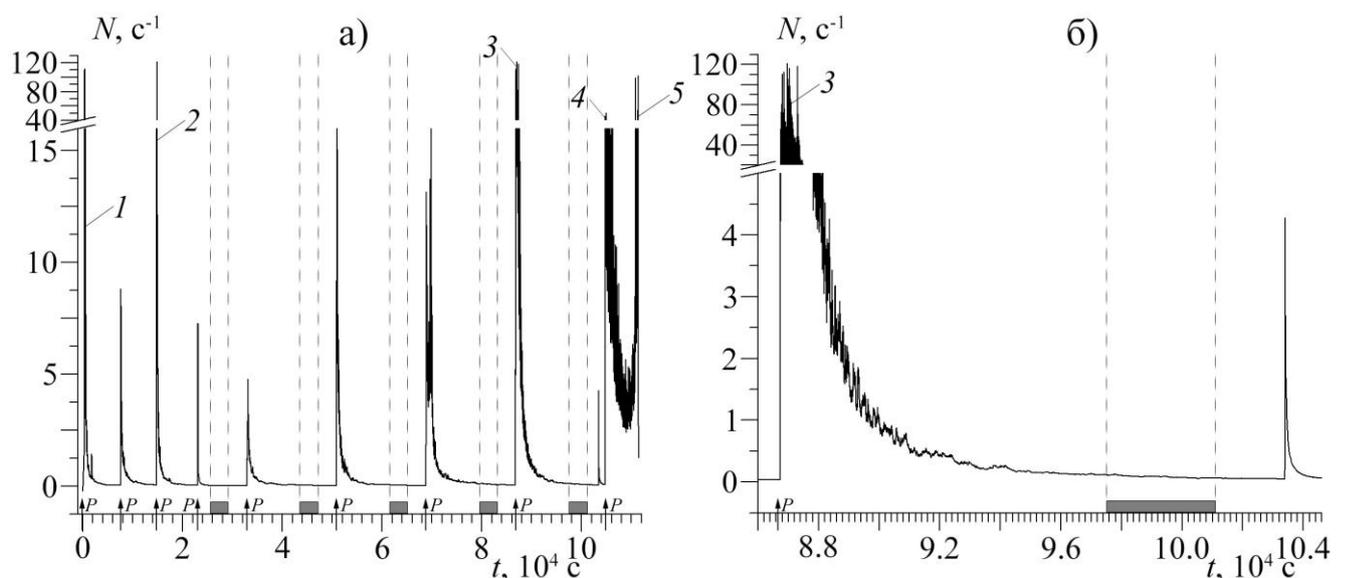


Рисунок 4.17 – Активность акустической эмиссии: а – зарегистрированная в течение всего эксперимента, б – в период седьмого квазистационарного уровня при относительной нагрузке  $k^*=0.9$ . Максимальные значения активности АЭ, обозначенные цифрами: 1 –  $112 \text{ с}^{-1}$ , 2 –  $121.4 \text{ с}^{-1}$ , 3 –  $121 \text{ с}^{-1}$ , 4 –  $50.5 \text{ с}^{-1}$ , 5 –  $102.2 \text{ с}^{-1}$ .

Однако, при квазистационарном уровне нагрузки при  $k^*=0.9$  был отмечен спонтанный прирост активности АЭ после сеанса воздействия, а именно спустя 38 минут. Учитывая опыт предшествующих испытаний на других материалах (обзор в [Богомолов, 2011]), данный прирост сигналов АЭ можно связывать с последствием от электромагнитных импульсов. На это может указывать большая разница между пиковым значением прироста, составляющем  $4.3 \text{ с}^{-1}$ , и средним фоновым значением до него  $0.06 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, активность превышает в  $33.9$

раза трехкратное среднеквадратическое отклонение активности АЭ до воздействия, длительность отклика равнялась 1165 секундам.

Продемонстрируем результаты еще одного эксперимента, мрамора № 3, проведенного по той же схеме с воздействием скрещенных электрического и магнитного полей при постоянной нагрузке. Результаты помогут прояснить закономерный вопрос почему электромагнитное воздействие вызывает изменения в компонентах деформации (преимущественно в продольной) и их скоростей, однако данные изменения не сопровождаются акустоэмиссионными откликами как в случае образцов, испытанных в режиме роста нагрузки, рассмотренных в главе 3. И почему приросты активности во время сеансов и, как в случае мрамора № 2, с задержкой после сеанса не отразились в деформационном поле?

На рисунке 4.18 представлена диаграмма нагружения с отмеченными сеансами ЭМВ, а также график напряжения-деформации. Предел прочности образца составил 144.9 МПа, это позволило реализовать 11 квазистационарных уровней нагрузки с воздействиями ЭМ поля. Анализ трех компонент деформации и их скоростей выявил реакцию на воздействие в течение сеансов и с задержкой после завершения сеанса. Продольная деформация и ее скорость в пяти из одиннадцати сеансов обнаружила тенденции к росту, в поперечной деформации  $\epsilon_x$  и ее скорости  $\dot{\epsilon}_x$  в течение семи сеансов наблюдались приросты, и в поперечной компоненте деформации  $\epsilon_y$  в четырех сеансах выявлены изменения, связанные с электромагнитным воздействием.

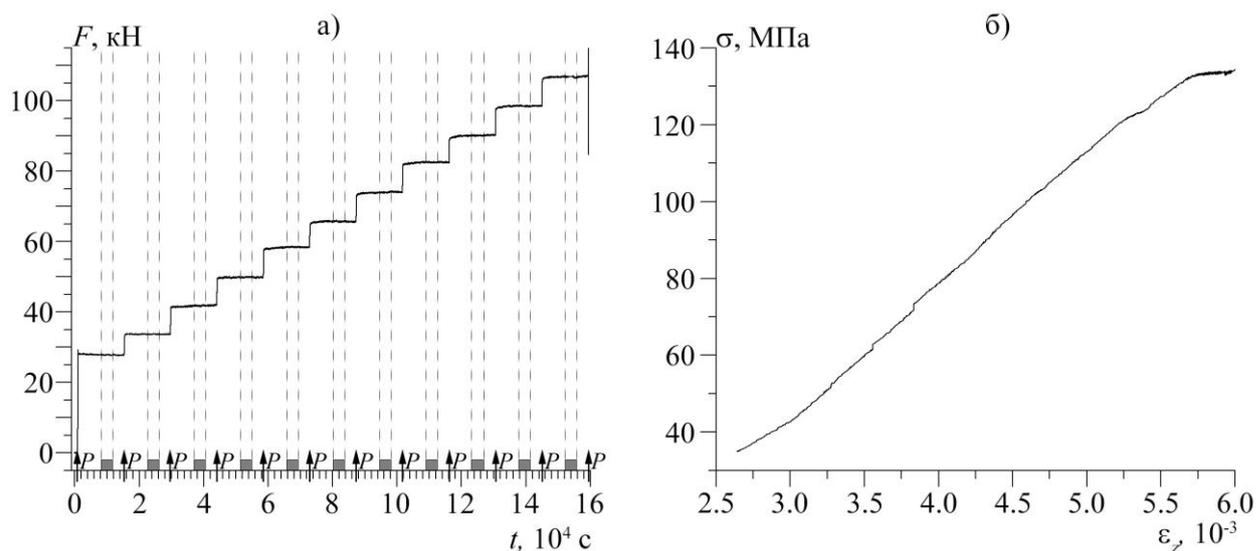


Рисунок 4.18 а – Диаграмма нагружения образца №2 с отмеченными сеансами ЭМВ пунктирными линиями и серыми прямоугольниками снизу, моменты нагрузки обозначены стрелочками с подписью Р; б – график напряжения-деформации.

Как и в предыдущих экспериментах, реакция материала образца на электромагнитное воздействие наблюдается в деформационном поле уже при малых значениях напряжения

(рисунок 4.19 а). Изменения компонент деформаций  $\epsilon_X$  и  $\epsilon_Y$ , а также их скоростей начались при относительной нагрузке 0.24 от разрушения (таблица 4.9, рисунок 4.19). При этом в поперечном направлении X деформация сменила тренд с возрастающего на убывающий, а в противоположном направлении скорость деформации  $\dot{\epsilon}_Y$  выросла в 2.4 раза.

Начиная с третьего сеанса ( $k^*=0.36$ ) электромагнитное воздействие приводит к увеличению скорости всех трех компонент деформации (рисунки 4.19-4.20). Чем выше уровень напряжений в образце, тем более высокой амплитудой характеризуются деформационные изменения. На рисунке 4.19 представлены масштабированные графики поперечной деформации  $\epsilon_X$  и ее скорости при напряжениях, соответствующих  $k^*=0.36$  и  $k^*=0.57$  от разрушения. До воздействия скорость деформации  $\dot{\epsilon}_X$  сменяет убывающий тренд на квазистационарный (сохраняющийся в течение часа) со значением  $\dot{\epsilon}_X = -6 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ . В ходе сеанса происходит рост скорости деформации до  $\dot{\epsilon}_X = 15.1 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  (выделенная область на рисунке 4.19 а). В случае другого сеанса при  $k^*=0.57$  наблюдается кратковременный 13-минутный скачок скорости деформации до 10 раз (выделенная область на рисунке 4.19 б).

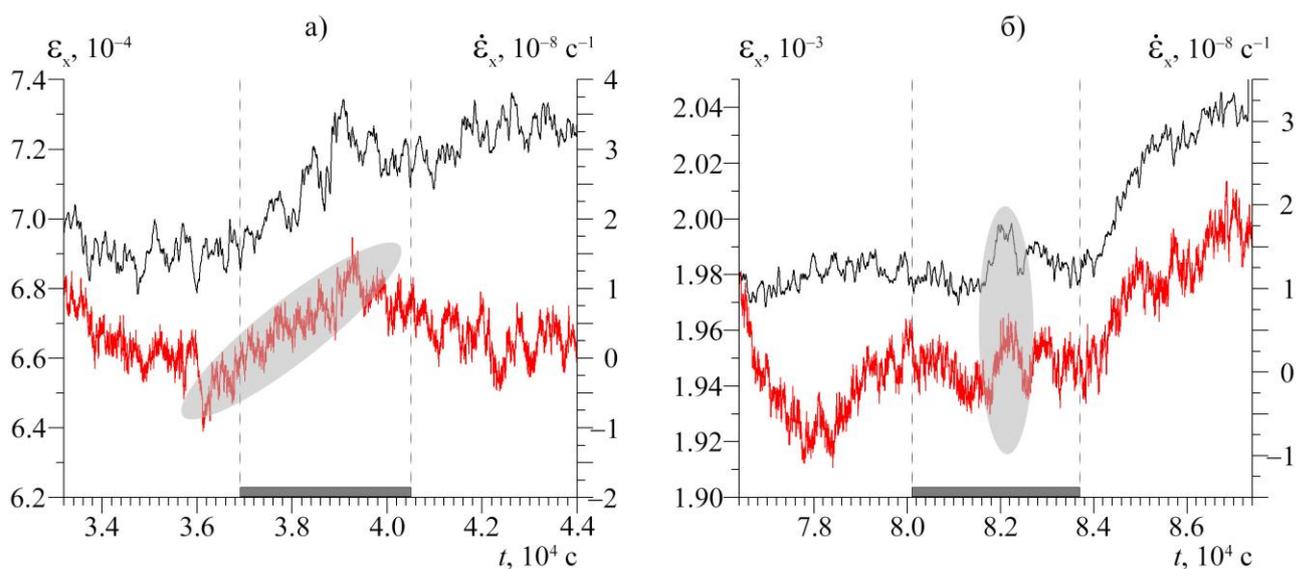


Рисунок 4.19 – Масштабированные графики поперечной  $\epsilon_X$  деформации (черная кривая) ее скорости (красная кривая) при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.36$  от разрушения и б –  $k^*=0.57$  от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серым прямоугольником внизу.

В восьмом сеансе при напряжении  $k^*=0.71$  от разрушения фоновая скорость деформации  $\dot{\epsilon}_X = 17.8 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  увеличивается в 2.1 раза и к концу сеанса завершается возвращением к уровню, чуть ниже фонового (рисунок 4.20 а). В области предразрушения ЭМ поле вызвало еще более значительные приросты значения деформации и ее скорости: спустя 32 минуты от начала

десятого сеанса скорость поперечной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  возросла в 19 раз, лишь к концу сеанса рост замедлился и величина скорости установилась на уровне  $\dot{\epsilon}_x = 58.3 \cdot 10^{-9} \text{ c}^{-1}$  (рисунок 4.20 б).

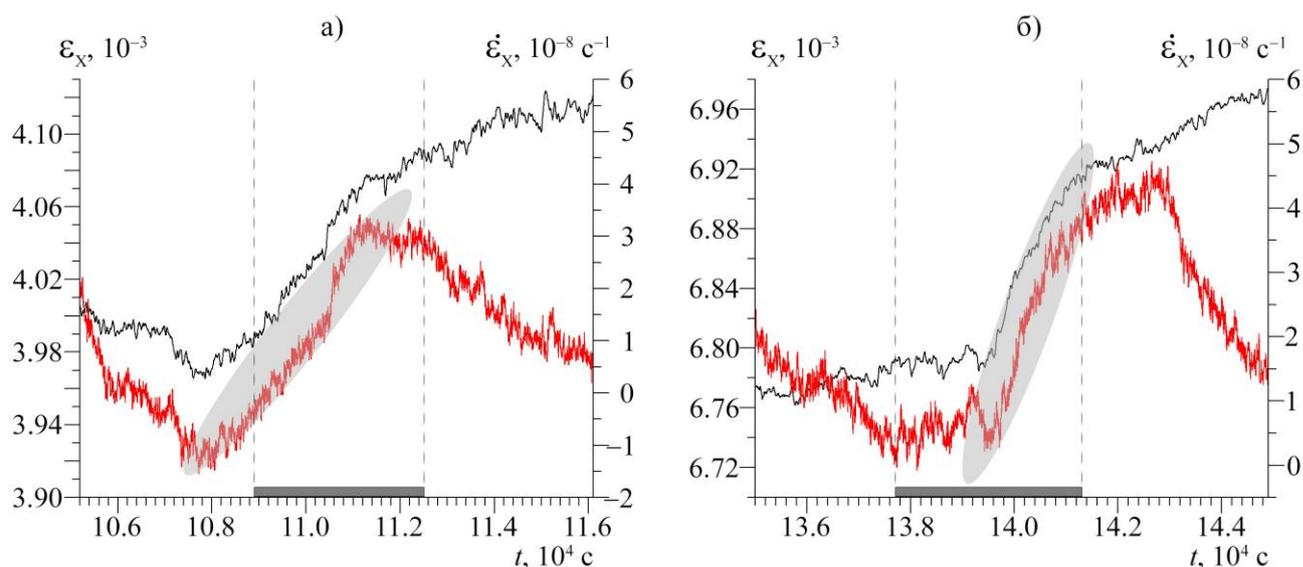


Рисунок 4.20 – Масштабированные графики поперечной  $\epsilon_x$  деформации (черная кривая) ее скорости (красная кривая) при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.71$  от разрушения и б –  $k^*=0.85$  от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серым прямоугольником внизу.

В отличие от предыдущих экспериментов, описанных в данном разделе, в случае продольной деформации и ее скорости электромагнитное воздействие не вызвало значительных изменений, но низкоамплитудные изменения все же были зарегистрированы. На рисунке 4.21 представлены графики продольной деформации и ее скорости в периоды шестого и десятого сеансов при напряжениях с коэффициентами  $k^*=0.57$  и  $k^*=0.86$  от разрушения соответственно.

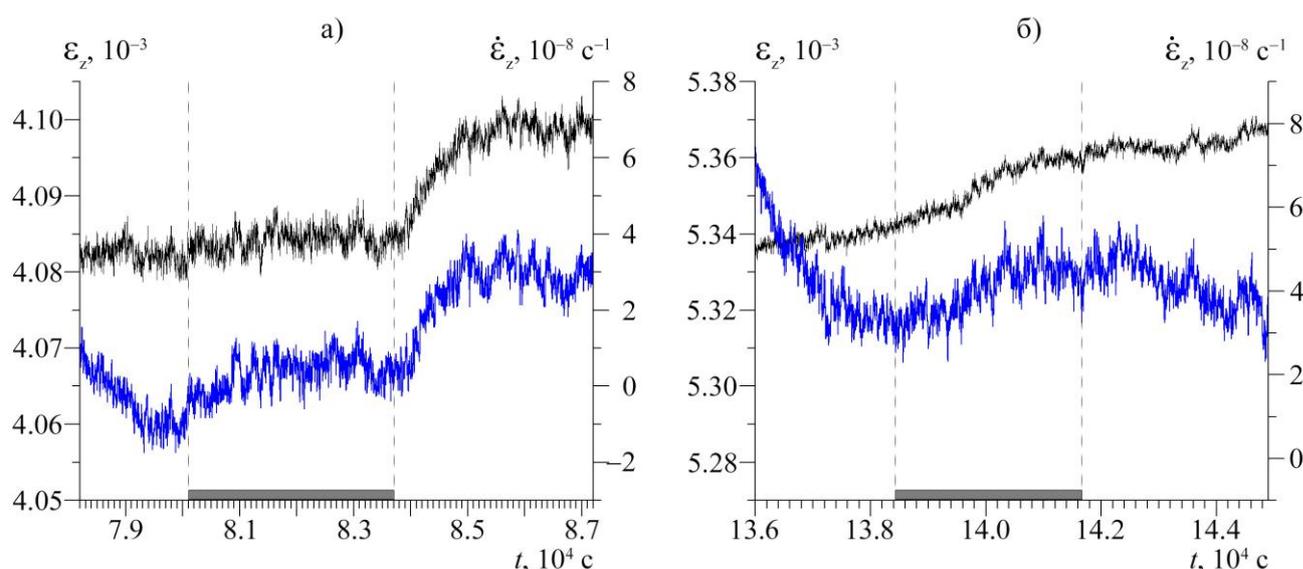


Рисунок 4.21 – Масштабированные по времени 6 и 10 сеансов графики продольной  $\epsilon_z$  деформации (черная кривая) ее скорости (синяя кривая) при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.57$  от

разрушения и б –  $k^*=0.85$  от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серым прямоугольником внизу.

Реакция в скорости деформации, продемонстрированная на рисунке 4.21 а, характеризуется сменой спадающего тренда скорости деформации до значения  $\dot{\epsilon}_z = -8.5 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$  на слабовозрастающий с начала сеанса до уровня  $\dot{\epsilon}_z = 4 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ . А затем, с задержкой, превышающей длительность сеанса, скорость деформации выросла в 29 раз, и тем самым проявилось действие ЭМ поля. При увеличении напряжения до уровня 0.85 от разрушения в период десятого сеанса с задержкой в 27 минут (почти половина времени сеанса) наблюдается небольшой рост скорости продольной деформации до значения  $\dot{\epsilon}_z = 12.6 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ , а затем стабилизация на уровне  $\dot{\epsilon}_z = 3.8 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4.21 б).

Рассмотрим еще примеры увеличения скорости деформации (в поперечном направлении Y) для двух квазистационарных уровней нагрузки  $k^*=0.71$  и  $k^*=0.85$  от разрушения (рисунок 4.22). В обоих случаях действие поля проявилось с незначительными задержками от начала сеанса ЭМВ (12 и 3 минуты соответственно). В восьмом сеансе изменение скорости деформации незначительно, в отличие от прироста величины деформации со значения  $\epsilon_Y = 4.14 \cdot 10^{-3}$  до  $\epsilon_Y = 4.18 \cdot 10^{-3}$  (выделенная область на рисунке 4.22 а). В десятом сеансе при  $k^*=0.85$  с фонового уровня  $\dot{\epsilon}_Y = 6.5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  до включения источника ЭМ поля скорость поперечной деформации возросла дважды за сеанс: в 2 раза и в 3.15 раза (выделенные области на рисунке 4.22 б). Конец сеанса характеризуется уменьшением скорости деформации до фонового уровня до ЭМ воздействия.

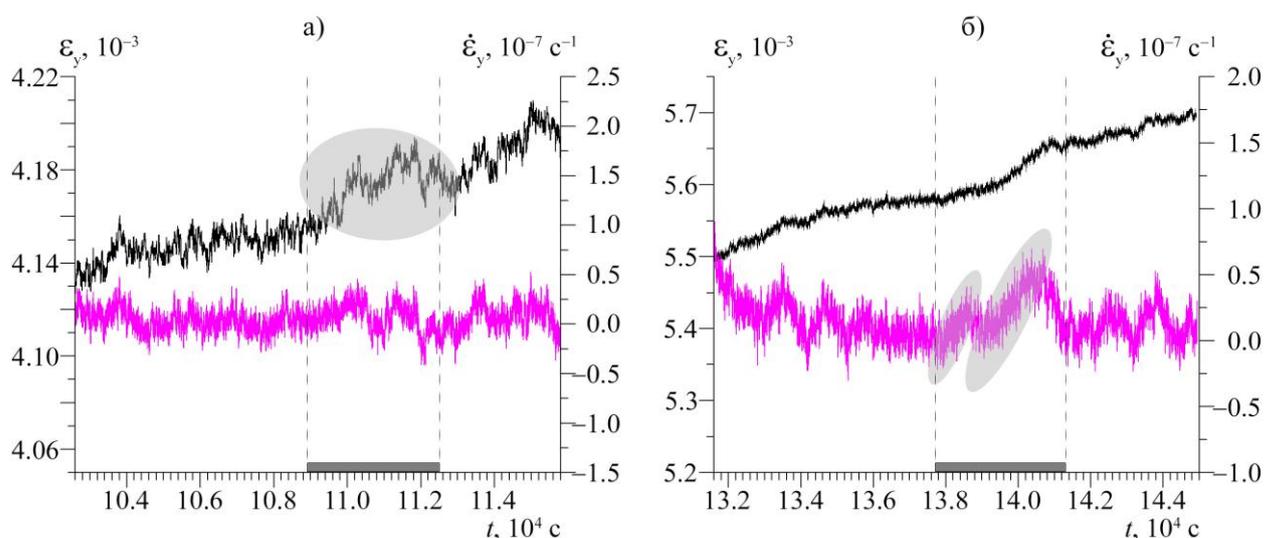


Рисунок 4.22 – Масштабированные по времени 8 и 10 сеансов графики поперечной  $\epsilon_Y$  деформации (черная кривая) ее скорости (розовая кривая) при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.71$  от

разрушения и  $b - k^* = 0.85$  от разрушения. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано пунктирными линиями и серым прямоугольником внизу.

Изменения скоростей продольной и поперечных деформаций, идентифицированные как реакция на электромагнитное воздействие, приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Скорости трех компонент деформации, оцененные за 1 час до и во время действия электромагнитного поля.

№ сеанса возд-я	$\sigma$ ЭМВ	$k^*_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}$	$\dot{\epsilon}_Z, 10^{-9} 1/c$		$\dot{\epsilon}_X, 10^{-9} 1/c$		$\dot{\epsilon}_Y, 10^{-9} 1/c$	
			до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ	до ЭМВ	во время ЭМВ
1	34.9	0.24	-	-	6.4	-5.7	2.1	5.1
2	42.2	0.29	$-7.1 \cdot 10^{-2}$	1). -2.1 2). 7.3	$1.5 \cdot 10^{-2}$	-5.7	-	-
3	52.2	0.36	-	-	0.6	1). 15.1 2). -7.3	-	-
4	62.3	0.43	-	-	-	-	3.2	1). -3.5 2). 34.8 3). -4.4
5	72.9	0.5	-1.6	1). 2.8 2). 0.2	-	-	-	-
6	82.1	0.57	$-8.5 \cdot 10^{-2}$	1). 0.4 2). 11.7 (послед.)	$5.7 \cdot 10^{-2}$	1). -3.1 2). 50.4 3). -7.5	-	-
7	92.4	0.64	-	-	6.3	1). 6.3 2). -14.8 3). 17.3	-	-
8	103.1	0.71	0.3	1). 7.9 2). 2.0	17.8	1). 38 2). 15.7	2.1	1). 11.0 2). -2.5
9	112.6	0.78	-	-	-	-	-	-
10	123.1	0.85	2.3	1). 4.7 2). 12.6 3). 3.8	7.0	1). 7.0 2). 133.8 3). 58.3	6.5	1). 13.2 2). 41.6 3). -28.2
11	133.4	0.92	-	-	-	-	-	-

Обратим внимание на результаты регистрации сигналов АЭ в этом эксперименте. Активность АЭ имеет тенденции, обнаруженные и ранее продемонстрированные в предыдущих двух испытаниях. Лишь единожды был зарегистрирован отклик акустоэмиссионной активности при нагрузке  $k^* = 0.43$  от разрушения, во всех остальных случаях почти все сигналы акустической эмиссии возникали вследствие нагружения образца (рисунок 4.23 а). Прирост по максимуму активности в четвертом сеансе ЭМВ составил 3.3 раза по сравнению с уровнем  $3\sigma^*$ , определенном до сеанса воздействия, а количество дополнительно инициированных событий сверх фонового уровня составило 18 за время 9.6 минут (рисунок 4.23 б).

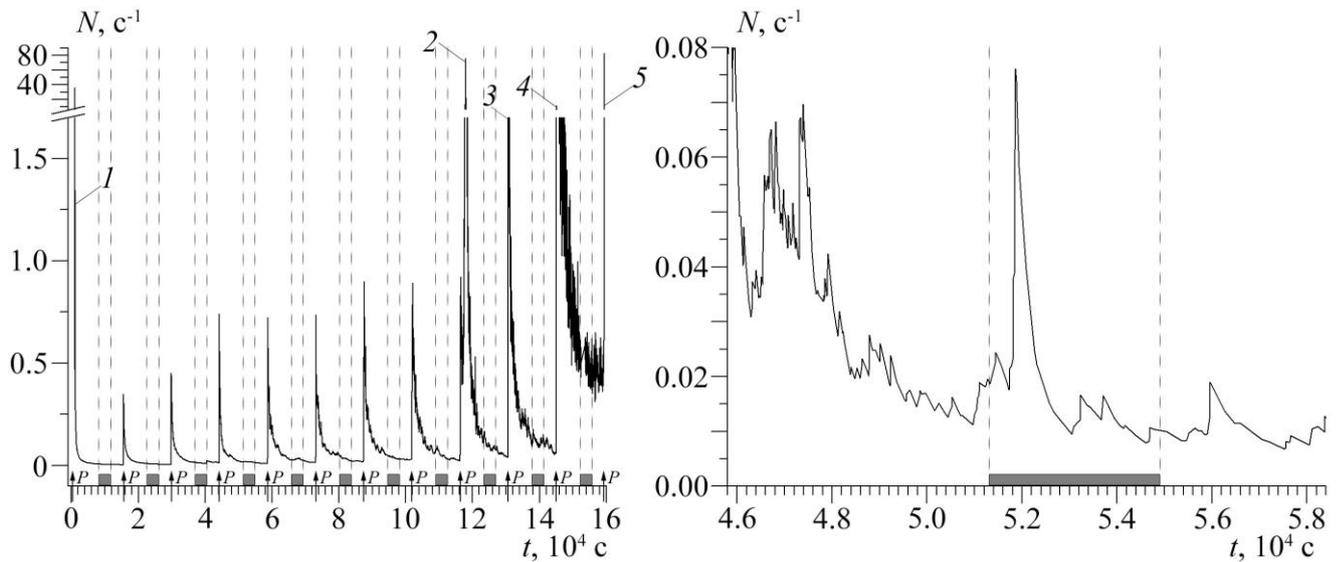


Рисунок 4.23 – Активность акустической эмиссии: а – зарегистрированная в течение всего времени испытания образца №3, б – в период четвертого квазистационарного уровня при  $k^*=0.43$  от разрушения. Максимальные значения активности АЭ, обозначенные цифрами: 1 –  $36 \text{ c}^{-1}$ , 2 –  $75.6 \text{ c}^{-1}$ , 3 –  $11.4 \text{ c}^{-1}$ , 4 –  $4.6 \text{ c}^{-1}$ , 5 –  $82 \text{ c}^{-1}$ .

Подводя итоги экспериментов с образцами мрамора, испытанными в режиме ступенчатого нагружения, необходимо выделить следующие моменты: их средний предел прочности равен среднему пределу прочности образцов, испытанных в режиме с линейно нарастающей нагрузкой – 128.4 МПа, а модуль Юнга меньше в 1.85 раза и составляет 25.6 ГПа (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Основные механические характеристики образцов мрамора, испытанных с воздействием электромагнитного поля при квазистационарном уровне нагрузки.

Образец	ЭМВ	$\sigma_{zz}(\varepsilon_{zz}) = E \cdot \varepsilon_{zz}$	$\sigma_{п.п.}$ , МПа	$\varepsilon_x, 10^{-3}$	$\varepsilon_y, 10^{-3}$	$\varepsilon_z, 10^{-3}$
		Стадия упругого деформирования E, ГПа				
1	+	14.0	138.9	0.4	2.5	2.9
2	+	27.3	101.9	2.9	3.1	6.6
3	+	35.4	144.9	9.6	7.2	6.0

Из 26 сеансов воздействия скрещенных ЭМ полей при фиксированных значениях сжатия в тринадцати выявлены изменения скорости продольной деформации  $\dot{\varepsilon}_z$ . Скорость  $\dot{\varepsilon}_z$  возростала как минимум в 1.6 раз, а максимально – в 137.6 раз (таблица 4.12). При нагрузках  $k^* < 0.7$  из шестнадцати проведенных сеансов в девяти было выявлено изменение  $\dot{\varepsilon}_z$ , которое, в среднем, составляло 33.5 раза. Из десяти сеансов, проведенных при нагрузках выше  $k^* = 0.7$ , изменения скорости продольной деформации обнаружены в четырех сеансах со средним приростом равным 12.1 раза. Изменение  $\dot{\varepsilon}_x$  наблюдалось в 30% сеансов со средним приростом в 166 раз, и в четырех

сеансах имело место увеличение  $\dot{\epsilon}_Y$  в среднем в 6.2 раза (таблица 4.12). В двух случаях наблюдался рост всех трех скоростей деформаций. Отклики АЭ на воздействие ЭМ полей проявились лишь в пяти сеансах (4 при малых нагрузках, когда  $k^* < 0.7$ ) и имели небольшую амплитуду и длительность. При  $k^* > 0.7$  приросты активности АЭ наблюдались дважды и составили 17.9 и 33.9 раза (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Изменения трех компонент скоростей деформации, активности АЭ для серии образцов, деформируемых в присутствии скрещенных электрического и магнитного полей.

	Мрамор № 1				Мрамор № 2				Мрамор № 3			
	$\frac{\dot{\epsilon}_{ZЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{ZдоЭМВ}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{XЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{XдоЭМВ}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{YЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{YдоЭМВ}}$	$\frac{N_{ЭМ}}{B/3\sigma^*}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{ZЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{ZдоЭМВ}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{XЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{XдоЭМВ}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{YЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{YдоЭМВ}}$	$\frac{N_{ЭМ}}{B/3\sigma^*}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{ZЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{ZдоЭМВ}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{XЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{XдоЭМВ}}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{YЭМВ}}{\dot{\epsilon}_{YдоЭМВ}}$	$\frac{N_{ЭМ}}{B/3\sigma^*}$
	$k^* < 0.3$	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	-	1.12	2.4
									102.8	380	-	-
$0.3 < k^* < 0.4$	9.5 20	-	-	2.0	н/а	н/а	н/а	н/а		25.2	-	-
$0.4 < k^* < 0.5$	-	-	-	1.8	3.8	-	-	-	-	-	10.9	3.3
$0.5 < k^* < 0.6$	16	-	-	1.4	1.6	-	-	-	8 137.6	- 884	-	-
$0.6 < k^* < 0.7$	н/а	н/а	н/а	-	2.15	14.7	-	-	-	2.7	-	-
$0.7 < k^* < 0.8$	15	-	-	17.9	-	-	-	-	26.3	2.1	5.2	-
$0.8 < k^* < 0.9$	1.6	-	-	-	-	-	-	-	5.5	19.1	6.4	-
$k^* > 0.9$	-	-	-	-	-	-	-	33.9	-	-	-	-

Примечание к таблице: н/а – отсутствовали сеансы при данном уровне нагрузки; – отсутствие изменений в скоростях деформации и откликов активности АЭ, связанных с электромагнитным воздействием.

#### 4.3. Перераспределение характеристик акустической эмиссии образцов гранита в условиях одноосного сжатия и влияния электрических импульсов

Рассмотрим результаты эксперимента на образце гранита Каинда, диаграмма нагружения и периоды воздействия показаны на рисунке 4.24. Методика нагружения и дополнительные

аспекты воздействия подробно описаны в разделе 2.2, а использованное оборудование – в разделах 2.1, 2.4.3.

Напряжение разрушения (одноосное сжатие) составило 79 МПа. Всего было реализовано 6 квазистационарных уровней нагрузки и 7 сеансов электровоздействия.

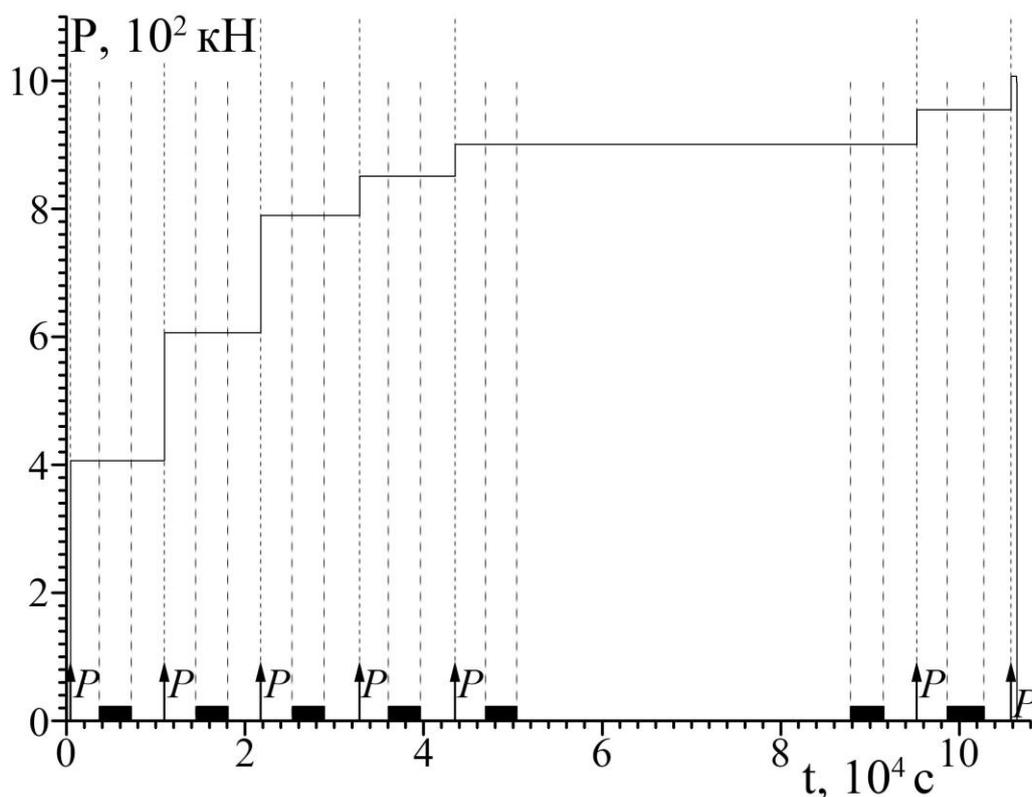


Рисунок 4.24 – Диаграмма нагружения образца гранита согласно [Мубассарова и др., 2014]. Черными барами показаны периоды воздействия электромагнитным полем. Стрелки с подписью P – момент пригрузки.

Результаты измерения акустоэмиссионной активности образца, полученной шестиканальной системой Amsy-5, показаны на рисунках 4.25-4.26. Кратковременные приросты активности акустической эмиссии, инициируемые электрическими импульсами, были получены при нагрузках, соответствующих  $k^*=0.41$ ,  $k^*=0.61$ ,  $k^*=0.79$ ,  $k^*=0.85$  и  $k^*=0.94$ . Как видно из рисунка 4.25 а, при уровне нагрузки  $k^*=0.41$  среднее значение фоновой активности АЭ за 1 час до начала воздействия составляло 6.7 сигналов в секунду, кратковременный прирост АЭ, вызванный воздействием электроимпульсов, наступил с задержкой 2537 с от начала подачи импульсов. Максимум активности АЭ при приросте в 14.1 раза превышает уровень  $3\sigma^*$ , где  $\sigma^*=6.92$  (рисунок 4.25 а).

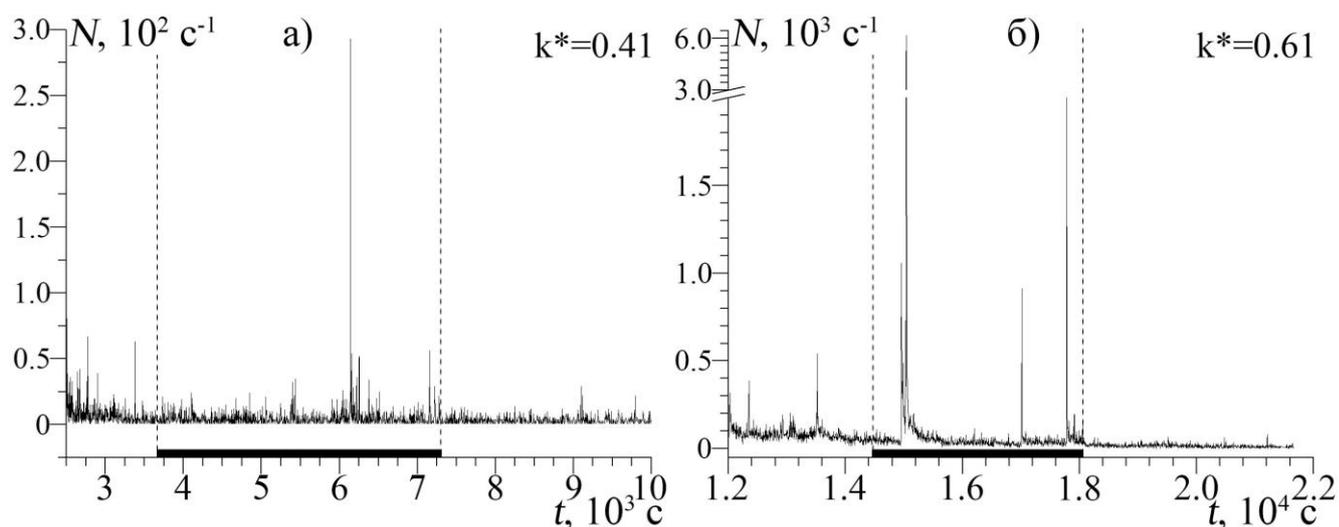


Рисунок 4.25 Активность акустической эмиссии образца гранита Каинда при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.41$  и б –  $k^*=0.61$  согласно [Мубассарова и др., 2014]. Пунктирными прямыми и черными линиями снизу показаны интервалы воздействия электрическими импульсами.

На следующей ступени нагрузки при  $k^*=0.61$  фоновая активность до начала воздействия была выше, среднеквадратическое отклонение равнялось  $\sigma^*=42.6 \text{ c}^{-1}$  (рисунок 4.25 б). Кратковременный прирост АЭ произошел с задержкой 480 с от начала сеанса и по максимальному значению в 48 раз превышает уровень  $3\sigma^*$ . При увеличении нагрузки до уровня 0.79 от разрушения увеличился и средний фоновый уровень акустоэмиссионной активности, который составил  $212.6 \text{ c}^{-1}$ , а значение среднеквадратического отклонения за 1 час до воздействия равнялось  $\sigma^*=176.9 \text{ c}^{-1}$  (рисунок 4.26 а). Активность сигналов АЭ повысилась до максимума  $N=1049 \text{ c}^{-1}$  и превысила уровень  $3\sigma^*$  почти в 2 раза, задержка составила 854 секунды.

Прирост акустоэмиссионной активности, имевший место при нагрузке с  $k^*=0.85$  был более длительным по времени ( $\Delta t=1048 \text{ c}$ ) по сравнению с предыдущими откликами АЭ при меньших уровнях нагрузки (рисунок 4.26 б). С задержкой в 1520 секунд отклик АЭ в 28.8 раза превосходил трехкратный уровень среднеквадратического отклонения активности АЭ до сеанса ( $\sigma^*=227.6 \text{ c}^{-1}$ ).

При приближении уровня нагрузки к предразрушающим при  $k^*=0.94$  активность АЭ, инициированная воздействием электрическими импульсами, превышает активность при нагрузке в 18 раз, при этом задержка активизации АЭ составляет 1616 секунд от начала подачи на образец электроимпульсов (рисунок 4.27). Следует отметить тот факт, что в течение этого сеанса воздействия произошло формирование магистральной трещины. При пригрузке изменение напряжения на образце составило 6.6 МПа (9.8% от напряжения до пригрузки) и привело к увеличению активности до уровня  $2750 \text{ c}^{-1}$ .

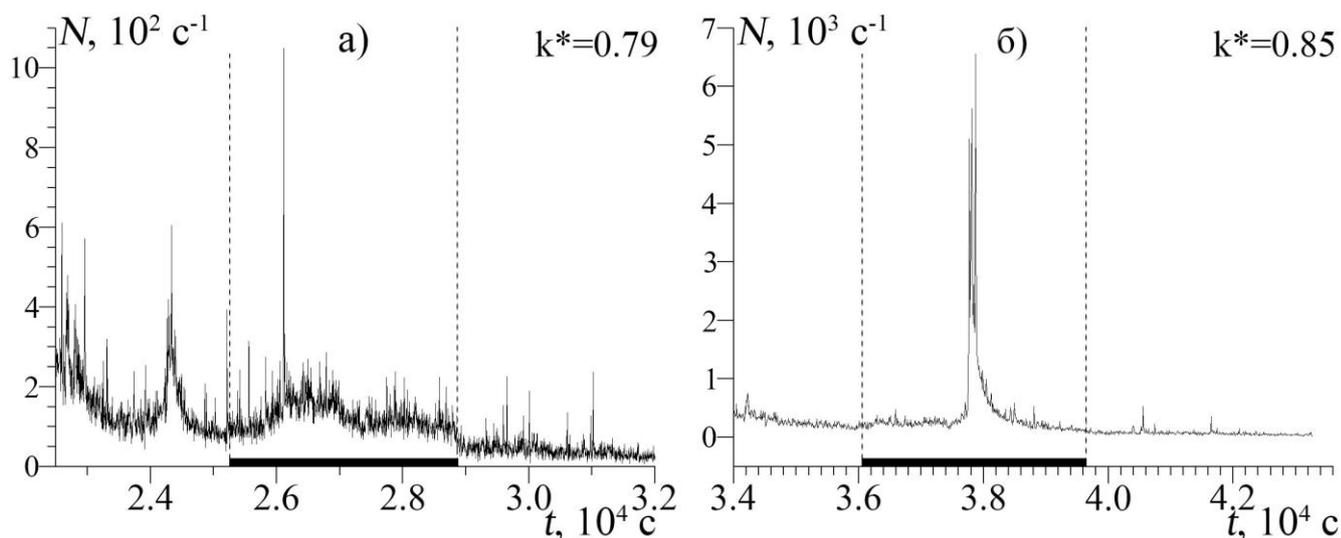


Рисунок 4.26 – Активность акустической эмиссии образца гранита Каинда при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.79$  и б –  $k^*=0.85$  согласно [Мубассарова и др., 2014]. Пунктирными прямыми и черными линиями снизу показаны интервалы воздействия электрическими импульсами.

Отклик АЭ на воздействие при возникновении трещины оказался существенно большим – до  $49841 \text{ c}^{-1}$  и в 40.9 раза превысил трехкратное среднеквадратическое отклонение активности АЭ, оцененное до начала сеанса электровоздействия (рисунок 4.27).

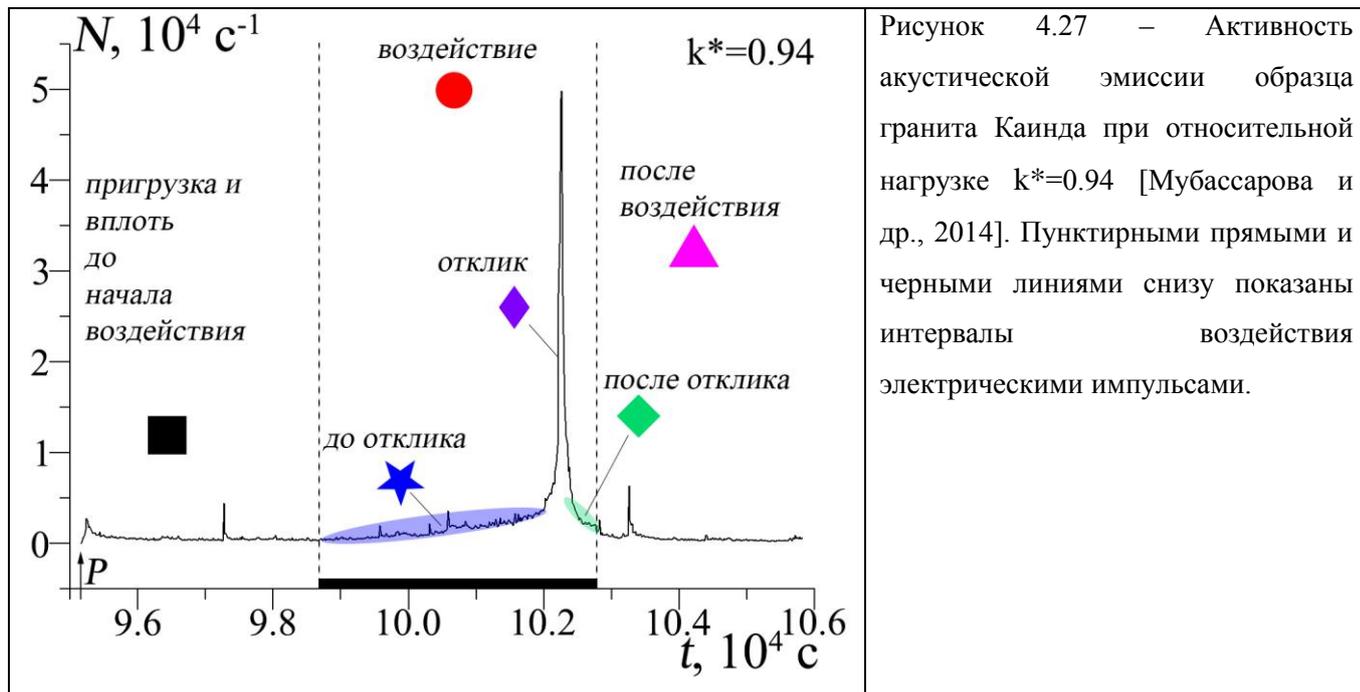


Рисунок 4.27 – Активность акустической эмиссии образца гранита Каинда при относительной нагрузке  $k^*=0.94$  [Мубассарова и др., 2014]. Пунктирными прямыми и черными линиями снизу показаны интервалы воздействия электрическими импульсами.

В сводной таблице 4.13 приведены количественные данные о величине приростов активности АЭ, времени задержки откликов активности АЭ от начала воздействия и длительности отклика АЭ.

Таблица 4.13 – Данные откликов АЭ на электромагнитное воздействие в эксперименте с образцом гранита.

№ сеанса	$k_{ЭМВ} = \frac{\sigma_{ЭМВ}}{\sigma_{разр}}, \%$	$N/3\sigma^*$	Длительность отклика, мин/с	Величина задержки отклика, мин/с
1	0.41	14.1	118 с	2537 с
2	0.61	48	260 с	480 с
3	0.79	2	18 с	854 с
4	0.85	28.8	1456 с	1520 с
5	0.89	-	-	-
6	0.94	40.9	2528 с	1616 с

В дополнение к графикам активности, отражающим развитие во времени процесса дефектообразования (кратко, кинетику дефектов), были построены энергетические распределения количества сигналов АЭ. Результат показан на рисунках 4.28-4.29. Распределение сигналов АЭ на рисунках 4.28-4.29 для разных уровней нагрузки может свидетельствовать о их соответствии линейному закону повторяемости (в логарифмических единицах), аналогичному закону Гутенберга-Рихтера в сейсмологии. Вместе с тем при всех уровнях нагрузки можно отметить различия в угловых коэффициентах графиков распределений **б** при электромагнитном воздействии и до него.

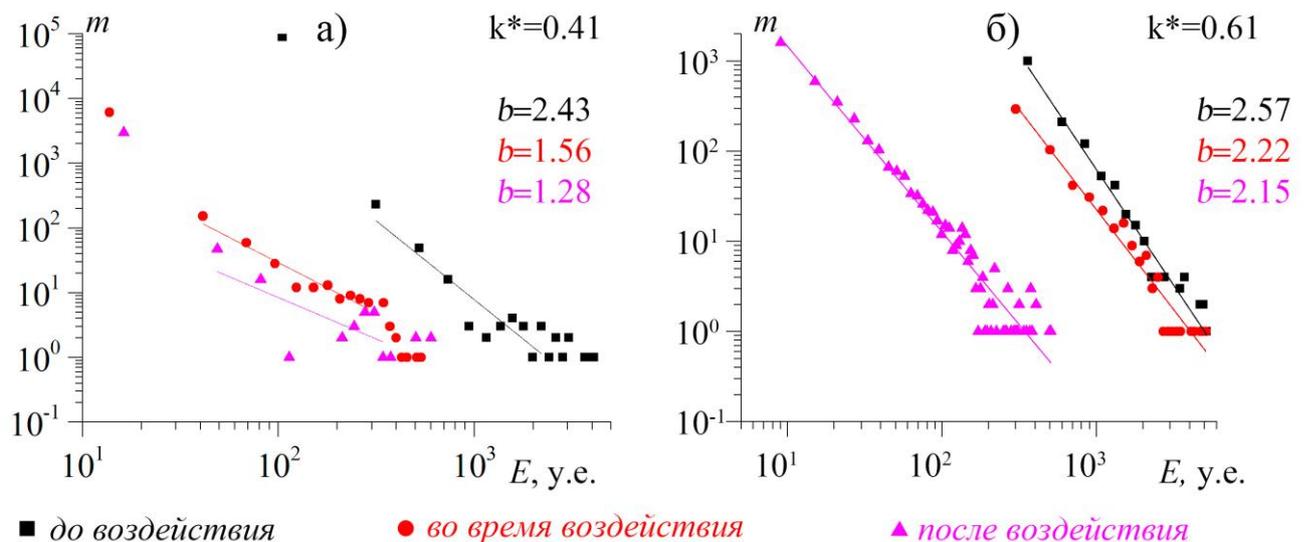


Рисунок 4.28 – Кумулятивные распределения сигналов акустической эмиссии гранита Каинда по энергиям при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.41$ , б –  $k^*=0.61$  от разрушения; в – угловые коэффициенты [Мубассарова и др., 2014].

При нагрузках, соответствующих  $k^*=0.61$  и  $k^*=0.85$ , различия в угловых коэффициентах (которые удобно называть **b**-фактором, по аналогии с законом Гутенберга-Рихтера) до, во время и после воздействия не более 25%, при этом диапазон энергий сигналов АЭ не превышает  $10^4$  у.е. (рисунок 4.28 б, 4.29 б). В случае первого сеанса при относительной нагрузке  $k^*=0.41$  угловой коэффициент во время воздействия на 35% ниже его же значения до сеанса (рисунок 4.28 а). При увеличении нагрузки до уровня 0.79 от разрушения (период

непосредственно нагрузки и релаксации после нее) наблюдается смещение энергий сигналов АЭ в диапазон больших значений до  $10^6$  у.е. и снижение значения углового коэффициента  $b$  (рисунок 4.29 а).

При увеличении напряжения до 0.94 от разрушения распределения сигналов по энергиям для событий АЭ, зарегистрированных до и после воздействия практически совпадают. Во время электромагнитного воздействия наблюдаются существенные отличия от предыстории как по  $b$ -фактору, так и по положению графика (т.е. диапазону энергий). Рисунок 4.29 в показывает, что в период воздействия регистрируются сигналы АЭ с энергиями, превосходящими  $10^4$  эВ, а угловой коэффициент графика энергетического распределения  $b$  меньше в два раза по сравнению с периодами без воздействий. Это свидетельствует, что на данной ступени нагрузки электромагнитное поле существенно изменило режим дефектообразования – в некоторой области образца локализация деформации привела к возникновению макротрещины.

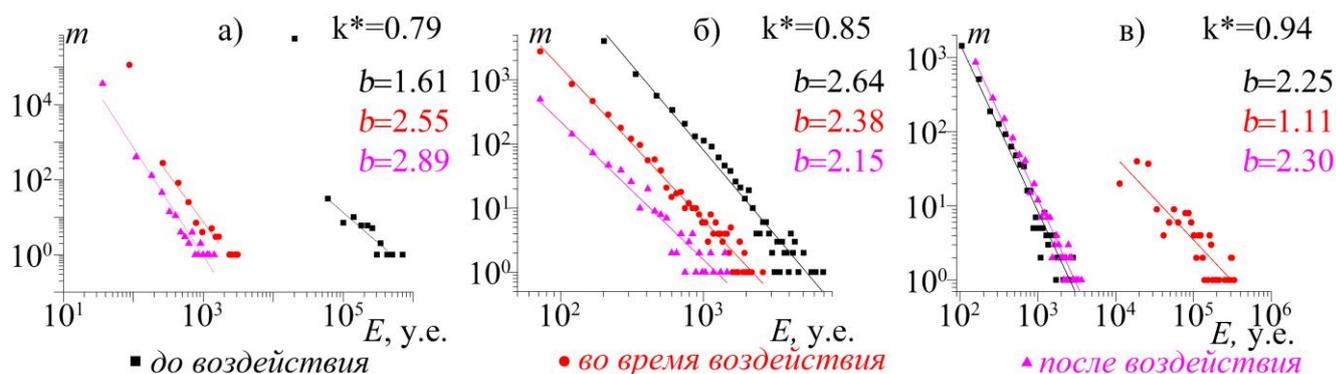


Рис. 4.29 – Кумулятивные распределения сигналов акустической эмиссии гранита Каинда по энергиям при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.79$ , б –  $k^*=0.85$  от разрушения, в -  $k^*=0.94$ ;  $b$  – угловые коэффициенты, согласно [Мубассарова и др., 2014].

Рассмотрим графики энергетических распределений сигналов акустической эмиссии в периоды сеансов электровоздействия, сортированных по времени: сигналы, произошедшие до отклика активности АЭ, непосредственно составляющие отклик АЭ и сигналы, возникшие по окончании отклика (поясняющие обозначения на рисунке 4.27). В связи с тем, что при  $k^*=0.41$  и  $k^*=0.79$  непосредственно отклики активности АЭ состояли из небольшого количества сигналов, провести вычисления кумулятивных распределений сигналов АЭ по энергиям не представлялось возможным. Поэтому рассмотрим кумулятивные распределения для уровней нагрузок при  $k^*=0.61$ ,  $k^*=0.85$  и  $k^*=0.94$  (рисунок 4.30).

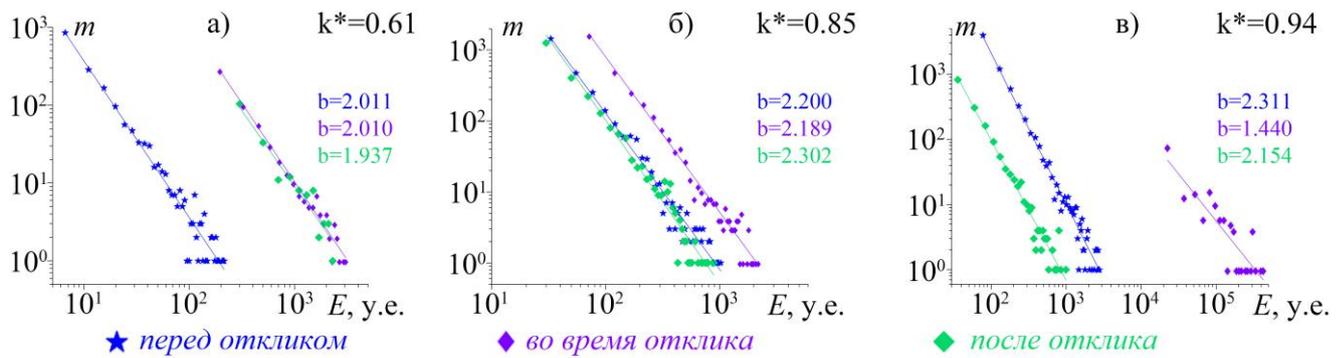


Рис. 4.30 – Кумулятивные распределения сигналов акустической эмиссии гранита Каинда по энергиям при относительных нагрузках: а –  $k^*=0.61$ , б –  $k^*=0.85$  от разрушения, в –  $k^*=0.94$ ;  $b$  – угловые коэффициенты.

Как видно из графиков, угловые коэффициенты  $b$  сигналов АЭ, зарегистрированных непосредственно в период отклика активности, отличаются от угловых коэффициентов сигналов, возникших до отклика и при спаде активности АЭ после отклика. При относительных нагрузках  $k^*=0.61$  и  $k^*=0.94$  наблюдается смещение энергий сигналов в диапазон больших энергий: в первом случае диапазон равен  $2 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^3$  у.е. (рисунок 4.30 а), а во втором – смещение на порядок по сравнению с диапазоном энергий сигналов, возникших до отклика активности АЭ (рисунок 4.30 в). В отличие от меньших нагрузок, при  $k^*=0.94$  наблюдается уменьшение значения углового коэффициента  $b$  в 1.6 раза – от значения  $b_{\text{до отклика}} = 2.31$  до  $b_{\text{отклика}} = 1.44$  (рисунок 4.30 в).

Как было отмечено выше, для выявления различий в пространственном расположении источников сигналов при пригрузке и в течение воздействия была реализована локация источников сигналов АЭ (дефектов) в объеме образца. Расположение датчиков на образце в данном эксперименте показано на рисунке 4.31 а.

Наиболее информативным является распределение источников АЭ, полученное в измерительной сессии с электромагнитным воздействием при нагрузке 0.94 от максимальной. Рисунок 4.31 б демонстрирует выборку сигналов АЭ, для которых достоверно определены координаты его источника, т.е. надежно оценен показатель неопределенности локации (стандартное отклонение вычисленных расстояний от датчика АЭ до источника и этого расстояния в соответствии с зарегистрированной разницей времени прихода сигнала до разных датчиков в многоканальной системе регистрации), ошибка оценки координат не превышает 0.1 мм. Однако, ошибка, связанная с точностью установки датчиков АЭ на образце, составляет  $\pm 0.5$  мм, что определяет погрешность определения координат источников сигналов АЭ не хуже, чем 5% от линейных размеров образцов.

В связи с тем, что уровень порогового значения, при превышении которого регистрировались акустоэмиссионные сигналы, был достаточно низок, определение координат сигналов, имеющих малое значение амплитуды, было затруднительно. Как видно из рисунка 4.31 б в период пригрузки и до воздействия источники сигналов АЭ (дефекты) диффузно рассеяны по всему объему образца. При подаче электрических импульсов число событий АЭ возрастает и большая доля источников концентрируется в некоторой области, которая является зоной зарождения магистральной трещины (выделенная светлосерая область на рисунке 4.31 б). После того как воздействие было выключено, активность АЭ не превышала уровень 900 событий в секунду в течение часа, хотя трещина уже образовалась. При этом источники АЭ были сконцентрированы в другой области образца (рисунок 4.31 б, темно-серая область). Этот рисунок демонстрирует, что при реакции среды на внешнее воздействие отмеченный выше прирост активности АЭ (см. рисунок 4.27) произошел за счет событий, место расположения которых при образовании магистральной трещины сформировало зону («кластер»), в отличие от рассредоточенных источников АЭ, зарегистрированных до воздействия. Следующая за этим пригрузка оказалась последней – образец разрушился, причем одна из плоскостей разрыва располагалась в области сосредоточения дефектов после воздействия (синие шарики).

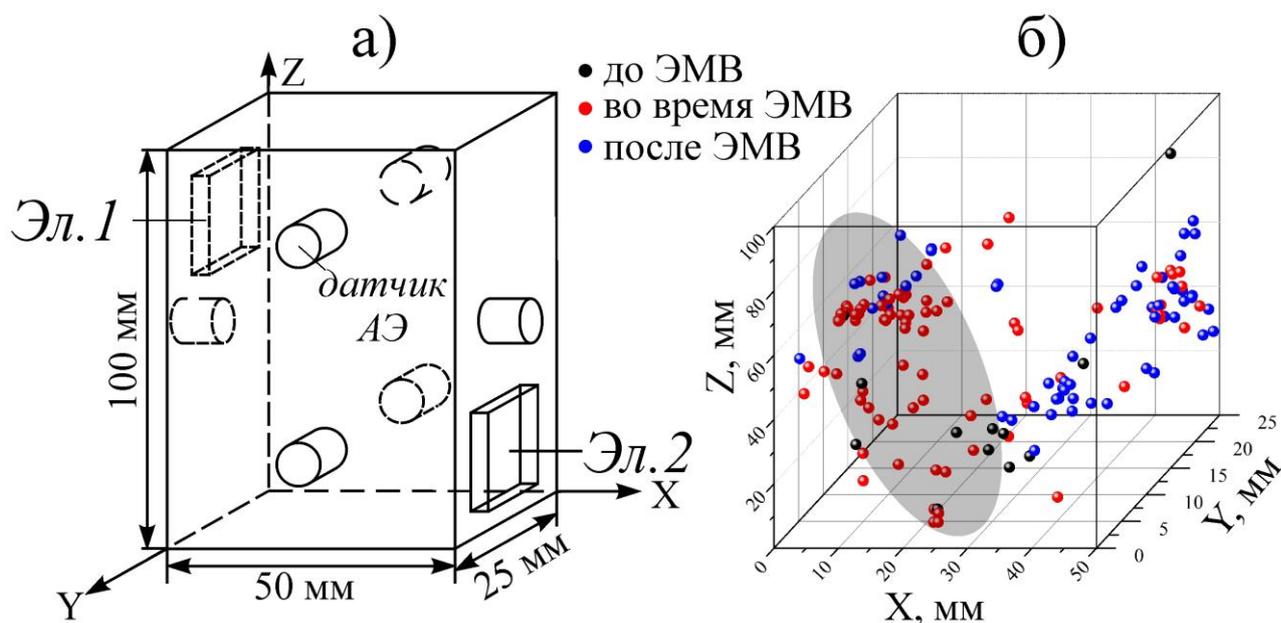


Рисунок 4.31 – Схема расположения датчиков АЭ и электродов воздействия (а) и пространственное распределение источников сигналов АЭ (б) при постоянном уровне сжатия 0.94 от разрушения согласно [Мубассарова и др., 2014]. Черными шариками обозначены источники сигналов, произошедших во время пригрузки и до начала воздействия, красными шариками – произошедших во время воздействия и синими – после воздействия.

Подведем итоги исследований на неводонасыщенных образцах гранита, проведенных в ИМСС УрО РАН. При нагрузках выше 0.4 от разрушения обнаружены значительные отклики активности АЭ на воздействие импульсов электрического поля напряженностью до 1 кВ/м (в 83%

сеансов). При откликах активность АЭ возрастала в 2-40.9 раза по сравнению с трехкратным среднеквадратическим отклонением активности до воздействия, среднее значение прироста по пяти сеансам составило 26.8 раза. При напряжениях ниже 0.9 от разрушения различия в угловых коэффициентах графиков энергетического распределения сигналов АЭ  $b$  до, во время и после воздействия не более 25%, при этом диапазон энергий сигналов АЭ не превышает  $10^4$  у.е. Во время внешнего воздействия при нагрузках, близких к разрушению ( $k^* > 0.9$ ), наблюдаются существенные изменения углового коэффициента  $b$  до двух раз и смещение графиков энергетического распределения в диапазон больших энергий ( $> 10^4$  у.е.).

Результаты локации источников акустоэмиссионных сигналов (дефектов) показывают, что в период нагрузки и в течение релаксационного спада активности АЭ до воздействия дефекты диффузно расположены 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.

#### **Выводы по главе 4**

В сериях экспериментов на образцах мрамора (водонасыщенных и неводонасыщенных) и гранита (неводонасыщенных) продемонстрировано существенное влияние электромагнитных воздействий на кинетику деформирования и дефектообразования.

Для водонасыщенных образцов мрамора, наряду с проявлениями эффекта Ребиндера – уменьшением предела прочности и модуля упругости (Юнга), – были обнаружены приросты скоростей продольной и поперечных деформаций, а также активности АЭ образцов мрамора. Амплитуды приростов скоростей деформации и активности АЭ достигали десятков и сотен раз и наблюдались при относительных значениях напряжений 0.5 от разрушения, что ниже, чем для неводонасыщенных образцов (для которых значение равно 0.7). В более чем половине сеансов изменения скоростей деформаций происходили одновременно в продольном и поперечном направлении.

Эксперименты, проведенные на неводонасыщенных образцах мрамора, испытанных в режиме ступенчатого роста нагрузки продемонстрировали следующие результаты. В сеансах скрещенных электрического и магнитного полей в половине случаев происходили изменения скорости продольной деформации в среднем в десятки раз. В ряде сеансов одновременно изменялись скорости продольной и поперечных деформаций. Отклики активности акустической эмиссии на воздействие электромагнитных полей имели небольшую амплитуду и длительность и наблюдались в небольшом числе сеансов.

В результате исследований, проведенных в ИМСС УрО РАН, на неводонасыщенных образцах гранита, с регистрацией акустической эмиссии в шестиканальном режиме и локацией источников

сигналов АЭ получено следующее. При нагрузках выше уровня 0.4 от разрушения обнаружены значительные отклики активности АЭ на воздействие импульсов электрического поля напряженностью до 1 кВ/м в подавляющем большинстве сеансов. Активность АЭ, инициируемая электровоздействиями, возрастала в 2-40.9 раза по сравнению с трехкратным среднеквадратическим отклонением активности АЭ до воздействия.

Кумулятивные распределения сигналов АЭ по условным (электрическим) энергиям описываются линейной зависимостью (в логарифмических единицах), аналогичной закону Гутенберга-Рихтера в сейсмологии. При нагрузках, близких к разрушению, в сеансах с электрическими импульсами наблюдаются существенные отличия от предыстории (до сеанса) как по угловому коэффициенту  $b$ , так и по положению графика (т.е. диапазону энергий).

Результаты локации источников АЭ (дефектов) показывают, что в период пригрузки и до воздействия дефекты 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. Полученные результаты позволяют обосновать защищаемые научные положения 3, 4 (Введение, стр. 7).

### **Заключение**

Триггерное влияние электромагнитных полей на процессы деформирования на разных масштабных уровнях (от сеймогенерирующих структур Земной коры до испытываемых в лабораторных условиях образцов сантиметровых размеров), установленное по вариациям сейсмической, сейсмоакустической и акустоэмиссионной активности, обуславливает необходимость получения достоверных данных об изменениях деформации в период этих вариаций.

В диссертационной работе изложены результаты лабораторных исследований влияния электромагнитных полей весьма слабой интенсивности (напряженностью электрического поля не более 1кВ/м и индукцией магнитного поля порядка 4 мТл) на образцы мрамора и гранита, находящиеся в напряженном состоянии. Достоверно установлено влияние этих полей на скорость деформации и параметры акустической эмиссии указанных материалов.

Показано, что влияние взаимно перпендикулярных (скрещенных) электрического и магнитного полей на скорость деформации и активность акустической эмиссии образцов мрамора в режиме фиксированной и нарастающей нагрузки носит воспроизводимый, устойчивый характер. Изменения скоростей продольной и двух поперечных деформаций образцов мрамора могут происходить синхронно между собой и с приростами активности АЭ. В процессе деформирования водонасыщенных образцов мрамора скрещенные электрическое и магнитное поля вызывают увеличение скоростей продольной и поперечных деформаций в десяти и сотни раз, сопровождающееся в ряде случаев с лавинообразным ростом активности АЭ

(до сотен сигналов АЭ в секунду).

В эксперименте с локацией источников 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. При воздействии электрических импульсов на образцы гранита в подавляющем большинстве сеансов обнаружены значительные приросты (в десятки раз) активности АЭ. Кумулятивные распределения сигналов АЭ образцов гранита по условным (электрическим) энергиям описываются линейной зависимостью (в логарифмических единицах), аналогичной закону Гутенберга-Рихтера в сейсмологии. При напряжениях, близких к разрушению, в сеансах с электрическими импульсами обнаружены существенные отличия между значениями углового коэффициента ( $b$ -value) в период воздействия и до него, а также смещение (на два порядка) диапазона энергий сигналов в область больших энергий.

Установлено, что наблюдаемые вариации скорости деформации, активности АЭ, а также различие угловых коэффициентов  $b$  в периоды во время воздействия ЭМ полей и в его отсутствие свидетельствуют о модификации процесса дефектообразования в горных породах (диэлектриках). Для мрамора – материала со свойствами пластичности – это проявляется в изменениях скорости деформации при внешнем воздействии скрещенных электрического и магнитного полей.

## Список литературы

1. Авагимов А.А. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием / А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, Э.Б. Файнберг // Физика Земли. – 2005. – № 6. – С. 55-65.
2. Авагимов А.А. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энерговоздействии / А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, В.Н. Ключкин // Физика Земли. – 2006. – № 10. – С. 36-42.
3. Авагимов А.А. Динамика энергообменных процессов в модельных образцах при воздействии упругим и электромагнитным полями / А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, В.И. Окунев // Физика Земли. – 2011. – № 10. – С. 64-70.
4. Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // Физика Земли. – 2008. – № 1. – С. 77-80.
5. Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Анализ триггерного воздействия электромагнитными полями на геологическую среду, количественные оценки взаимодействия // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 87-95.
6. Альшиц В.И. О природе влияния электрического тока на магнито-стимулированную микропластичность монокристаллов Al / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик // Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т. 67, Вып. 10. – С. 788-793.
7. Адушкин В.В. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации / В.В. Адушкин, С.А. Рябова, А.А. Спивак, В.А. Харламов // ДАН. Геофизика. – 2012. – Т. 444, – № 3. – С. 304-308.
8. Адушкин В.В. Геофизические эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. / В.В. Адушкин, Б.Г. Гаврилов, К.И. Горелый, Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов // ДАН. Геофизика. – 2007. – Т. 417, – № 4. – С. 535-540.
9. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. – М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.
10. Алексеев В.А. О влиянии солнечного затмения 29 марта 2006 г. на ионосферу и сейсмическую активность Кавказа / В.А. Алексеев, Н.Г. Алексеева, М.Г. Даниялов, А.Д. Жигалин, И.А. Мусаев, С.М. Першин, В.В. Фомичев, В.П. Урядов // В сб. материалов Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург», Петергоф, 02-06 октября 2006 г. Обнинск: Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2006. – С. 9-13.

11. Альшиц В.И. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская // ФТТ. – 1987. – Т. 29, № 2. – С. 467-470.
12. Альшиц В.И. Микропластичность диамагнитных кристаллов в постоянном магнитном поле / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – №. 10. – С. 85-88.
13. Альшиц В.И. Деформация кристаллов LiF в постоянном магнитном поле / В.И. Альшиц, А.А. Урусовская, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер // ФТТ. – 2000. – Т. 42, Вып. 2. – С. 270-272.
14. Альшиц В.И. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // Кристаллография. – 2003. – Т. 48, № 5. – С. 826-855.
15. Альшиц В.И. Анизотропия резонансной магнитопластичности кристаллов NaCl в магнитном поле Земли / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // ФТТ. – 2013. – Т. 55, Вып. 2. – С. 318-325.
16. Альшиц В.И. Резонансная магнитопластичность в сверхнизких магнитных полях / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104, № 5. – С. 362-373.
17. Альшиц В.И. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Р.К. Котовский, Е.А. Петржик, П. Трончик // УФН. – 2017. – Т. 187, № 3. – С. 327-341.
18. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с. ISBN 5-98277-033-7.
19. Бахмутов В.Г. Геомагнитная возмущенность и землетрясения в зоне Вранча / В.Г. Бахмутов, Ф.И. Седова, Т.А. Мозговая // Физика Земли. – 2007. – № 11. – С. 30-36.
20. Бобровский В.В. Применение широкополосных АЭ измерений при моделировании энерговоздействий на геологическую среду для разрядки избыточных напряжений / В.В. Бобровский, А.В. Аладьев, Л.М. Богомолов, Л.Н. Горбанева, П.В. Ильичев, А.С. Закупин, В.Н. Сычев // Материалы семинара молодых ученых и специалистов, посвященного 25-летию Научной станции ОИВТ РАН, г. Бишкек, 10 октября 2003 г. / Отв. ред. В.М. Лелевкин, Л.М. Богомолов. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2004. – С. 59-67.
21. Богомолов Л.М. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород / Л.М. Богомолов, Б.Ц. Манжиков, В.Н. Сычев, Ю.А. Трапезников, Г.Г. Щелочков // Геология и геофизика. – 2001. – Т.42, №10. – С. 1678-1689.

22. Богомолов Л.М. Корреляционный анализ локальной сейсмичности на Бишкекском геодинамическом полигоне в связи с проблемой активного мониторинга / Л.М. Богомолов, А.А. Авагимов, В.Д. Брагин, А.С. Закупин, В.А. Зейгарник, В.Н. Сычев, Н.А. Сычева, В.М. Шавлыгин, Г.Г. Щелочков // Геофизика XXI столетия. Сб. трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный мир, 2006. – С. 317-325.
23. Богомолов Л.М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 39-56.
24. Богомолов Л.М. Как электромагнитные импульсы влияют на разрывообразование на разных структурных уровнях (физика энергвоздействий) // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 22–24 июня 2010 г.): материалы Всероссийского семинара-совещания. Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. – М.: ГЕОС. – 2010 а. – С.42-51.
25. Богомолов Л.М. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности / Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, В.Н. Сычев / Саарбрюкен: Lambert Academic Publishing, 2011. – 1-ое издание. – 408 с. – ISBN: 978-3-8465-14.
26. Богомолов Л.М. Поиск новых подходов к объяснению механизмов взаимосвязи сейсмичности и электромагнитных эффектов // Вестник ДВО РАН. – 2013. – №3. – С. 12-18.
27. 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 напряженно-деформированного состояния // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 7. – С.20-27.
28. 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.
29. Бучаченко А.Л. О влиянии магнитного поля на механику немагнитных кристаллов: происхождение магнитопластического эффекта // ЖЭТФ. – 2006. – Т. 129, Вып. 5. – С. 909-913.
30. Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу // УФН. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 101-108.

31. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферы плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 1. – С. 42-48.
32. Велихов Е.П. Использование импульсных МГД-генераторов для геофизических исследований и прогноза землетрясений / Е.П. Велихов, Ю.М. Волков, Б.П., Дьяконов А.В. Зотов, О.М. Барсуков // Sixth International Conference on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. Washington, D.C., 9-13 June, 1975. – 1975. – Vol. 5. – P. 211-228.
33. Веттегрень В.И. Динамика и иерархия землетрясений / В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, М.А. Крючков // Физика Земли. – 2006. – № 9. С. 40-45.
34. Виноградов С.Д. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов / С.Д. Виноградов, К.М. Мирзоев, Н.Г. Саломов – Душанбе: Дониш, 1975. – 114 с.
35. Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. – М.: Наука, 1989. – 177 с.
36. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280с.
37. Внешнее прецизионное устройство сбора аналоговой и цифровой информации с usb портом LA-I24UBS [Электронный ресурс] – <http://www.rudshel.ru/show.php?dev=3>
38. Волыхин А.М. Проявления геодинамических процессов в геофизических полях / А.М. Волыхин, В.Д. Брагин, А.В. Зубович, Ю.А. Трапезников. – М.: Наука, 1993. – 158 с.
39. Гаврилов В.А. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов / В.А. Гаврилов, И.А. Пантелеев, Г.В. Рябинин // Физика Земли. – 2014. № 1. – С. 89-103.
40. 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.
41. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 535 с.
42. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // ФТТ. – 2004. – Т. 46, Вып. 5. – С. 769-803.
43. 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.
44. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 5. – С. 5-22.

45. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика земли. – 2004. – № 10. – С. 37-54.
46. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 5-14.
47. Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. Триггерные механизмы землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 22–24 июня 2010 г.): материалы Всероссийского семинара-совещания. Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. – М: ГЕОС. – 2010. – С.52-61.
48. Грайзер В.М. “Истинное” движение почвы в эпицентральной зоне. – М.: Наука, 1984. – 198 с.
49. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 304 с.
50. Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Отклонение от закона Гутенберга-Рихтера // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 29-35.
51. 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.
52. Данилов В.И. О влиянии электрического потенциала на сопротивление микроиндентированию поверхности металлов / В.И. Данилов, Л.Б. Зуев, С.В. Коновалов, Р.А. Филипьев, Б.С. Семухин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – № 2. – С. 85-89.
53. Джонсон Д. Справочник по активным фильтрам: Пер. с англ. / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
54. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза землетрясений. – М.: Физматлит, 2009. – 240 с.
55. Добрынин В.М. Петрофизика (Физика горных пород): Учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников / Под ред. Д.А. Кожевникова. – М.: ФГУП Изд. «Нефть и газ», 2004. – 368 с.
56. Еманов А.Ф. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Багатское землетрясение 18 июля 2013) А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова, Е.В. Шевкунова, В.Г. Подкорытова // ФТПРПИ. – 2014. – № 2. – С. 41-46.
57. Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // ФТТ. – 2005. – Т. 47, Вып. 6. – С. 1000-1008.

58. Завьялов А.Д., Никитин Ю.В. Параметр концентрации трещин при подготовке разрушения на разных масштабных уровнях // Вулканология и сейсмология. – 1997. – № 1. – С. 56-79.
59. Завьялов А.Д., Никитин Ю.В. Процесс локализации сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4/5. – С. 83-89.
60. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. – 2002. – № 4. С. 3-15.
61. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 3. С. 63-75.
62. Закупин А.С. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения / А.С. Закупин, А.А. Авагимов, Л.М. Богомолов // Физика Земли. – 2006. – № 10. – С. 43-50.
63. Закупин А.С. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия / А.С. Закупин, А.В. Аладьев, Л.М. Богомолов, Б.В. Боровский, П.В. Ильичев, В.Н. Сычев, Н.А. Сычева // Вулканология и сейсмология. – 2006 г. – № 6. – С. 22-33.
64. Закупин А.С. Изучение влияния электромагнитного поля на нагруженные образцы горных пород тензометрическим и акустоэмиссионным методами // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2011. – Т. 11, № 4. – С. 73-78.
65. Зотов О.Д. О магнитных предвестниках землетрясений / О.Д. Зотов, А.В. Гульельми, А.Л. Собисевич // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 139-147.
66. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галогенных кристаллов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 120 с.
67. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов: учебное пособие. – Долгопрудный: Издат. Дом Интеллект, 2013. – 376 с.
68. Иванов-Холодный Г.С. Суточный эффект в глобальной сейсмичности Земли / Г.С. Иванов-Холодный, К.А. Боярчук, В.Е. Чертопруд // Сб. докладов III Международной конференции “Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений”. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2004. – С. 51-54.
69. Кардашев Б.К. Внутреннее трение и физико-механические свойства твердых тел // Кристаллография. – 2009. – Т. 54, № 6. – С. 1074-1086.
70. Козырев Н.А. Избранные труды. – Ленинград: Изд. ЛГУ, 1991. – 443 с. – ISBN 5-288-00626-1.

71. Корбанова В.Н. Петрофизика. Учеб. для вузов. 2-е изд, перераб. и доп. М.: Недра, 1986. – 392 с.
72. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
73. Кочарян Г.Г. Дистанционное инициирование динамических событий // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 22–24 июня 2010 г.): материалы Всероссийского семинара-совещания. Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН.– М: ГЕОС. – 2010. – С.18-30.
74. Кочарян Г.Г. Жесткость разломной зоны как геомеханический фактор, контролирующий излучательную эффективность землетрясений в континентальной коре // ДАН. – 2013. – Т. 452, №. 1. – С. 87-87. – Doi: 10.7868/S0869565213260162.
75. Кочарян Г.Г. Режим деформирования разломных зон и инициирующий потенциал сейсмических колебаний / Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В. // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 22–24 июня 2010 г.): материалы второго Всероссийского семинара-совещания. Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. – М: ГЕОС. – 2013. – С.34-45.
76. Кочарян Г.Г. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 2. Полевые эксперименты и феноменологическая модель явления / Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов, В.В. Ружич, И.В. Батухтин, Е.А. Виноградов, А.М. Камай, В.К. Марков // Физическая мезомеханика. – 2015. – Vol. 18, №. 6. – Р. 75-85.
77. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов / Отв. ред. академик РАН В.В. Адушкин. – М.: ГЕОС, 2016. – 424 с. ISBN 978-5-89118-730-6.
78. Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 4. – С. 94–104.
79. Куксенко В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел / Физика прочности и пластичности / Под ред. С.Н. Журков. – Л.: Наука, 1986. – С. 36-41.
80. Куксенко В.С. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках / В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов, А.В. Пономарев // ФТТ. – 1997. – Т. 39, № 7. – С. 1202-1204.
81. Куксенко В.С. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) / В.С. Куксенко, Б.Ц. Манжиков, К. Тилегенов, Ж.К. Шантемиров, Б.Э. Эмильбеков // ФТТ. – 2003. – Т. 45, Вып. 12. – С. 2182-2186.

82. Куксенко В.С. Концепция сильного сжатия горных пород и массивов / В.С. Куксенко, М.А. Гузев, В.В. Макаров, И.Ю. Рассказов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2011. – № 3-4 (8-9). – С. 14-58.
83. Куксенко В.С. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования / В.С. Куксенко, Е.Е. Дамаскинская, А.Г. Кадомцев // Физика Земли. – 2011 а. – № 10. – С. 25-31.
84. 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.
85. Лавров А.В. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник, Ю.Л. Филимонов. – М.: МГГУ, 2004. – 437 с. – ISBN: 5-7418-0312-1.
86. Лапшин В.Б. Инициация акустической эмиссии в обводненных образцах песчаника / В.Б. Лапшин, А.В. Патонин, А.В. Пономарев, М.Г. Потанина, В.Б. Смирнов, С.М. Строганова // ДАН. – 2016. – Т. 469, № 1. – С. 97-101. – Doi: 10.7868/S0869565216190191.
87. Макаров П.В., Перышкин А.Ю. Моделирование "медленных движений" – автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 32-46.
88. Макаров П.В. 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: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 235 с. ISBN 978-5-9747-0108-5 (в пер.)
89. Малыгин Г.А. Акустопластический эффект и механизм суперпозиции напряжений // ФТТ. – 2000. – Т. 42, Вып. 1. – С. 69-75.
90. Мирзоев К.М. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию / К.М. Мирзоев, С.Д. Виноградов, З. Рузибаев // Физика Земли. – 1991. – № 12. – С. 69-72.
91. Мирзоев К.М. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре / К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, А.А. Лукк, С.Л. Юнга // Физика Земли. – 2009. – № 10. – С. 49-68.
92. Мирзоев К.М. Способ снятия упругой энергии для предотвращения землетрясений / К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, А.А. Лукк, С.Л. Юнга // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 22–24 июня 2010 г.): материалы Всероссийского семинара-совещания. Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. – М.: ГЕОС. – 2010 а. – С.87-96.
93. Михайлова Н.Н. Каталог землетрясений Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий. Алма-Ата: Наука, – 1990. – Ч. 2. – 227 с.
94. Моргунов Р.Б., Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и магнитная память в диамагнитных твердых телах // ЖЭТФ. – 2009. – Т. 136, Вып. 3 (9). – С. 505-515.

95. 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.
96. Мубассарова В.А. Современные решения в задачах акустических и тензометрических измерений при испытании горных пород // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2014. – Т. 14, № 7. – С. 73-76.
97. Мубассарова В.А., Богомолов Л.М. К вопросу о чувствительности акустической эмиссии образцов геоматериалов к импульсным электровоздействиям // В мире научных открытий. – 2010. – № 3-3. – С. 12-17.
98. 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 а. – № 3-3. – С. 7-12.
99. 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.
100. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. Отв. ред. А.В. Николаев. – М.: Наука, 1994. – С. 5-15.
101. Нишида А. Геомангнитный диагноз магнитосферы. – М.: Наука, – 1980. – 299 с.
102. Огурцов М.Г. Солнечная активность и гелиоклиматические факторы – долговременная эволюция и возможные сценарии будущего развития: Автореф. дисс. докт. ф.-мат. наук.: 01.03.03 / Огурцов Максим Геннадиевич. – Санкт-Петербург, 2009. – 24 с.
103. Пантелеев И.А., Гаврилов В.А. Численное моделирование эволюции электрокинетического тока при подготовке тектонического землетрясения на основе данных скважинных геоакустических измерений // Сб. трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20-24 августа 2015 г. / Отв. ред.: Д.А. Губайдуллин, А.И. Елизаров, Е.К. Липачев. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет. – 2015. – С. 2928-2930.
104. Писакин А.В., Системы энергоснабжения на базе МГД-генераторов / А.В. Писакин, Н.Л. Аитов, В.А. Зейгарник, В.Ю. Рикман, О.Г. Матвеев, Ю.П. Бабаков // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29, Вып. 6. – С. 1216–1223.

105. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. / Под ред. Г. Либовица. Т. 2. – М.: Мир, 1975. – С. 336-520.
106. Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. – М.: Наука, 2008. – 380 с.
107. Попандопуло Г.А. Определение координат гипоцентров местных землетрясений на Гармском геофизическом полигоне. Землетрясения и процессы их подготовки / Под ред. В.Н. Страхова. – М.: Наука, 1991. – С. 5-23.
108. Попова О.Г. Связь изменения напряженного состояния Земной коры с солнечными затмениями и магнитными бурями / О.Г. Попова, А.Д. Жигалин, Ю.Ф. Коновалов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 2. – С. 157-164.
109. Природные опасности России: в 6 т. Т. 2. Сейсмические опасности / Отв. ред. Г.А. Соболев М.: Крук, 2000. 295 с.
110. Пуарье Ж.П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. – М.: Мир, 1988. – 287 с. – ISBN 5-03-000699-0.
111. Пулинец С.А., Лью Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. акад. В.Н. Страхова и д.ф.-м.н. В.А. Липеровского. – 1999. – 37 с.
112. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. Учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
113. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 406 с.
114. Родкин М.В. Сеймотектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах / Родкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н. – М.: ГЕОС, 2009. – 198 с.
115. Рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия: пат. Рос. Федерация : МПК G01N3/16 (2006.01) / А.С. Закупин, Б.В. Боровский; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук (НС РАН) (KG). № 2542639(13) С2; заявл. № 2012148683/28, 15.11.2012; опубл. 20.02.2015.
116. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247, №. 4. – С. 829-831.
117. Садовский М.А. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов / М.А. Садовский, К.М. Мирзоев, С.Х. Негматулаев, Н.Г. Саломов // Физика Земли. – 1981. – № 6. – С.32-42.

118. Садовский М.А. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко // Физика Земли. – 1982. – № 12. – С. 3-18.
119. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
120. Сейсмичность при горных работах / Коллектив авторов (под ред. Мельникова Н.Н.). – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 325 с.
121. Сидорин А.Я. Комплексные электрометрические исследования геодинамических процессов. Экспериментальная сейсмология / Сидорин А.Я., Журавлев В.И., Осташевский М.Г. Под ред. Садовского М.А. – М.: Наука, 1983. – С. 149-162.
122. Сидорин А.Я. Первое применение МГД-генератора в геофизике: Эксперимент на Гармском полигоне. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах / Под ред. Жамалетдинова А.А. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2006. – Ч. 1. – С. 114-124.
123. Смирнов Б.И. Магнитопластический эффект в сегнетоэлектрических кристаллах  $\text{NaNO}_2$  / Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, В.И. Николаев // ФТТ. – 2001. – Т. 43, №. 12. – С. 2154-2156.
124. Смирнов В.Б. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурального моделирования / В.Б. Смирнов, А.В. Пономарев, П. Бернар, А.В. Патонин // Физика Земли. – 2010. – № 2. – С. 17-49.
125. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. – 2012. – № 7-8. – С. 63-88.
126. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 26-36.
127. Смолин И.Ю. Режимы с обострением при разрушении образцов горных пород и элементов земной коры / И.Ю. Смолин, П.В. Макаров, А.С. Кульков, М.О. Еремин, Р.А. Бакеев // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 6. – С. 77-85.
128. Соболев Г.А. Некоторые свойства неустойчивого скольжения по неровному разрыву / Г.А. Соболев, Х. Шпетцлер, А.В. Кольцов // Некоторые свойства неустойчивого скольжения по неровному разрыву. М.: Наука, 1991. – С. 97-108.
129. Соболев Г.А. Инициирование неустойчивой подвижки в лабораторных экспериментах / Г.А. Соболев, Х. Шпетцлер, А.В. Кольцов, Т.Л. Челидзе // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. М.: ИФЗ, 1993. – Вып. 1. – С. 38-47.

130. Соболев Г.А. О связи сейсмичности с магнитными бурями / Г.А. Соболев, Н.А. Закржевская, Е.П. Харин // Физика Земли. – 2001. – № 11. – С. 62-72.
131. Соболев Г.А. Динамика акустической эмиссии при инициировании водой / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев, Ю.Я. Майбук, Н.А. Закржевская, В.И. Понятовская, Д.Г. Соболев, А.А. Хромов, Ю.В. Цывинская // Физика Земли. – 2010. – № 2. – С. 50-67.
132. Соболев Г.А. Сейсмический шум. – М.: ООО «Наука и образование», 2014. – 272 с.
133. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. – М.: ИФЗ РАН, 2011. – 56 с.
134. Соболев Г.А., Кольцов А.В. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
135. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / Отв. ред. В.Н. Страхов. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
136. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Динамика акустической эмиссии при инициировании водой // Физика Земли. – 2011. – № 10. – С. 48-63.
137. Сомсиков В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т.31, №1. – С. 1-12.
138. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т.51, № 6. – С. 723 -735.
139. Способ определения коэффициента пуассона горных пород: пат. Рос. Федерация : МПК G01N3/08 (2006.01) / А.С. Вознесенский, А.В. Корчак, П.В. Николенко, Шкуратник В.Л.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный горный университет (МГГУ) (RU). № 2350922(13) С1; заявл. № 2007144283/28, 30.11.2007; опубл. 27.03.2009 Бюл. № 9.
140. Способ прогноза землетрясений: пат. Рос. Федерация : МПК G01V1/00, G01V3/12 / Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН). № 2488846(13) С1; заявл. № 2011153918/28 29.12.2011; опубл. 27.07.2013.
141. Способ снятия упругих напряжений в земной коре для предотвращения катастрофических землетрясений: пат. Рос. Федерация : МПК G01V1/00, G01V3/12 / Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН). № 2431158(13) С1; заявл. № 2010115855/28 22.04.2010; опубл. 10.10.2011.

142. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
143. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
144. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: «Наука», 2001. – 343 с. ISBN 5-02-024942-4.
145. Стаховский И.Р. Самоподобная сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель // Физика Земли. – 2007. – № 12. – С. 35-47.
146. Сычев В.Н. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки избыточных тектонических напряжений / В.Н. Сычев, А.А. Авагимов, Л.М. Богомолов, В.А. Зейгарник, Н.А. Сычева // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008. – С. 179-189.
147. Сычев В.Н. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона / В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов, А.К. Рыбин, Н.А. Сычева. Под ред. Адушкина В.В. и Кочаряна Г.Г. // Триггерные эффекты в геосистемах. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 316-326.
148. Сычев В.Н. О суточной периодичности и случайной составляющей в потоке сейсмических событий / В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, №6. – С. 68-78.
149. Сычева Н.А. Сеймотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов, В.А. Мухамадеева // Физика Земли. – 2005. – № 11. – С. 62-78.
150. Сычева Н.А. Солнечные вспышки и вариации уровня сейсмического шума и сейсмический режим Северного Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 22–24 июня 2010 г.): материалы всероссийского семинара-совещания. Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. – М.: ГЕОС, – 2010. – С. 326-335.
151. Сычева Н.А. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев // Физика Земли. – 2011. – № 3. С. 55-71.
152. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Доклады РАН. – 1997. – Т. 353, № 4. – С. 542–545.

153. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии / Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова, А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 10. – С. 1641–1649.
154. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмического процесса при облучении коры мощными электромагнитными импульсами. Современные методы обработки, анализа и интерпретации электромагнитных данных / Под ред. В.В. Спичака. – М.: УРСС, 2009. – С. 177–195.
155. Тарасов Н.Т. Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций // ДАН. – 2010. – Т. 433, № 5. – С. 689-692.
156. Тарасов Н.Т. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 06-09 июня 2017 г.): материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. – М.: ГЕОС. – 2017. – С. 356-365.
157. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Докл. РАН. – 1995. – Т. 343, № 4. – С. 543-546.
158. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // Физика Земли. – 2011. – № 10. – С. 82-96.
159. 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 докладов Четвертой тектонофизической конференции, 3-7 октября 2016 г., г. Москва. М.: ИФЗ. – 2016. – Т. 1. – С. 571-577.
160. Трапезников Ю.А. Основные результаты электромагнитных исследований по прогнозу землетрясений на полигонах ИВТАН. Прогноз землетрясений / Ю.А. Трапезников, А.М. Волыхин, Г.Г. Щелочков, В.А. Зейгарник и др. Под ред. Садовского М.А. – Душанбе-Москва.: Дониш, 1989. – № 11. – С. 264–274.
161. Томилин Н.Г. Статистическая кинетика разрушения горных пород и сейсмических явлений / Н.Г. Томилин, Е.Е. Дамаскинская, П.И. Павлов // ФТТ. – 2005. – Т. 47, Вып. 5. – С. 955-959.
162. Турунтаев С.Б. Выявление техногенных изменений сейсмического режима при помощи методов нелинейной динамики / С.Б. Турунтаев, С.В. Ворохобина, О.Ю. Мельчаева // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 52-65.
163. Тяпунина Н.А., Белозерова Э.П. Заряженные дислокации и свойства щелочногаллоидных кристаллов // УФН. – 1988. – Т. 156, № 4. – С. 683-717.

164. Тяпунина Н.А. Влияние магнитного поля на дислокационную неупругость и пластичность кристаллов LiF с различными примесями / Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова, В.Н. Виноградов // ФТТ. – 2003. – Т. 45, № 1. – С. 95-100.
165. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // УФН. – 1968. – Т. 96, № 1. – С. 38-60.
166. Урусовская А.А. О влиянии магнитного поля на предел текучести и кинетику макропластичности кристаллов LiF / А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауэр // Письма в ЖЭТФ. – 1997. – Т. 65, Вып. 6. – С. 470-474.
167. Урусовская А.А. Деформация кристаллов NaCl в условиях совместного действия магнитного и электрического полей / А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, Н.Н. Беккауэр, А.Е. Смирнов // ФТТ. – 2000. – Т. 42, № 2. – С. 267-269.
168. Прочность и деформируемость горных пород / Под ред. А.Б. Фадеева. – М.: Недра, 1979. – С. 5-23.
169. Файнберг Э.Б. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми геомагнитными бурями / Э.Б. Файнберг, А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, Т.А. Васильева // Физика Земли. – 2004. – № 4. – С. 54-62.
170. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика, 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
171. Шемякин Е.И. Синтетическая теория прочности // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 6. – С. 59-65.
172. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. – 359 с. [1] вкл., цв. ISBN 978-5-906284-50-1.
173. Шестопалов И.П. О генерации нейтронов и геомагнитных возмущениях в связи с Чилийским землетрясением 27 февраля и вулканическим извержением в Исландии в марте-апреле 2010 г. / И.П. Шестопалов, С.В. Белов, А.А. Соловьев, Ю.Д. Кузьмин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, – № 1. – С. 130-142.
174. Шестопалов И.П., Харин Е.П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Сборник докладов III международной конференции “Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений”, с. Паратунка. – 2004. – С. 16-21.
175. Щербаков И.П. Особенности временной корреляции образования трещин при ударном разрушении горных пород / И.П. Щербаков, В.С. Куксенко, А.Е. Чмель // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 2. – С. 302-308.

176. 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 Research Lab. – Washington DC, 1995. – N. NRL/MR/6303--95-7791.
177. Afraimovich E.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California / Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2004. – Vol. 6, N. 5. – P. 339-354.
178. Anagnostopoulos G., Papandreou A. Space conditions during a month of a sequence of six  $M > 6.8$  earthquakes ending with the tsunami of 26 December 2004 // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2012. – Vol. 12, N. 5. – P. 1551–1559. – Doi: 10.5194/nhess-12-1551-2012.
179. Arakawa M. Effect of direct and alternating-current electric fields on friction between ice and metal / M. Arakawa, V.F. Petrenko, Ch. Chen // Canadian Journal of Physics. – 2003. – Vol. 81. – P. 209-216.
180. Barbot S. Three-dimensional models of elastostatic deformation in heterogeneous media, with applications to the Eastern California Shear Zone / S. Barbot, Y. Fialko, D. Sandwell // Geophys. Journal International. – 2009. – Vol. 179, N. 1. – P. 500-520. – Doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04194.x.
181. Beridze E. Electroplastic effect / E. Beridze, C. Gennari, F. Michieletto, M. Forzan // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 264-272. – Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.264
182. Bleier T. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments / T. Bleier, C. Dunson, C. Alvarez, F. Freund, and R. Dahlgren // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2010. – Vol. 10, N. 9. – P. 1965-1975. – Doi: 10.5194/nhess-10-1965-2010.
183. Bogomolov L. Do Acoustic Emission Response of Rocks to Electric Power Action as Seismic-electric Effect Manifestation / L.M. Bogomolov, P.V. Il'ichev, V.A. Novikov, V.I. Okunev, V.N. Sychev, A.S. Zakupin // Annals of Geophysics. – 2004. – Vol. 47, N. 1. – P. 65-72.
184. Bogomolov L. Acoustic emission measurements to understand transition straining processes and seismicity triggering by power impacts / L. Bogomolov, A. Zakupin, A. Alad'ev, T. Tullis // Applications of Cybernetics and Informatics in Optics, Signals, Science and Engineering / Ed. by N. Callaos // Proc. 8 th Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, USA. – 2004 a. – Vol. XII. – P. 274-279.

185. Bogomolov L., Zakupin A. Do Electromagnetic Pulses Induce the Relaxation or Activation of Microcracking Rate in Loaded Rocks? (acoustic emission based study) // *Solid State Phenomena*. – 2008. – Vol. 137. – P. 199-208.
186. Boonyongmaneerat Y. Increasing Magnetoplasticity in Polycrystalline Ni-Mn-Ga by Reducing Internal Constraints through Porosity / Y. Boonyongmaneerat, M. Chmielus, D.C. Dunand, P. Müllner // *Physical review letters*. – 2007. – Vol. 99, N. 24. – P. 247201. Doi: 10.1103/PhysRevLett.99.247201.
187. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes // *Science*. – 1966. – Vol. 153, N. 3739. – P. 62-64, 990-992.
188. Chelidze T. Laboratory study of electromagnetic initiation of slip / T. Chelidze, N. Varamashvili, M. Devidze, Z. Tchelidze, V. Chikhladze, T. Matcharashvili // *Annals of Geophysics*. – 2002. – Vol.45, No 5. – P. 587-598.
189. Chelidze T. Electromagnetic initiation of slip: laboratory model / T. Chelidze, A Gvelesiani, N. Varamashvili, M. Devidze, V. Chikhradze, Z. Tchelidze, M. Elashvili // *Acta Geofizika Polonica*. – 2004. – Vol. 52, No. 1. – P.49 -62.
190. Chelidze T. Do Influence of Strong Electromagnetic Discharges on the Dynamics of Earthquakes Time Distribution in the Bishkek Test Area (Central Asia) / T. Chelidze, V. De Rubeis, T. Matcharashvili, P. Tosi // *Annals of Geophysics*. – 2006. – Vol. 49, N. 4/5. – P. 961-975.
191. Chelidze T. Preliminary results of forced stick-slip synchronization area studies: experiments and theoretical models / T. Chelidze, T. Matcharashvili, E. Mepharidze, D. Tephnadze, N. Zhukova // *Physics of Solid Earth*. – 2016. – Vol. 19, Issue A. – P. 35-48.
192. Chelidze T., Lursmanashvili O. Electromagnetic and mechanical control of slip: laboratory experiments with slider system // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2003. – Vol. 10, N. 6. – P. 557-564.
193. Chelidze T.L, Matcharashvili T.N. Electromagnetic control of earthquake dynamics? // *Computers & Geosciences*. – 2003. – Vol. 29, N. 5. – P. 587-593. – Doi:10.1016/S0098-3004(03)00040-2.
194. Chelidze T.L, Matcharashvili T.N. Complexity of seismic process; measuring and applications – A review // *Tectonophysics*. – 2007. – Vol. 431, N. 1-4. – P. 49-60. – Doi:10.1016/j.tecto.2006.05.029.
195. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 287, N. 2. – P. 276–287.
196. 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.

197. Doomhof D. Compaction and Subsidence / D. Doomhof, T.G. Kristiansen, N.B. Nagel, P.H. Pattillo, C. Sayers // *Oilfield Review*. – 2006. – N. 3 (Autumn). – P. 50-68.
198. Dudley J.W. ISRM Suggested Method for Uniaxial-Strain Compressibility Testing for Reservoir Geomechanics / J.W. Dudley, M. Brignoli, B.R. Crawford, R.T. Ewy, D.K. Love, J.D. McLennan, G.G. Ramos, J.L. Shafer, M.H. Sharf-Aldin, E. Siebrits, J. Boyer, M.A. Chertov // *Rock Mech. Rock Eng.* – 2016. – Vol. 49, Issue 10. – P. 4153-4178. – Doi: 10.1007/s00603-016-1055-4.
199. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2003. – Vol. 3, N. 3/4. – P. 171-177.
200. Freund F. Charge generation and propagation in rocks // *J. Geodynamics*. – 2002. – V. 33. – P. 545-572.
201. Freund F. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions / F.T. Freund, A. Takeuchi, B.W.S. Lau // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2006. – Vol. 31. – P. 389-396. – Doi: 10.1016/j.pce.2006.02.027
202. Freund F., Pilorz S. Electric currents in the Earth crust and the generation of pre-earthquake ULF signals. / *Frontier of Earthquake Prediction Studies*. Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Nihon Senmontosho Publ. – 2012. – C. 464-508.
203. Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I. Patterns of Stress Corrosion: Geometry of the Principal Stresses // *Pure and Applied Geophysics*. – 1983. – Vol. 121, No. 3. – P. 477-494.
204. Gavrilov V.A. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks / V.A. Gavrilov, I.A. Panteleev, G.V. Ryabinin, Yu.V. Morozova // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2013. Vol. 13, Issue 1002. – Doi: 10.2205/2013ES000527. P. 1-16.
205. Gorshkov A.I. Recognition of Earthquake-Prone Areas: Validity of Results Obtained from 1972 to 2000 / A.I. Gorshkov, V.G. Kossobokov, E.Ya. Rantsman, A.A. Soloviev // *Computational Seismology and Geodynamics*. – 2005. – Vol. 7. – P. 37-44.
206. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica*. North-Holland Publishing Company. – 1983, – Vol. 9D. – P. 189-208.
207. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the earth and related phenomena. 2<sup>nd</sup> edition. – Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1954. – 310 p.
208. Han P. Further investigations of geomagnetic diurnal variations associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0) / P. Han, K. Hattori, G. Xu, R. Ashida, Ch.-H. Chen, F. Febriani, H. Yamaguchi // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 114. – P. 321-326.

209. Hardy H.R.Jr. Acoustic Emission/Microseismic Activity: Volume 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications. – CRC Press, 2005. – T. 1. – 308 p.
210. Ishimoto M., Iida, K. Observations sur les Seismes Enregistres par le Microsismographe Construit Dermerment // Bull. Earthquake Research Institute Tokyo University. – 1939. – Vol. 17. – P. 443-478.
211. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv fur das Eisenhüttenwesen. – 1953. – Vol. 24, No. 1/2. – P. 43-45.
212. Keilis-Borok V.I. The lithosphere of the Earth as nonlinear system with implications for earthquake prediction // Reviews of Geophys. – 1990. – Vol. 28, No. 1. – P. 5-34.
213. Kosterz G., Müllner P. Magnetoplasticity // Zeitschrift für Metallkunde. – 2005. – Vol. 96, N. 7. – P. 703-709.
214. Kuksenko V. A two-stage model of fracture of rocks / V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaya, D. Lockner // Pure and Applied Geophysics. – 1996. – Vol. 146, No. 2. – P. 253-263.
215. Kuksenko V. The role of driving rate in scaling characteristics of rock fracture / V. Kuksenko, N. Tomilin, A. Chmel // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2005. – Vol. 06, N. P06012. – Doi:10.1088/1742-5468/2005/06/P06012.
216. Liu J. Y. et al. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly / J.Y. Liu, Y.I. Chen, Y.J. Chuo, C.S. Chen // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2006. – Vol. 111, N. A5. P. 1-5. Doi: 10.1029/2005JA011333.
217. Lockner D. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite / D.A. Lockner, J.D. Byerlee, V.S. Kuksenko, A. Ponomarev, A. Sidorin // Nature. – 1991. – Vol. 350, No. 6313. – P. 39-42.
218. Love J.J., Thomas J.N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // Geophysical Research Letters. – 2013. – Vol. 40. – P. 1-6. – Doi:10.1002/grl.50211.
219. Matcharashvili T.N. Influence of High Energy Electromagnetic Pulses on the Dynamics of the Seismic Process Around the Bishkek Test Area (Central Asia) / T.N. Matcharashvili, T.L. Chelidze, N.N. Zhukova // Pure Appl. Geophys. – 2015. – Vol. 172, N. 7. – P. 1893-1908. – Doi: 10.1007/s00024-014-0860-5.
220. McLaskey G.C. Laboratory Generated M -6 Earthquakes / McLaskey G.C., B.D. Kilgore, D.A. Lockner, N.M. Beeler // Pure and Applied Geophysics. – 2014. – Vol. 171, No. 10. – P. 2601-2615.
221. Mogi K. The fracture of semi-infinite body caused by inner stress origin and relation to earthquake phenomena (Fist Paper) // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1962. –

- Vol. 40. – P. 815-829.
222. Mogi K. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous material and its relations to earthquake phenomena // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1962 a. – Vol. 40. – P. 125-173.
223. Moldovan I.A. Correlation of geomagnetic anomalies recorded at Muntele Rosu Seismic Observatory (Romania) with earthquake occurrence and solar magnetic storms / I.A. Moldovan, A.O. Placinta, A.P. Constantin, A.S. Moldovan, C. Ionescu // Annals of Geophysics. – 2012. – Vol. 55, N. 1. – P. 125-137. – Doi: 10.4401/ag-5367
224. Molotskii M. Theoretical basis for electro- and magnetoplasticity // Materials Science and Engineering A. – 2000. – Vol. 287. – P. 248-258.
225. Molotskii M., Flerov V. Dislocation Paths in a Magnetic Field // The Journal of Physical Chemistry B. – 2000. – Vol. 104, N. 16. – P. 3812-3816.
226. Molotskii M., Fleurov V. Spin Effects in Plasticity // Phys. Review Letters. 1997. Vol. 78, N. 14. – C. 2779-2782.
227. Mugele F. Electrowetting: a convenient way to switchable wettability patterns / F. Mugele, A. Klingner, J. Buchrle, D. Steinhauser, S. Herminghaus // J. of Physics: Condensed Matter. – 2005. – Vol. 17. – P. 5559-5576. – Doi:10.1088/0953-8984/17/9/016.
228. Müllner P. A microscopic approach to the magnetic-field-induced deformation of martensite (magnetoplasticity) / P. Müllner, V.A. Chernenko, G. Kostorz // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 267, N. 3. – P. 325-334.
229. Müllner P. Modelling magnetoelasticity and magnetoplasticity with disconnections and disclinations / P. Müllner, A.S. Geleynse, D.R. Carpenter, M.S. Hagler, M. Chmielus // Materials Research Society, Online Proceedings Library Archive. – 2007. – Vol. 1050. Ch. 1050-BB02-01.
230. Novikov V.A. et al. Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models / V.A. Novikov, V.I. Okunev, V.N. Klyuchkin, J. Liu, Yu.Ya. Ruzhin, X. Shen // Earthquake Science. Online First Articles. – 2017. Doi: 10.1007/s11589-017-0181-8.
231. Obert L., Duvall W.I. Use of Sub audible Noises for the Prediction of Rock Bursts. Part II. – USBM: Mines Rep, 1942. – Vol. 3654.
232. Ohnaka M., Mogi K. Frequency dependence of acoustic emission activity in rocks under incremental, uniaxial compression // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1981. – Vol. 56. P. 67-89.
233. Ohnaka M., Mogi K. Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure // Journal of

- Geophysical Research. – 1982. – Vol. 87, N. B5. – P. 3873-3884.
234. Ouzounov D. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes / D. Ouzounov, D. Liu, K. Chunli, G. Cervone, M. Kafatos, P. Taylor // *Tectonophysics*. – 2007. – Vol. 431, N. 1-4. – P. 211-220.
235. Pallas-Areny R., Webster J.G. *Sensors and Signal Conditioning*. New-York: Wiley-12 Interscience, 1991. – ISBN 0471332321.
236. 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 // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2015. Vol. 15, Issue 4003. – Doi:10.2205/2015ES000557. P. 1-14.
237. Petrenko V.F. The effect of static electric fields on ice friction // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 76, N. 2. – P. 1216-1219.
238. Petrenko V.F. *Study of the Physical Mechanisms of Ice Adhesion*. – Thayer School of Engineering, Dartmouth College. – 2003. – 37 p.
239. Petrenko V., Whitworth R. *Physics of Ice*. – NY.: Oxford University Press Inc., 2002. – 408 p. – ISBN-13: 9780198518945
240. Ponomarev A.V. Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones / A.V. Ponomarev, A.D. Zavyalov, V.D. Smirnov, D.A. Lockner // *Tectonophysics*. – 1997. – Vol. 277. – P. 57-81.
241. Rabeh T. Strong earthquakes associated with high amplitude daily geomagnetic variations / T. Rabeh, M. Miranda, M. Hvozdará // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2010. – Vol. 53, N. 3. – C. 561-574.
242. Rahim Z. Using the NE5521 signal conditioner in multi-faceted applications // *Philips Semiconductors*. – 1988.
243. Scholz C.H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1968. – Vol. 58, N. 1. – P. 399-415.
244. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature*. – 1998. – Vol. 391. – P. 37-42.
245. Schmidt E.D.D. Linear displacement – linear variable differential transformers – LVDTs, Schaevitz Sensors. [Электронный ресурс] – <http://www.te.com/usa-en/products/brands/meas.html?tab=pgp-story>
246. Smirnov V.B. Acoustic structure in rock samples and the seismic process / V.B. Smirnov, A.V. Ponomarev, A.D. Zavyzlov // *Physics of the Solid Earth*. – 1995 – Vol. 31, No. 1. – P. 38-58.
247. Sornette D., Sammis C.G. Complex critical exponents from renormalization group

- theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions // *Journal de Physique I*. – 1995. – V. 5. – P. 607-619.
248. Surkov V., Hayakawa M. *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*. – London, New York: Springer, 2014. – 495 p. ISBN 978-4-431-54366-4. Doi: 10.1007/978-4-431-54367-1.
249. Suzuki Z. *A Statistical Study on the Occurrence of Small Earthquakes I* // *Science Reports Tohoku University, Ser. 5 Geophysics*. – 1953. – Vol. 5, N. 3. – P. 177-183.
250. Suzuki Z. *A Statistical Study on the Occurrence of Small Earthquakes II* // *Science Reports Tohoku University, Ser. 5 Geophysics*. – 1955. – Vol. 6, N. 2. – P. 105-119.
251. 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.
252. Telesca L. *Investigating non-uniform scaling behavior in Ultra Low Frequency (ULF) earthquake-related geomagnetic signals* / L. Telesca, V. Lapenna, M. Macchiato, K. Hattori // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2008. – Vol. 268, N. 1-2. – P. 219-224.
253. Teunissen J.G., Montenbruck O. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*. – Springer International Publishing AG, 2017. – ISBN: 978-3-319-42926-7. – DOI 10.1007/978-3-319-42928-1.
254. Utsu T. *A statistical study on the occurrence of aftershocks* // *Geophys. Mag.* – 1961. – Vol. 30. – P. 521-605.
255. Utsu T. *The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity* / T. Utsu, Y. Ogata, R.S. Matsu'ura // *Journal of Physics of the Earth*. – 1995. – Vol. 43, N. 1. – P. 1-33.
256. Vallen System [Электронный ресурс] – <http://www.vallen.de>.
257. Vallen AE Suite V6. – 2010. – 307 p. [Электронный ресурс] – <http://vallen.de/downloads/>
258. Varnes D.J. *Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity* // *Pure and Applied Geophysics*. – 1989. – Vol. 130, No. 4. – P. 661-686.
259. Vinogradov S.D. *Experimental Observations of Elastic Wave Radiation Characteristics from Tensile Crack and Pre-existing Shear Faults* // *Pageoph*. – 1978. – Vol. 116, N. 4-5. – P. 888-899.
260. White P.J. *Advances in Subsidence Modeling of Exploited Geothermal Fields* / P.J. White, J.V. Lawless, S. Terzaghi, W. Okada // *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April 2005*. P. 24-29.

261. Xu G. Anomalous behaviors of geomagnetic diurnal variations prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9. 0) / G. Xu, P. Han, Q. Huang, K. Hattori, F. Febriani, H. Yamaguchi // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2013. – Vol. 77. – P. 59-65.
262. Zakupin A.S. The Effect of Crossed Electric and Magnetic Fields in Loaded Rock Specimens / A.S. Zakupin, L.M. Bogomolov, N.A. Sycheva // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. Vol. 521–522. – P. 401–404.
263. 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*. Croatia, Rijeka: InTech, 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>.
264. 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 a. – P. 107-114.
265. Zaliapin I. Premonitory spreading of seismicity over the faults' network in southern California: Precursor Accord / I. Zaliapin, V. Keilis-Borok, G. Axen // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – Vol. 107, No. B10. – ESE 5-1-ESE 5-15. – Doi: 10.1029/2000JB000034.
266. Zhurkov S.N. Principles of the kinetic approach of fracture prediction / S.N. Zhurkov, V.S. Kuksenko, V.A. Petrov // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 1984. Vol. 1, No. 3. – P. 271-274.