

На правах рукописи



**БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович**

**ОТКЛИКИ ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ ГЕОСРЕДЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВИБРАЦИЙ**

Специальность 25.00.10-  
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научная станция РАН в г. Бишкеке.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Кочарян Геворг Грантович (ФГБУН Институт динамики геосфер  
РАН).

доктор физико-математических наук  
Гохберг Михаил Борисович (ФГБУН Институт физики Земли им.  
О.Ю. Шмидта РАН)

доктор физико-математических наук  
Наймарк Олег Борисович (ФГБУН Институт механики сплошных  
сред УрО РАН).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Геофизическая служба РАН

Защита диссертации состоится «14 марта» 2013 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д002.050.01 ФГБУН Институт динамики геосфер РАН по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д.38, корп.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь Диссертационного  
совета,  
кандидат физико-математических наук

В.А. Рыбаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Уменьшение последствий природных и природно-техногенных землетрясений – сложная научно-техническая и социальная проблема, приобретающая все большее значение в связи с возрастанием техногенной нагрузки на природный комплекс (расширением горнодобывающих и опасных производств, добычи нефти и газа, ростом плотности населения). До сих пор следствием возрастающего техногенного воздействия на земную кору было лишь ухудшение сейсмогеоэкологической обстановки, усложняющее и удорожающее добычу полезных ископаемых и другую деятельность в сейсмически активных районах. Эффекты наведенной сейсмичности проявились при закачке жидких промышленных отходов в скважины, расположенные в разломных зонах, при изменениях уровня воды в крупных водохранилищах и сопутствующих вибровозмущениях при водосбросах, при проведении подземных взрывов, при разработке полезных ископаемых (горно-тектонические удары) и т.п. Однако, как показано в работах российских ученых, при выполнении определенных условий контролируемое воздействие на геосреду может давать и позитивный результат: перераспределение сейсмичности в виде уменьшения количества относительно крупных землетрясений за счет увеличения числа слабых событий и высвобождаемой ими энергии. Было обращено внимание на принципиальную важность корреляций приростов микросейсмичности с проведением вибросейсмических зондирований при помощи мощных вибраторов с ионосферными магнитными возмущениями, а также с электростимуляциями земной коры с использованием геофизических МГД-генераторов. При анализе примеров кратковременной активации сейсмичности отмечалось, что воздействия с помощью вибраций и электромагнитных полей (в силу их универсальности и экологичности) наиболее перспективны для исследований по проблеме разрядки избыточных напряжений в земной коре. Расчет был сделан на то, что релаксация напряжений может происходить вследствие ускорения высвобождения энергии при стимулированном приросте числа слабых событий (мощность же “накачки” энергии при тектоническом процессе считалась неизменной). Пример реализации такого сценария был продемонстрирован в известных работах Садовского М.А., Мирзоева К.М. и др., посвященных влиянию вибраций от водосброса на плотине Нурекской ГЭС, Таджикистан на режим выделения сейсмической энергии.

Случай воздействий на геосреду электромагнитных импульсов, генерируемых при пусках геофизических МГД-генераторов, анализировался в работах Тарасова Н.Т. с соавторами из ИФЗ РАН и ОИВТ РАН. В этом случае обнаруженный после проведения электростимуляций прирост сейсмичности на территории Гармского и Бишкекского полигонов также происходил за счет увеличения количества слабых событий. В недавних работах группы авторов из Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) получен аналогичный по смыслу результат, суть которого – триггерное влияние на локальную сейсмичность электромагнитных импульсов обычного конденсаторно-тиристорного источника зондирований земной коры, применяемого в настоящее время вместо МГД-генераторов. По данным этих работ кратковременный прирост сейсмической активности, коррелирующий с периодами проведения на Бишкекском полигоне сеансов электростимуляций в экспериментальном режиме, не сопровождался статистически значимым уменьшением числа умеренных по энергии событий с классами  $K=11-13$ . Отличие результатов в этом аспекте от случая вибровоздействий связано, по-видимому, с недостаточной длительностью периода наблюдений, и, как следствие, небольшим числом событий. Но оно может отражать обстоятельство, что лишь при некоторых условиях (или некоторых стадиях сейсмического процесса) инициированный извне прирост слабой сейсмичности дает уменьшение количества более сильных событий, т.е. разрядку избыточных напряжений. Альтернативой сценарию энергетического “размена” сильных событий на большее число слабых может быть избирательная активация событий в некотором диапазоне классов или прирост во всех представительных классах, соответствующий сохранению самоподобия (неизменности наклона графика повторяемости землетрясений). С учетом изложенного и того, что механизм триггерного воздействия электромагнитных импульсов и вибраций еще не выяснен полностью, представляет несомненный интерес продолжение исследований реакции среды на импульсные воздействия физических полей (так называемые энерговоздействия, ЭВ). С практической стороны, интерес к этим вопросам определяется их взаимосвязью с развитием технологий активного сейсмического мониторинга, основанного на изучении откликов геосреды на тестовые воздействия вибраций или электромагнитных импульсов с применением мощных источников, т.е. с разработкой новых подходов к прогнозированию землетрясений.

Существенный вклад в исследования реакции среды на энерговоздействия вносит физическое

моделирование на образцах. В модельных экспериментах по триггерным воздействиям физических полей на процесс разрушения основной составляющей является регистрация акустической эмиссии (АЭ), отражающей и сопровождающей структурные изменения в образцах горных пород и других гетерогенных материалов. В экспериментах, проведенных в нескольких лабораториях (ИФЗ РАН, ОИВТ РАН, ИС РАН) была убедительно продемонстрирована высокая чувствительность акустической эмиссии к воздействию вибраций либо электромагнитных импульсов. Эффект отклика АЭ на воздействие таких нестационарных факторов установлен для образцов с самыми разными физико-химическими свойствами. С позиций того, что до некоторого предела материалы образцов обладают способностью к релаксации (т.е. могут приспосабливаться к действующему напряжению), внешняя стимуляция дефектообразования, проявляющаяся как прирост АЭ, является благоприятным фактором (темп релаксации возрастает). Качественное сходство откликов на импульсные воздействия активности АЭ и вариаций сейсмичности констатировалось в ряде работ. Соответствие результатов лабораторного моделирования ЭВ с натурными наблюдениями естественно было бы рассматривать как свидетельство, пусть косвенное, возможности управления сейсмическим процессом при помощи физических полей. Однако в экспериментальных исследованиях на образцах упор был сделан, прежде всего, на обнаружении откликов акустической эмиссии (трещинообразования) на модельные энерговоздействия. Вопрос о том, наблюдается ли при стимулировании АЭ вибрациями или электромагнитными импульсами не просто прирост количества событий, а именно отклик с перераспределением амплитуды и энергии сигналов АЭ (т.е. прообраз размена сильного землетрясения на серию слабых) исследован пока недостаточно. Таким образом, актуально проведение обобщающего исследования откликов геосреды на воздействия электромагнитных импульсов и вибраций, охватывающего натурные проявления чувствительности геосреды к энерговоздействиям, акустоэмиссионные эффекты при воздействии физических полей на нагруженные образцы горных пород и разработку физических моделей, адаптированных для описания импульсных воздействий. Основой для такого исследования, проводимого в рамках данной диссертационной работы, являются результаты, полученные автором в течение 1996-2011 гг.

**Цель работы** - установить фундаментальность эффекта сейсмо- и акустоэмиссионного отклика материалов геосреды на действие вибраций и импульсных электромагнитных полей. Обобщить результаты о свойствах этих эффектов, проявляющихся сходным образом на различных структурно-масштабных уровнях и определяющих возможность использования энерговоздействий для активного мониторинга и управляемого влияния на процесс разрушения геосреды.

**Основные задачи работы:**

-Аналитический обзор существующих представлений о механизмах влияния электромагнитных импульсов и вибраций на неупругое деформирование геоматериалов на различных структурно-масштабных уровнях. Развитие на этой основе методики натурных и лабораторных исследований эмиссионных эффектов при воздействии на геосреду нестационарных физических полей.

-Анализ и обобщение сейсмологических данных о взаимосвязи вариаций сейсмичности на территории Бишкекского полигона (Северный Тянь-Шань). Сопоставление явлений наведенной сейсмичности при воздействии естественных факторов и техногенных полей. Выявление закономерностей сейсмических откликов на энерговоздействия.

-Выполнение комплекса лабораторных экспериментов для исследования влияния вибро- и электромагнитных воздействий на процесс разрушения нагруженных образцов горных пород.

-Сравнение эмиссионных откликов на натурном и лабораторном масштабе. Интерпретация и обобщение результатов о стимулирующем влиянии электромагнитных импульсов и вибраций на микросейсмичность и трещинообразование в образцах (АЭ).

-Разработка физических моделей взаимодействия геосреды с динамическими нагрузками (вибрациями и электромагнитными импульсами), описывающих возникновение эмиссионных откликов и возможность релаксации напряженного состояния среды.

**Исходным материалом** диссертационной работы являются данные о сейсмичности Северного Тянь-Шаня, полученные при помощи сейсмической телеметрической сети KNET, материалы электромагнитного мониторинга, проводимого в ИС РАН, а также данные геоакустических измерений. Объектом исследования является также банк данных по акустической эмиссии образцов горных пород и искусственных гетерогенных материалов, испытанных на ползучесть при ступенчатом сжатии и дополнительном воздействии электромагнитных импульсов или вибраций.

**Основной защищаемый результат** заключается, по мнению автора, в обосновании фундаментальности выявленного (при его активном участии) эффекта эмиссионного отклика материалов земной коры, находящихся при околокритических нагрузках, на воздействия на них электромагнитных импульсов или вибраций, ввиду масштабируемости этого эффекта (качественного сходства откликов в широком диапазоне характерных длин) и его нечувствительности к вещественному составу, физико-химическим и реологическим свойствам геоматериалов, а также к выбору параметров источника воздействий.

**На защиту** также выносятся следующие **результаты и положения**:

-Показано, что прирост активности АЭ образцов горных пород, испытываемых при постоянном одноосном сжатии, стимулируется вибрациями даже малых амплитуд, меньших, чем в случае эффектов виброупругости и акустопластичности.

-Установлено существование электро-акустоэмиссионного эффекта, заключающегося в приросте активности АЭ нагруженных образцов геоматериалов при воздействии на них одиночных или периодически повторяющихся импульсов электрического поля с напряженностью 200 – 5000 В/м и отличающегося от необратимого возрастания активности АЭ при макроразрушении.

-Показано, что малоамплитудные события дают основной вклад в акустоэмиссионные отклики образцов, находящихся при одноосном сжатии в диапазоне нагрузок 0,7- 0,9 от уровня разрушения. При этом в случае откликов на вибровоздействия количество событий АЭ больших амплитуд снижается, а при активации АЭ электрическими импульсами амплитудное распределение сигналов АЭ остается практически неизменным, т.е. сохраняется самоподобие процесса трещинообразования.

-Предложен способ повышения эффективности воздействия физических полей на скорость трещинообразования нагруженных образцов геоматериалов при комбинированном воздействии скрещенных электрического и магнитного полей, источники которых синхронизируются по фазе. Прирост активности АЭ, инициированный скрещенными полями существенно больше, чем при откликах только на один возмущающий фактор (электрическое либо магнитное поле).

-По краткопериодным вариациям суточного числа землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня обнаружено влияние на локальную сейсмичность однополярных токовых импульсов длительностью более 9 секунд, применяемых при некоторых режимах электрзондирования на Бишкекском геодинамическом полигоне. Активация происходит, в основном, за счет увеличения числа слабых событий из представительного диапазона энергетических классов. Выявлена роль скин - эффекта в эффективности влияния токовых импульсов при электрзондированиях.

-Показано с помощью разработанных моделей триггерных эффектов при деформировании материалов геосреды в присутствии физических полей, что механизм влияния электромагнитных импульсов может сводиться к возникновению небольшой осциллирующей добавки деформации.

**Научная новизна** определяется следующими результатами.

-На основании сформированной обширной базы данных показано, что кратковременный прирост активности АЭ под влиянием электромагнитных импульсов наблюдается в нагруженных образцах материалов с разнообразными свойствами: с хрупким и псевдопластичным типами разрушения, с наличием или отсутствием пьезоэлектрических фракций, жидкой фазы и др.

-Исследование влияния слабых низкочастотных вибраций и электромагнитных импульсов проведено по унифицированной методике. Выявлено сходство откликов АЭ образцов горных пород, испытываемых при постоянном одноосном сжатии на воздействие вибраций и электромагнитных импульсов, свидетельствующее об общности механизмов возбуждения этих откликов.

-Установлены количественные характеристики стимулирующего влияния различных воздействий (пробная механическая пригрузка, вибрации, электромагнитные импульсы, комбинированные воздействия нескольких источников) на прирост числа событий АЭ. Минимальное значение поглощенной энергии в расчете на одно условное событие АЭ, инициированное внешним полем, оценено как 3-20 мкДж.

-Обнаружено, что серии однополярных токовых импульсов мощного электроимпульсного источника, используемого на Бишкекском полигоне для глубинного зондирования коры, могут влиять на вариации сейсмичности, аналогично электрвоздействию при пусках геофизических МГД-генераторов.

-Отмечено, что прирост сейсмичности (суточного числа событий) после дат электрзондирований в экспериментальном режиме имеет место и на всей исследуемой территории,

и на небольшом ее участке вокруг первичного диполя. Подтверждено соответствие эффекта сейсмических откликов на ЭВ с общефизическим принципом близкодействия. Однако основной вклад в прирост сейсмичности после электроразрядов в экспериментальном режиме дают области, где сейсмический процесс (деструкция среды) протекает наиболее интенсивно.

-Найдены проявления реакции среды на электровоздействие при экспериментальных разрядах на Бишкекском полигоне в изменениях параметров очагов землетрясений: расширение направленности осей сжатия и растяжения на угловой диаграмме распределения количества событий с известными фокальными механизмами по азимутам этих осей.

-Отмечена аналогия откликов сейсмичности и откликов сигналов АЭ на внешние электровоздействия, указывающая, что на разных масштабах, от сантиметрового (лабораторного) до натурального (единицы - десятки км), процесс неупругого деформирования материалов геосреды чувствителен к электромагнитным импульсам.

-На основе физических моделей предложены масштабные зависимости параметров электровоздействия: амплитуды электрического поля (случай образцов) и амплитуды плотности тока (электроразрядов), при которых могут возбуждаться отклики эмиссионных сигналов геосреды.

### **Практическая значимость.**

Результаты исследований откликов слабой сейсмичности на электромагнитные импульсы имеют значение для развития методов активного сейсмоэлектрического мониторинга среды с применением уже освоенных мощных источников. Развернутые исследования реакции геосреды на тестовые электроимпульсные воздействия (активный сейсмический и геоакустический мониторинг) могут дать важную информацию для разработки новых подходов к предсказанию землетрясений.

Полученные результаты способствуют пониманию различных проявлений сейсмичности, наведенной нестационарными (динамическими факторами), в частности электромагнитным воздействием. Они могут использоваться в качестве одной из принципиальных основ для разработки методов снижения избыточных напряжений в геосреде и управления сейсмическим процессом.

Практическое значение для методов неразрушающего контроля состояния неметаллических материалов и конструкций могут иметь аппаратно - методические разработки по широкополосной регистрации АЭ в экспериментах с модельными энерговоздействиями. При одноосном сжатии наличие задержанного отклика АЭ на тестирующие электроимпульсы при квазистационарном или затухающем фоновом режиме АЭ соответствует уровню нагрузки 0,7-0,9 от максимального. Сам отклик свидетельствует о приближении к критическому состоянию, а задержка – о сохранении некоторого ресурса прочности. Отсутствие эмиссионного отклика указывает на умеренный (заведомо приемлемый для прочности) уровень нагрузки и энергонасыщенности испытываемого материала или изделия.

**Достоверность результатов и выводов** обеспечивается значительным объемом накопленных данных, тщательной подготовкой и тестированием алгоритмов для обработки данных, применением нескольких способов анализа данных, согласованностью результатов натуральных, лабораторных и теоретических исследований и соответствием с результатами других работ по смежной тематике. Достоверность результатов экспериментов также определяется использованием надежной методики испытания образцов на прессах, многократно проверенной в ФТИ им. Иоффе и ВНИМИ РАН (С-Петербург), ИФЗ РАН (Москва), ОИВТ РАН (Москва), ИФиМГП НАН КР (Бишкек) и др. институтах; применением современной автоматизированной системы регистрации АЭ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка использованной литературы. Она включает 359 страниц текста, 157 рисунков и 31 таблицу. Список литературы содержит 553 библиографических наименований

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 79 научных публикациях, в том числе в 33 статьях в рецензируемых журналах и 42 публикациях в периодических научных сборниках, трудах международных и всероссийских конференций, 2 препринтах и 2 электронных книгах.

**Апробация работы.** Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены и получили признание на ряде международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе: на Межд. симпозиуме «Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика», Алма-Ата, 1997; на первом Международном воркшопе «Геодинамика Тянь-Шаня», Бишкек 2000 г.; на Межд. осеннем конгрессе AGU, San Francisco, USA, 2000; на 2-м Межд. симпозиуме «Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов», Бишкек 2002 г.; на 6-ом Межд. семинаре «Физические основы

прогнозирования разрушения горных пород», Красноярск, 2002 г.; на 3-ем Межд. воркшопе по магнитным, электрическим и электромагнитным методам в сейсмологии и вулканологии (MEESM-2003), Москва, 2002 г.; на 2-ом Казахстанско-Японском семинаре «Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений», Алма-Ата, 2002 г.; на Межд. симпозиуме «Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия» Новосибирск 2003 г.; на 5-ом Казахстанско-Китайском симпозиуме «Современная геодинамика и сейсмический риск Центральной Азии», Алма-Ата, 2003 г.; на Казахстанско-Российском симпозиуме «Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска», Алма-Ата, 2004 г.; на 8-ом Межд. конгрессе «Systemics, Cybernetics and Informatics», Orlando, USA, 2004 г.; на 7-ом Межд. семинаре по физике разрушения горных пород, Борок, 2005 г.; на третьем Международном симпозиуме «Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке», Бишкек, 2005 г.; на Седьмых геофизических чтениях имени В.В. Федынского «Геофизика XXI столетия: 2005 год», Москва, 2006 г.; на 4-ой и 5-ой Межд. конференциях «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений», пос. Паратунка, Камчатка, 2007, 2010 гг; на 11-ом Межд. семинаре «Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твердых телах», Тула, 2007 г.; на Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, 2007, 2009, 2011 гг; на семинаре «Актуальные проблемы физики и механики нано- и мезоскопических систем», Пермь, 2007 г.; на Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В.Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН», Москва, 2008 г.; на 4-ом Межд. симпозиуме «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы», Бишкек, 2008 г.; на Межд. семинаре «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения», Томск, 2008 г; на 20-й сессии Российского акустического общества, Москва, 2008 г.; на 18-ой Всероссийской конференции «Петербургские чтения по проблемам прочности и роста кристаллов», Санкт-Петербург, 2008 г.; на Всероссийском совещании «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия», Иркутск, 2009 г.; на Межд. конференции «Физическая мезомеханика, компьютерное конструирование и разработка новых материалов», Томск, 2009 г.; на 8-ом Межд. семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», Санкт-Петербург, 2010 г.; на 5-ой Межд. конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», пос. Паратунка, Камчатский край, 2010 г.; на Всероссийском семинар-совещании «Триггерные эффекты в геосистемах», Москва, 2010 г.; на 5-ом Межд. симпозиуме «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», Бишкек, 2011 г.; на 11-ой Ген. ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (IUGG), Мельбурн, Австралия, 2011 г.; на конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе», Южно-Сахалинск, 2011 г., на 33-ей Ген. ассамблее Европейской сейсмологической комиссии, Москва, 2012.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач, разработке методики исследования, непосредственном выполнении экспериментальных и теоретических работ и формулировке основных результатов и выводов диссертации. Автор был одним из инициаторов и участников разработки и создания экспериментальных комплексов, использованных при выполнении работы, лично провел экспериментальные исследования на образцах геоматериалов. Под непосредственным руководством автора были усовершенствованы алгоритмы и программы для обработки сейсмических и акустоэмиссионных данных, а также выполнялись расчеты. Для теоретического объяснения полученных результатов автором непосредственно разработаны физические модели первичного преобразования энергии электромагнитных импульсов в упругие волны, а также феноменологическая модель потока событий. Контроль достоверности расчетов и интерпретация выходных данных результатов, а также комплексирование результатов (сопоставление материалов лабораторного и натурального эксперимента) проводились диссертантом. Лично им написано более половины объема публикаций по теме диссертации и сделаны выводы.

Автор принимал участие в качестве ответственного исполнителя разделов в выполнении следующих проектов:

- «Разработка основ технологий искусственной разрядки тектонических напряжений в геологической среде для снижения сейсмической опасности», Минпромнауки РФ, Госконтракт №43044112646, 2002-2004,

- проектов по грантам Российского фонда фундаментальных исследований «Экспериментальное и теоретическое моделирование воздействий электромагнитного и вибрационного полей на геологическую среду», РФФИ №03-05-65077-а; «Акустоэмиссионные и сейсмологические проявления триггерных эффектов и необратимости при деформировании геоматериалов», РФФИ №07-05-00687-а; «Изучение механизма генерации тектонических напряжений в земной коре внутриплитовых орогенов», РФФИ №09-05-00687-а; «Разработка физических основ искусственного электромагнитного воздействия на

деформационные процессы в земной коре”, РФФИ №09-05-00059-офи-м; “Исследование влияния электромагнитных полей на микроразрушение в геологической среде методами активного геоакустического мониторинга и лабораторного моделирования”, РФФИ №10-05-00231-а; “Разработка механизмов взаимодействия физических полей с горными породами в критическом напряженно-деформированном состоянии”, РФФИ № 11-05-12042-офи-м;

- “Исследование упругого энерговыделения гетерогенных сред при дилатансионном деформировании в присутствии вибраций”, по гранту CRDF YG1-2082, 2001-2002; “Исследование приливных деформационных волн и виброэффектов в нагруженных геоматериалах”, по гранту CRDF YG1-2326- VI-02, 2002-2004.

- “Поиск электромагнитных предвестников землетрясения на основе объединения спутниковых и наземных средств”, 7-я рамочная программа ЕС, проект 262005, 2010-2011.

Результаты исследований, полученные диссертантом в рамках этих проектов, также вошли в диссертационную работу.

### **Благодарности.**

Автор считает важным выразить признательность директорам институтов, где проводились исследования: Б.В.Левину (ИМГиГ ДВО РАН, 2008-2012 гг) и В.А. Зейгарнику (НС РАН, 1999-2008 гг). Искренне благодарен соавторам публикаций, а также всем коллегам из НС РАН, ИФЗ РАН, ИДГ РАН, ИМГиГ ДВО РАН, ОИВТ РАН, ФТИ РАН, ИНГГ СО РАН и др. институтов, в творческом сотрудничестве с которыми проводились исследования: Авагимову А.А., Аладьеву А.В., Боровскому Б.В., Бобровскому В.В., Валетову С.А., Гаврилову В.А., Дамаскинской Е.Е., Диденкулову И.Н., Дядькову П.Г., Дучкову А.Д., Завьялову А.Д., Закупину А.С., Злобину Т.К., Ильичеву П.В., Качесовой Г.С., Коновалову А.В., Колесникову Ю.И., Капустян Н.К., Кремневой И.П., Кузикову С.И., Куксенко В.С., Кочаряну Г.Г., Манжикову Б.Ц., Марапульцу Ю.В., Мубассаровой В.А., Наймарку О.Б., Новикову В.А., Окуневу В.И., Пантелееву И.А., Плехову О.А., Ребецкому Ю.Л., Ружичу В.В., Соболеву Г.А., Сычеву В.Н., Сычевой Н.А., Тарасову Н.Т., Тихонову И.Н., Турунтаеву С.Б., Юнга С.Л., Яковицкой Г.Е.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель работы, ее научная новизна и основные защищаемые положения, изложены задачи работы и методы их решения. Отмечено, что диссертационная работа относится к новому направлению сейсмологии и геофизики с ориентацией на развитие технологий активного сейсмического мониторинга, основанного на изучении откликов геосреды на тестовые энерговоздействия с применением мощных источников.

### **Глава 1. Отклик геосреды на энерговоздействия физических полей как особый случай наведенной сейсмичности (обзор состояния исследований).**

Перед землетрясением зона очага и окружающая область находятся в метастабильном состоянии, при котором возрастает чувствительность среды даже к малым внешним возмущениям. Вариации потока слабых сейсмических событий служат индикаторами влияния на деструкцию земной коры внешних факторов природного и техногенного характера. Горные удары и сейсмоакустическая эмиссия (аналоги землетрясений на малых энергетических масштабах) также отражают изменения в скорости деструкции геосреды, в том числе под влиянием внешних факторов. Проведенные в конце прошлого века исследования наведенной сейсмичности подтвердили возможность влияния на сейсмический режим сравнительно слабых естественных воздействий: лунно-солнечных приливов, изменения скорости вращения Земли, атмосферных процессов, сейсмоволн от удаленных землетрясений, а также искусственных воздействий: закачки либо откачки жидкостей из скважин, быстрые изменения уровня водохранилищ, мощных электромагнитных импульсов. В работах Адушкина В.В., Капустян Н.К., Кочаряна Г.Г., Мирзоева К.М., Негматуллаева С.Х., Николаева А.В., Садовского М.А., Соболева Г.А., Тарасова Н.Т., Турунтаева С.Б., Юнга С.Л., Gomberg J., Hill D.P., Simpson D.W. и др. были заложены надежные основы для дальнейшего исследования проблемы влияния физических полей на процесс деструкции в земной коре. Важно подчеркнуть, что в большинстве работ результат о влиянии естественных и техногенных факторов был установлен по активации локальной сейсмичности.

**В разделе 1.1** рассмотрены особенности электромагнитного воздействия при зондированиях земной коры с применением мощных источников тока (МГД-генераторов). МГД - генераторы применялись в 80 -х годах прошлого века на Гармском полигоне (Памир, Таджикистан) и Бишкекском полигоне (Северная



часть Центрального Тянь-Шаня, Кыргызстан). По данным оригинальных работ [Тарасов, 1997, Тарасов и др. 1999] отклики среды на электротзондирования проявились на графиках суммарного суточного числа событий, построенных методом совмещения периодов наблюдений (наложение дат пусков образует день воздействий). Отклики были обнаружены на территориях как Гармского, так и Бишкекского полигонов, причем для последнего прирост суточного числа событий  $N_t$  выше фонового уровня был отмечен на 2-6 сутки после воздействий, а максимум  $N_t$  по амплитуде в 2-2,5 раза превысил 99% доверительный интервал для уровня фона. В дальнейшем Тарасовым Н.Т. было также обнаружено изменение интенсивности сеймотектонической деформации под влиянием электротзондирований. Стоит отметить, что до проведения в ИС РАН в 2000-2005 гг. экспериментальных зондирований все работы, посвященные искусственным электротвоздействиям, вынужденно основывались на одних и тех же материалах: сейсмических каталогах за период пусков МГД-генераторов на Гармском и Бишкекском полигонах.

Наблюдения кратковременного прироста сейсмичности после электротзондирований с применением МГД - генератора можно отнести к специальному случаю наведенной и триггерной сейсмичности, когда внешнее воздействие является очень слабым (напряжения, вызванные пондермоторными силами, на много порядков меньше литостатических). А вот 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.). Тем самым воздействие электромагнитных полей, в частности искусственных источников, выделяется среди других внешних факторов.

**В разделе 1.2.** кратко изложены материалы о вариациях сейсмичности после магнитных бурь с резким началом (на примере Северного Тянь-Шаня). При возмущениях геомагнитного поля в ионосфере в проводящих слоях земной коры наводятся токи изображения. Поэтому эффект магнитных бурь естественно сравнивать с влиянием токов при электротзондированиях. В ряде работ, посвященных этому вопросу, обосновано, что такие магнитные бури приводят к кратковременному увеличению  $N_t$  на кумулятивных графиках через 10-14 суток после начала бури (ссылки в обобщении [78] и в диссертации). Время задержки прироста оказалось значительно больше, чем при воздействиях разрядов МГД – генераторов. Тем не менее, по признаку прироста числа событий  $N_t$  можно говорить о сходстве эффектов, вызванных искусственными и естественными электромагнитными возмущениями.

Далее в первой главе **в разделах 1.3, 1.4** проведен обзор материалов о влиянии на сейсмичность различных (но не электромагнитных) техногенных воздействий: изменениях уровня водохранилищ, нагнетании воды в скважины, добыче углеводородного сырья, воздействий мощных вибраторов, а также естественных экзогенных факторов: лунно-солнечных приливов, удаленных землетрясений, ударов волн при штормах. Эффекты наведенной сейсмичности проявились в наиболее явной форме (контрастно по отношению к среднему фону) в тех случаях, когда внешнее воздействие характеризовалось достаточно большим изменением напряжения (заполнение водохранилищ) либо оно приводило к существенному изменению параметров среды, в частности, внутрислоевого давления и сцепления (закачка и откачка жидкостей). Эти воздействия изучены с достаточной полнотой. Также известно множество примеров того, что сравнительно слабые возмущения (вибровоздействия, сейсмволны удаленных землетрясений) могут стимулировать прирост числа сейсмических событий. Для исследований, ориентированных на возможность использования физических полей для стимулирования слабой сейсмичности и частичной разрядки напряжений, особый интерес представляют случаи, когда получены количественные оценки параметров внешнего триггера. В работах Мирзоева К.М., Садовского М.А. и др. показано, что воздействие вибраций, возбуждаемых в горном массиве при интенсивном сбросе воды в процессе эксплуатации плотины Нурекской ГЭС (Таджикистан) приводит к значительному сокращению выделения сейсмической энергии в зоне вокруг плотины с радиусом порядка 15 км, когда их уровень характеризуется амплитудой микросейсм  $A_v \sim 0,2 - 0,5$  мкм. В книге [Капустян, Юдахин, 2007] описаны элементы структуры среды, определяющие такой эффект.

В работе [Науменко, 1979] продемонстрировано, что при прохождении циклонов, в период максимального развития морского волнения, вызывающего рост амплитуды микросейсм до уровня более 5 мкм (по данным сейсмостанции Шикотан, Курильские о-ва), в районе, охваченном штормом, происходит уменьшение числа слабых местных землетрясений (в диапазоне энергетических классов  $6 < K < 10$ ). По мнению автора этой статьи, преобразование даже незначительной части энергии шторма, достигающей  $10^{18}$  Дж, в упругие волны при ударах морских волн о берег, может отразиться в сейсмическом режиме: иницировании событий меньших классов и сокращении числа событий с  $K > 6$  в

течение нескольких суток. Т.е. ситуация аналогична случаю водосброса на Нурекской плотине. В работах [30,32] в дополнение к оценкам характерного порогового значения амплитуды микросейсм  $A_{CR} \sim 5$  мкм предложено оценить амплитуду соответствующих колебаний давления  $(\delta p)_{CR}$  по формуле

$$(\delta p)_{CR} \sim \rho V_S u_{CR} \sim \rho V_S \omega A_{CR}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность,  $V_S$  - скорость упругих волн в среде по месту регистрации микросейсм,  $u$  - скорость частиц,  $\omega$  - циклическая частота. Для волн при шторме и штормовых микросейсм  $\omega \sim 0,1 - 0,3 \text{ с}^{-1}$ . При использовании значений  $\rho \sim 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $V_S \sim 2 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$  из (1) получается оценка  $(\delta p)_{cr} \sim 50-100$  Па. В случае вибраций, возбуждаемых водосбросом на Нурекской плотине,  $A_v \sim A_{cr} \sim 0,2 - 0,5$  мкм, а характерные частоты микросейсм на порядок выше, чем у штормов. Так что и в этом случае пороговую амплитуду  $(\delta p)_{cr}$  можно оценить такой же величиной.

Сравнительный обзор материалов о наведенной и, в частности, триггерной сейсмичности охватил практически все виды воздействий. На основании обзора сделаны **выводы по главе 1**, из которых наиболее важен следующий. Воздействия вибраций и электромагнитных импульсов на земную кору сейсмоактивных регионов выделяются среди других факторов техногенной сейсмичности тем, что триггерный эффект, т.е. прирост числа событий, достигается при весьма слабых возмущениях напряжения. Характерной формой реакции среды на эти воздействия является кратковременный прирост сейсмичности (в течение нескольких суток). Влияние вибраций изучено в большей степени, чем электромагнитных импульсов. Для анализа электромагнитных воздействий принципиально важны новые данные о вариациях сейсмичности в период электророндирований с применением мощных обычных источников (отличных от МГД-генераторов).

## Глава 2. Физические основы электромагнитного и вибрационного воздействий на процесс разрушения материалов земной коры

В разделе 2.1 рассматриваются феноменологические подходы к описанию триггерных эффектов вибраций и электромагнитных импульсов, действующих на нагруженные геоматериалы как малое внешнее возмущение. На качественном уровне описания в любую из множества моделей очага землетрясения (фактически, моделей процесса разрушения геоматериалов или геосреды) может быть включено влияние внешних факторов. Такое влияние описывается как параметрическое, т.е. вызванное извне изменение какого-либо параметра среды, входящего в соотношение для предельных значений компонент тензора напряжений либо их функций. Случаю триггера соответствуют изменения параметра, при которых предельные соотношения (критерии текучести либо разрушения) описывают переход от упругого к неупругому поведению и, в частности, потерю устойчивости исходного равновесного состояния. В терминах теории катастроф и нелинейной динамики эта картина есть не что иное, как бифуркация решения вблизи особой точки. На рис.1 представлена модель теории катастроф, поясняющая возможность (и закономерность) изменения параметра состояния системы,  $X$ , на конечную величину  $\delta X$  даже при малом возмущении управляющего параметра  $\Lambda$  вблизи точки бифуркации. В синергетике тот же эффект скачка  $\delta X$  рассматривается как разновидность или аналог фазового перехода в точке  $\Lambda = \Lambda_2$ . Схематическая модель (рис.1) адекватна для описания триггерного эффекта, если управляющий параметр  $\Lambda$  характеризует внешние воздействия. Принципиальную роль в этой модели играет нелинейность связи переменной  $X$  и управляющего параметра  $\Lambda$ , определяемой эволюционным уравнением  $dX/dt = F(X, \Lambda, t)$ .

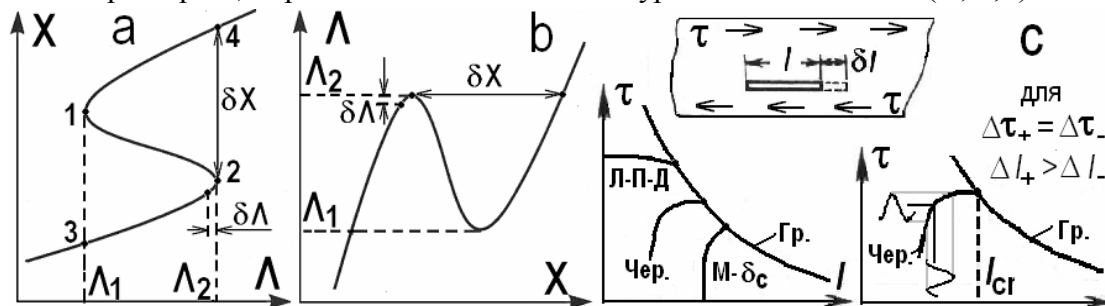


Рис. 1. Немонотонность зависимости переменной  $X$  (параметра состояния) от управляющего параметра  $\Lambda$  и модель триггерного эффекта в теории катастроф (а), согласно [Николис, 1989; Макаров и др, 2007]. В модели Наймарка  $X \rightarrow (\epsilon_R)_{ik}$ ,  $\Lambda \rightarrow \sigma_{ik}$ . б) обратный график  $\Lambda(X)$  содержит интервал, аналогичный  $\sigma$ - $\epsilon$  диаграмме запредельного деформирования; в) критические зависимости для плоской трещины: Гр.- спадающая зависимость по Гриффитсу, Л-П-Д – докритический интервал по модели Леонова-Панасюка-Дагдейла, М-дс – по - дс модели Морозова Е.М., Чер – по модели Черепанова и схема влияния вибраций на докритический рост трещин.

Во многих работах, посвященных наведенной сейсмичности, триггерный эффект от удаленных сильных землетрясений, заполнения водохранилищ и др. объяснялся с помощью закона Кулона – Мора (с поправкой Терцаги):

$$\tau = \mu_s \cdot (\sigma - p_w) + \tau_s, \quad (2)$$

где обозначено:  $\tau$ - сдвиговая,  $\sigma$ - нормальная компоненты напряжения в плоскости разрыва;  $\mu_s$  - коэффициент внутреннего трения,  $\tau_s$  – сцепление,  $p_w$  - внутривещное давление жидкости. В ходе эволюции одного или нескольких параметров в (2) в определенный момент времени меняется соотношение между сцеплением  $\tau_s$  и величиной фактора Кулона – Мора  $C_{К-М} = \tau - \mu_s (\sigma - p_w)$ , что и определяет инициирование неустойчивости при  $C_{К-М} \geq \tau_s$ . С позиций теории катастроф “неожиданные” изменения фактора  $C_{К-М}$  под влиянием сравнительно слабых внешних воздействий (в частности, вибраций и электромагнитных импульсов) при квазистационарных  $\sigma$ ,  $\tau$  можно связать с нелинейной зависимостью внутреннего трения  $\mu_s$  от других параметров. Для случая сухого трения разработаны модели (определяющие соотношения), описывающие зависимости внутреннего трения,  $\mu_s$ , либо его эквивалента - предельного сдвигового напряжения  $\tau_L = \mu_s \sigma$  от смещения контактирующих блоков  $\xi$ , скорости смещения  $u$ , параметров состояния поверхностей... Принципиально, что эти зависимости немонокотны и содержат интервал со спадом  $\mu_s$  и/или  $\tau_L$  при растущих  $\xi$  или  $u$ . На основе таких моделей сухого трения в работах Кочаряна Г.Г., Johnson P.A., Marone Ch. и др. (ссылки в диссертации) достигнуто значительное продвижение в объяснении влияния (циклических нагрузок) на режим межблоковых подвижек. Применение этих моделей для объяснения электромагнитного влияния сдерживается из-за нехватки информации о том, как в присутствии ЭМ поля изменяются параметры, входящие в определяющие соотношения для сухого трения.

В разделе 2.2 рассматриваются модели, описывающие влияние вибраций и ЭМ полей на рост трещин в образцах испытываемых в лабораторных условиях (натурные эксперименты освещены в главе 1). Обзор ограничивается случаями, когда пьезоэффект не играет существенной роли, из-за вида материалов (поликристаллы, горные породы с низкими пьезомодулями и т.п.) и амплитудных значений напряженности электрического поля. Наибольший интерес для данной работы представляют модели догриффитсовских (усталостных) трещин, которые являются источником большинства регистрируемых сигналов АЭ. Элементарным процессом, дающим вклад в активацию трещинообразования (прирост активности АЭ) при внешнем воздействии можно считать переход от режима докритического (усталостного) роста микротрещины в отдельной неоднородной зоне (“очаге”) к режиму роста по Гриффитсу. Длина трещины остается ограниченной, поскольку вне очага уровень напряжений недостаточен для обеспечения гриффитсовского роста. Переход описывается немонокотной зависимостью равновесной длины  $l$  трещины от сдвигового напряжения  $\tau$ , ход которой аналогичен показанному на рис. 1b участку графика в окрестности  $\Lambda_2$ . Физическая модель влияния вибраций, даже весьма слабых, на скорость роста отдельной трещины  $dl/dt$  предложена в монографии [Черепанов, 1974]. В этой модели, учитывающей пластичность материала вблизи кончиков трещины и термофлуктуации, обоснована нелинейная, быстро растущая зависимость  $dl/dt$  от коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$ , пропорционального  $\tau$ . Из-за нелинейности вибрационная добавка к напряжению (и, следовательно,  $K_I$ ) дает больший прирост скорости  $dl/dt$  на фазе положительных  $\delta K_I$ , чем уменьшение  $dl/dt$  на другой фазе с  $\delta K_I < 0$  (рис.1с.). В среднем по времени трещина растет быстрее при наличии вибраций. Источником колебаний напряжения на фоне основной нагрузки могут быть также и импульсные ЭМ поля, с действием которых связаны пондермоторные силы. Поэтому модель Черепанова можно распространить и на случай электровоздействия на трещину в диэлектрическом или слабо проводящем материале. Помимо этого механизма влияние ЭМ поля на одиночную трещину может быть обусловлено изменением эффективного значения параметра Гриффитса  $\gamma_{ef}$  – удельной энергии образования поверхностей. Стоит отметить, что известный эффект Ребиндера отражает вариации  $\gamma_{ef}$  при увлажнении поверхностей трещин. Другая причина вариаций  $\gamma_{ef}$  – наличие поверхностных зарядов на берегах трещины, плотность которых может меняться под влиянием внешних полей. По оценкам, проведенным в [25,76,79], при напряженности электрического поля  $E_e$  больше или порядка  $10^5$  В/м указанные механизмы могут объяснить чувствительность процесса роста микротрещин к воздействию ЭМ полей. Однако требуется развитие новых моделей для объяснения наблюдаемых откликов образцов геоматериалов на воздействие полей меньшей напряженности,  $E_e \sim 10^3$  В/м (описание в главе 4). Таким

образом, описанная модель может быть основой для объяснения реакции образцов геоматериалов на вибровоздействие.

В разделе 2.2 также рассматриваются кинетические аспекты процесса разрушения образцов геоматериалов, а именно эволюция ансамбля микротрещин, проявлением которой являются временные зависимости активности АЭ. Согласно многостадийной модели процесса разрушения, разработанной в ФТИ им А.В. Иоффе (двухстадийной модели по терминологии оригинальных работ Куксенко В.С. и др.) режим накопления дефектов (диффузный, кластеризация, формирование разрыва) определяется концентрационным параметром  $\delta = L/l$ , где  $L$  - среднее расстояние между ближайшими микротрещинами с длиной  $l$ . Фактически,  $\delta$  является параметром порядка, смене режима соответствует переход через критические значения  $\delta = \delta_c$ . С позиций многостадийной модели можно ожидать, что триггерные эффекты внешних физических полей проявятся, прежде всего, при околокритических значениях параметра  $\delta$ , соответствующих переходу к кластеризации. При этом роль дополнительного притока энергии аналогична роли флуктуаций. Значительное продвижение в описании кинетики ансамбля дефектов в нагруженных телах достигнуто в теоретической модели Наймарка О.Б. (ИМСС УрО РАН). Эта модель позволяет учитывать внешние динамические возмущения, и поэтому может быть распространена на случай дополнительных воздействий вибраций и ЭМ полей. Для теоретически выделенных случаев растяжения и простого сдвига было показано, что при определенных значениях параметра  $\delta$  прирост деформации вследствие внутренних разрывов  $(\epsilon_R)_{ik}$  (лабораторный аналог сеймотектонической деформации) описывается немонотонной зависимостью от главного напряжения, подобной S-образной кривой на рис. 1а. Переход между ветвями этой кривой (из точки 1 в 3, из точки 2 в 4) означает изменение  $(\epsilon_R)$  при неизменном напряжении и может интерпретироваться как триггерный эффект. Следствием модели Наймарка также является возможность генерации медленно распространяющихся триггерных волн (волн переключения режима). Скорость этой волны зависит от амплитуды, и разброс времени прохождения волны может объяснять наблюдаемое в экспериментах непостоянство времени задержки отклика АЭ на внешние воздействия.

Среди моделей воздействия импульсных ЭМ полей на рост трещин особое место занимает модель из книги [Финкель, 1977], в которой рассматривается рост уединенной трещины в ионных кристаллах. Считается, что трещина имеет длину, сравнимую с гриффитсовской, а для описания движения ее берегов применимо длиннобалочное приближение. Было показано, что рост таких трещин может быть остановлен электрическим полем достаточно большой напряженности, которое направлено перпендикулярно плоскости трещины и взаимодействует с зарядами на ее поверхностях. Таким образом, имеются модели описывающие, по крайней мере, качественно влияние ЭМ полей как на одиночные трещины, так и на поведение ансамбля микротрещин. Тем не менее, пока не создано общей модели возбуждения откликов на электромагнитные импульсы, синтезирующей успешные теоретические подходы и широкую базу экспериментальных данных. В связи с этим в разделе 2.3 приводятся наиболее важные результаты ранее проведенных экспериментов, где исследовалось влияние электрического и магнитного полей на деформирование различных материалов. Влияние электрических полей с напряженностью до  $E_c \sim 1-10$  МВ/м и магнитных полей с индукцией до  $B \sim 1$  Т на неупругие и пластические свойства твердых тел различной природы наблюдалось на самых разных структурно-масштабных уровнях (начиная от дислокаций и атом-вакансионных дефектов) и при различных значениях главного напряжения. В случае металлических (проводящих) образцов изменения их реологических свойств и скорости неупругой (пластической) деформации, связанные с номенклатурой и эволюцией структурных дефектов, отмечались при воздействиях электрических полей с напряженностью порядка  $10^4$  В/м или магнитных полей с индукцией от 0,1 Т до нескольких Т. Электропластические эффекты в ионных (щелочно-галогенных) кристаллах, вызванные воздействием достаточно сильных полей на движение дислокаций, освещаются в обобщении [Зуев, 1990] и обзоре [Урусовская, 2000]. Эффекты магнитоластики, а также комбинированные эффекты при одновременном воздействии ЭМ полей от разных источников рассмотрены в обзоре [Головин, 2004]. Важен обнаруженный в Институте кристаллографии РАН эффект сильного возрастания микропластичности при деформировании ионных кристаллов в присутствии скрещенных электрического и магнитного полей, который проявился в заметных изменениях  $\sigma - \epsilon$  характеристик. На рис. 2 представлены примеры результатов модификации деформирования некоторых материалов под воздействием ЭМ полей. Стоит отметить, что при получении этих результатов измерения АЭ не проводились. В другом эксперименте,

описанном в книге [Гохберг и др., 1988], установлено влияние сильного магнитного поля на ориентацию плоскости макротрещины в образцах из ионных кристаллов (изменение угла между этой плоскостью и осью главного сжатия). Как для случая рис.2, так и для других случаев реакции на воздействие ЭМ полей, которые рассмотрены в разделе 2.3, объемная плотность энергии ЭМ поля значительно меньше плотности упругой энергии, соответствующей напряжению сжатия порядка 10- 100 МПа. Такое же соотношение между напряжениями от действия пондермоторных сил и механическими напряжениями, откуда следует, что все эти случаи относятся к разновидностям триггерного эффекта.

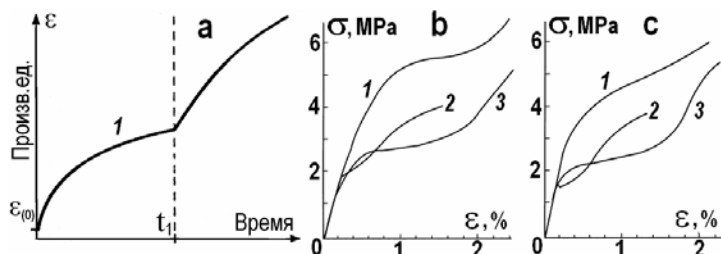


Рис. 2. Реакция материалов на воздействие ЭМ полей: а) деформация металлических образцов в экспериментах [Кишкин, Клыпин, 1973] с включением магнитного или электрического поля в момент  $t_1$ ; б, в) – кривые нагружения кристаллов NaCl, испытываемых на сжатие в режиме заданной скорости роста деформации, согласно [Урусовская и др., 2000]. 1 – внешние поля отсутствуют; 2 – наложено магнитное поле  $B = 0,4$  Т перпендикулярно направлению главного сжатия; 3 – с наложением скрещенных магнитного ( $B = 0,4$  Т) и электрического ( $E = 9$  кВ/м) полей.

Результаты о влиянии магнитного поля, либо скрещенных магнитного и электрического полей на ход пластической деформации в ионных кристаллах занимают особое, выделенное положение среди зарегистрированных случаев реакции среды на воздействие ЭМ полей. Пластическая деформация контролируется ансамблем дефектов, которые могут быть магниточувствительными, как и спин-химические реакции. Достижения в исследованиях спин - зависимых эффектов дислокаций, макромолекул и др. (оформившихся в свое направление “спинтроника”, [Головин, 2004]) свидетельствуют о наличии фундаментальных основ для объяснения эффектов магнитоластики. А для эффектов преимущественно электрического поля пока сохраняется неопределенность в том, какой основной фактор определяет механизм электроластики.

Проведение развернутых экспериментальных исследований электровоздействий на образцах гетерогенных материалов представляется важным этапом в решении этой проблемы. Расширение баз данных по откликам среды на воздействия вибраций и электромагнитных импульсов в условиях лабораторного эксперимента необходимо также для развития и совершенствования моделей триггерного эффекта электромагнитных полей со слабым механическим эквивалентом. Новые возможности для таких исследований открывает применение метода акустической эмиссии, весьма чувствительного к трещинообразованию и изменениям скорости неупругой деформации. Эти положения стали основным **выводом по главе 2**, сделанным на основании обзора многочисленных проявлений реакции среды на воздействие физических полей (обнаруженных без применения метода АЭ) и моделей для их интерпретации с позиций физики процессов разрушения.

### Глава 3. Моделирования электромагнитного и вибрационного воздействий на земную кору в экспериментах на реологических прессах

В начале главы в разделе 3.1 рассматриваются методика и основные результаты предшествующих экспериментов по моделированию воздействий вибраций и электромагнитных полей на деформирование образцов геоматериалов. Такие эксперименты проводились на прессах в (ГФО “Борок” ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, ФТИ им Иоффе РАН, ИФиМГП НАН КР) и установках - слайдерах (ИДГ РАН, ИФЗ им О.Ю. Шмидта РАН, Институт геофизики Грузинской АН и др.). Применение АЭ при физическом моделировании элементов сейсмического процесса опирается на представления о самоподобии геологической среды, включая подобие характеристик накопления повреждений на разных пространственно - временных масштабах. Возможность получения результатов, адекватных условиям в сейсмогенерирующих зонах, продемонстрирована в работах Виноградова С.Д., Куксенко В.С., Пономарева А.В., Соболева Г.А., Lockner D., ставших классическими. В ряде работ были выявлены эффекты, связанные с воздействием умеренных вибраций (с амплитудой напряжения порядка процентов от средней нагрузки), а также динамических воздействий (микроударов). Были также обнаружены проявления воздействий нестационарных электромагнитных полей в вариациях активности АЭ [Соболев, Пономарев, 2003]. Общность и взаимосвязь вибро- и электрочувствительности геоматериалов обусловлена, в частности, пондермоторными силами при возбуждении электромагнитных полей в объеме образцов.

Случай воздействия вибраций с очень малыми амплитудами, на много порядков меньше среднего уровня напряжения, был изучен в меньшей степени. Вопрос о влиянии столь слабых вибраций представляет как самостоятельный интерес, так и в связи в пондерморными силами при электровоздействиях. В разделе 3.2 описываются результаты авторских исследований влияния слабых вибраций на активность АЭ нагруженных образцов горных пород [1-5,30,34-36,40,45,46]. В экспериментах проводилось одноосное нагружение гранитных образцов месторождений Табылга и Каинда, Кыргызстан. Образцы имели форму правильных цилиндров, диаметр которых был вдвое меньше высоты. Постоянство нагрузки на образце в течение длительного времени обеспечивалось с помощью пружинной реологической приставки к стандартному гидравлическому прессу. Пресс использовался для ступенчатого изменения нагрузки в ходе эксперимента. После фиксации нагрузки пресс отключался, а дальнейшее нагружение обеспечивалось за счет упруго сжатых пружин приставки. Жесткость нагружения составляла  $K_L \approx 10^7$  Н/м. Применение пружинной приставки исключало влияние шумов гидропривода пресса. Продолжительность выдержки образца при каждом уровне нагрузки определялась временем, необходимым для регистрации представительного количества событий АЭ. Ступенчатое нагружение продолжалось до разрушения образцов при нагрузке 11 ÷ 12 т. Общая продолжительность эксперимента составляла около месяца. В течение этого времени обычное нагружение чередовалось с виброеансами. Источником вибраций служил маломощный пятилопастной вентилятор с частотой вращения  $\approx 40$  с<sup>-1</sup>, контактирующий с элементами пружинной приставки через демпфирующую прокладку. Амплитуда акустического давления в волнах от вентилятора не превышала 10 Па, т.е. менее 10<sup>-6</sup> % от среднего напряжения сжатия. В ходе эксперимента вентилятор включался на время (около четырех часов), в течение которого накапливались данные об АЭ образца в вибрационном поле. Для экспериментов использовались образцы гранита с известными нагрузочными  $\sigma - \epsilon$  характеристиками. Измерительная аппаратура работала в ждущем режиме; регистрировалась АЭ, амплитуда которой превышала порог дискриминации. Для каждого зарегистрированного события АЭ определялась амплитуда огибающей акустического сигнала и его длительность. Также сохранялась информация о времени возникновения событий, а при необходимости – о волновой форме сигналов АЭ. Уровень вибраций от вентилятора был ниже порога дискриминации аппаратуры, что исключало возможность их регистрации как ложных событий АЭ.

На первом этапе исследований в 1997-1998 гг. были получены временные зависимости количества накопленных событий АЭ, активности АЭ и средней амплитуды событий, а также деформации образца  $\epsilon$  в присутствии слабых низкочастотных вибраций. В 14 виброеансах, проведенных на четырех однотипных образцах, при нагрузках 0,65-0,95 от максимальной активности АЭ возрастала в 2 ÷ 7 раз по сравнению с ее значениями перед сеансами вибраций. Диапазон нагрузок, при которых наблюдался прирост активности АЭ в виброеансах, соответствовал дилатансионной деформации. А на образцах, не подвергаемых действию вибраций, после пригрузки наблюдалось монотонное снижение акустической активности. Примеры этих зависимостей представлены на рис. 3. Были также выявлены следующие особенности АЭ, связанные с действием вибраций: задержка активизации АЭ в начале виброеанса, последствие по его окончании, снижение средней амплитуды АЭ и ее дисперсии во время виброеанса. Длительность задержки варьировалась в широких пределах  $(3-10) \cdot 10^4$  с. С возрастанием времени выдержки образца под нагрузкой и величины средней нагрузки время задержки отклика на вибровоздействие быстро уменьшалось. Длительность последствия была такого же порядка, что и время задержки. После включения вибраций переход в состояние с повышенной активностью АЭ и сниженной средней амплитудой иногда происходил как жесткая мода (рис.3 а), иногда - как мягкая мода (рис.3 б). При жесткой моде активизации режима АЭ сначала регистрировались события с относительно большой амплитудой, затем устанавливалось насыщение активности АЭ на новом уровне, и средняя амплитуда сигналов становилась меньше, чем была до включения вибраций. При мягкой моде снижение средней амплитуды АЭ происходило без эпизодического всплеска крупноамплитудных событий. Примерно в половине виброеансов наблюдалось насыщение величины продольной деформации образца после ее интенсивного роста, начинавшегося синхронно с активизацией АЭ после задержки (рис.3 а). По графикам деформаций (4) прослеживаются переходные процессы при включении и выключении вибратора.

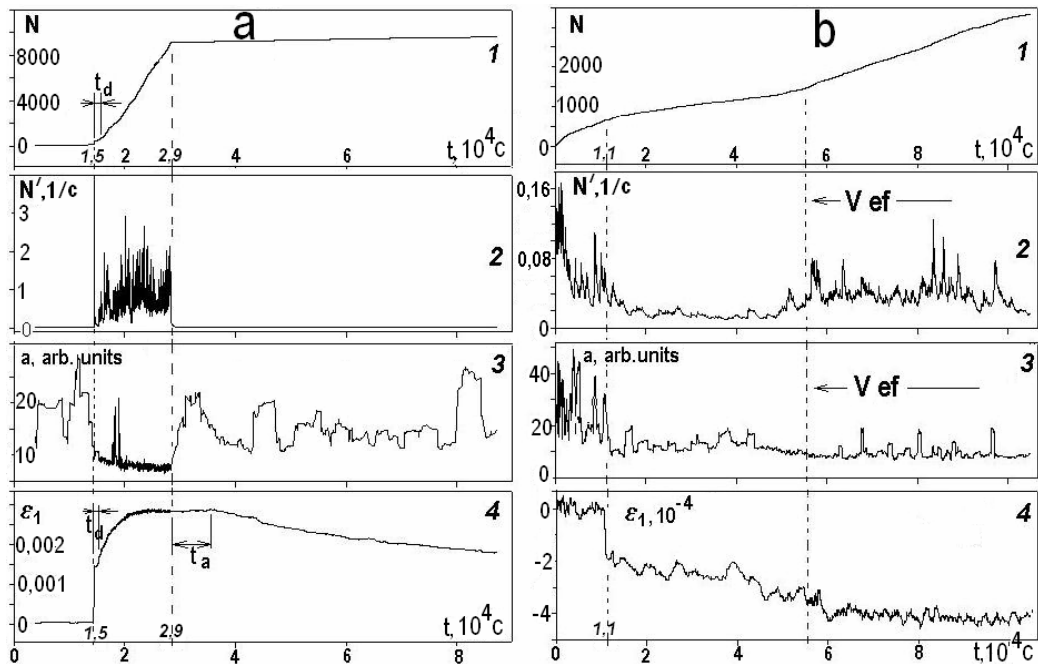


Рис.3: а – ход накопления числа событий АЭ (1), активности АЭ (2), средней амплитуды сигналов АЭ (3) и продольной деформации образца (4) в течение последовательных сеансов: без вибраций (0 –  $1,5 \cdot 10^4$  с), при наличии вибраций ( $1,5 - 2,9$ )  $\cdot 10^4$  с, без вибраций ( $2,9 - 8,8$ )  $\cdot 10^4$  с. Время задержки:  $t_d = 800$  с. Время последействия:  $t_a = 8 \cdot 10^3$  с.; б – Те же, сигналы, что в случае а, для сеанса без вибраций (0 -  $1,1$ )  $\cdot 10^4$  с и двух последовательных вибресеансов ( $1,1 - 10,5$ )  $\cdot 10^4$  с. ← V ef – временной интервал, когда проявлялись вибрационные эффекты.

На рис.4 приведены распределения по энергиям сигналов АЭ гранитного образца, накопленных в сессиях на разных ступенях сжимающей нагрузки, начиная с 5,6 т (80 МПа) до 10 т (142 МПа), включительно. Под энергией понимается энергия электрического сигнала на выходе из пьезопреобразователя, которая рассчитывалась как  $W = a^2 b = 10^{0,4343 K}$ , где  $a$  - амплитуда огибающей акустоэмиссионного сигнала,  $b$  - его длительность на пороге дискриминации,  $K$  - энергетический класс, введенный по аналогии с сейсмологией. Зависимость 1 на рис.4 включает все события, зарегистрированные в отсутствие вибровоздействия на образец (10 сеансов), зависимость 2 - события, зарегистрированные в 14 вибресеансах. На графиках можно выделить три характерных участка. Первый, восходящий, соответствует слабоэнергетическим событиям классов от  $-35$  до  $-31$ , второй участок, включающий события с  $-31 \leq K < -27$ , и третий участок, который относится к событиям с относительно высокой энергией,  $K \geq -27$ . Как видно на рис.4, первый и третий участки графиков сходны. Но на втором (промежуточном) участке графики различаются по угловым коэффициентам. В сеансах с вибрациями, число событий в диапазоне классов, отмеченном на рис.4 двойной линией, убывает с ростом энергии быстрее, чем в случае отсутствия вибраций. Таким образом, наибольшую чувствительность к вибровоздействию обнаруживают события АЭ из определенного диапазона энергий (от  $10^{-13,5}$  до  $10^{-11,7}$  Дж).

Изменения амплитудно - временных распределений АЭ в вибрационном поле отмечались, начиная с некоторого уровня амплитуды вибраций. Анализ записей волновых форм сигналов показал, что вибрации с частотой около 200 Гц, дающие триггерный эффект, имеют амплитуду ускорения, сопоставимую с амплитудой слабых зарегистрированных событий АЭ. Пример записи волновой формы АЭ и низкочастотных инициирующих вибраций приведен на рис.5. В одном из сеансов амплитудой вибраций варьировали, устанавливая различные демпфирующие прокладки между вентилятором и приставкой. Благодаря этому удалось оценить минимальное значение амплитуды ускорения, при котором вибровоздействие влияет на АЭ. После пересчета амплитуды ускорения на амплитуду смещения, с учетом наличия выделенного периода 5 мс (частота 200 Гц) было получено, что амплитуда вибраций  $A_V$ , способных к инициирующему влиянию на активность АЭ, составляет  $A_V \geq 0,2 \pm 0,1$  мкм. Этой оценке амплитуды смещения можно сопоставить возмущения нагрузки  $\delta P = K_L A_V \sim 0,2$  Н, т.е.  $2 \cdot 10^{-6}$  от главного сжатия (нагрузка  $\sim 10$  тонн). Оценка  $A_V = A_{min}$  практически совпала со значением амплитуды микросейсм, при превышении которой менялся режим выделения сейсмической энергии вблизи Нурекской ГЭС, Таджикистан (согласно известным работам Мирзоева К.М. и др.). Указанное значение  $A_{min}$  можно рассматривать как нижний предел (порог по амплитуде) для эффекта слабых низкочастотных вибраций.

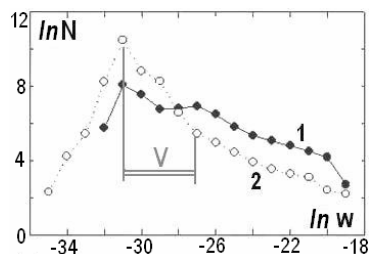


Рис. 4. Распределения количества событий АЭ по энергиям: 1- в периоды без вибраций, 2 - с вибровоздействием

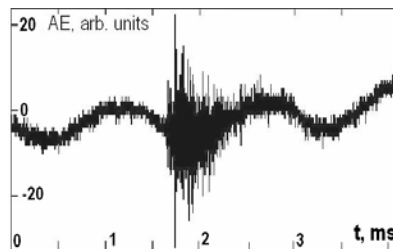


Рис.5. Волновая форма сигнала АЭ, зарегистрированного в ходе вибросейса

На следующем этапе исследований, в начале нулевых гг в Научной станции ОИВТРАН (позже переименованной в НС РАН) были созданы новые установки для бесшумных испытаний на сжатие образцов геоматериалов, которые открывают новые возможности для исследования триггерных эффектов физических полей. На новых установках: пружинном реологическом прессе УДИ с максимальным сжатием образца 100 тонн и малом реологическом стенде с длинноходовой пружиной, обеспечивающей усилие сжатия до 20 тонн, проведен комплекс исследований, посвященных влиянию электромагнитных импульсов на трещинообразование (АЭ). Вместе с тем, было важным сравнить отклики на воздействие электромагнитных импульсов и слабых вибраций у образцов геоматериалов, испытываемых на одной и той же установке, при одинаковых условиях нагружения. В случае экспериментов на УДИ для модельных вибровоздействий применялся точечный источник (буззер), плотно закрепляемый на образце. При испытаниях образцов на реостенде использовалась электродинамическая головка, установленная на верхней опоре, соосно образцу с передачей вибровоздействия через конструкцию установки. Для организации вибросейсов на буззер или электродинамическую головку подавался синусоидальный сигнал генератора ГЗ-33 или ГЗ-112. В течение вибросейса контролировалось постоянство амплитуды и частоты сигналов на входе вибратора. При обработке данных наряду с временной зависимостью активности АЭ, определяемой по генеральной выборке событий, вычислялись селективные активности, имеющие смысл активностей АЭ по выборкам слабых (малоамплитудных) и сильных (крупноамплитудных).

Зависимости активностей АЭ с сепарацией по амплитудам позволяют анализировать, происходит ли сокращение числа сильных событий при возрастании числа слабых для конкретного отклика АЭ на внешнее воздействие. Пример влияния слабых вибраций на акустоэмиссионную активность образца гранита Каинда, Киргизия, при нагрузке 67% от разрушения показан на рис.6 а. В этом эксперименте вибрации возбуждались при подаче на динамическую головку синусоидального напряжения от генератора ГЗ-33 с амплитудой - 2 В и частотой 1 кГц. Под влиянием вибраций активность АЭ возросла в 3 раза (с 0,4 до 1,2 1/с) по сравнению с ее уровнем до вибросейса, что отчетливо просматривается по рис.6 а.

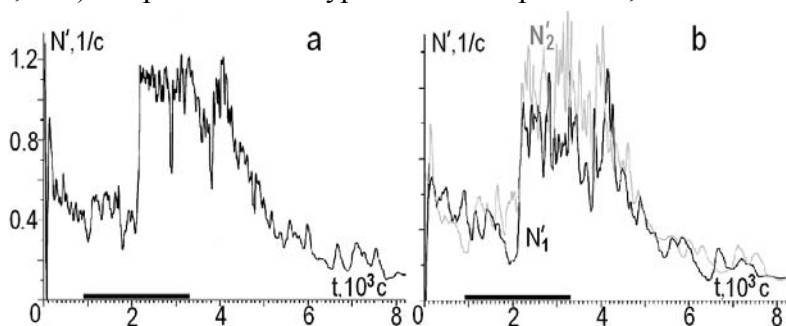


Рис.6. Временные зависимости параметров АЭ образца гранита (высота 60мм, диаметр 30мм) в сессии с вибровоздействием (отмечено полосой): а) активность общего числа событий АЭ; б) активности слабых ( $N_1$ , черная кривая) и сильных событий ( $N_2$ , серая кривая)

Отклик в виде резкого нарастания активности АЭ произошел с задержкой примерно 1300 с после начала вибросейса. Далее уровень активности оставался постоянным в течение 40 минут, после чего активность постепенно спадала до фонового уровня. Наряду со значительным приростом активности на графике следует также выделить интервал задержки 1300 секунд с начала вибровоздействия. На этом интервале спадающий тренд активности АЭ сменяется квазистационарным. С началом вибровоздействия длительность и энергия акустоэмиссионных сигналов АЭ возрастают, а в момент прироста активности АЭ резко спадают до прежнего уровня). Изменение длительности и энергии сигналов АЭ при квазистационарном уровне активности (до сильного прироста АЭ) свидетельствует о чувствительности материала образца к вибровоздействию. На графиках селективных активностей (рис. 6 б) для событий больших и малых амплитуд, прежде всего, следует обратить внимание на общее сходство (прирост по



отношению к предыстории наблюдается для обеих зависимостей). В отклонениях от среднего уровня проявляется “рассогласованные” изменения селективных активностей (флуктуации) с длительностью 50-200 с. Важно отметить, что относительное возрастание активности оказалось более высоким для выборки крупноамплитудных сигналов. Тем не менее, ввиду численного преобладания малоамплитудных сигналов, именно их прирост дает наибольший вклад в увеличение полной активности.

Основной **вывод по главе 3** состоит в том, что даже слабые низкочастотные вибрации с амплитудами давления порядка  $10^{-6}$  от главного напряжения способны стимулировать прирост активности АЭ [1,3,30,34-36,40,45,46]. Методы исследования виброэффектов в экспериментах на бесшумных установках (с регистрацией АЭ) можно использовать для развития методики моделирования воздействий электромагнитных импульсов [4,5,39,40,48,61,78].

#### Глава 4. Эффект отклика акустической эмиссии нагруженных образцов геоматериалов на воздействие электромагнитных импульсов

Методические разработки, направленные на лабораторное моделирование сейсмического эффекта разрядов МГД - генераторов или других мощных источников, включают выбор системы нагружения и режима испытаний, подбор модельных образцов геоматериалов, источников электромагнитных импульсов и др. [5,10,11,43,44,55]. В начале главы 4 в **разделе 4.1** изложены вопросы методики, которые являются неотъемлемой частью проведенного исследования и необходимы для понимания результатов.

Образцы горных пород и модельных геоматериалов испытывались на ползучесть при постоянном сжатии при помощи пружинного пресса УДИ с максимальным усилием 100 тонн (разработка ВНИМИ, С -Петербург) и рычажно- гравитационного пресса УДИ-Л с максимальным усилием сжатия 35 тонн (изготовлен на базе установки УДИ, рис. 7). Пружинные пресса обеспечивают бесшумность нагружения при поддержании постоянного сжимающего практически все время эксперимента (за исключением моментов ступенчатого прироста сжатия), а рычажно - гравитационные позволяют снизить шумы и проводить измерения даже при изменении нагрузки. Эксперименты с регистрацией АЭ проводились в следующей последовательности (рис.8 а). После увеличения и фиксации нагрузки образцу отводилось определенное время (20-60 минут) для релаксации переходных процессов, связанных с неравномерностью пригрузки и краевыми эффектами (поверхностное выкрашивание и др.). Затем, когда активность АЭ, усредненная окном 50 с, становилась квазистационарной или плавно спадающей, начиналась измерительная сессия с непрерывной регистрацией АЭ и сигналов тензометрии. Длительность измерительной сессии была от 2 до 10 часов в зависимости от задач эксперимента, активности образца, скорости ее затухания и модельных воздействий.

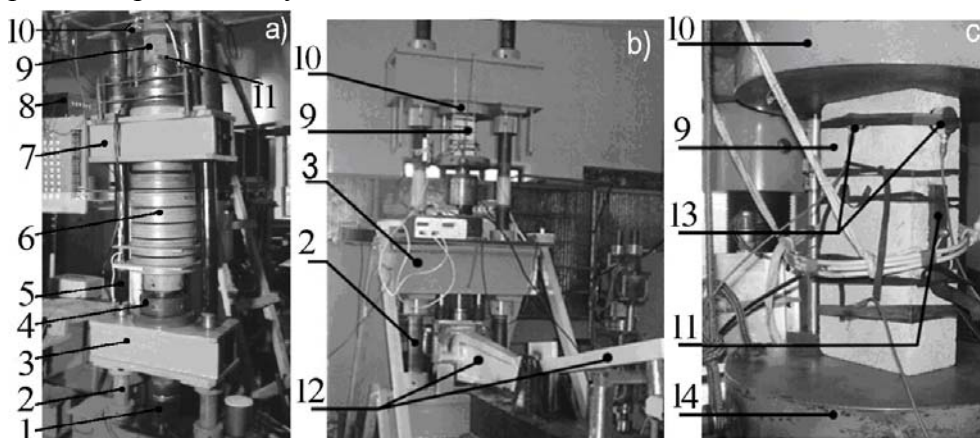


Рис. 7. Фотографии реологических установок: а)- пружинной, УДИ; б) –рычажно-гравитационной, УДИ-Л. Обозначения: 1-гидравлический домкрат; 2,5-опорная стойка; 3-нижняя траверса; 4-фиксирующая гайка; 6-пружины; 7-верхняя траверса; 8-блок усилителей; 9- образец; 10- плита верхняя; 11-графитовый электрод, 12- составной рычаг, 13 – датчик АЭ, 14- плита нижняя; с) - приближение к образцу, установленному на УДИ-Л.

Основной фактор, определяющий длительность испытаний это активность АЭ, зависящая, прежде всего, от величины механического напряжения. Порядок измерительной сессии строился по принципу: регистрация без воздействия, затем включался источник электроимпульсов, а после его выключения продолжены измерения АЭ без воздействий. Воздействие электрическими импульсами осуществлялось при подаче электрических импульсов на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца. В качестве источников импульсов использовались генераторы прямоугольных импульсов Г5-54,

Г6-28, Г3-112 с амплитудой напряжения до 50 В и конденсаторный разрядник (напряжение до 900 В). Воздействие скрещенным электрическим и магнитным полями осуществлялось с помощью электродов и магнитной катушкой, возбуждающей магнитное поле на ее оси с индукцией  $\sim 0,004$  Т (рис.8). Синхронизацию фаз электрических импульсов генератора Г5-54, подаваемых на электроды, и генератора Г3-112, нагружающего магнитную катушку, обеспечивало специальное синхронизирующее устройство, благодаря которому выдерживалось постоянство направления вектора потока энергии (Умова – Пойнтинга). Сигналы АЭ регистрировались пьезодатчиками в частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц. Это позволяло сохранять информацию о волновой форме сигналов. Аппаратура работала в ждущем режиме с запуском по превышению сигнала заданного порогового значения, обычно выбираемого в 1,5 выше, чем среднеквадратичный уровень входного шума канала.

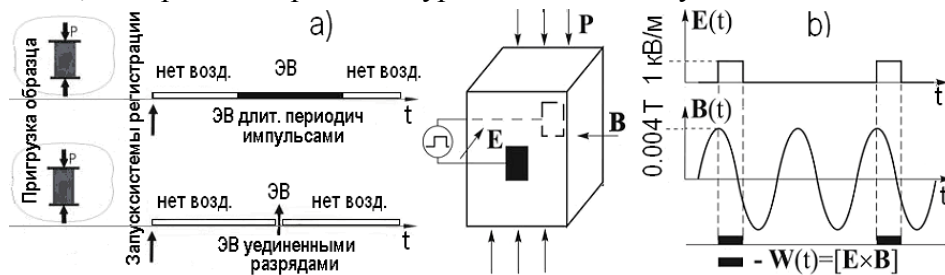


Рис. 8. а) – диаграмма проведения экспериментов для исследования влияния на АЭ дополнительных воздействий периодических и одиночных электроимпульсов; б) – схема эксперимента с воздействием скрещенных полей: слева направления действия полей и главного сжатия, справа синхронизация В, Е полей

Сначала для обнаружения эффекта отклика АЭ на воздействие импульсов ЭМ поля была проведена длинная серия экспериментов на пружинных прессах. Было испытано 38 образцов, из них 26 – горные породы с разными физико-химическими свойствами [5,11,39,44]. Сведения об исследованных образцах и количестве экспериментов с дополнительными электровоздействиями представлены в таблице 1. После обнаружения откликов АЭ для большинства образцов, была проведена следующая серия экспериментов для уточнения закономерностей реакции среды на воздействие электроимпульсов (ЭВ). На рычажно-гравитационном прессе УДИ-Л1 было испытано 5 образцов (гранодиорит-1, гранит-2, габбро -1 и каменная соль - 1). Особенностью этих экспериментов было проведение тестовой добавки нагрузки (1-2% от главного сжатия) перед дополнительными воздействиями (полем Е) для соли и гранита Сары-Жаз и скрещенным ( $E \times B$ ) для гранита Уестерли. Это позволило сравнить параметры откликов АЭ на разные виды воздействий. В экспериментах также контролировалось изменение межэлектродной емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Эти параметры измерялись при помощи LCR-метра АМ 3001 (Актаком), который подсоединялся к тем же электродам на боковой грани образца (рис. 7 с).

Активность АЭ вычислялась как производная от временного ряда накопления числа событий АЭ  $N(t_i)$ , где  $t_i$  – время регистрации события  $i$ . Поскольку зависимость  $N(t_i)$  эквивалентна представлению в виде списка (каталога событий АЭ), т.е. ряда для обратной зависимости  $t(N_i) \equiv t(i)$ , для вычисления активности удобно использовать следующую формулу (дискретный аналог производной обратной функции)

$$n = \langle dN/dt \rangle = \langle (\delta t_i / \delta i)^{-1} \rangle, \quad (3)$$

где скобки  $\langle \rangle$  означают усреднение по интервалу в несколько (3-7) событий. Благодаря параметризации (3) с равномерным шагом, а также за счет предварительной фильтрации ряда  $t_i$  скользящим окном обеспечивается устойчивость численного дифференцирования. По графикам активности выделялись интервалы с нарушением спадающего или квазистационарного тренда. В случаях, когда вариации следовали после начала внешних воздействий, они считались вероятными откликами на ЭВ. Вывод о наличии отклика делался при обнаружении однотипных вариаций в повторяющихся экспериментах с ЭВ.

Таблица 1. Перечень образцов, испытанных на пружинных установках

№	Материал, месторождение и колич.образцов	Высота, поперечные размеры, мм	Колич. сессий с ЭВ
1	Гранит серый (Табылга, Киргизия)-2	80 x Ø40	11
2	Гранит серый, увлажнен. (Табылга, Киргизия) -2	80 x Ø40	5
3	Гранит (Уестерли, США)-2	128 x 50 x 57	11
4	Гранодиорит (Аламедин, Киргизия) – 2	107 x Ø52	14
5	Кварцит (Ат-Баши, Киргизия) – 2	90 x 50 x 55	10
6	Габбро (Каинда, Киргизия) – 4	70 x 18 x 45	17
7	Габбро (Каинда, Киргизия)	75 x 16 x 45	8

8	Габбро, увлажнен (Каинда)	51 x 19 x 29	4
9	Бетон -5	250 x 100 x 120	18
10	Керамика	95 x 20 x 50	14
11	Керамика водонасыщенная- 3	175 x 35 x 115	21
12	Каменная соль-3	120 x Ø60	14

**В разделе 4.2** представлены результаты экспериментов на пружинных прессах с образцами, перечисленными в табл.1. Для всех испытанных материалов более чем в 70% случаев сессий с воздействием электромагнитных импульсов (модельными ЭВ) был зарегистрирован эффект активации АЭ [5,10,11]. При этом все сомнительные случаи, включая неоднозначность интерпретации из-за сбоя системы регистрации, ошибок при включении/выключении источников ЭВ и др., отнесены к отрицательным исходам - отсутствие эффекта. Для большинства испытанных образцов (около 85%) триггерный эффект в форме откликов АЭ на внешнее ЭВ обнаружен на нагрузках от 70 до 95% от уровня разрушения. Для однородной серии образцов наилучшая воспроизводимость откликов на однотипные воздействия отмечалась при нагрузках 80-90% от разрушающей. Нарастание активности АЭ, указывающее на изменения в материале - переход ансамбля дефектов в новое состояние, происходило через некоторое время после начала внешнего воздействия. Затем активность АЭ возвращалась к фоновому уровню или, в некоторых случаях, оказывалась ниже среднего. На рис. 9 а на примере бетонного образца с гранитными включениями показан эффект электростимулирования АЭ при воздействии однополярных прямоугольных импульсов. Рис. 9 b демонстрирует, что уровень активности АЭ образца каменной соли (галита), возросший вследствие электровоздействия, сохраняется в течение сессии с включенным генератором Г5-54. Плавное снижение уровня активности АЭ после выключения генератора представляет собой последствие. Все это аналогично проявлению виброэффектов (рис. 6а). Так как галит – материал с высоким удельным сопротивлением, полученные результаты свидетельствуют о том, что эффекты и поляризации и проводимости играют существенную роль при дополнительных энергетических воздействиях. Это подтвердилось в контрольном эксперименте, когда графитовые электроды были изолированы от поверхности образца тонкой фторопластовой лентой.

Задержка откликов АЭ на электрические импульсы варьировалась в широких пределах: от 50-100 секунд (кратковременная реакция) до нескольких тысяч секунд (длительная задержка). Рис. 9 с демонстрирует пример четкого отклика (рост активности АЭ вдвое) с задержкой около 600 с после включения генератора прямоугольных импульсов. Для испытанных образцов гранитов длительные задержки характерны при нагрузках порядка 80-85 % от разрушающих, а кратковременная реакция – при нагрузках больше или порядка 90 % от максимума. Для сравнения с образцами конгломератной породы (граниты) рассматривались отклики АЭ образцов габбро (рис.9 e,f) и кварцита (рис. 9 h). Габбро был выбран как материал, сходный по своим механическим характеристикам с гранитами Табылга, Каинда (таб. 1), но не содержащий фракций с пьезоэлектрическими свойствами. Для контраста проводился эксперимент с образцом кварцита. Отклик АЭ образца габбро на воздействие квазипериодических импульсов (рис. 9 e) оказался аналогичен откликам АЭ образцов галита и гранита Уестерли. В данном случае задержка составила около 1000 с, отмечено последствие в течение такого же промежутка времени. На рис. 9 f показана зависимость АЭ активности образца габбро той же серии, что и в случае рис. 9 e, описывающая отклик на воздействие одиночных импульсов - разрядов конденсаторной батареи. Таким образом, прирост активности АЭ может инициироваться как длительным воздействием периодических электроимпульсов небольшой амплитуды (~50 В, или  $E \sim 10^3$  В/м), так и уединенными импульсами с более высокой амплитудой напряжения. На графиках на рис. 9 с,e,f, наряду с откликами, наблюдаются всплески спонтанной активизации АЭ. В отсутствие ЭВ время математического ожидания всплесков (оцененное по контрольным образцам) менялось от 4 до 6 тысяч секунд в зависимости от уровня нагрузки и времени после её ступенчатого увеличения. С учетом частотности спонтанных всплесков и количества сеансов ЭВ, лишь небольшая часть вариаций АЭ активности при проведении ЭВ может быть отнесена к спонтанной активизации, случайно совпадающей со временем дополнительного воздействия. К примеру, графики активности АЭ, показанные на рис. 9 а, с, e, были получены в измерительных сессиях, в течение которых до ЭВ не наблюдалось всплесков АЭ, превышающих дисперсию. В большинстве спонтанный всплеск активности АЭ и вынужденный отклик на ЭВ различаются по параметрам, как, например, на рис. 9 с, для которого амплитуда спонтанных всплесков значительно меньше отклика. Для образца габбро (рис. 9 e,f) спонтанный всплеск АЭ четко отделяется меньшей длительностью и амплитудой.

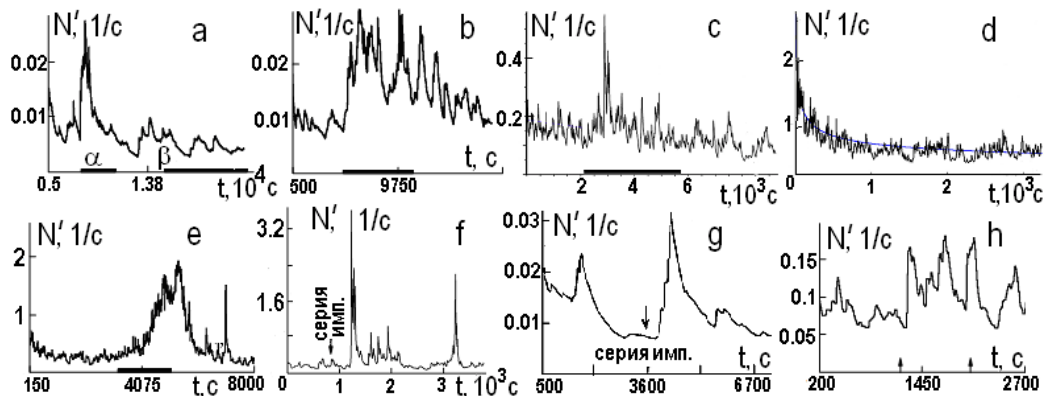


Рис.9. Активность АЭ образцов при модельных “энерговоздействиях”. Время длительных воздействий импульсами генератора Г5-54 указано полосой, кратковременных ЭВ - стрелками. Материалы: а – бетон, параметры импульсов (частота, длительность, амплитуда соответственно):  $\alpha$ - 2 кГц, 5 мкс, 60 В,  $\beta$ -1 кГц, 10 мкс, 60 В (нагрузка – 75% от разрушающей); б – галит, параметры: 2 кГц, 5 мкс, 60 В (нагрузка – 85%); с – гранит Уэстерли, параметры: 2 кГц, 30 мкс, 50 В (нагрузка – 85%); д – тот же образец, при той же нагрузке, что в случае (с), начальный интервал без ЭВ; е – габбро, параметры импульсов: 2 кГц, 70 мкс, 55 В, (нагрузка – 95% от разрушающей); ф – габбро, ЭВ -10 конденсаторных разрядов (амплитуда 800 В, уровень нагрузки – 82%); г – водонасыщенная керамика диоксида циркония, ЭВ – серия из 10 разрядов (амплитуда 400 В, нагрузка 50 %); h – кварцит, ЭВ импульсами индукционного разрядника (амплитуда не менее 3 кВ, нагрузка 50% от разрушающей).

Результат эксперимента с модельным двухфазным материалом – пористой керамикой диоксида циркония показан на рис. 9 г. Эта керамика не обладает пьезоэлектрическими свойствами. Изготовленный образец был насыщен водой, и его электропроводимость увеличилась более чем в  $10^3$  раз по сравнению с обычными сухими образцами. Для водонасыщенных образцов стимулированный прирост активности АЭ наблюдался при меньшей напряженности электрического поля. В частности, при воздействии одиночными импульсами (рис. 9 г) этот эффект отмечен для 400 В конденсаторных разрядов, а активация сухих образцов достигалась при амплитудах напряжения выше 600 В. При воздействиях периодическими импульсами Г5-54 для стимулирования АЭ водонасыщенной керамики было достаточно амплитуды 20-30 В, а не 50-60 В, кА для сухих образцов. На рис. 9 h приведен особый пример - отклик образца кварцита на одиночные импульсы напряжения (~3 кВ амплитуда). Образец кварцита изначально имел трещиноватую структуру, и в ходе его деформирования наблюдалось много сколов, что отображалось в виде спонтанных всплесков активности АЭ. Высокая активность трещиноватого образца позволила проводить ЭВ в экспериментальных сессиях при нагрузке порядка 40% от разрушающей. Отклик представляет собой резкое увеличение АЭ с небольшой задержкой порядка 50 с. В ходе сессии с ЭВ наблюдались сколы вскоре после одного или нескольких всплесков АЭ, вызванных, в частности, электроимпульсами. Важно, что, несмотря на наличие у кварцита пьезоэлектрических свойств и воздействие поля с наибольшей напряженностью, прирост активности АЭ (рис. 9 е) не стал более существенным, чем в случае образцов галита (рис. 9 б) и габбро (рис. 9 е, ф). Сопоставление откликов активности АЭ образцов кварцита, галита и гранита свидетельствует об общности эффекта прироста активности АЭ под влиянием электроимпульсов.

**Раздел 4.3** посвящен оценкам статистической достоверности эффекта прироста активности АЭ под влиянием электроимпульсов. Наличие задержки отклика АЭ, длительность которой непостоянна даже для серийных образцов при одной и той же нагрузке, сделало необходимым применение специальных методов статистического анализа. Для временных зависимостей активности АЭ, полученных в сессиях с длительным электровоздействием, применен дискриминантный корреляционный анализ. Строились функции кросс - корреляций между вспомогательными рядами  $\theta$  - функций, один из которых описывает наличие/отсутствие активации, превышающей уровень СКО, а второй – присутствие (или нет) ЭМ поля. Для всех образцов и всех сессий с ЭВ, в которых отклик АЭ отмечался визуально, максимум корреляционной функции был выше 0,5. Это выше значения 0,3, для которого события считаются независимыми. В случае кратковременных воздействий зарегистрированные в течение сессии события АЭ естественно разделяются на произошедшие до и после ЭВ, и адекватным является критерий Пирсона для одномерных выборок. Значения параметра Пирсона, ( $\chi^2$ ), вычислялись в скользящем окне шириной заведомо меньше времени задержки отклика. Для зависимостей, показанных на рис. 9 f,g,h, максимум  $\chi^2$  после ЭВ оказался более 9. Для зависимостей с менее контрастным приростом активности максимальное значение  $\chi^2$  превышало критический уровень ( $\chi^2_{CR} \approx 2,7$ , при котором изменения можно считать не случайными с достоверностью 90%.

Для оценки значимости совокупности данных об откликах АЭ, полученных для нескольких материалов и видов воздействий, использовался биномиальный тест. Наиболее показателен следующий пример. В диапазоне нагрузок 70-95% от максимума было проведено 26 экспериментов (ЭВ в течение сессий при постоянном сжатии), а отклик зарегистрирован в 22 случаях. Для нулевой гипотезы (отсутствие влияния ЭВ) вероятность активации АЭ в отдельном эксперименте естественно принять равной  $\frac{1}{2}$ . Но тогда биномиальное распределение описывает вероятность появления 22 таких (положительных) исходов в 26 экспериментах пренебрежимо малой величиной 0,02 %. Это означает, что для исследованных материалов и для указанного диапазона нагрузок наблюдения прироста активности АЭ после воздействия электроимпульсов являются высокозначимыми, т.е. отклики АЭ не случайны.

**В разделе 4.4.** представлены результаты детализационных экспериментов, проведенных на рычажно-гравитационном прессе УДИ-Л. В этих экспериментах, в частности, сравнивались параметры откликов АЭ на воздействие ЭМ полей и на изменение механической нагрузки [19,23,25]. Исследовались образцы полухрупких (граниты) и псевдопластичных (каменная соль) горных пород, для которых в диапазоне нагрузок 0,75-0,9 от максимума фоновая активность АЭ квазистационарна в течение нескольких часов. На рис 10 а показаны результаты измерения АЭ образца гранита Сары-Жаз (Кыргызстан) в сессии при напряжении сжатия 100 МПа (0,85 от максимального). Ступенчатое увеличение нагрузки до 107 МПа привело к резкому росту активности АЭ (рис. 10 а) с последующим спадом с временной зависимостью, аналогичной закону Омори. В период всплеска активности АЭ длительностью 180 с было зарегистрировано примерно  $N_{ALL} = 4100$  событий. Вычитая из  $N_{ALL}$  вклад фоновой активности, можно оценить количество триггерных событий,  $N_{ТП} = 3400$ , соответствующих вкладу энергии при тестовой пригрузке, составляющему около 5 Дж. Далее в рассматриваемом эксперименте образец подвергался воздействию электрических импульсов с амплитудой напряженности около 400 В/м, частотой - 50 кГц. Количество энергии, поглощенной образцом в период воздействия поля (отмечен полосой ЭИ на рис. 10 а), по порядку величины оценено как  $2 \cdot 10^{-2}$  Дж. Отклик на воздействие электроимпульсов превышает отклик на тестовое механическое воздействие по длительности и амплитуде прироста активности АЭ. Количество триггерных событий за 300 секундный период подачи импульсов может быть оценено как  $7100 \pm 50$ , из них  $N_{ЭИ} = 5700 \pm 50$  событий произошли за первые 180 с периода ЭИ. Это значение  $N_{ЭИ}$  в 1,7 раза больше  $N_{ТП}$  при механической активации, хотя энерговклад в первом случае (ТП) пригрузки был существенно больше, чем во втором (ЭИ).

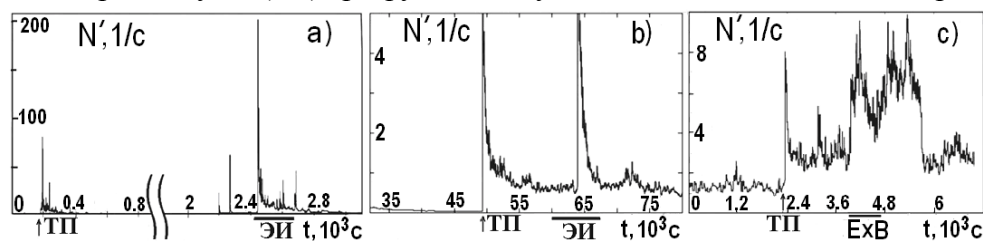


Рис. 10. Временные зависимости активности АЭ образцов: гранита Сары-Жаз (а), каменной соли, Токтогул (б), гранита Уэстерли (с). Воздействия: ТП- тестовая пригрузка, ЭИ – электроимпульс Г5-54, Е×В – скрещенные поля.

Аналогичные результаты были получены на образце каменной соли (рис. 10 б). В этом случае напряжение сжатия было 30 МПа (0,85 от максимального), первая активация АЭ на рис. 10 б вызвана добавкой сжатия на 0,5 МПа (энерговклад 1-2 Дж), а вторая электроимпульсами с амплитудой напряженности  $E \sim 10^3$  В/м, частотой – 2,2 кГц. Число триггерных событий при механическом воздействии, составило  $N_{ТП} = 5050 \pm 50$ , а электрическом -  $N_{ЭИ} = 4200$ , т.е. для образца каменной соли при том же уровне нагрузки, что для гранита (рис.10 а), отношение  $N_{ЭИ} / N_{ТП}$  оказалось меньше единицы ( $\approx 0,6$ ). Результаты еще одного эксперимента с образцом другого вида гранита (Уэстерли, США) показаны на рис.10 с. По общей методике сначала была проведена добавка напряжения на 0,4 МПа к стационарному сжатию 198 МПа (около 0,85 от максимума), энерговклад составил около 0,5 Дж. Тестовая пригрузка вызвала отклик длительностью 120 с, было дополнительно инициировано  $N_{ТП} = 2790 \pm 20$  событий. После установления нового стационарного уровня активности АЭ было проведено воздействие скрещенными электрическим и магнитным полями. Амплитуда напряженности поля Е была около 400 В/м, частота – 3 кГц, магнитное поле характеризуется амплитудой индукции  $B \sim 0,004$  Т, и частотой 6 кГц. Применялась синхронизация включения электрических импульсов с фазой источника магнитного поля (рис.8 б). Количество энергии, внесенной в образец скрещенными Е×В полями, было около 0,1 Дж. В течение периода активации (отклика) было зарегистрировано 10800 событий АЭ, а 5990

из них могут считаться триггерными (что соответствует избытку сверх установившегося уровня). Отклик на воздействие скрещенных полей более длительный, чем на механическую пригрузку. Если рассматривать одинаковые временные интервалы (весь отклик на ТП часть периода активации вследствие (E×B) полей), отношение избыточного числа событий будет порядка 2.

Для сопоставления результатов, полученных для полухрупких (граниты) и псевдопластичных (соль) образцов рассчитывалось отношение поглощенной энергии (W) к числу триггерных событий, обозначаемое ЭУТ - энергия удельного триггера. Сводка результатов помещена в таблице 2. Данные из таб. 2 указывают на значительное различие (более чем на три порядка) в значениях параметра ЭУТ для образцов гранита и каменной соли при электровоздействии. А при механической активации величины ЭУТ для этих двух образцов отличаются друг от друга менее чем на порядок. По параметру ЭУТ воздействие импульсов генератора Г5-54 на гранитные образцы оказалось более эффективным, чем на образцы каменной соли. А наиболее эффективным способом стимулирования АЭ следует считать синхронизированное воздействие скрещенных (E×B), для которого значение ЭУТ – всего  $2 \cdot 10^{-5}$  Дж.

Таблица 2. Параметры вариаций активности АЭ при разных видах воздействий.

Образец	Вид воздействия	Прирост деформ.	Удельный прирост деформ.	Энерго-вклад, Дж	$N_{ТП}, N_{ЭИ}, N_{E×B}$	ЭУТ, Дж
Гранит Сары-Жаз	ТП	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-7}$	5	3400	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Каменная соль	ТП	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	$(2-4) \cdot 10^{-8}$	1-2	5050	$(1-2) \cdot 10^{-4}$
Гранит Уэстерли	ЭИ	не применимо	не применимо	0,02	7100	$3 \cdot 10^{-6}$
Каменная соль	ЭИ	не применимо	не применимо	0,05	2500	$2 \cdot 10^{-5}$
Гранит	ТП	$10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	2,5	2790	$10^{-3}$
Уэстерли	E×B	не применимо	не применимо	0,1	5990	$2 \cdot 10^{-5}$

В разделе 4.4 также рассмотрен вопрос об изменении амплитудных распределений событий АЭ при активации электроимпульсами. Для этого анализируются селективные активности АЭ, определяемые по выборкам относительно слабых (низкоамплитудных) и сильных (крупноамплитудных) событий [19,25,28]. Выделено два предельных режима активации АЭ. Наиболее распространен режим, при котором рост активности слабых событий,  $N'_1$ , и сильных,  $N'_2$ , происходит пропорционально друг другу (с сохранением самоподобия источников АЭ). Все случаи мало контрастных откликов, с приростом полной активности менее чем в 1,5 раза, соответствуют режиму самоподобия. Другой режим содержит противофазные изменения селективных активностей  $N'_2$ : нарастание потока слабых событий,  $N'_1$ , при убывании или постоянстве  $N'_2$ . Этот режим проявляется только при напряжениях сжатия выше 85% от разрушения. Эпизоды рассогласования также отмечены при включенном источнике ЭМ поля, в период задержки отклика АЭ. В случае откликов в режиме самоподобия большинство стимулированных событий относится к группе слабых. Наглядный пример показан на рис. 11. Эксперимент проводился с образцом каменной соли из той же серии, что и образец, отклик которого демонстрировался на рис. 9 б, сжимающая нагрузка составляла 70% от максимальной. При обобщении полученных результатов о селективных активностях АЭ образцов установлена тенденция соблюдения самоподобия: в потоке событий АЭ взаимопропорциональное изменение активностей слабых и сильных событий происходит почти все время, включая период воздействия ЭМ поля.

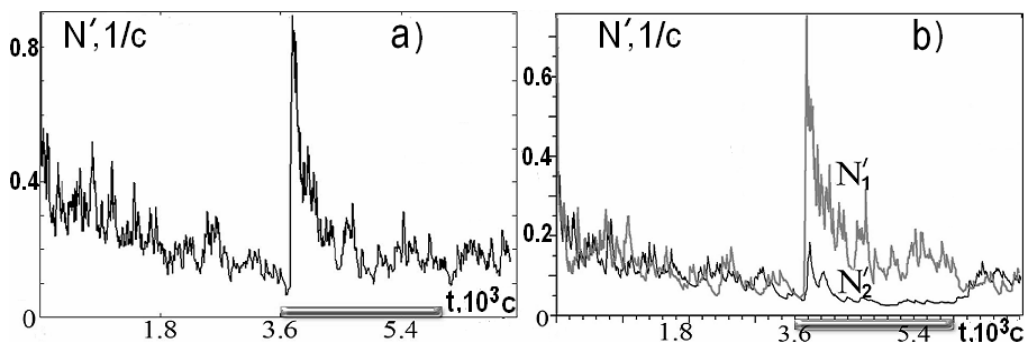


Рис. 11. Зависимости активности (а) и селективных активностей (б) образца каменной соли в сессии с подачей электроимпульсов (напряжение - 60 В, длительность 5 мкс, частота - 2 кГц).  $N'(t) = N'_1(t) + N'_2(t)$ .

В разделе 4.5 проведено обсуждение возможных механизмов преобразования электромагнитной энергии в механическую в условиях экспериментов на образцах и предложена физическая модель, связывающая механизм воздействия импульсных ЭМ полей на трещинообразование (АЭ) с возбуждением вибраций. Для идентификации базового эффекта первичного возбуждения вибраций при

подаче на образцы электроимпульсов важным обстоятельством является резкость изменения поля во всех случаях, когда наблюдались отклики АЭ. При подаче прямоугольных импульсов с крутыми фронтами может проявиться такой волновой эффект, как нелинейное резонансное взаимодействие звуковых и электромагнитных волн, с резонансом на разностной частоте. В экспериментах по воздействию на образцы геоматериалов импульсами импульсов Г5-54 крутые фронты нарастания с длительностью менее 0,1 мкс обеспечивают возбуждение большого числа гармоник в полосе частот выше  $\omega \sim 10^7$  1/с. Среди них найдутся близкие частоты  $\omega_1, \omega_2$ , с разностью  $\omega_1 - \omega_2$ , лежащей в диапазоне звуковых частот  $\omega_S$  от сотен 1/с до  $10^3$  1/с. При таком резонансе звуковая волна с частотой  $\omega_S = \omega_1 - \omega_2$  будет усиливаться. По-существу, эффект является низкочастотным аналогом известного в нелинейной оптике эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна - рассеяния света на временных флуктуациях диэлектрической проницаемости, возникающих вследствие флуктуаций плотности, т.е. при деформации. В нагруженных образцах при образовании микротрещин в окружающем объеме вещества, несомненно, имеют место неоднородные возмущения деформации. Если эти возмущения получают дополнительную энергию и импульс от внешнего поля, а акустическая добротность среды достаточно велика, колебания распространяются и могут оказывать триггерное влияние на рост трещины в другой области. Далее процесс повторяется и, таким образом, может произойти “саморазгон” роста микротрещин, проявляющийся в экспериментах как кратковременный прирост активности АЭ. Для горных пород без крупных трещин добротность при атмосферном давлении  $Q \sim 100-400$ , а в сжатом состоянии может достигать нескольких тысяч. Фактор добротности имеет решающее значение, благодаря нему взаимодействие электромагнитных волн со звуковыми может продолжаться намного дольше времени пробега упругой волны, возникающей при образовании трещины.

Особенности расположения токоподводящих электродов в вышеописанных экспериментах (рис. 8 б) позволяют описывать переходные процессы при прохождении крутых фронтов импульсов как распространение двух ЭМ волн с противоположно направленными векторами Умова-Пойнтинга. В классической (неквантовой) модели вынужденного рассеяния Бриллюэна это соответствует случаю “рассеяния назад”, при котором условие усиления звуковой волны записывается в форме:

$$\omega_S = (V_S/C) \cdot (\omega_1 + \omega_2) \approx 2 (V_S/C) \omega_{1,2} \quad , \quad (4)$$

где  $V_S$  – скорость звуковой волны,  $C$  – скорость ЭМ волн. Для консолидированных сред обычно  $V_S/C \sim 10^{-5}$ , и условие (4) согласуется с требованием  $\omega_S = \omega_1 - \omega_2$ , при указанных выше частотах звуковых и ЭМ волн. На основе классической модели Бриллюэновского рассеяния “назад”, [Шуберт и Вильгельми, 1973], выведено следующее выражение для оценок амплитуды вибраций, которые могут возбуждаться при рассматриваемом нелинейном резонансе

$$\delta\sigma \sim \pi^2 Q \cdot \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \epsilon_e \cdot E_{\sim}^2, \quad (5)$$

где обозначено:  $\delta\sigma$  - амплитуда колебаний давления,  $\epsilon_e$  – диэлектрическая проницаемость материала образца,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $E_{\sim}$  – амплитуда напряженности электрического поля на частоте  $\omega_{1,2}$ . Оценки с использованием (5) подтверждают возможность возбуждения колебаний с амплитудой порядка  $10^{-7} - 10^{-6}$  относительно уровня главного сжимающего напряжения при воздействиях импульсов с характерной напряженностью  $E \sim 1$  кВ/м (случай использования Г5-54). Важно отметить, что при одних и тех же величинах напряженности поля  $E$  амплитуды колебаний напряжения на частоте  $\omega_S$  оказались более чем в  $Q$  раз больше значений для плотности ponderomotorных сил в квазистационарном случае. Предложенный механизм возбуждения колебаний объясняет, в какой-то степени, сходство откликов АЭ на действие импульсов ЭМ поля и слабых низкочастотных вибраций. Эта модель указывает ряд следствий, которые подтверждены наблюдениями. В частности, имеются данные об опережающем возбуждении вибраций с частотами в сотни 1/с при воздействии ЭМ поля [71,79], что подтверждает центральное положение модели.

**Выводы по главе 4** о наличии и свойствах откликов АЭ образцов геоматериалов на воздействия электромагнитных импульсов, согласно [5,10,11,16,19,23,25,55,69,71,77], вынесены в Заключение.

## **Глава 5. Сейсмические проявления откликов среды на воздействие мощных электромагнитных импульсов (на примере Северного Тянь-Шаня)**

В разделе 5.1 дано описание геологического строения и геодинамики рассматриваемого региона. Охарактеризована сейсмичность Центрального Тянь - Шаня и его северной части - территории расположения Бишкекского геодинамического полигона (БГП). Приведены сведения о геофизических

сетях БГП, в том числе сейсмической сети KNET (10 цифровых телеметрических станций). Эта информация важна для обоснования того, что только данные о вариациях слабой сейсмичности адекватны для исследования “энерговоздействий” на кору БГП. Для исследований по теме работы использовался каталог землетрясений, полученный по данным сети KNET (6470 событий за 1998-2008 гг). Исследуемая территория БГП находится в пределах 41,5° - 43,5° с.ш., 73°-77° в.д. Внутри этой области сеть KNET обеспечивает регистрацию событий с классами энергетических классов  $K \geq 7$  практически без пропусков [12,13,41,42], диапазон представительных классов:  $7,0 < K < 12$  ( $1,7 < M_b < 4,4$ ).

Далее в **разделе 5.2** изложены обстоятельства и методика проведения на Бишкекском полигоне электромагнитных зондирований в экспериментальном режиме (модельные ЭВ, [13,51]). Дано краткое описание конденсаторно-тиристорного источника ЭРГУ-600-2, который применяется для мониторинга кажущегося сопротивления земной коры по методу ЗСД. В обычном режиме (мониторинг  $\rho_k$ ) этот источник генерирует двуполярные симметричные импульсы тока. Нагрузкой является первичный диполь, полюса которого – распределенные электроды с разномом  $AB=4200$  м. Идея эксперимента с использованием ЭРГУ-600-2 заключается в проведении зондирований однополярными импульсами, форма которых аналогична зондирующим токам при пусках геофизических МГД – генераторов. В проведенном в 2000 - 2005 гг. эксперименте в первичный диполь в дополнение к обычным зондированиям подавалось 200 однополярных импульсов длительностью 5, 10 или 20 секунд каждый (рис.12 а). Амплитуда тока составляет 600А (как и для двуполярных импульсов, рис. 12 б). Весь период эксперимента разделяется на три этапа, различающихся по длительности зондирующих импульсов. На первых двух этапах (когда длительность токовых импульсов была сначала 5 с, затем 10 с) модельные ЭВ проводились, как правило, раз в 35 суток. На третьем этапе серии 20 с импульсов подавались раз в 49 суток. Всего было проведено 53 экспериментальных сеанса зондирования (этап 1 - 18, этап 2 - 18, этап 3 - 17). При экспериментальных зондированиях однополярными импульсами вклад энергии в среду и электрохимический перенос были существенно больше, чем при зондированиях с применением геофизических МГД-генераторов. Суточный вклад энергии в геосреду в серии из 200 импульсов (рис.12 а) сопоставим с энергией слабого землетрясения (что и позволяет называть эти зондирования “энерговоздействиями”). Тем не менее, в день проведения ЭВ энерговклад увеличивается всего на 30%, существенно возрастает лишь электроперенос. Воспроизводимость формы импульсов тока в питающем диполе в течение всех экспериментальных сеансов позволяет эффективно применить методику совмещения периодов (в нашем случае 35 - суточных) для выявления корреляций между изменением сейсмичности и ЭВ.

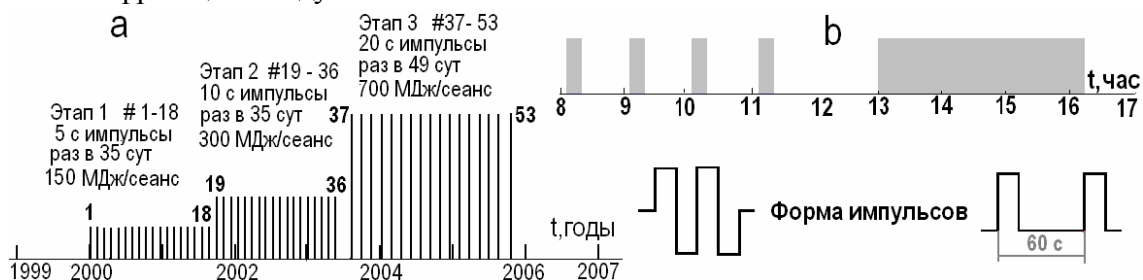


Рис.12. Временная схема эксперимента с однополярными импульсами: а – этапы эксперимента; б- схема сеансов в день дополнительных зондирований

В **разделе 5.3** проведен детальный анализ вариаций слабой сейсмичности [13,33,42,51,56,57,64,70,72-75]. Количественной мерой сейсмичности считается суточное число землетрясений  $N_D$ , произошедших на территории БГП. По данным каталога KNET строились временные зависимости  $N_D$  в окне шириной 35 суток, причем середина окна  $\{t_j-17, t_j+17\}$  приходилась на дату  $t_j$  ( $j=1,2,3...53$ ) - время соответствующего сеанса. По этим графикам выделялись вариации  $N_D$ , происходящие после дня воздействия  $t_j$  и превышающие отклонения от среднего на величину в одно и два среднеквадратичных отклонения, СКО. Среднесуточное число событий и уровень СКО определялись по 17 суткам, предшествующим дате  $t_j$ . Выявлено, что обычная картина равновероятных флуктуаций  $N_D$  меняется: в большинстве окон после дня ЭВ происходит прирост суточного числа событий (в 42 случаях из 53 прирост  $N_D$  превышает уровень СКО, а в 35 случаях – выше уровня 1,5 СКО). Также повышается и общее количество событий после дня ЭВ по сравнению с предшествующим периодом. Значимость наблюдений активации была подтверждена рядом тестов: сравнением с данными о распределении суточного числа событий в другие периоды или для других (контрольных) зон; применением биномиального теста (по аналогии со случаем раздела 4.3) для всего эксперимента 53 ЭВ и его отдельных этапов; анализом



различных выборок из каталога событий (в частности, исключая “сомнительные” периоды после сильных землетрясений и с грозвыми разрядами) и др. Объем автореферата позволяет представить результаты непараметрического теста Вилкоксона и совмещения периодов наблюдений.

Тест Вилкоксона для двух зависимых выборок применен по той же методике, что и в работах Тарасова Н.Т. для случая МГД-генераторов. В нашем случае сравнивается количество событий в интервалах до и после ЭВ длительностью от 1 до 17 суток (признак “до” или “после” даты ближайшего ЭВ определяет разграничение именно на 2 выборки). Для каждого из 53 сеансов ЭВ вычисляется разность между числом событий в интервалах после и до воздействия. События выбирались в диапазоне энергетических классов 7-11. Если значения в двух выборках совпадают, они исключаются из рассмотрения. Оставшиеся значения ранжируются (начиная с наименьшего), и определяются суммы рангов, соответствующих случаям положительных ( $T_1$ ) и отрицательных разностей ( $-|T_2|$ ). По полученным данным вычисляется значение параметра  $z$

$$z = [\min(T_1, T_2) - N(N+1)/4] / [N(N+1)(2N+1)/24]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $N$  – число элементов после исключения нулевых значений. Расчет значений  $z$  для интервалов различной длины позволяет с помощью таблиц [Кендалл, Стюарт, 1973] найти вероятности нулевой гипотезы  $P_0$ , по которой количество событий после ЭВ не отличается их числа до ЭВ, впечатление о приросте лишь кажущееся. На рис. 13 показаны значения вероятности нулевой,  $P_0$ , и альтернативной ( $1 - P_0$ ) гипотез в зависимости от длительности временных интервалов (в сутках). Согласно рис. 13 гипотезу о неслучайном приросте числа событий через 6 суток после ЭВ можно принять с доверительной вероятностью не менее 0,8.

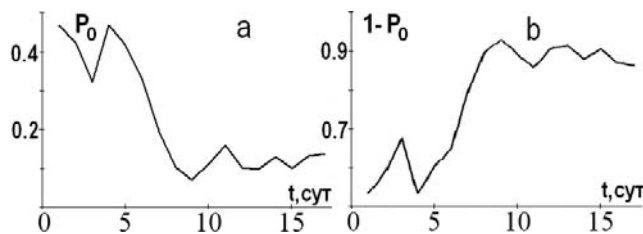


Рис. 13. Вероятность реализации нулевой (а) и альтернативной (б) гипотез о различии в числе событий до и после ЭВ для интервалов различной длительности.

Для выделения влияния токовых импульсов при экспериментальных зондированиях среди нерегулярных факторов (магнитные бури, удаленные землетрясения и т.п.), которые также могут играть роль триггеров, применено когерентное суммирование суточного числа событий в окнах  $\{t_j-17, t_j+17\}$ . На рис. 14 представлены кумулятивные распределения для сейсмических событий представительных классов по отдельным этапам эксперимента, отличающимся по длительности импульсов тока и (пропорционально) вкладу энергии. Появление более контрастных откликов  $N_D$  на втором и третьем этапах можно связать как с увеличением энерговклада, так и длительности импульсов. При этом роль длительности наиболее очевидна – в силу скин - эффекта амплитуда импульсов убывает с глубиной, но для более длинных импульсов, спектр которых смещен в сторону низших частот, убывание слабее. По оценкам, эффективная глубина проникновения электромагнитного поля при экспериментальных зондированиях составляет  $h_{ef} \approx 20$  км для 5 с импульсов,  $h_{ef} \approx 28$  км для 10-секундных и  $h_{ef} \approx 40$  км для 20-секундных. Для Северного Тянь-Шаня большинство гипоцентров лежит в слое 5-15 км, с чем естественно сопоставить глубинность структур, которые могут дать отклик на ЭВ.

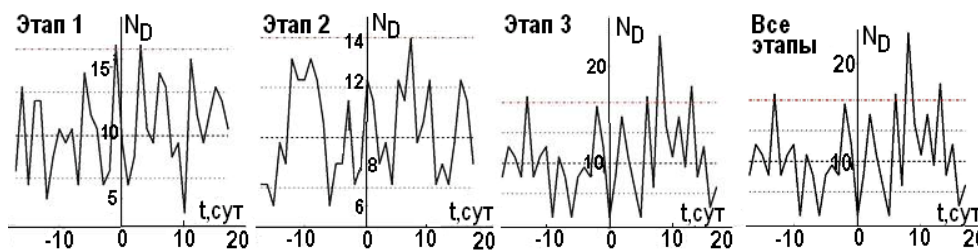


Рис. 14. Кумулятивные распределения суточного числа событий классов 7-11 по отдельным этапам эксперимента. Пунктиром указано среднее значение, найденное по первым 17 суткам до ЭВ, и отклонение от него на 1 и 2 СКО.

**Энергетические характеристики эффекта активации.** Результаты расчета суммарной сейсмической энергии событий, выделившейся на территории БГП до и после дополнительных ЭВ, приведены в таблице 3. Включены результаты для всех зарегистрированных событий, а также для выборки классов 7-11. Данные табл.3 показывают, что количество энергии,  $E_S$ , выделившейся за 17 суток после воздействий, превышает значение  $E_S$  за такой же интервал до ЭВ. Значение прироста выделившейся энергии на первом и втором этапах порядка  $1-5 \cdot 10^{12}$  Дж, а на третьем этапе - значительно

больше,  $\Delta E_S \sim 7 \cdot 10^{14}$  Дж. Для выборки событий  $7 < K \leq 11$  прирост  $\Delta E_S$ , превышающий выделение сейсмической энергии в период до ЭВ отмечен на втором и третьем этапах эксперимента. При суммировании по всем 53 экспериментальным зондированиям получается, что прирост выделившейся энергии после ЭВ составляет  $\Delta E_S \sim 7,5 \cdot 10^{14}$  Дж для всего каталога и  $\Delta E_S \sim 0,3 \cdot 10^{12}$  Дж для выборки 7-11 классов. Значительный прирост высвобождения энергии, превышающий вклад энергии в среду при экспериментальных зондированиях свидетельствует о триггерном эффекте электромагнитных (токовых) импульсов. В качестве показателя эффективности триггера можно рассматривать отношение  $\Delta E_S$  или  $\Delta E_{S,7-11}$  к энергокладу и к рассматриваемой площади. Значения этого параметра: около  $0,5 \text{ 1/км}^2$  для всего каталога и  $2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/км}^2$  для выборки 7-11 классов.

Таблица 3. Энергоклад и выделение сейсмической энергии на разных этапах эксперимента.

№ этапа, № ЭВ	Классы	До ЭВ, ГДж	После ЭВ, ГДж	$\Delta E$ , ГДж	Вклад ЭВ, ГДж
1, 1-18	Все К	$0,1 \cdot 10^4$	$0,6 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^4$	2,8
	7-11	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	$-0,3 \cdot 10^2$	
2, 19-36	Все К	$0,3 \cdot 10^2$	$0,9 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^3$	5,5
	7-11	$0,3 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	
3, 37-53	Все К	$0,9 \cdot 10^3$	$0,7 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$	12
	7-11	$0,3 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^3$	
Все, 1-53	Все К	$0,2 \cdot 10^4$	$0,8 \cdot 10^5$	$0,75 \cdot 10^5$	20
	7-11	$0,2 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^3$	$0,3 \cdot 10^3$	

Для детализации данных о чувствительности к энерговоздействиям событий разных классов К построены распределения количества землетрясений, произошедших в течение 10-ти суточных интервалов до и после ЭВ, по их классам. На рис.15 показаны графики таких распределений для различных этапов эксперимента, построенные в полулогарифмическом масштабе. Площадь между кривыми, описывающими распределения до и после ЭВ, дает прирост сейсмичности в диапазоне классов К, где ход кривых различается. Для графиков, полученных при совмещении всех окон с 1 по 53, различие составляет примерно 70 событий при общем числе событий 7-11 классов в 10-суточных интервалах перед ЭВ  $\sim 500$ . Прирост достигается, в основном, за счет событий 7-8 классов (на третьем этапе 7-8,5), которые можно считать восприимчивыми к электромагнитным воздействиям. Необходимо подчеркнуть, что на втором и третьем этапах увеличивается число событий с  $K > 7,5$ , для которых исключена возможность пропуска событий.

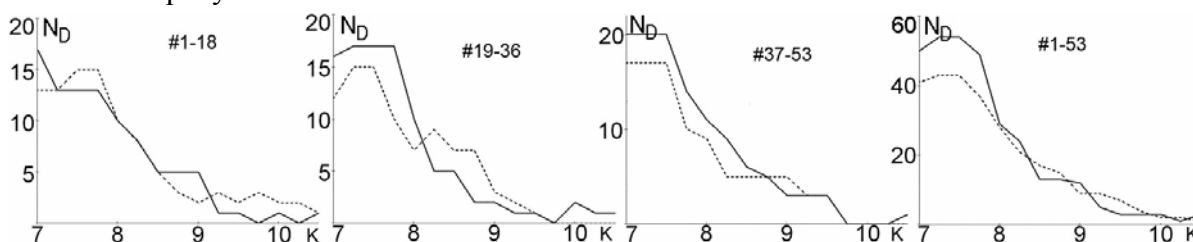


Рис. 15. Распределение по классам сейсмических событий, произошедших в течение 10 суток до (пунктир) и после ЭВ (сплошная линия).

**Особенности в следовании событий с классами  $K > 10$  после ЭВ.** В период проведения экспериментальных зондирований на территории БГП произошло 37 землетрясения с энергетическими классами 10-12, в том числе 11 в 10 -суточных интервалах до дня ЭВ и 14 – в 10 -суточных интервалах после ЭВ. По кумулятивным распределениям этих событий в интервале  $\pm 17$  суток от совмещаемого дня ЭВ отмечен прирост суточного числа событий на 5-9 день после воздействий (по сравнению с предысторией), рис.16 а. Но наиболее интересным является существенное уменьшение числа событий в интервале 12-17 суток после ЭВ, которое может быть проявлением многостадийности реакции среды на воздействие электромагнитных импульсов. Для визуального анализа особенностей следования событий с “умеренной” энергией более удобным является построение кумулятивных графиков для интервала 0 - 34 сутки после ЭВ. Это позволяет расширить границы рассматриваемого интервала 12 - 17 суток, что необходимо для идентификации паузы в следовании не очень частых событий классов 10-12. Ввиду того, что на третьем этапе экспериментальные зондирования проводились через 49 суток, а не через 35,

переход к новому временному окну не сводится к тривиальному переносу графика из левого полуокна (рис.14) и требует перерасчета. Результат такого перерасчета (рис.16 б) свидетельствует о неравномерности в следовании событий классов 10-12 с активацией после ЭВ, заметным спадом числа таких событий в интервале 12-25 сутки после воздействия и новым приростом в интервале после 26 суток. Для событий классов 7-10 спад активности в интервале 12-25 сутки выражен слабее и связан с тем, что в эти дни отклик на внешние воздействия уже завершился. В годы до и после проведения эксперимента, 1998-1999, 2006-2008 гг не было обнаружено неравномерности следования событий, подобной показанной на рис 16 б.

Неслучайный характер изменения распределения событий классов 10-12 по суткам после ЭВ можно подтвердить с помощью теста Фишера [Кендалл, Стьюарт, 1973]. Для реализации теста весь интервал 35 суток после дня ЭВ разбивался на 3 интервала: 1-11 сутки, 12-23 сутки, 24-34 сутки. Нулевая гипотеза состоит в том, что выбранной пары интервалов количество событий с классами 10-12 не отличается. Выборка сравнения была сформирована по каталогу сети KNET 2006-2009 гг для и той же территории БГП, что основная выборка. Для этого были случайно сгенерированы равноотстоящие на 35 суток даты «мнимых» воздействий, и совмещены 35 суточные интервалы между ними. По результатам теста Фишера альтернативную гипотезу (о неслучайности уменьшения числа событий на 12-23 сутки по сравнению с интервалом 1-11 сутки) можно принять с доверительной вероятностью более 0,95.

Представленные на рис. 16 данные, сами по себе, вряд ли достаточны для утверждения о проявлениях эффекта “энергетического размена”, подобного описанному для случая вибрационного воздействия в работах [Мирзоев и др.,1987; Капустян и Юдахин, 2007]. Однако они определяют пределы во времени, в которых, с наибольшей вероятностью, может сохраняться релаксированное состояние среды после воздействий импульсов тока с вышеуказанными параметрами. Согласно рис.16 б, для экспериментальных зондирований (как на рис.12) это время наступает с задержкой 11-12 суток и длится около 12 суток. А прирост слабой сейсмичности (рис.14), отражающий триггерное влияние импульсов тока при экспериментальных зондированиях, отмечен на 6-8 сут.

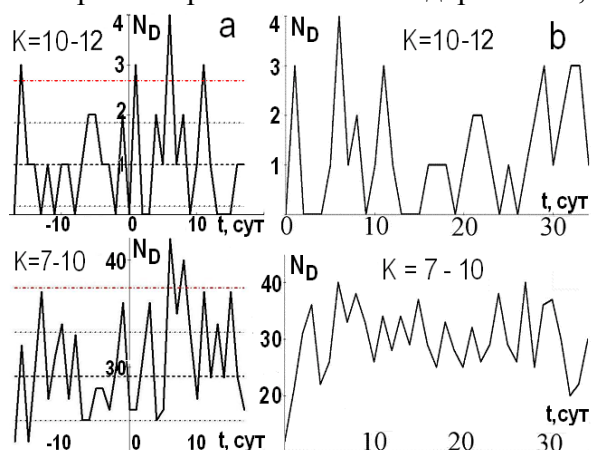


Рис. 16. Кумулятивные распределения суточного числа событий классов 10-12 и 7-10 в интервале  $\pm 17$  суток от дня ЭВ (а) и в период после совмещенного дня воздействий (б).

**Проявления реакции среды на ЭВ в параметрах механизмов очагов.** Для исследования проявлений ЭВ в вариациях фокальных параметров и некоторых изменениях режима сейсмостектонических деформаций (СТД) в качестве исходного материала использован каталог фокальных механизмов, который содержит параметры очагов более 800 землетрясений, произошедших на территории внутри сети KNET за 1999 - 2008 гг. Из этого каталога были сформированы 4 выборки: две из них включали события, которые произошли за 10 дней до ЭВ и после него, две другие - землетрясения, произошедшие за 17 дней до и после ЭВ. При расчете СТД использовался подход, описанный в [8,22]. Глубина сейсмоактивного слоя принята равной 30 км. На рис.17 представлены диаграммы распределений азимутов осей сжатия и растяжения фокальных механизмов очагов землетрясений по четырем выборкам, которые отображают диапазон изменения этих осей до ЭВ и после него.

Отмечается узкий разброс азимутов оси сжатия ( $345 \pm 7^\circ$ , рис.17 а,с) для событий из интервалов до ЭВ и расширение разброса после ЭВ ( $330^\circ - 360^\circ$ , рис. 17 б,д). Таким образом, что для выборок “до ЭВ” направленность азимута оси сжатия на северо-северо-запад выражена сильнее, чем для более широких распределений для выборок “после ЭВ”. Это различие может отражать уменьшение коэффициента внутреннего трения и/или сцепления при внешнем воздействии. Для рассматриваемых выборок событий

в интервалах до и после ЭВ также проведен анализ усредненных фокальных механизмов для выявления сходства или различия с данными о режиме СТД (по классификации, предложенной в [Юнга, 1997]).

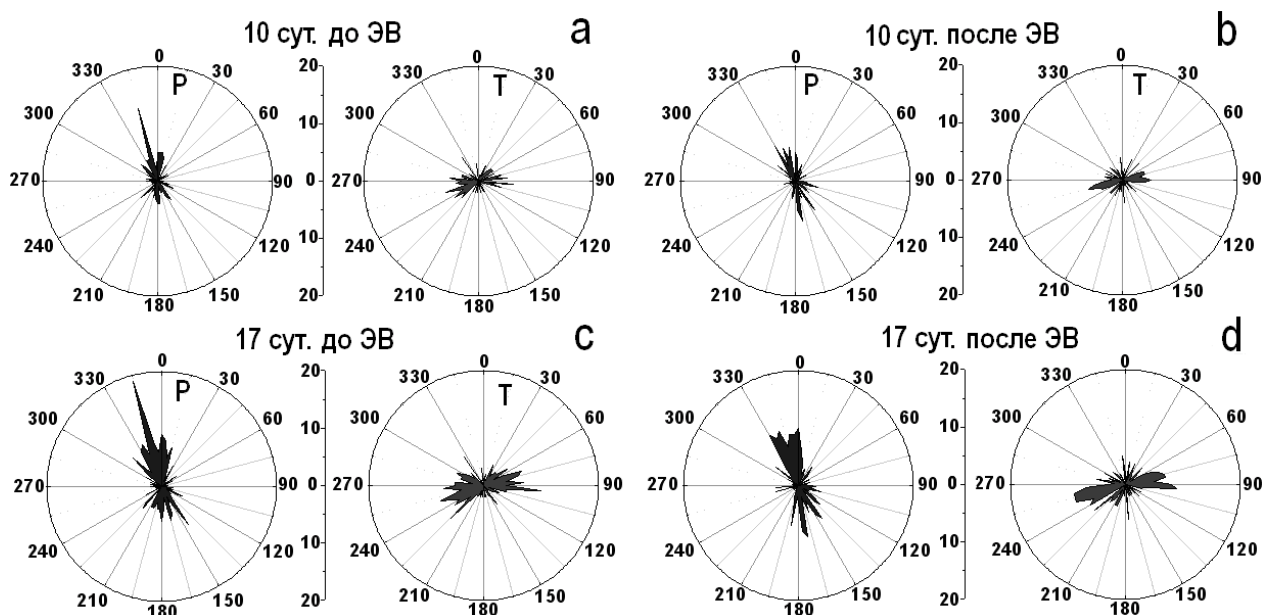


Рис. 17. Распределение азимутов углов осей сжатия и растяжения фокальных механизмов очагов: а – события в интервале 10 суток до ЭВ; б – 10 суток после ЭВ; с – 17 суток до ЭВ; д – 17 суток после ЭВ.

Известно, что для западной части территории БГП характерен режим сдвига, а для восточной – режим транспрессии [8,22,24]. Эти результаты воспроизведены при расчетах средних механизмов для выборок событий в течение 10 и 17 суток до ЭВ. А вот для выборок событий, произошедших после ЭВ, проявилось отличие: транспрессия сменила сдвиговый тип средних механизмов в западной части БГП. Обнаружение различий в фокальных параметрах имеет принципиальное значение с точки зрения методологии: причинно-следственная связь должна проявляться не только в статистике событий, но и в изменениях каких-либо их параметров. Подразумевается, что если некоторый фактор обеспечивает механизм воздействия, то он как “инструмент” должен оставить след на “детали”. В данном случае роль такого показателя могут играть параметры ориентации осей сжатия и растяжения.

Результаты различных тестов и подходов к анализу влияния экспериментальных зондирований можно резюмировать (**вывод по главе 5**, в соответствии с [13,42,51,56,57,64,70, 72-75,78]) – подтверждено наличие отклика сейсмичности на воздействие мощных импульсов тока.

## Глава 6. Развитие исследований влияния на геосреду естественных и искусственных электромагнитных возмущений

В этой главе представлен материал, демонстрирующий соответствие результатов об откликах на экспериментальные зондирования 2000-2005 гг с другими результатами о влиянии искусственных и естественных электромагнитных возмущений. В разделе 6.1 методы и алгоритмы, использованные в главе 5, применены для переобработки данных о вариациях сейсмичности Северного Тянь-Шаня в период проведения пусков МГД – генераторов (1983-1989 гг). В этот период цифровой сети KNET еще не было, и для расчетов использовался региональный каталог землетрясений за 1981-1990 гг, составленный в Институте сейсмологии НАН КР. При новом расчете и сравнительном анализе получен следующий результат [62,78], дополняющий выводы оригинальных работ Тарасова Н.Т. и др. о кумулятивном приросте суточного числа событий после пусков МГД-генераторов (раздел 1.1). Показано, что этот прирост определяется вкладом событий, произошедших после 46 пусков с длинными, более 9 с, импульсами тока. Для таких импульсов и энерговклад, и глубина проникновения (скин-слой) достигают максимальных значений. Остальные 68 пусков с длительностью импульсов короче 9 с не дают статистически достоверного отклика сейсмичности. Таким образом, земная кора в сейсмоактивном регионе проявляет чувствительность к воздействию зондирующих импульсов с достаточной длительностью (как при пусках МГД- генераторов, так и при разрядах ЭРГУ-600-2).

В разделе 6.2 рассматриваются проявления эффекта сильных магнитных бурь в характеристиках землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня (по данным сети KNET). Приведены примеры сейсмических откликов (прирост суточного числа событий  $N_D$ , вариации параметров сейсмического

шума) на аномальные магнитные бури, рассматриваемые как своего рода тестовые воздействия. Показано, что эффект таких бурь в период 2000-2006 гг можно отделить от искусственных воздействий ЭРГУ-600-2. Однако эффект прироста  $N_D$  под влиянием естественных возмущений ЭМ поля проявился менее контрастно, чем при электрозондированиях с применением мощных источников тока. Наибольший интерес для темы диссертации представляет результат [27,73], что для территории БПГ время задержки отклика после начала магнитной бури составляет 2-6 суток. Это короче периода 10-14 суток (указанного в разделе 1.2 по данным др. работ) и близко к величине задержек активации под влиянием искусственных источников. Подтверждено сходство эффектов, связанных с искусственными и естественными возмущениям ЭМ поля.

**В разделе 6.3** для объяснения механизма воздействия импульсов тока предложена модель, опирающаяся на хорошо известный эффект стимулирования слабой сейсмичности упругими возмущениями (вибрациями). При поиске источника вибраций при экспериментальных зондированиях обращено внимание на принципиальное значение крутизны фронтов мощных импульсов тока для наблюдаемых слабой сейсмичности. Токи экспериментальных сеансов ЭРГУ-600-2 концентрируются в электропроводящих каналах, роль которых играют, в основном, заполненные минерализованной водой полости трещин. Распространение мощных токовых импульсов с крутыми фронтами в трещиноватой среде при заполнении трещин водой чуть менее 100% может сопровождаться нелинейными электромеханическими эффектами переходного типа, которые ранее не рассматривались применительно к энерговоздействиям. Во-первых, это пробой на фронте нарастания тока, а точнее формирование токового канала в режиме с обострением за счет быстрого исчезновения перемычек – пузырьков насыщенного пара, разделяющих отдельные столбики проводящей жидкости (рис. 18 а). Во-вторых, это быстрый разрыв жидкого проводника с образованием пузыря при прохождении фронта спада импульса тока, рис.18 б (аналог известного эффекта взрывающейся проволочки). При вынужденном перемещении границы жидкость–пар и, тем более, раздувании/схлопывании пузыря в жидкой фазе, возбуждаются звуковые волны. Эти волны передаются из жидкости в скелетный материал и стимулируют рост других трещин в окружающем объеме. Если считать жидкость смачивающей и не слишком вязкой, то при дилатансионном деформировании объема среды с полностью водозаполненной трещиной, длина которой стационарна ввиду равновесного состояния, жидкий объем может распасться на несколько капель, способных перемещаться относительно стенок и друг относительно друга. При расширении полости трещины такой распад более вероятен, чем отрыв жидкости от поверхности трещины. И наоборот, при сближении боковых поверхностей частично заполненной трещины, отдельные капли могут объединяться за счет поглощения пузыря насыщенного пара.

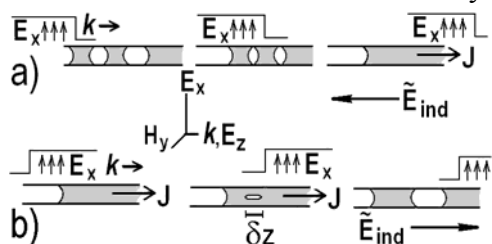


Рис. 18. Модель канального механизма. Для электроимпульсов, распространяющихся в направлении  $k$  фронты нарастания/спада амплитуды  $E_x$  опережают фронты тока  $J$ : а) вступление мощного импульса - формирование токового канала при слиянии жидких объемов в полости; б) разрыв токового канала после прохождения импульса.

Эти эффекты, родственные кавитации, в общем случае реализуются независимо от электромагнитных зондирований, например при динамическом воздействии волн сжатия от взрыва или удаленного землетрясения. Но при распространении мощных импульсов возникновение в жидкости новых поверхностей (пузыря) может происходить за счет электромагнитной энергии. Для этого необходимо, чтобы высвобождение энергии при угасании тока по месту разрыва проводника превысило расход энергии на образование новых поверхностей. Можно записать соответствующий критерий, приравнивая по порядку величины энергию образования новых поверхностей в жидкости  $W_s = 2 \gamma s \delta z$  ( $\gamma$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $\delta z$  – длина сегмента, показанная на рис.18, s- поперечный размер) и энергию тока  $W_J$ , локализованную вокруг этого сегмента. В приближении телеграфного уравнения  $W_J$  выражается через погонную индуктивность  $L_1$  и силу тока  $J$  по формуле  $W \sim L_1 \delta z \cdot J^2/2$ . Условие  $W_J > W_s$  сводится к простому выражению

$$J \geq 2 (\gamma s / L_1)^{1/2}, \quad (7)$$

смысл которого сходен с критерием Гриффитса – разрывная неустойчивость реализуется в ослабленных местах при локализованном накоплении там достаточной энергии. В классическом случае это

происходит с трещиной, а в нашем случае – в жидкой фазе в полости трещины (рис.18 б). Если выбрать для оценки  $\gamma \sim 0,05$  Н/м (вода при температуре 70-90°C),  $L_1 \sim 0,01- 0,1$  мГн/м,  $s \sim 0,1 -1$  м, то выражение (7) будет описывать минимальную для реализации эффекта амплитуду тока в одиночном канале (полости)  $J \sim 50$  А, что значительно меньше величины тока зондирования (600 А). Другим эффектом, сопутствующим быстрому пробойному формированию токового канала в слабопроводящей или диэлектрической твердой среде (помимо возникновения/схлопывания пузыря) является индукционное возбуждение против-ЭДС в окружающей канал области, (рис.18 а). Аналогично, при взрывном распаде токового канала в жидкости в области возле него будет наводиться “перенапряжение” (рис. 18b). Напряженность наведенного поля может превысить амплитудное значение  $E$  в падающей волне, и его взаимодействие с пьезоэлектрическими фракциями и сторонними зарядами в скелетном веществе является еще одним фактором, вносящим вклад в возбуждение вибраций во вмещающей среде. Кроме того, перемещение столба жидкости при разрыве канала, может вызвать вторичный эффект - более интенсивное поступление воды к вершинам трещин, ответвляющихся от основного канала, что оказывает влияние на их последующий рост. Таким образом, нелинейные эффекты, связанные с большой мощностью токовых импульсов и крутизной их фронтов вполне могут быть кандидатами на роль механизма, объясняющего первичное воздействие электромагнитных зондирований [25,27,68,70,71].

Модели, предложенные для описания механизма возбуждения эмиссионного отклика среды на натурном и лабораторном масштабах, оказались различными. С учетом этого, а также значительного различия напряженности электрического поля в лабораторном и натурном эксперименте сходство откликов сейсмичности и АЭ на воздействия электромагнитных импульсов является весьма нетривиальным. В разделе 6.4 этот вопрос рассматривается с позиций эволюционных (кинетических) уравнений для активности ( $n$ ) эмиссионных сигналов [9,76]. Разработана феноменологическая модель (по типу синергетики), в которой влияния внешних факторов учитывается параметрически:  $dn/dt = - a n^2 + b n - c$ , где допускается зависимость параметров среды  $a$ ,  $b$ ,  $c$  от времени. В рамках этой модели триггерный эффект описывается как кратковременное изменение знака  $dn/dt$  при возмущениях параметров, что возможно вблизи особой точки эволюционного уравнения. Наличие общего сценария возникновения откликов эмиссионных сигналов при внешних воздействиях может объяснить, в определенной степени, сходство вариаций сейсмичности и АЭ, стимулированных электромагнитными импульсами.

### **Заключение, основные выводы**

Проведенное исследование охватило широкий круг вопросов взаимосвязи внешних физических полей и процессов неупругого деформирования и разрушения геоматериалов и геосред, объединенных направленностью на перспективу использования электромагнитных импульсов для влияния на сейсмический процесс и снижения вероятности возникновения катастрофического землетрясения. Основное внимание было уделено воздействиям импульсных электромагнитных полей. Было продемонстрировано, что эффект эмиссионного отклика среды на воздействие электромагнитных импульсов встроен в систему представлений современной науки о свойствах нагруженных геоматериалов и геосред. Выводы о характеристиках этого эффекта на натурном и лабораторном масштабах можно сформулировать следующим образом.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о том, что даже весьма слабые вибрации оказывают существенное влияние на ход деформационного процесса и акустическую эмиссию горных пород. Установлен пороговый характер эффекта вибрационного стимулирования активности АЭ вибровоздействия, триггерного воздействия слабых вибраций на темп дилатансионного деформирования горных пород. Выявлено наличие временной задержки между началом вибраций и последующим возрастанием активности АЭ, а также последствие вибраций при их выключении. Вариации активности АЭ нагруженных образцов горных пород на воздействия слабых низкочастотных вибраций и электромагнитных импульсов имеют сходные черты. Опыт исследования влияния слабых вибраций в экспериментах на бесшумных прессах востребован для развития методики моделирования воздействий электромагнитных импульсов.

Результаты экспериментов, проведенных на бесшумных реологических установках, продемонстрировали, что эффект от наложения внешних электромагнитных полей обладает

достаточным потенциалом для модификации процесса накопления дефектов в образцах геоматериалов, находящихся в состоянии неупругого деформирования, но не слишком близко к критическим условиям. Преобладающей реакцией породных образцов на электромагнитные импульсы является кратковременный прирост скорости образования и удлинения микротрещин, что проявляется как отклик активности акустической эмиссии. Анализ энергии, приходящейся на одно дополнительно инициированное событие (параметра ЭУТ – энергии удельного триггера), подтвердил, что такие электромагнитные воздействия как, например, импульсы скрещенных электрического и магнитных полей, или другие оптимизированные ЭВ, могут стимулировать прирост активности АЭ аналогично небольшим механическим пригрузкам (в несколько процентов от напряжения сжатия). Низкое значение параметра ЭУТ для электромагнитных импульсов по сравнению со случаем тестовой пригрузки связано с избирательностью воздействия электромагнитного поля на разупрочненные (подготовленные) зоны, при добавке же механического напряжения нагружается весь образец. При стимулированной активации, как правило, остаются неизменными соотношения между числом дефектов больших и меньших размеров, чему соответствует сохранение самоподобия в потоке событий АЭ. Противофазная активация с преимущественным образованием и ростом малых дефектов может быть вызвана при специальных условиях, в частности, при сжимающих нагрузках порядка 0,9-0,95 от разрушающих, если при этом средняя активность квазистационарна. В целом, исследования откликов АЭ в образцах полухрупких и псевдопластичных геоматериалов продемонстрировали скорее сходство, чем различие реакции этих сред на электромагнитное воздействие при одних и тех же параметрах импульсов. Это нетривиальное обобщение вплотную подвело к новой модели механизма возбуждения упругих волн в результате нелинейного резонансного взаимодействия с гармониками электромагнитного импульса. В терминах нелинейного рассеяния электромагнитных волн на неоднородностях плотности механизм описывается как аналог эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна для волн в диапазоне частот выше или порядка  $10^7$  1/с. Предложенная модель объясняет многие закономерности вариаций АЭ в проведенных экспериментах с электромагнитными воздействиями, в том числе эмпирическое обобщение о чувствительности к электромагнитным импульсам только тех областей, где с достаточной интенсивностью идут процессы трещинообразования, но сохраняются цельные зоны с высокой добротностью Q. Применительно к условиям испытаний образцов это означает, что необходимым условием для реализации нелинейных резонансов является достаточно высокий уровень активности АЭ.

Все использованные методы обработки и анализа данных указали (прямо или опосредованно), что в период проведения электромагнитных зондирований в экспериментальном режиме, 2000-2005 гг, имели место краткопериодные вариации слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня, коррелирующие с датами зондирований однополярными импульсами. Свидетельством влияния на слабую сейсмичность экспериментальных включений (сеансов) ЭРГУ-600-2 является изменение пространственно – временных и энергетических распределений количества событий, усредненное по всем 35- дневным периодам наблюдений. Отклик на энергетические воздействия однополярных импульсов проявляется в виде кратковременного прироста суточного числа слабых землетрясений, наступающего с задержкой в несколько (от 5 до 7) суток. Активация происходит, в основном, за счет событий, гипоцентры которых находятся на глубинах 5-15 км и попадают внутрь площади ближайших к источнику зон с повышенной естественной сейсмоактивностью. Показано, что однополярные импульсы с длительностью свыше 9 с наиболее эффективны в стимулировании прироста слабой сейсмичности по сравнению с импульсами меньшей длительности, в том числе двуполярными импульсами, применяемыми для мониторинга кажущегося сопротивления. Различие эффективности объясняется меньшим затуханием длинных однополярных импульсов с глубиной. Такой же вывод о роли длительности импульсов тока получен при анализе результатов о влиянии пусков геофизических МГД-генераторов на Бишкекском полигоне.

Соответствие результатов при воздействии различных источников может рассматриваться как наиболее убедительный аргумент о достоверности эффекта кратковременного прироста суточного числа сейсмических событий после ЭВ. Продемонстрирован устойчивый характер эффекта отклика слабой сейсмичности на электроимпульсное ЭВ, что выделяет эти воздействия среди таких внешних возмущений, как удаленные сильные землетрясения, техногенные периодичности, грозовые разряды и др. Эффект прироста суточного числа сейсмических событий под влиянием электромагнитных возмущений имеет место и в естественных условиях (сильные магнитные бури). Но при воздействиях искусственных источников (МГД-генераторы, установка ЭРГУ-600-2) он проявился более контрастно.

Вариации слабой сейсмичности после воздействий импульсов тока аналогичны откликам активности акустической эмиссии нагруженных образцов горных пород при модельных электровоздействиях.

В настоящее время идея применения вибраций и электромагнитных полей как средства активного сейсмического мониторинга (а в перспективе экологически приемлемым способом управления процессом) переросла из смелого замысла в научное направление “РИНГ” - разрядку избыточных напряжений в геосреде. Фундаментальность эффекта активации процесса разрушения на микро- и мезоуровнях позволяет перейти от накопления данных по триггерным эффектам внешних физических полей к исследованиям количественных закономерностей частичной разрядки напряжений. По мнению автора, в дальнейших исследованиях целенаправленное воздействие электромагнитных импульсов на земную кору должно рассматриваться как вспомогательная, “резервная” технология снижения сейсмической опасности, используемая в комплексе с другими методами. Результаты исследований на образцах, проведенные в поддержку направления РИНГ, представляют и самостоятельный интерес для использования в смежной области (физическое материаловедение, неразрушающий контроль неметаллических конструкционных материалов).

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Статьи в журналах

1. **Богомолов Л.М.**, Трапезников Ю.А., Манжиков Б.Ц. Влияние слабых вибраций на деформирование горных пород при постоянной нагрузке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 2. С. 1 - 4.
2. **Богомолов Л.М.**, Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. Амплитудные спектры акустической эмиссии при ступенчатом нагружении горных пород // Вулканология и сейсмология. 2000. № 2. С. 75 - 78.
3. **Богомолов Л.М.**, Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н., Трапезников Ю.А. и др. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1678 - 1689.
4. **Богомолов Л.М.**, Манжиков Б.Ц., Ильичев П.В., Сычев В.Н. Структура акустических и электромагнитных эмиссионных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1690 - 1696.
5. **Bogomolov L.M.**, P'ichev P.V., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic - electric effect manifestation // Annals of Geophysics. V. 47. № 1. 2004. P. 65 - 72.
6. Закупин А.С., Аладьев А.В., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н., Хлыбов О.С. Компьютерное моделирование самоорганизованной критичности применительно к задачам геомеханики // Вестник КPCУ. 2004. Т. 4. № 6. С. 116 - 119.
7. Аладьев А.В., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н.А., Гайдук Т.Л. Физические и геомеханические аспекты распределений фокальных параметров очагов землетрясений // Вестник КPCУ. 2004. Т.4. № 6. С.103 - 110.
8. Сычева Н.А., Юнга С.Л., **Богомолов Л.М.**, Мухамадиева В.А. Сейсмоструктурные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли. 2005. № 11. С. 62 - 78.
9. **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н., Ильичев П.В. Феноменологическая модель потока возбужденных эмиссионных сигналов геосреды // Физика Земли. 2006. № 9. С. 71 - 80.
10. Закупин А.С., Авагимов А.А., **Богомолов Л.М.** Оклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С.43-50.
11. Закупин А.С., **Богомолов Л.М.**, Боровский Б.В., Ильичев П.В., Сычев В.Н. и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С.22 - 33.
12. Журавлев В.И., Лукк А.А., Мирзоев К.М., Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.** Суточная периодичность в возникновении слабых землетрясений Средней Азии // Вестник КPCУ. 2006. Т.6. №3. С.24 - 35.
13. Sychev V.N., **Bogomolov L.M.**, Sycheva N.A., Zakupin A.S., Avagimov A.A. Correlation properties of weak seismicity at Bishkek geodynamic test site in relevance to active monitoring problem // Вестник КPCУ. 2006. Т.6. № 3. С.79 - 86.
14. Закупин А.С., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н., Авагимов А.А., Аладьев А.В., Боровский Б.В., Ильичев П.В. Акустоэмиссионные проявления самоорганизации в нагруженных геоматериалах при воздействии электромагнитных импульсов // Вестник КPCУ. 2006. Т.6. № 3. С. 113 - 119.
15. **Богомолов Л.М.**, Ильичев П.В., Лесников А.В. Влияние вибраций и электромагнитных импульсов на накопление дефектов в нагруженных материалах // Вестник КPCУ. 2006. Т.6. № 3. С. 120 - 127.
16. **Bogomolov L.M.**, Sychev V.N., P'ichev P.V., Zakupin A.S., Alad'ev A.V., Avagimov A.A. Acoustic Emission measurements to Simulate Effect Microseismicity Triggering by Physical Fields // Вестник КPCУ. 2006. Т.6. № 3. С. 128-136.
17. Ильичев П.В., **Богомолов Л.М.**, Закупина Г.С., Мубассарова В., Аладьев А.В. Локация источников АЭ в экспериментах по моделированию энерговоздействий на геологическую среду как проблема информационных технологий // Вестник КPCУ. 2006. Т.6. № 3. С. 137 - 143.
18. Сычева Н.А., Юнга С.Л., **Богомолов Л.М.**, Макаров В.И. Сейсмоструктурные деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня // Физика Земли. 2008. № 5. С. 3 - 15.



19. **Bogomolov L.M.**, Zakupin A.S. Do Electromagnetic Pulses Induce the Relaxation or Activation of Microcracking Rate in Loaded Rocks? // *Solid State Phenomena*. 2008. V.137. P. 199 - 208.
20. Gavrilov V., **Bogomolov L.**, Morozova Yu., Storcheus A. Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity // *Annals of Geophysics*. 2008. V. 51. No 5/6. P. 737-753.
21. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н., Костюк А.Д. Интенсивность сейсмотектонических деформаций как показатель динамических процессов в земной коре (на примере Тянь-Шаня) // *Геофизические исследования*. 2009. Т. 10. № 2. С. 37 - 46.
22. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Юнга С.Л. Геоинформатика в статистическом подходе к расчетам сейсмотектонических деформаций // *Геоинформатика*. 2009. Т. 16. № 1. С. 33 - 43.
23. Zakupin A.S., **Bogomolov L.M.**, Sycheva N.A. The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded rock specimens // *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing (Elsevier)* 2009. V. 521-522. P. 401 - 404.
24. Костюк А.Д., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н. А. Юнга С. Л., Яги Ю. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // *Физика Земли*. 2010. № 3. С. 52 - 65.
25. **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.
26. **Богомолов Л.М.**, Мубассарова В.А. Чувствительность акустической эмиссии образцов горных пород к импульсным электровоздействиям как возможное проявление эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна // *В мире научных открытий*. 2010. №3 (09). Часть 3. С. 7-11. Научно - инновационный центр, Красноярск. ISSN 2072-0831.
27. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // *Физика Земли*. 2011. № 3. С.55 - 71.
28. Боровский Б.В., **Богомолов Л.М.**, Закупин Б.В., Мубассарова В.А. К вопросу о стимулировании акустической эмиссии образцов геоматериалов электромагнитными полями. *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 71 - 81.
29. Гаврилов В.А., Закупин А.С., **Богомолов Л.М.** Сравнение скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // *Физика Земли*. 2011. № 11. С. 63 - 74.
30. Мубассарова В.А., **Богомолов Л.М.**, Закупин Б.В., Боровский Б.В. Особенности потока АЭ сигналов нагруженных гранитных образцов при воздействии слабых вибраций // *Вестник КРСУ*. 2011. Т. 11. № 4. С. 60 - 66.
31. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н. К вопросу о квази-пуассоновском режиме следования сейсмических и акустоэмиссионных событий и отклонения от него // *Вестник КРСУ*. 2011. Т. 11. № 4. С. 115 - 128.
32. **Богомолов Л.М.** От исследований штормовых микросейсм к анализу сейсмо-ионосферных эффектов // *Вестник ДВО РАН*. 2011. № 6. С. 27 - 33.
33. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н. Геоинформационные аспекты анализа потоков сейсмических и акустоэмиссионных событий как реализаций случайных процессов // *Геоинформатика*. 2012. Т. 19. № 2 С. 29 - 39.

Публикации в сборниках, периодических изданиях и материалах научных мероприятий.

34. **Богомолов Л.М.**, Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. О природе скачкообразных реакций нагруженных образцов на действие микроколебаний // *Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика*. Алма-Ата. 1997. С. 167 - 172.
35. Manjikov B.Ts., **Bogomolov L.M.**, Sychev V.N. Effect of low frequency vibrations on amplitude-time distribution of acoustic emission during rock deformation // *Geodynamics of Tien-Shan. Proc. 1st Int. Workshop*. 2000. Bishkek. P. 9 - 15.
36. **Bogomolov L.M.**, Manjikov B.Ts., Sychev V.N. Structure of pulses of acoustic and electromagnetic emission from rocks during uniaxial compression // *Geodynamics of Tien-Shan. Proc. 1st Int. Workshop*. 2000. Bishkek. P. 55 - 61.
37. **Богомолов Л.М.**, Зубович А.В., Попов А.Я., Сычев В.Н. Применение кинетической концепции прочности для интерпретации данных GPS // *Проблемы геомеханики и геотехнического освоения горных территорий*. Под ред. И.Т.Айтматова, Труды ИФиМГП НАН КР. Бишкек. 2001. С. 277-286.
38. **Богомолов Л.М.**, Зубович А.В., Сычев В.Н., Сычев И.В. Модель виброчувствительности акустической эмиссии при деформировании гетерогенных материалов и ее геодинамические приложения. // *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород* / ред. В.А. Мансуров. Красноярск. 2002. С. 48 - 54.
39. **Богомолов Л.М.**, Аладьев А.В., Закупин А.С., Ильичев П.В. и др. Отклик АЭ образцов геоматериалов на энергвоздействие – модель наведенной сейсмичности и разрядки тектонической энергии // *Напряженное состояние литосферы, ее деформация и сейсмичность* / отв.ред. С.И. Шерман. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2003. С. 20-23.
40. Аладьев А.В., **Богомолов Л.М.**, Боровский Б.В., Закупин А.С., Ильичев П.В., Сычев В.Н. Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энергвоздействиях физическими полями // *Проблемы сейсмологии 3-его тысячелетия*. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2003. С. 168-172.
41. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Авагимов А.А., Зейгарник В.А. и др. О корреляциях локальной сейсмичности с зондирующими электроимпульсами на Бишкекском геодинамическом полигоне // *Проблемы сейсмологии 3-его тысячелетия*. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2003. С. 244-249.
42. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Авагимов А.А., Брагин В.Д., и др. Корреляционный анализ данных KNET в связи с электроимпульсным воздействием // *Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов* /

йтв.ред. С.В. Гольдин и Ю.Г. Леонов. Москва-Бишкек. 2003. С.254 - 274.

43. Ильичев П.В., **Богомолов Л.М.**, Аладьев А.В., Сычев В.Н., Бобровский В.В. Параметры акустоэмиссионных сигналов, инициированных электровоздействием на нагруженные образцы // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / отв.ред. С.В.Гольдин и Ю.Г. Леонов. Москва-Бишкек. 2003. С. 286 - 304.

44. Закупин А.С., **Богомолов Л.М.**, Аладьев А.В., Сычев В.Н. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / отв.ред. С.В.Гольдин и Ю.Г. Леонов. Москва-Бишкек. 2003. С.304 - 318.

45. Аладьев А.В., **Богомолов Л.М.**, Сычев В. Н., Боровский Б.В. и др. К оптимизации вибровоздействий на структуры земной коры для разрядки напряжений по данным лабораторного моделирования // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / отв.ред. С.В.Гольдин и Ю.Г. Леонов. Москва-Бишкек. 2003. С. 325 - 334.

46. Манжиков Б.Ц., **Богомолов Л.М.**, Тилегенов К., Шатемиров Д.К. и др. Виброэффекты упругого энерговыделения при ползучести горных пород // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / отв.ред. С.В.Гольдин и Ю.Г. Леонов. Москва-Бишкек. 2003. С. 335 - 343.

47. **Bogomolov L.**, Sychev V., Kuzmicheonok A., Avagimov A. et al. On the interrelation between seismicity and sounding electric impacts at Bishkek geodynamic testing place // Problems of destructive earthquake disaster prevention. Almaty-Evero. 2003. P. 175 - 183.

48. **Bogomolov L.M.**, Manjnikov B. Ts., Tullis T.E., Sychev V.N., Zakupin A.S. Acoustic emission measurements to understand transition straining processes and seismicity triggering by power impacts // In: 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). V. XII. Orlando, USA. 2004. P. 274 - 279.

49. Сычева Н.А., Юнга С.Л., **Богомолов Л.М.**, Аладьев А.В. Исследование сеймотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня по данным KNET // Современная геодинамика и сейсмический риск Центральной Азии. Алматы. 2004. С. 207 - 214.

50. Ponomarev A., Avagimov A., **Bogomolov L.M.**, Sobolev G., Tarasov N., et al. Induced Seismicity By Trigger Stimulation From Laboratory And Field Tests // Proc. 1 st Int. Workshop "Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics". Mizunami, Japan. 2004. Paper s2 - 06 (6 p.)

51. **Богомолов Л.М.**, Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Сычев В.Н. и др. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмoeлектромагнитному мониторингу) // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 112 - 116.

52. Сычева Н.А., Юнга С.Л., **Богомолов Л.М.**, Бейсенбаев Р.Т. и др. Сеймотектонические деформации земной коры Иссык-Кульской зоны и Казахского Тянь-Шаня // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 344 - 350.

53. **Богомолов Л.М.**, Закупин А.С. Компьютерное моделирование СОК-эффектов, связанных с энергoвоздействием на геосреду для разрядки тектонических напряжений // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска / ред. Е. Нусипов, С.В. Гольдин. Алматы. 2005. С. 96 - 102.

54. Аладьев А.В., Авагимов А.А., **Богомолов Л.М.** О характеристиках сигналов АЭ нагруженных образцов геоматериалов при дополнительных воздействиях физических полей // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска / ред. Е. Нусипов, С.В. Гольдин. Алматы. 2005. С. 320 - 327.

55. **Bogomolov L.M.** MHD-effects on micro-level and modeling of physical fields influence over loaded rocks // Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах / отв. ред. А.А. Жамалетдинов. Апатиты. 2006. С 127-140.

56. Сычев В.Н., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н.А., Авагимов А.А., Брагин В.Д., Закупин А.С., Зейгарник В.А., Шавлыгин В.М., Щелочков Г.Г., Корреляционный анализ локальной сейсмичности на Бишкекском геодинамическом полигоне в связи с проблемой активного мониторинга // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сб. трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный Мир. 2006. С. 317 - 325.

57. **Богомолов Л.М.**, Гаврилов В.А., Закупин А.С., Сычева Н.А. и др. От исследований откликов акустической эмиссии на образцах к сейсмическим проявлениям электротриггерных эффектов // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений / отв. ред. Б.М. Шевцов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. 2007. С. 75 - 83.

58. Закупин А.С., **Богомолов Л.М.**, Закупина Г.С., Мубассарова В.А., и др. Особенности спектров и параметров потока акустоэмиссионных сигналов при воздействии электромагнитного поля на нагруженные образцы // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений / отв. ред. Б.М. Шевцов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. 2007. С. 84- 90.

59. Сычева Н.А., Мухамадеева В.А., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н. К вопросу об активизации сейсмичности в Центральной Азии / кинетика параметров региональной сейсмичности // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии / отв. ред. Е.В. Складаров. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2007. Т. 2. С. 159 - 164.

60. Закупин А.С., **Богомолов Л.М.**, Боровский Б.В., Закупина Г.С. и др. О влиянии внешних энергетических воздействий на скорость трещинообразования в геоматериалах // Взаимодействие дефектов и неупругие явления в

твердых телах / ред. Д.М. Левин. Тула: изд-во: ТулГУ. 2008. С. 47 - 59.

61. Ильичев П.В., Бобровский В.В., **Богомолов Л.М.**, Манжиков Б.Ц. и др. Аппаратно-программный комплекс для исследования волновых форм акустической эмиссии // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. Вып. 3 / отв. ред. Б.Ц. Манжиков. Москва-Бишкек. 2008. С. 143 - 161.

62. Сычев В. Н., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н.А. К вопросу о возможности влияния пусков МГД генераторов на вариации слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. Вып. 3 / отв. ред. Б.Ц. Манжиков. Москва-Бишкек. 2008. С. 172 - 186.

63. Gavrilov V.A., **Bogomolov L.M.**, Morozova Yu. A., Storcheus A.V. Variations of geoacoustic emission in a deep borehole; relevance to seismicity and physical origin // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. Вып. 3 / отв. ред. Б.Ц. Манжиков. Москва-Бишкек. 2008. С. 198 - 211.

64. Сычев В. Н., **Богомолов Л.М.**, Зейгарник В. А., Сычева Н.А. и др. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки избыточных тектонических напряжений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / отв. ред. В.М. Опарин. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. С. 134 - 141.

65. Сычев В.Н., **Богомолов Л.М.**, Авагимов А.А., Сычева Н.А. Аномальная магнитная буря после солнечной вспышки 5-6 декабря 2006 г – тест концепции электромагнитного воздействия для разрядки избыточных напряжений в геосреде // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы / отв.ред. Ю.Г. Леонов. Москва- Бишкек. 2009. Вып. 4. С. 331 - 334.

66. Сычев И.В., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н. Вопросы углубленной обработки и использования данных сейсмической сети KNET // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы / отв.ред. Ю.Г. Леонов. Москва- Бишкек. 2009. Вып. 4. С. 373 - 378.

67. **Богомолов Л.М.**, Сычева Н.А. О проявлениях квазипериодичности, синхронизации и реализаций случайного процесса в потоке сейсмических событий // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / ред. А.В.Леонтьев. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН. 2010. С.323 - 349.

68. Сычев В.Н., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н. А., Боровский Б.В. О синхронизации вариаций сейсмической активности на территории Северного Тянь-Шаня с режимом электромагнитных зондирований земной коры // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / ред. А.В. Леонтьев. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН. 2010. С. 80 - 87.

69. **Богомолов Л.М.**, Закупин А.С., Гаврилов В.А., Мубассарова В.А. О базовых физических эффектах, определяющих возможность влияния электромагнитных импульсов на трещинообразование в нагруженных образцах геоматериалов // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений / отв. ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. Петропавловск-Камчат.: ИКИР ДВО РАН. 2010. С. 315 - 318.

70. Сычев В.Н., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н.А. О проявлениях электростимулированных вариаций сейсмичности и возможных механизмах влияния электромагнитных импульсов // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Отв. Ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. Петропавловск-Камчат.: ИКИР ДВО РАН. 2010. С. 448-451.

71. **Богомолов Л.М.** Как электромагнитные импульсы влияют на разрывообразование на разных структурно-масштабных уровнях / физика энерговоздействий // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы всероссийского семинара совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М: ГЕОС. 2010. С. 42 - 51.

72. Сычев В.Н., **Богомолов Л.М.**, Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований Земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы всероссийского семинара совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М: ГЕОС. 2010. С. 316 - 325.

73. Сычева Н.А., **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н. Солнечные вспышки и вариации уровня сейсмического шума и сейсмический режим Северного Тянь-Шаня // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы всероссийского семинара совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М: ГЕОС. 2010. С. 326 - 335.

74. **Богомолов Л.М.** О проявлениях триггерного влияния электромагнитных импульсов в параметрах механизмов очагов землетрясений в Северном Тянь-Шане // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / ред. А.В. Леонтьев. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН. 2011. Т. 1. С. 67 - 72.

75. Сычев В.Н., **Богомолов Л.М.**, Сычева Н.А. К вопросу о статистической достоверности сейсмического отклика при экспериментальных зондированиях коры Бишкекского геодинамического полигона // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов / отв.ред. М.Г. Леонов, Н.В.Шаров. Бишкек: НС РАН. 2012. Т.1. С. 273 - 280.

#### Прочие публикации

76. **Богомолов Л.М.**, Сычев В.Н., Адигамова Н.С., Закупин А.С. Феноменологическое описание разномасштабных триггерных эффектов при деформировании геосреды в присутствии физических полей // Препринт НС РАН №1-06. Бишкек. 2006. 40с.

77. Закупин А.С., **Богомолов Л.М.** Электротриггерные явления в нагруженных геоматериалах по данным акустической эмиссии // Препринт НС РАН №3-06. Бишкек. 2006. 31 с.

78. **Богомолов Л.М.**, Закупин А.С., Сычев В.Н. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой

сейсмичности // Издательский дом: Lambert Academic Publishing, Saarbrücken: reha gmbh. 2011. 408 с. ISBN 978-3-8465-1436-8 (Электронная книга)

79. Zakupin A., Bogomolov L., Mubassarova V. et al. Acoustic Emission and Electromagnetic Effects in Loaded Rocks // In: Acoustic Emission. Ed. W. Sikorski. InTech, Rijeka, Croatia. 2012. P.173-198. ISBN: 978-953-51-0056-0. (Electronic book).

### Список цитируемой литературы

1. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (обзор) // ФТТ. 2004. Т. 46. № 5. С. 769-803.
2. Гохберг М.М., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука. 1988. 174 с.
3. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галогенных кристаллов. Новосибирск: Наука. 1990. 120 с
4. Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий. Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 415 с
5. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. Том 2. 1973. М.: Наука. 892 с.
6. Кишкин С.Т., Клытин А.А. Эффекты электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // ДАН СССР. 1973. Т. 211. № 2. С. 325-327.
7. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Степанов Ю.П. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / Отв. Ред. Л.Б. Зуев. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео". 2007. 235 с.
8. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС // Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш. 1987. С. 101-119.
9. Науменко Б.Н. Явление частичной ликвидации тектонических напряжений штормовыми микросейсмами // Физика Земли. 1979. № 8. С. 72-75
10. Николис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление: Пер. с англ./ Предисл. Б.Б. Кадомцева. М.: Мир. 1989. 488 с.
11. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
12. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542-545.
13. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 152-160.
14. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // УФН. 1968. Т. 96. № 1. С. 38-60.
15. Урусовская А.А., Альшиц В.И., Беккауэр Н.Н., Смирнов А.Е. Деформация кристаллов NaCl в условиях совместного действия магнитного и электрического полей // ФТТ. 2000. Т. 42. № 2. С. 267-269.
16. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. М.: Metallurgia. 1977. 359 с.
17. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука. 1974. 640 с.
18. Шуберт М., Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. М: Мир. 1973. 244 с.
19. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука. 1990. 191 с.