

УДК 550.34

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ (ОБЗОР)

© 2022 г. В. А. Зейгарник<sup>1,\*</sup>, Л. М. Богомолов<sup>2,\*\*</sup>, В. А. Новиков<sup>1,\*\*\*</sup><sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

\*E-mail: zeygarnik@ihed.ras.ru

\*\*E-mail: l.bogomolov@imgg.ru

\*\*\* E-mail: novikov@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 16.04.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Представлен обзор пионерских исследований электромагнитной триггерной сейсмичности, выполненных в России в 1995–2020 гг. Проведен анализ полевых наблюдений искусственных и природных электромагнитных воздействий на сейсмическую активность. Представлены результаты физического моделирования инициирования трещинообразования и “лабораторного землетрясения” электрическими импульсами на специализированном прессовом оборудовании и пружинно-блочной модели разлома земной коры. Рассмотрены возможные механизмы триггерного электромагнитного воздействия на деформационные процессы в очаге землетрясения. В результате полевых экспериментов, лабораторного моделирования и теоретического анализа, выполненных за последние 25 лет, доказано существование нового типа триггерного воздействия на деформационные процессы в земной коре – электромагнитного инициирования сейсмических событий. Обсуждаются возможные пути использования электромагнитной триггерной сейсмичности для снижения сейсмической опасности.

*Ключевые слова:* электромагнитное поле, очаг землетрясения, инициирование сейсмических событий.

DOI: 10.31857/S000233722010100

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на успехи сейсмостойкого строительства, землетрясения по-прежнему представляют собой один из основных вызовов природы человечеству. С 1900 г., вследствие 2234 катастрофических землетрясений, на земном шаре погибло свыше 2 млн 320 тыс. человек [Daniel et al., 2017], а прямые и косвенные экономические потери, по оценкам ЮНЕСКО, ежегодно составляют миллиарды долларов. В связи с этим весьма актуальными и востребованными являются исследования процессов, происходящих в очаге землетрясения, включая подготовку сейсмического события и его инициирование экзогенными и эндогенными воздействиями. Результаты этих работ содействуют решению таких фундаментальных научных проблем, как слабые воздействия на деформационные процессы в земной коре, разработка эффективных методов краткосрочного прогнозирования землетрясений и возможное создание практических методов управления сейсмическим процессом с целью уменьше-

ния количества жертв, экономического ущерба и экологических рисков от землетрясений.

Проблема инициирования землетрясений слабыми возмущениями получила новый импульс после известного землетрясения Landers, США (28.06.1992,  $M = 7.3$ ), после которого в течение десятков часов на расстояниях до 1250 км от эпицентра регистрировались сейсмические события, происхождение которых приписывалось триггерному эффекту [Hill et al., 1993; Gomberg et al., 2001]. Начиная с пионерской работы [Садовский и др., 1981], такие исследования вызывают заметный интерес в России, и они направлены на изучение возможности дистанционного управления деформационными процессами в массиве горных пород. Накопленные в мире за последние двадцать пять лет убедительные факты инициирования землетрясений и других динамических событий сейсмическими волнами заставляют сейсмологическое сообщество во многом изменить скептическое отношение к подобной возможности [Кочарян, 2016; Ружич, 2020]. Настоящий об-

зор посвящен изучению отклика сейсмичности на другой тип внешнего воздействия на очаги землетрясений, открытый в России в прошлом столетии, – искусственное и природное электромагнитное воздействие (ЭМВ) на горные породы и разломы земной коры в напряженно-деформированном состоянии. К наиболее ранним работам по электросейсмическим эффектам относятся исследования [Анцыферов, 1962; Балбачан, Томашевская, 1987; Ярославский, Капустян, 1990], однако наибольший импульс к развитию данного направления дали первые работы по изучению искусственного инициирования сейсмических событий на Памире и Северном Тянь-Шане [Тарасов, 1997], а также первые лабораторные эксперименты [Sobolev et al., 2000], выполненные в ИФЗ РАН.

## 2. ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

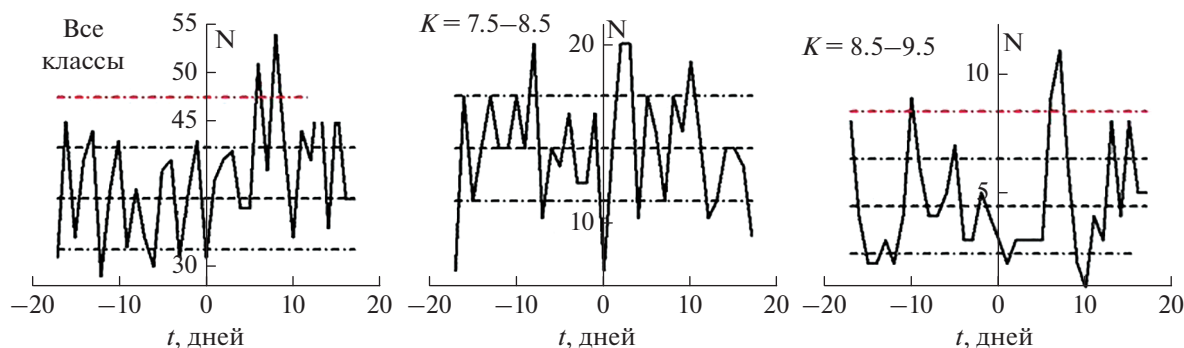
### 2.1. Искусственное инициирование сейсмических событий на Памире и Северном Тянь-Шане

Впервые на возможность изменения сейсмичности земной коры при электрическом воздействии (ЭВ) было указано в работе [Тарасов, 1997], в которой были представлены результаты статистического анализа отклика сейсмической активности Гармского геофизического полигона ИФЗ РАН (Памир, Таджикистан) на импульсы электрического тока, подаваемого в земную кору через заземленный электрический диполь с расстоянием электродов 3 км и сопротивлением 1.5 Ом. Эксперименты проводились в 1976–1978 гг. с использованием геофизического МГД-генератора “Памир-1” для глубинного электромагнитного зондирования земной коры в сейсмоопасном регионе с целью поиска возможных предвестников землетрясений [Зейгарник, Сидорин, 1997]. При пуске МГД-генератора ток в излучающем диполе достигал 1.5 кА, длительность зондирующего импульса составляла 2.5 с.

Сопоставление количества землетрясений энергетического класса  $K > 5$  в пределах временных окон  $\pm 40$  сут от момента каждого пуска показало, что воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмогенную область вызывает значительные пространственно-временные изменения сейсмического режима: заметную активизацию сейсмичности в целом в районе наблюдений. Характер таких изменений в разных структурах зависит от энергонасыщенности этих структур, их геологического строения и от электромеханических характеристик слагающих их горных пород [Тарасов, 1997].

Аналогичные результаты были получены в других геологических условиях на Бишкекском

геодинамическом полигоне ОИВТ РАН (Северный Тянь-Шань, Киргизия), где в 1983–1990 гг. проводился регулярный мониторинг кажущегося электрического сопротивления земной коры с использованием МГД-генератора “Памир-2”, питающего заземленный диполь длиной 4.2 км [Вольхин и др., 1993]. Было проведено 114 пусков; ток в излучающем диполе достигал 2.8 кА, а длительность токового импульса составляла от 1.7 до 12.1 с. В работах [Тарасов и др., 1999; 2001; Tarasov, Tarasova, 2004; Chelidze et al., 2006; Турунтаев и др., 2012; Смирнов, Завьялов, 2012] изучено методами как статистического анализа, так и нелинейной динамики возможное воздействие мощных электромагнитных (ЭМ) импульсов МГД-генератора на сейсмический режим Средней Азии и Казахстана. Было установлено, что после пусков МГД-генератора с подачей импульсов тока в земную кору сейсмичность рассматриваемого района становится заметно выше, чем до них. Резкая активизация местных землетрясений возникает через 2–4 дня после пусков и продолжается в течение нескольких суток. Было показано, что ЭМ импульсы инициируют выделение энергии, накопленной средой в ходе тектонических процессов, в виде относительно слабых землетрясений. При последующем более детальном анализе в работах [Тарасов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011] были проведены оценки сейсмотектонических деформаций (СТД) для исследуемых территорий Памира и Северного Тянь-Шаня в периоды пусков МГД-генераторов, а также до и после этих периодов. В этих работах отмечено, что для Памира интервал наиболее быстрого прироста СТД совпадает с периодом зондирования (пусков МГД-генераторов). В этой же работе показано, что в области Северного Тянь-Шаня, ограниченной радиусом 130 км вокруг излучающего диполя, в период зондирования с применением МГД-генераторов (то есть в период резкого повышения суммарной энергии, вносимой в среду), величина сейсмотектонических деформаций также возрастает быстрее. Высокая стоимость пусков МГД-генераторов в конечном итоге ограничивала количество режимных зондирований земной коры, и в 1983 г. на Научной станции ОИВТ РАН (в настоящее время это Научная станция РАН в г. Бишкеке) начались разработки более дешевых электроимпульсных систем (ЭИС), питающихся от линии электропередач и позволяющих возбуждать последовательности импульсов тока с амплитудой в несколько сотен ампер. В результате были последовательно разработаны и изготовлены специальные тиристорные установки ЭИС-100 (1983 г.), ЭИС-300 (1984 г.), ЭИС-630 (1986 г.), ЭРГУ-600-2 (1987 г.), создающие ток в излучающем диполе соответственно 100, 300, 630 и 1400 А [Вольхин и др., 1993]. Наиболее мощная из этих систем – электроразведочное генераторное устрой-



**Рис. 1.** Кумулятивные зависимости суточного числа событий различных энергетических классов на территории БГП (согласно работе [Сычев и др., 2010]). Нижняя пунктирная линия – среднее значение количества землетрясений до ЭМВ, средняя и верхняя пунктирные линии – среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ) и его удвоенное значение ( $2\sigma$ ) соответственно.

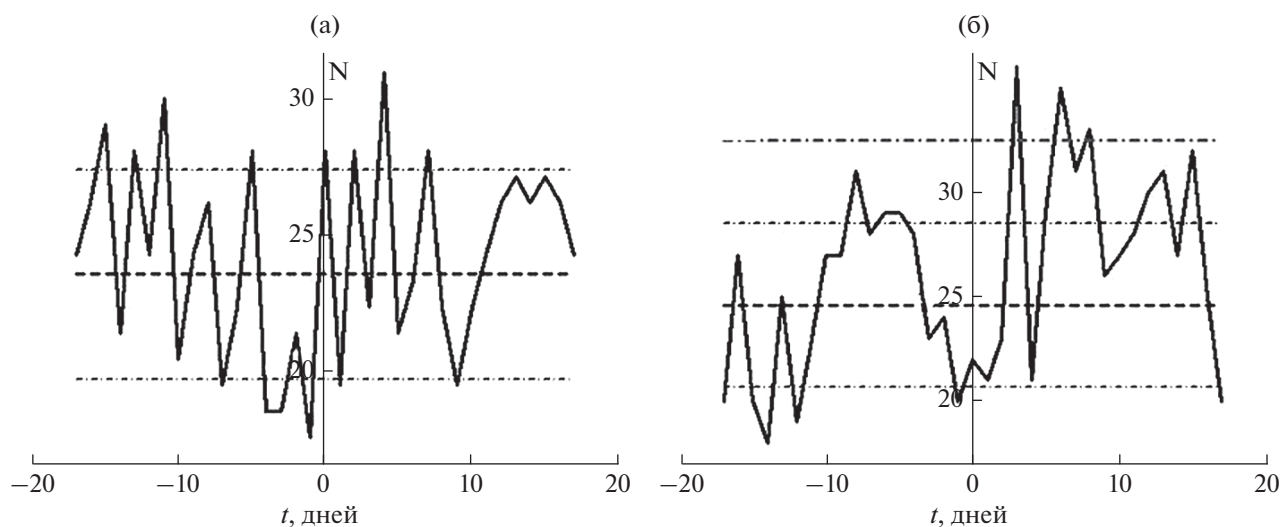
ство ЭРГУ-600-2 – эксплуатируется на Бишкекском геодинатическом полигоне (БГП) и в настоящее время. Начиная с 1987 г., для мониторинга кажущегося электрического сопротивления земной коры по рабочим дням проводятся режимные зондирования: 6 серий из 90–120 двуполярных импульсов, генерируемых ЭРГУ-600-2. Суточный вклад электрической энергии в геологическую среду составляет до 1000 МДж.

Для подтверждения результатов, полученных с использованием МГД-генератора, в 2000–2005 гг. на Бишкекском геодинатическом полигоне были проведены специальные эксперименты по ЭМ зондированию земной коры с использованием того же излучающего диполя и электрического источника ЭРГУ-600-2. Источник один раз в 35 сут создавал серию однополярных импульсов постоянного тока до 0.6 кА. За счет увеличения числа импульсов (вместо однократного) энергия, подаваемая в земную кору, была сопоставима с энергией от МГД-генератора [Богомолв и др., 2005; Сычев и др., 2010]. В период проведения этих специальных экспериментальных электромагнитных зондирований наблюдались короткопериодные вариации слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня, коррелирующие с датами зондирований однополярными импульсами. Изменение пространственно-временных и энергетических распределений количества событий, усредненное по всем 35-суточным периодам наблюдений с экспериментальными сеансами ЭРГУ-600-2, является свидетельством влияния зондирующих импульсов этого источника на слабую сейсмичность. Отклик на энергетические воздействия однополярных импульсов проявляется в виде кратковременного прироста суточного числа слабых землетрясений, наступающего с задержкой от 5 до 7 сут. Активизация происходит в основном за счет событий, гипоцентры которых

находятся на глубинах 5–15 км и лежат внутри площади ближайших к источнику зон с повышенной естественной сейсмической активностью. Наиболее чувствительным к воздействию зондирующих импульсов является поток событий энергетических классов  $K = 7.5–9.5$ . На рис. 1 [Сычев и др., 2010] совмещены все 53 временных интервала длительностью 35 сут, где 0 соответствует дню экспериментальных зондирований земной коры с использованием ЭРГУ-600-2 в режиме однополярных импульсов.

Показано (см. рис. 1), что после ЭМВ прирост количества событий классов  $K = 7.5–8.5$  начинается раньше, чем активизация событий с энергиями, соответствующими диапазону  $8.5 < K < 9.5$ . Вместе с тем наибольший прирост сейсмической активности, превышающий  $2\sigma$ , отмечается для событий классов 8.5–9.5.

Для оценки достоверности эффекта прироста сейсмичности после воздействий однополярных импульсов тока важно сравнение результата совмещения периодов наблюдений на территориях вокруг источника зондирований и в отдаленном районе. Для построения контрольных кумулятивных распределений был выбран находящийся в Казахстане район Тянь-Шаня, площадь территории которого и общее число землетрясений, произошедших здесь в 2000–2005 гг., близки к соответствующим значениям для территории БГП. Для анализа был использован каталог Института сейсмологии МОН Республики Казахстан (РК) за 1998–2006 гг. [Сычев и др., 2010; Богомолв и др., 2011]. Совмещены те же 35 суточных интервалов, что и в случае, представленном на рис. 1. На рис. 2 показаны результаты такого совмещения с суммированием суточного числа событий классов  $K = 7.5–12.5$ . На рис. 2а показано, что для района сравнения разброс значений числа событий в сутки не выходит из пределов  $2\sigma$  ни до, ни после



**Рис. 2.** Кумулятивные графики, построенные по каталогу Института сейсмологии МОН РК: (а) — для района сравнения; (б) для территории БГП (согласно работе [Богомолов и др., 2011]). Обозначение пунктирных линий такое же, как на рис. 1.

ЭМВ. А на рис. 2б видно, что и по данным каталога Института сейсмологии МОН РК на территории БГП происходит прирост суточного числа событий после ЭМВ (с превышением  $2\sigma$  относительно среднего уровня, определенного по первым 17 суткам 35-суточного окна).

Стоит отметить некоторое отличие кумулятивного графика на рис. 2б от распределения, построенного по данным сети KNET (рис. 1). По данным каталога Института сейсмологии МОН РК, первый прирост сейсмичности на величину более  $2\sigma$  от ЭМВ происходит на 3–4 сутки после дня ЭМВ, а второй, более длительный прирост — на 5–6 сутки.

Проведенное сравнение с отдаленным районом, а также результаты работ [Смирнов, Завьялов, 2012; Турунтаев и др., 2012] свидетельствуют об устойчивом характере эффекта отклика слабой сейсмичности на электромагнитное воздействие, выделяя этот тип среди таких внешних возмущений, как удаленные сильные землетрясения, техногенные периодические воздействия, грозовые разряды и др.

В работах [Сычев и др., 2010; Богомолов и др., 2011] показано, что однополярные импульсы длительностью от 10 с наиболее эффективны в стимулировании прироста слабой сейсмичности по сравнению с более короткими импульсами, в том числе с биполярными импульсами, применяемыми для электромагнитного мониторинга кажущегося сопротивления земной коры. Различие эффективности объясняется меньшим затуханием длинных однополярных импульсов с глубиной.

Для подтверждения полученных полевых результатов выполнена регистрация сейсмоакусти-

ческой эмиссии (САЭ) в скважинах БГП [Закупин и др., 2014]. Были исследованы спектральная структура сигналов САЭ и особенности вариаций интенсивности САЭ при проведении ЭМ зондирований земной коры с помощью генераторной установки ЭРГУ-600-2. Статистические методы обработки записей САЭ адаптированы к задаче выявления взаимосвязей с воздействием зондирующими импульсами тока, т.е. вкладом энергии в геосреду. Обнаружена реакция среды на сеансы ЭМ зондирования, проводимые для мониторинга кажущегося электрического сопротивления горных пород. Реакция среды проявляется в виде прироста интенсивности САЭ (откликов на импульсы тока, возбуждаемые при этих зондированиях). Отклики САЭ относятся к той же группе эффектов — признаков внешнего влияния на деформацию среды, что и вариации сейсмичности в период пусков геофизических МГД-генераторов 1983–1989 гг. [Тарасов и др., 1999; 2001; Tarasov, Tarasova, 2004; Смирнов, Завьялов, 2012] или экспериментальных зондирований 2000–2005 гг. [Богомолов и др., 2005; Сычев и др., 2010]. Источники сигналов САЭ находятся на небольшой глубине по месту расположения геофона, что и объясняет различие между вариациями интенсивности САЭ и микросейсмичности при откликах на одно и то же воздействие.

Таким образом, в результате проведенных полевых исследований отклика региональной сейсмичности (Памир и Северный Тянь-Шань) на электромагнитные воздействия на земную кору при подаче импульсов постоянного тока в заземленный диполь установлен новый — электромагнитный — тип инициирования землетрясений.

## 2.2. Инициирование землетрясений природными электромагнитными воздействиями (магнитными бурями и солнечными вспышками)

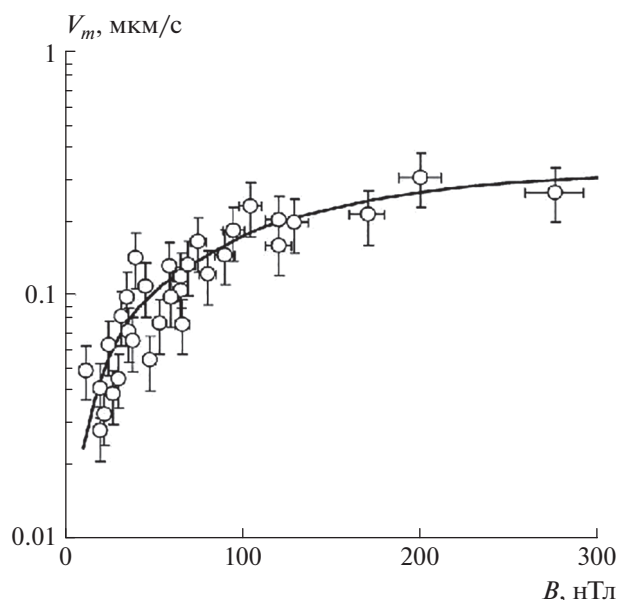
Полученные статистические результаты наблюдений отклика региональной сейсмичности на искусственные электромагнитные воздействия на земную кору стимулировали исследования аналогичных откликов на природные электромагнитные факторы: магнитные бури с внезапным началом и сильные солнечные вспышки. Влияние сильных магнитных бурь с внезапным началом (SSC), когда магнитная буря развивается в течение нескольких минут, исследовано в работах [Соболев и др., 2002; Закржевская, Соболев, 2002; 2004; Файнберг и др., 2004]. Изучены вариации сейсмичности в сейсмоактивных регионах Северного Тянь-Шаня [Соболев и др., 2002], Кавказа [Закржевская, Соболев, 2002], Аляски, Северной и Южной Калифорний [Закржевская, Соболев, 2004] в периоды до и после магнитных бурь с внезапным началом. Для анализа использовались сейсмические каталоги, очищенные от афтершоков и включающие в себя землетрясения только представительных энергетических классов. Из каждого каталога были выделены два подкаталога, один из которых включал интервалы перед бурями, а второй — после бурь. Методом наложения эпох установлено с высоким уровнем значимости, что в отдельных районах исследуемых сейсмоактивных регионов количество землетрясений после бурь увеличивается (положительный эффект), а в других — уменьшается (отрицательный эффект). В одних районах эффект ярко выражен, в других очень слаб или не проявляется вообще. В целом, в сейсмоактивных регионах отмечена тенденция изменения числа землетрясений после бурь. Этот эффект не связан с особенностями каталогов, а, возможно, объясняется геолого-геофизическими особенностями регионов. На основании выполненных оценок энергии, закачиваемой магнитными бурями и высвобождаемой землетрясениями, сделан вывод о триггерном механизме влияния бурь на сейсмичность. В работе [Файнберг и др., 2004] рассмотрен возможный тепловой механизм инициирования землетрясений: в ней исследованы величины и пространственные распределения тепловых потоков, генерируемых в земле геомагнитными бурями с внезапными началами. Показано, что энергия магнитных бурь, выделяемая в виде тепла, соизмерима с энергией, выделяемой землетрясениями, и что основная часть тепла выделяется в верхних 10–20 км разреза и сосредоточена по границам разломов. В работе [Соболев и др., 2020] исследована реакция сейсмического шума в минутном диапазоне периодов на сильные магнитные бури. Обнаружены сейсмические импульсы, возникавшие при быстрых изменениях скорости компонент магнитного поля  $dX$ ,  $dY$ ,

$dZ$ . Импульсы характеризовались амплитудами ~2 мкм и продолжительностью первые минуты. Большая вариабельность отношения амплитуды сейсмических импульсов к величине изменения  $dH_x$ ,  $dH_y$ ,  $dH_z$  свидетельствует о нелинейном процессе. Амплитуды импульсов примерно одинаковы на станциях, расположенных в сейсмически активных или пассивных регионах. Их свойства не зависят также от метеорологических условий. Импульсы выявлены на записях всех сейсмических станций, расположенных на континентах. Предполагается, что резкие изменения ЭМ поля во время бури служат триггером высвобождения накопленной в Земле энергии.

Изучение влияния вариаций геомагнитного поля на деформационные процессы в земной коре было продолжено в направлении исследования отклика сейсмического шума и сейсмичности на сильные солнечные вспышки [Сычева и др., 2011; Sorokin et al., 2019; Новиков и др., 2019; Novikov et al., 2020]. В частности, изучена взаимосвязь сильных магнитных бурь, вызванных солнечными вспышками, и вариаций сейсмического шума (среднего уровня и среднеквадратичного отклонения (СКО)) [Сычева и др., 2011], регистрируемого станциями сейсмической сети KNET при мониторинге территории Бишкекского геодинимического полигона. Получены результаты, свидетельствующие о большей чувствительности сейсмического шума в диапазоне частот 10–20 Гц к внешним, в частности электромагнитным воздействиям по сравнению с сейсмической активностью. Отмечены проявления влияния магнитных бурь, произошедших после сильных и сверхсильных солнечных вспышек в 2000–2006 гг.: кратковременный прирост СКО сейсмического шума, опережающий изменения скорости накопления числа событий.

Взаимосвязь микросейсмического шума и изменения геомагнитного поля (в виде пикообразных магнитных импульсов с амплитудой меньшей, чем при аномальных магнитных бурях) подтверждена также в работе [Адушкин и др., 2012]. В ней по данным о микросейсмическом шуме в районе геофизической обсерватории ИДГ РАН “Михнево” (Московская область) установлена корреляционная зависимость между максимальным значением вариаций среднеквадратической скорости колебаний грунта  $V_m$  в диапазоне частот 0.01–0.1 Гц и амплитудой геомагнитных вариаций (рис. 3). Монотонно растущая зависимость между этими величинами может свидетельствовать о влиянии геомагнитных вариаций (пикообразных импульсов, при которых наводятся токи в ионосфере и связанные с ними геоиндуцированные токи в проводящих слоях Земли) на микросейсмический шум.





**Рис. 3.** Зависимость между максимальным значением вариаций скорости  $V_m$  и относительной амплитудой внезапного геомагнитного импульса (согласно работе [Адушкин и др., 2012]). Горизонтальные и вертикальные отрезки – погрешность определения соответствующих величин.

К этому же направлению относится работа [Тарасов, 2017], в которой предпринята попытка разделить эффекты влияния на сейсмичность собственно солнечных вспышек и аномальных магнитных бурь (SSC).

В работах [Sorokin et al., 2019; Новиков и др., 2019] рассмотрен возможный механизм инициирования землетрясений ионизирующим излучением солнечных вспышек. На основе разработанной теоретической модели возмущений электрического поля, электрического тока и тепловыделения в литосфере, связанных с поглощением ионизирующего излучения солнечных вспышек, показано, что в результате крупномасштабного горизонтального возмущения проводимости нижней области ионосферы в присутствии внешнего электрического поля возможна генерация возмущений геомагнитного поля в диапазоне периодов единицы–десятки секунд. Амплитудно-временные характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы. В зависимости от соотношения между интегральными проводимостями Холла и Педерсена возмущенной ионосферы может наблюдаться осциллирующий и апериодический режимы магнитных возмущений. Для сильных возмущений проводимости ионосферы амплитуда пульсаций может достигать  $\sim 10^2$  нТл. При этом амплитуда горизонтальной компоненты электрического поля на поверхности Земли достигает

0.01 мВ/м, плотности электрического тока в литосфере  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, а плотность мощности выделения тепла этим током достигает  $10^{-7}$  Вт/м<sup>3</sup>. Таким образом, показано, что поглощение ионизирующего излучения солнечных вспышек может вызвать в сейсмогенных разломах вариации плотности теллурических токов, сопоставимые с плотностями тока, генерируемыми в земной коре искусственными импульсными источниками (геофизический МГД-генератор “Памир-2” и электроимпульсная установка “ЭРГУ-600”); эти вариации инициируют региональные землетрясения и пространственно-временное изменение сейсмической активности [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 1999; 2001; Tarasov, Tarasova, 2004; Смирнов, Завьялов, 2012; Сычев и др., 2010]. Следовательно, инициирование сейсмических событий возможно не только искусственными источниками электрического тока, но и солнечными вспышками, что подтверждается анализом поведения глобальной и региональной сейсмичности после сильной солнечной вспышки класса X9.3 06.09.2017 г., когда количество землетрясений с магнитудой  $\geq 4$  во временном окне  $\pm 11$  суток увеличилось на 68%, а региональная сейсмичность (Греция,  $M \geq 3$ ) возросла на 120% [Novikov et al., 2020].

Таким образом, выполненные к настоящему времени исследования отклика сейсмичности на искусственные и природные электромагнитные воздействия на земную кору указывают на существование ранее неизвестного в сейсмологии триггерного явления: инициирования сейсмических событий при взаимодействии ЭМ поля с горными породами в метастабильном напряженно-деформированном состоянии.

Следует отметить, что электромагнитные поля, создаваемые как искусственными, так и природными источниками, могут генерировать в очагах землетрясений весьма слабые теллурические токи с плотностью порядка  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, и механизм инициирования землетрясений такими токами пока до конца не ясен. Для подтверждения результатов статистического анализа полевых наблюдений ЭМ триггерной сейсмичности, а также проверки различных гипотез о механизмах данного явления в ИФЗ РАН, Институте геофизики НАН Грузии, ОИВТ РАН и на Научной станции РАН в Бишкеке выполнен большой объем лабораторных экспериментальных исследований как при деформировании образцов горных пород и их моделей на различном прессовом оборудовании, так и на пружинно-блочных установках, моделирующих разломы земной коры.

### 3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРИГГЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И РАЗЛОМАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

#### 3.1. Исследования отклика акустической эмиссии образцов горных пород и их аналогов на электромагнитное воздействие

В натуральных условиях осуществить исследование механизма деформирования среды в процессе подготовки землетрясения и образования магистрального разрыва практически невозможно. В то же время свойство самоподобия (или самоорганизованной критичности) геологической среды [Bak et al., 1987; Diodati et al., 1991; Bak, 1996; Гольдин, 2004; Соболев, 2014] дает основание изучать закономерности процесса деформации и разрушения геоматериалов в лабораторных условиях, в которых достаточно легко выдерживать и воспроизводить условия нагружения. На определенное сходство между проявлениями хрупкого разрушения геоматериалов в самых различных пространственных масштабах и сопутствующими процессами дефектообразования в этих материалах указывалось в работах [Журков и др., 1980; Соболев, Кольцов, 1988; Lockner et al., 1991; Соболев, Тюпкин, 2000; Смирнов, Пономарев, 2004; Завьялов, 2005; Смирнов и др., 2010; Kuksenko et al., 1996; Ponomarev et al., 1997; Веттегрень и др., 2006; Куксенко и др., 2011; Дамаскинская, Кадомцев, 2015] и многих других. При этом следует особо в этом списке выделить работу [Соболев, Кольцов, 1988], в которой описаны уникальные эксперименты, выполненные на образцах с характерными размерами порядка 1 м и с искусственными концентраторами напряжения, созданными внутри образца.

Перед динамической подвижкой, т.е. непосредственно перед землетрясением, массив горной породы, как и образец при лабораторном моделировании, находится в метастабильном состоянии (состоянии неустойчивого равновесия) [Соболев, 2011]. Особенностью такого состояния является существенное изменение деформации при небольших вариациях напряжения. Такие вариации могут возбуждаться при воздействии различных внешних факторов. Отсюда вытекает принципиальная возможность реализации триггерных эффектов, заключающихся в скачкообразном переходе от одного метастабильного состояния к другому под влиянием внешних воздействий даже небольшой интенсивности [Соболев, Пономарев, 2003; Куксенко, Махмудов, 2004; Макаров и др., 2007; Гохберг, Колосницын, 2010; Богомолов, 2010; Soboлев, 2011; Авагимов и др., 2011; Коcharян, 2016]. Само метастабильное состояние очаговой зоны зависит от целого ряда факторов, таких как уже достигнутый уровень трещинообразования, особенности макро- и микрострукту-

ры неоднородностей геоматериалов, динамика напряжений во времени, уровень внешних воздействий и многих других.

Соответствующие лабораторные эксперименты, связанные с нагружением цельных или составных образцов, ставятся довольно давно; в первую очередь здесь следует упомянуть работы [Scholz, 1968; Ohnaka, Mogi, 1982], а также многочисленные работы В.С. Куксенко и его школы [Куксенко, 1986; Дамаскинская, Томилин, 1991; Томилин и др., 1994, Kuksenko et al., 1996; Куксенко, Махмудов, 2004; Куксенко и др., 2011; Дамаскинская, Кадомцев, 2015; Дамаскинская и др., 2018] и Д. Локнера с коллегами [Lockner et al., 1991; Lockner, 1993; Thomson et al., 2006; 2009; Damaskinskaya et al., 2016; 2017]. В этих работах, в частности по данным о росте активности акустической эмиссии (АЭ), амплитудам акустических сигналов, их частотным характеристикам была выявлена стадийность деформирования горных пород. Были также изучены некоторые важные закономерности процесса трещинообразования и последующего разрушения образцов горных пород. Одним из важных достоинств таких экспериментов является возможность использования АЭ как средства изучения процесса разрушения в реальном времени с хорошим пространственно-временным разрешением актов появления дефектов структуры и нарушений сплошности (образованием, ростом и кластеризацией трещин отрыва и сдвига). Для этого использовался метод “акустической томографии”, оказавшийся очень продуктивным при воспроизведении картины зарождения трещин и динамики процесса трещинообразования. В частности, предпринимались попытки установить критерий, определяющий переход к состоянию критического накопления дефектов (трещин) с выраженным эффектом их взаимодействия (т.е. к состоянию самоорганизованной критичности). В работе [Damaskinskaya et al., 2017] на основе экспериментов с образцами гранита (с регистрацией АЭ-томографии и последующей рентгеновской томографии дефектов на каждой последовательной стадии нагружения) в качестве такого критерия предложена смена экспоненциального характера распределения сигналов акустической эмиссии на степенной. В работе [Eftaxias, Patirakis, 2013], посвященной изучению ЭМ сигналов, сопровождающих разрушение горных пород и зачастую совпадающих во времени сигналов АЭ, сформулирована концепция, что каждой стадии накопления повреждений, вплоть до лавинообразного трещинообразования и последующего разрушения, соответствуют свои частотные характеристики этих ЭМ сигналов. Нельзя не отметить, что частотный диапазон и интенсивность электромагнитной эмиссии (ЭМИ) меняется в разных экспериментах в очень широких пределах: он зависит от типа образца,

степени его однородности, скорости и вида нагружения; так что картина в этом отношении складывается достаточно пестрая (например, см. [Bredy, Glen, 1986; Курленя и др., 2000; Eftaxias, Patirakis, 2013] и обширную библиографию в последней из перечисленных работ).

Среди многочисленных исследований процесса разрушения модельных образцов и образцов геоматериалов можно выделить те, в которых испытуемый образец подвергался различного рода внешним воздействиям: флюидонасыщение, нагрев, импульсные и периодические динамические воздействия, воздействие электрическим и/или магнитным полем или электрическим током с различными амплитудно-частотными параметрами. Первые ключевые представления о влиянии электрических полей на процессы трещинообразования в горных породах были высказаны в работе [Анцыферов, 1962], а некоторое время спустя в работах [Соболев, Демин, 1980; Балбачан, Томашевская, 1987; Ярославский, Капустян, 1990]. Причем в последней было высказано предположение, что электровоздействие вызывает не дополнительные напряжения, а приводит к снижению прочностных свойств материалов, и это способствует развитию микроразрушений.

Упомянутые выше внешние воздействия, как правило, рассматривались как триггерные, поскольку их энергия была мала по сравнению с энергией, накопленной материалом образца, и вызванные ими приращения напряжения также составляли очень малую долю от приложенных. В работах [Богомоллов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011; 2016] указано на то, что скорость изменения напряжений при прохождении фронтов электрических импульсов может быть того же порядка или выше, чем при чисто механических возмущениях (вибрации, взрывы, явления на контактах блоков и т.п.).

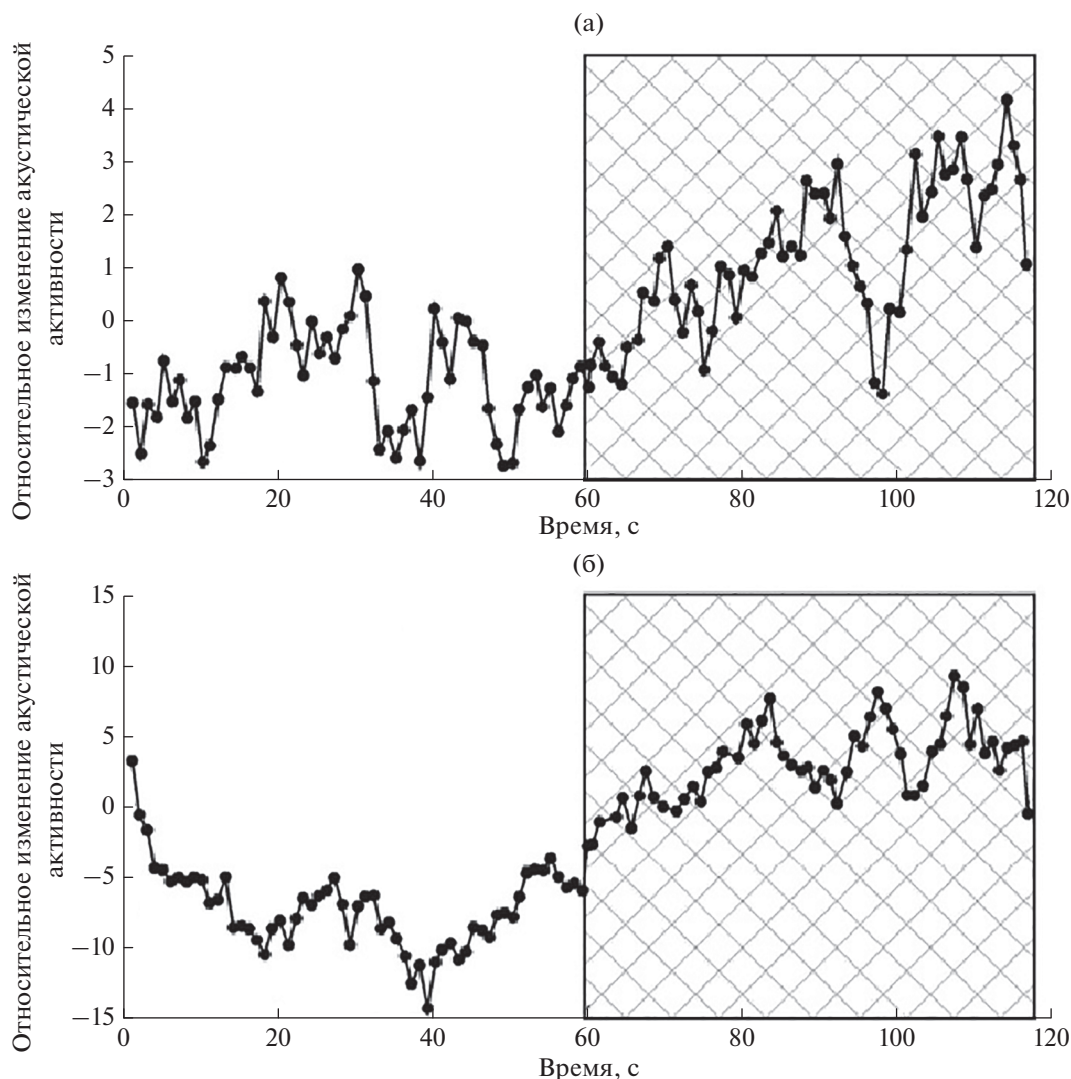
В наибольшей степени исследован вопрос о влиянии ЭМ полей на накопление дефектов (фактически, неупругую составляющую деформации) по данным АЭ образцов горных пород. Последние три десятилетия подобные эксперименты проводились в ИФЗ РАН, ОИВТ РАН и НС РАН в г. Бишкеке, и интерес к ним был стимулирован описанными выше полевыми экспериментами с мощными источниками тока (МГД-генераторы и ЭИС).

Первые результаты исследования ЭМВ на акустическую эмиссию модельных образцов были получены в геофизической обсерватории “Бокрок” ИФЗ РАН на сервоуправляемом прессе [Sobolev et al., 2000; Ponomarev et al., 2002; Соболев, Пономарев, 2003]. Эксперименты выполнены на бетонных образцах – составных наклонных параллелепипедах с ослабленной вставкой, имитирующей разломную зону, в которую был добав-

лен либо кварцевый песок (“пьезоэлектрический слой”), либо диабазовый песок (“не пьезоэлектрический”) [Sobolev et al., 1996; Соболев, Пономарев, 1997]. Такая конфигурация образца предопределила появление трещин именно в этом ослабленном слое. Образцы подвергались деформированию в условиях двухосного сжатия при постоянном боковом сжимающем усилии. Основная (вертикальная) нагрузка изменялась с постоянной скоростью, обеспечивая скорость деформации на уровне  $10^{-8} \text{ с}^{-1}$ . В некотором промежутке времени на образец действовало переменное электрическое поле. В результате была обнаружена тенденция увеличения активности АЭ: приращение числа сигналов АЭ (откликов) при наложении ЭМ поля составило порядка 1% от исходного уровня активности АЭ до воздействия (рис. 4). Эффект был более выражен на запредельной стадии нагружения, когда образец находился в метастабильном состоянии. Важно, что эффект растянут во времени и имеет тенденцию к выполаживанию.

Большой цикл исследований по этой тематике на различных образцах горных пород был впоследствии проведен в НС РАН (обобщение полученных результатов представлено в работе [Богомоллов и др., 2011]). Наибольшее количество экспериментов было проведено на образцах магматических пород, для которых исследован эффект чувствительности материалов к ЭВ в зависимости от величины сжимающего напряжения (сеансы ЭВ проводились при фиксированном уровне напряжения одноосного сжатия) [Закупин и др., 2006а; 2006б; Мубассарова и др., 2014]. На образцах гранитов, гранодиоритов и габбро было продемонстрировано, что активность АЭ, обусловленная воздействием ЭМ поля, проявляется при значениях осевого сжимающего напряжения, соответствующих  $k_p > 0.7$  ( $k_p$  – отношение текущей нагрузки к разрушающей) [Закупин и др., 2006а; Bogomolov, Zakupin, 2008]. Наименьшая величина напряжения, при которой зарегистрированы ЭМ эффекты, соответствует началу дилатансионной стадии деформирования, когда при увеличении сжимающей нагрузки объем образца увеличивается за счет бокового расширения. Во флюидонасыщенных образцах АЭ-отклик на ЭВ проявляется заметнее. Отмечено [Закупин и др., 2006б], что наблюдаемые АЭ-отклики, в зависимости от уровня нагрузки и типа ЭМВ, могут иметь вид как кратковременного всплеска АЭ, так и достаточно длительного приращения активности АЭ с медленным спадом до фонового уровня (как правило, приращение происходило со сдвигом во времени по отношению к моменту начала воздействия). При увеличении нагрузки наблюдаемые задержки откликов активности АЭ от момента начала ЭВ уменьшаются. Вариации усредненной активности АЭ при внешних воз-





**Рис. 4.** Изменение акустической активности при переходе от фазы покоя (1–59 с) к фазе инициирования электрическими импульсами (60–118 с) частотой 250 Гц (а) и 2.5 кГц (б), согласно работам [Соболев, Пономарев, 2003; Sobolev et al., 2000; Ponomarev et al., 2002]. Модель с диабазовым песком.

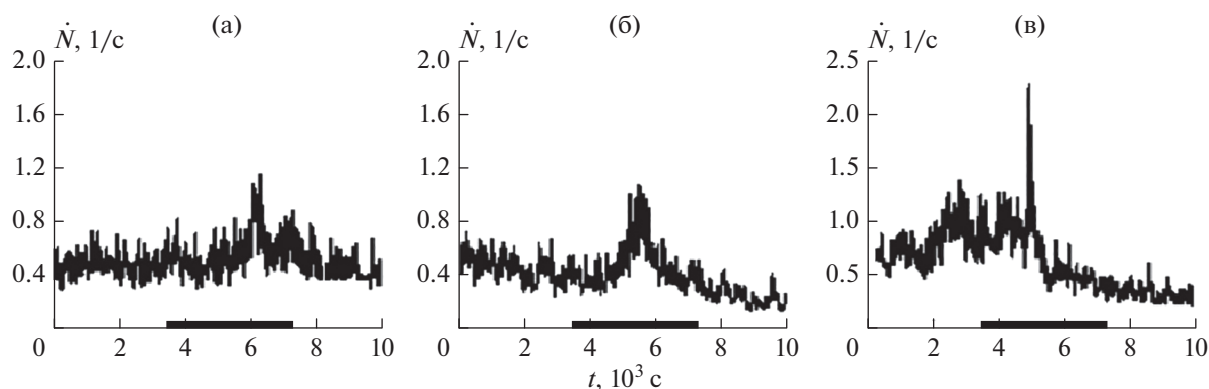
действиях (рис. 5), были подтверждены результатами статистического анализа [Закупин и др., 2006а; Богомолов и др., 2011].

В работе [Боровский и др., 2011; Zakupin et al., 2009] приведены результаты исследования влияния комбинированного ЭМВ (в виде ортогональных электрического и магнитного полей) на процесс трещинообразования. Показано, что такое воздействие порождает большой эффект прироста.

С самого начала этих исследований определенное внимание уделялось не только пространственно-временной картине трещинообразования, то есть анализу интенсивности АЭ, но и спектральным характеристикам акустических сигналов. В частности, появление в спектре второго максимума с меньшей частотой и интенсивностью, чем у первого (основного), интерпретирова-

лось как переход от диффузного распределения трещин по объему образца к их кластеризации [Трапезников et al.; Закупин и др., 2006б]. Авторы этих работ не без оснований полагали, что спектральные особенности акустических и электромагнитных сигналов могут дать существенную дополнительную информацию для понимания происходящих процессов. В работе также отмечалось, что эффект ЭВ проявляется заметно отчетливее при приближении нагрузок к разрушающим, т.е. при приближении к состоянию потери устойчивости. В работе [Закупин и др., 2006б] были подмечены очень многие эффекты, исследованные впоследствии в других работах.

При дальнейшем изучении триггерных ЭМ эффектов в ОИВТ РАН были сопоставлены значения энергий: вносимой ЭВ и излучаемой аку-



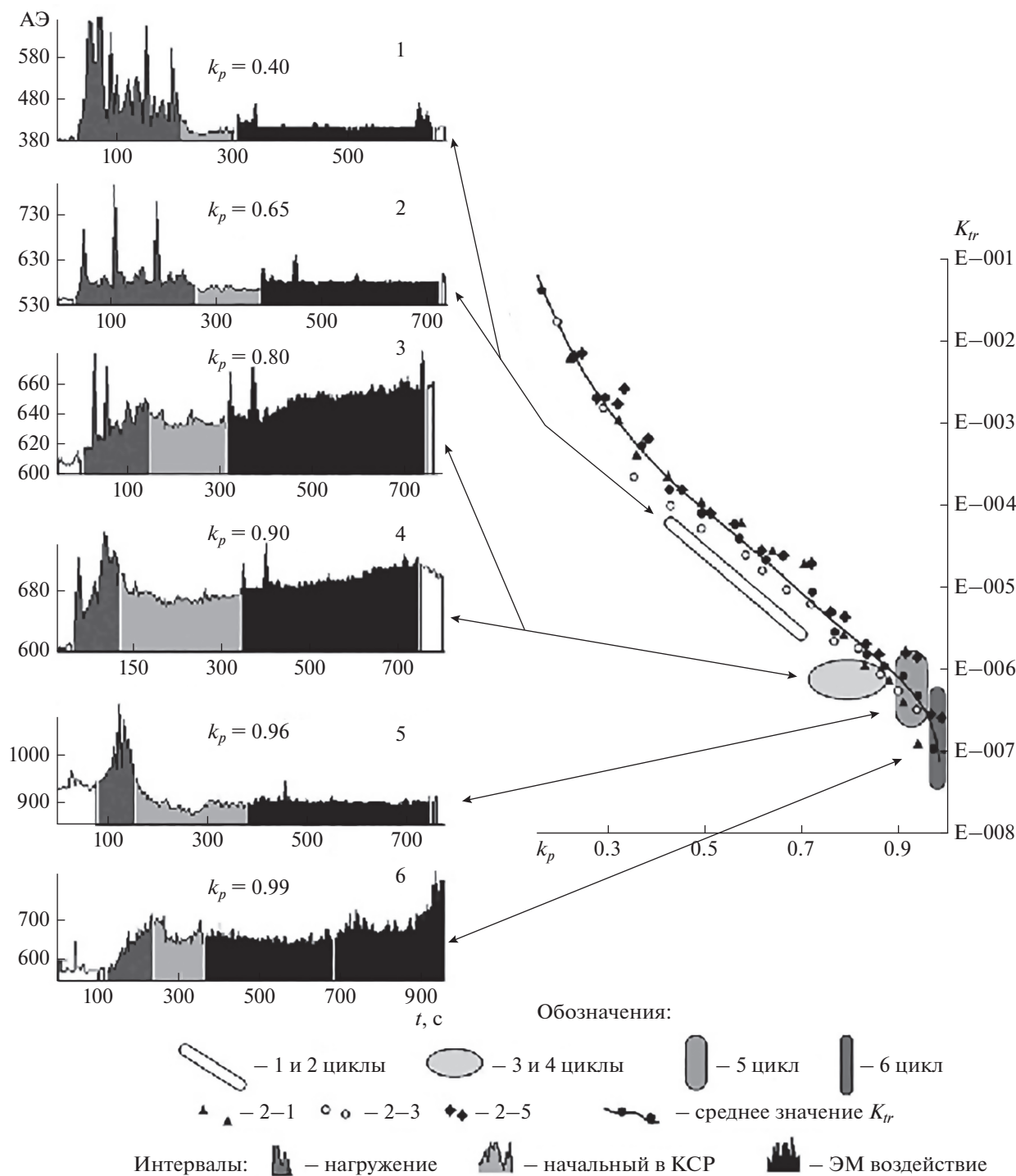
**Рис. 5.** Активность акустической эмиссии сухого образца гранодиорита при нагрузках: (а)  $k_p = 0.86$  ( $\sigma = 170$  МПа); (б)  $k_p = 0.91$  ( $\sigma = 178$  МПа); (в)  $k_p = 0.95$  ( $\sigma = 187$  МПа), согласно работе [Закупин и др., 2006а]. Воздействие во всех случаях – прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой 55 В, частотой 2 кГц, длительностью 20 мкс.

стическим сигналом [Авагимов и др., 2006]. На примере образцов двуокиси циркония было установлено, что по мере увеличения нагрузки средняя энергия, необходимая для генерации одного АЭ-сигнала, уменьшается на три порядка величины, а коэффициент акустоэлектрической связи (механо-электрического преобразования – КМЭ) почти не зависит от уровня нагрузки и составляет около  $3 \times 10^{-2}$  [Авагимов и др., 2006]. Для бетонных образцов с включениями корунда или керамической крошки из двуокиси циркония была рассчитана минимальная энергия триггерного воздействия  $e_{tr}$ , которая нелинейно зависит от накопленной энергии деформации  $\pi$ , соответствующей уровням нагрузки  $k_p$  от 0.3 до 1.0 (рис. 6). Величина  $e_{tr}$  по своему физическому смыслу означает удельную механическую энергию сжатия, которую необходимо подвести к образцу при очередном ступенчатом нагружении (пригрузе), чтобы инициировать один акт акустической эмиссии. Рассчитанное соотношение  $K_{tr} = e_{tr}/\pi$  составило при  $k_p \geq 0.9$ , величину порядка  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  для образцов с различными механофизическими свойствами [Авагимов, Зейгарник, 2008; Авагимов и др., 2011]. Причем, как следует из экспериментов, зависимость  $K_{tr}$  от  $k_p$  является довольно универсальной (см. рис. 3). Таким образом, было показано, что для исследованных образцов искусственной керамики внешнее электровоздействие разумной интенсивности может быть эффективным инструментом только при существенном приближении к критическому состоянию [Авагимов и др., 2011]. Для образцов другого типа (например, габбро и некоторые другие горные породы) это граничное значение  $k_p$  может смещаться в сторону меньших значений: примерно до 0.7. Кроме того, нельзя не учитывать, что те значения  $k_p$ , которыми обычно оперируют, относятся к образцу в целом и рассчитыва-

ются по измеряемой приложенной силе и сечению образца. Однако неизбежное наличие в образце различных неоднородностей приводит к перераспределению локальных напряжений, которые на отдельных участках (и особенно в зонах концентрации трещин) могут приближаться к критическим.

Последующие эксперименты, выполненные этой группой, были направлены на получение систематических свидетельств влияния ЭВ на АЭ и разрушение образца, находящегося в состоянии, близком к неустойчивому [Зейгарник и др., 2018; Zeigarnik et al., 2019]. В качестве образцов использовались параллелепипеды из строительного песчаника одной партии. В описываемых экспериментах в образце, находящемся при постоянной нагрузке в течение времени, достаточного для достижения фоновых значений АЭ, создавался постоянный ток, величина которого в пределах одного импульса плавно уменьшалась за счет электрохимических процессов на электродах. Такая форма импульсов была выбрана на основании предварительных экспериментов, которые показали, что нет однозначной связи между формой электрического импульса и реакцией образца на него.

В качестве примера на рис. 7 представлены результаты экспериментов на одном из образцов. На рисунке видно, что достаточно интенсивная акустическая эмиссия стала проявляться при достижении нагрузки 150 кН (на конечной стадии ступенчатой нагрузки). До этого интенсивность акустической эмиссии как на стадиях прироста нагрузки, так и на этапах электровоздействия была незначительной. При нагрузке 150 кН ( $k_p \geq 0.96$ ) в течение достаточно длительного периода времени до электровоздействия (около 30 мин) акустическая эмиссия также была незначительной. Примерно через 6 мин после включения тока по-

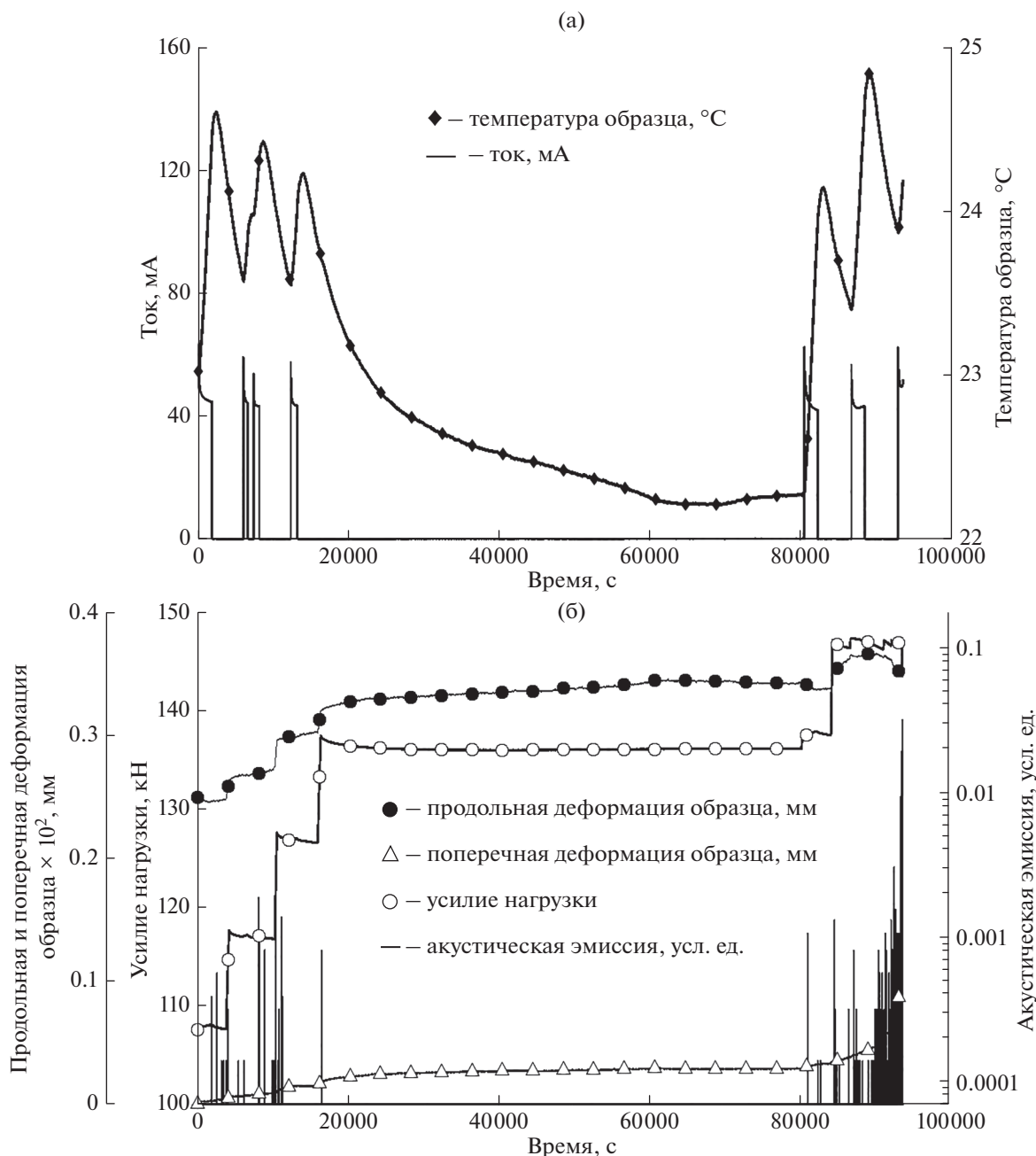


**Рис. 6.** Распределения параметра  $K_{tr}$  (отношение минимальной энергии триггерного воздействия к потенциальной энергии образца при уровне нагрузки  $k_p$ ) в зависимости от  $k_p$  по данным модельных образцов №№ 2-1, 2-3, 2-5, согласно работе [Авагимов и др., 2011].

явилась заметная акустическая эмиссия, уровень которой оставался более или менее стабильным как в течение остального интервала электровоздействия, так и около 25 минут после выключения тока. Затем акустическая эмиссия в течение

35 мин плавно нарастала, пока это нарастание не приняло лавинообразный характер.

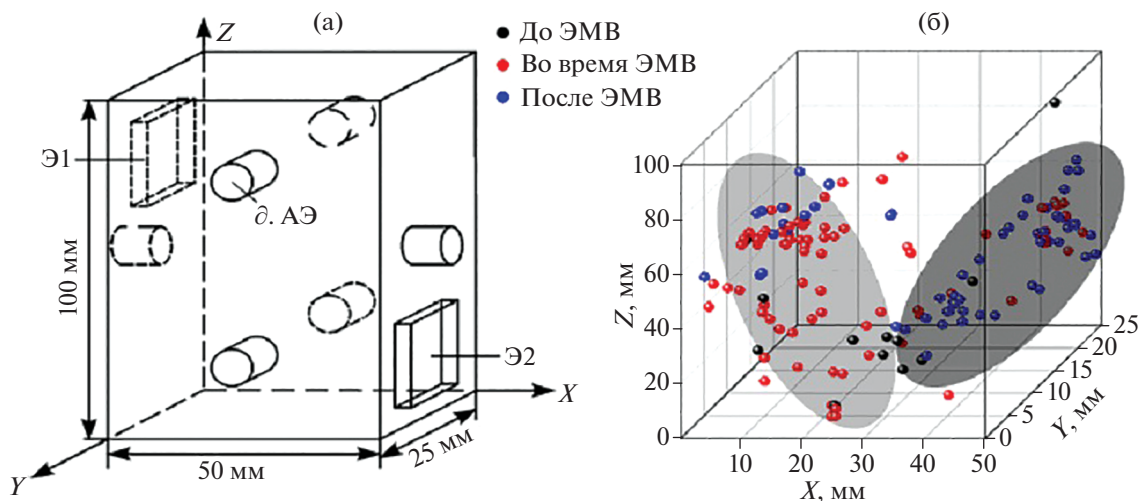
Таким образом, полученные данные об усилении акустической эмиссии в результате электровоздействия при нагрузках, близких к разруше-



**Рис. 7.** Результаты экспериментов на образце искусственного песчаника [Зейгарник и др., 2018]. На рисунке представлена заключительная часть эксперимента спустя 2676.45 минут после его начала. Этот момент времени на графике принят за ноль отсчета времени:  $\blacklozenge$  — температура образца, °С; — ток, мА;  $\bullet$  — продольная деформация образца, мм;  $\triangle$  — поперечная деформация образца, мм;  $\circ$  — усилие нагрузки, кН; — акустическая эмиссия, усл. ед.

нию, свидетельствуют об интенсификации процесса образования трещин с переходом его в стадию лавинного трещинообразования. В процессе электровоздействия образец переходит в запредельное состояние и теряет механическую устойчивость. Эти данные подтверждают вывод, сделанный в более ранней работе [Лапшин и др., 2016], о том, что причина этого явления скорее всего состоит в росте давления в порах и трещи-

нах за счет теплового эффекта. На рис. 7 видно, что пропускание тока сопровождается нагревом образца на 2–4 градуса. Возможно, это одна из причин последующего от электрического импульса, наблюдаемого как в натуральных, так и лабораторных условиях и столь часто упоминаемого в ряде цитированных выше работ. Анализ наблюдаемого эффекта в терминах энергетических соотношений показал, что энергия, подводимая к



**Рис. 8.** Схема расположения датчиков АЭ (д. АЭ) и электродов ЭМВ (Э1, Э2) (а) и пространственное распределение источников сигналов АЭ (б) при постоянном уровне сжатия  $k_p = 0.94$  ( $\sigma = 75$  МПа), по материалам работы [Мубассарова и др., 2014].

образцу за счет электровоздействия, оказывает триггерный эффект.

Как показали эксперименты с гранитом при непрерывным воздействием ЭМ поля (не прекращающимся в течение всего времени нагружения), характер деформирования изменяется [Пантелеев и др., 2015]: прежде всего, увеличивается угол наклона графика повторяемости сигналов АЭ по энергиям (*b-value*). Этот результат перекликается с установленным в работе [Смирнов, Завьялов, 2012] фактом заметного увеличения угла наклона графика повторяемости непосредственно во время воздействия импульсом тока от МГД-генератора и сразу после него, с постепенным его восстановлением в течение 35 ч. Кроме того, в эксперименте с непрерывным ЭМ воздействием было отмечено относительное уменьшение количества низкочастотных сигналов АЭ при пропорциональном увеличении количества средне- и высокочастотных импульсов АЭ.

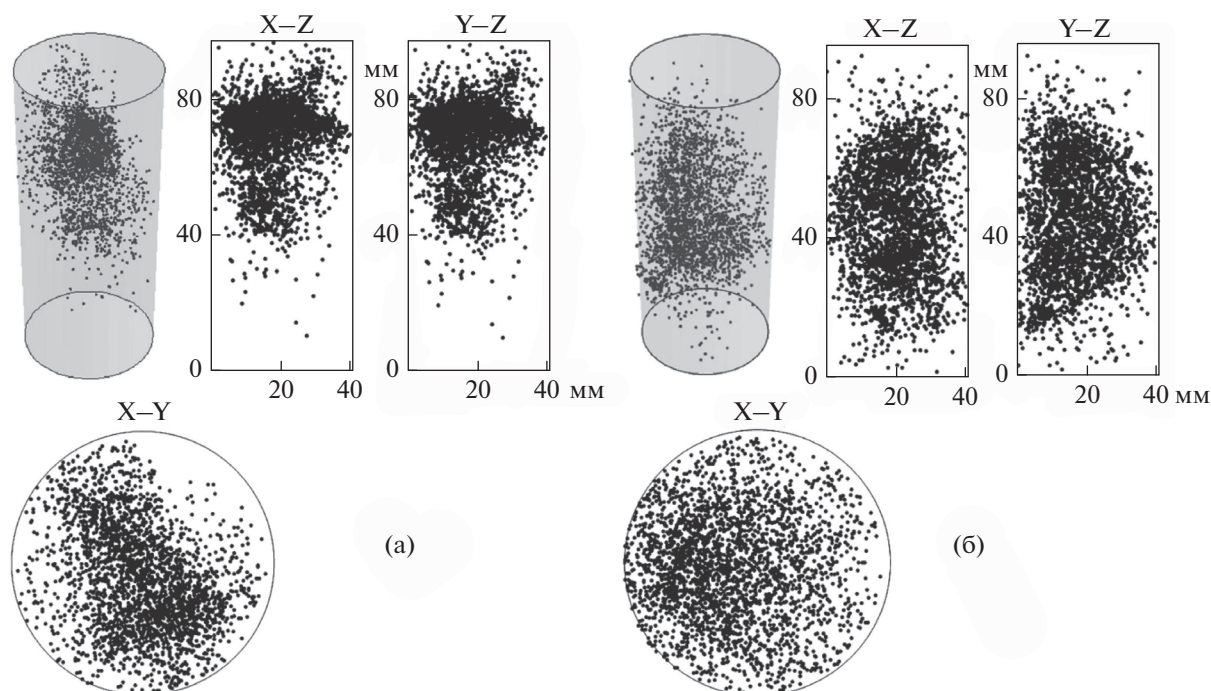
Наиболее наглядно об ЭМ влиянии свидетельствует изменение пространственного расположения источников АЭ в объеме образца [Пантелеев и др., 2015; Мубассарова и др., 2014]. Кратковременное (1 ч) воздействие электрическими импульсами на стадии диффузного (рассредоточенного) накопления дефектов приводит к перераспределению и кластеризации дефектов в области будущего макроразрыва (рис. 8).

Если ЭМ поле действует на образец непрерывно в течение всего хода нагружения, то поэтапное образование и развитие локализованных в объеме образца разрывов (трещин), происходившее без воздействия ЭМ поля, сменяется дисперсным накоплением относительно большого количества

соизмеримых по размеру трещин, коалесценция которых и вызывает макроразрушение (рис. 9).

В экспериментах [Лапшин и др., 2016] исследовалось усиление активности при прохождении электрического тока через флюидонасыщенные образцы песчаника (рис. 10). Этот эффект проявлялся при воздействии как постоянным, так и переменным током и слабо зависел от интервалов воздействия и степени минерализации насыщающего образец флюида, а определялся подведенной к образцу электрической энергией. Эксперименты проводились на прессовом оборудовании при гальваническом (т.е. с пропусканием переменного и постоянного тока различной мощности) и бесконтактном электростатическом воздействии. Важно, что испытания проводились в запретной области деформирования, когда на деформационной кривой ( $\sigma$ – $\epsilon$ -зависимости) напряжение сжатия образца  $\sigma$  уменьшается с ростом деформации  $\epsilon$ . Другой отличительной чертой этих экспериментов было то, что они проводились в условиях заданного режима осевой деформации (*strain-control loading*). В этих условиях в периоды прохождения тока также происходила заметная объемная деформация образцов, что в целом согласуется с результатами работы [Богомолов и др., 2017]. Однако в этих экспериментах не было обнаружено значимых различий в наклонах графиков повторяемости (*b-value*) интенсивности акустических сигналов, полученных в интервалах электрических воздействий и без них. Полученные оценки температурного нагрева порядка 70°C позволили сделать вывод, что активизация АЭ вызвана температурным расширением флюида в порах и трещинах образца. Таким образом, результаты этой работы перекликаются





**Рис. 9.** Пространственное расположение источников импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной в течение всего эксперимента, в случае отсутствия воздействия ЭМ поля (а) и при его воздействии (б), согласно работе [Пантелеев и др., 2015].

с результатами по термическому стимулированию АЭ [Johnston, Toksoz, 1980]. В экспериментах с приложенным электростатическим полем, создаваемым разностью потенциалов на электродах (при отсутствии гальванической связи электродов с образцом) усиления АЭ авторы не наблюдали.

Хорошо известные работы [Альшиц и др., 1998; Урусовская и др., 2000] по усилению магнитопластического эффекта в щелочно-галогидных кристаллах при совместном действии электрического и магнитного полей стимулировали проведение подобных экспериментов в ИС РАН; использовались образцы гранита Уэстерли [Zakupin et al., 2009]. Эксперименты проводились в условиях одноосного сжатия, когда направления векторов индукции магнитного поля  $B$  и напряженности электрического поля  $E$  были перпендикулярны друг другу и оси сжатия.

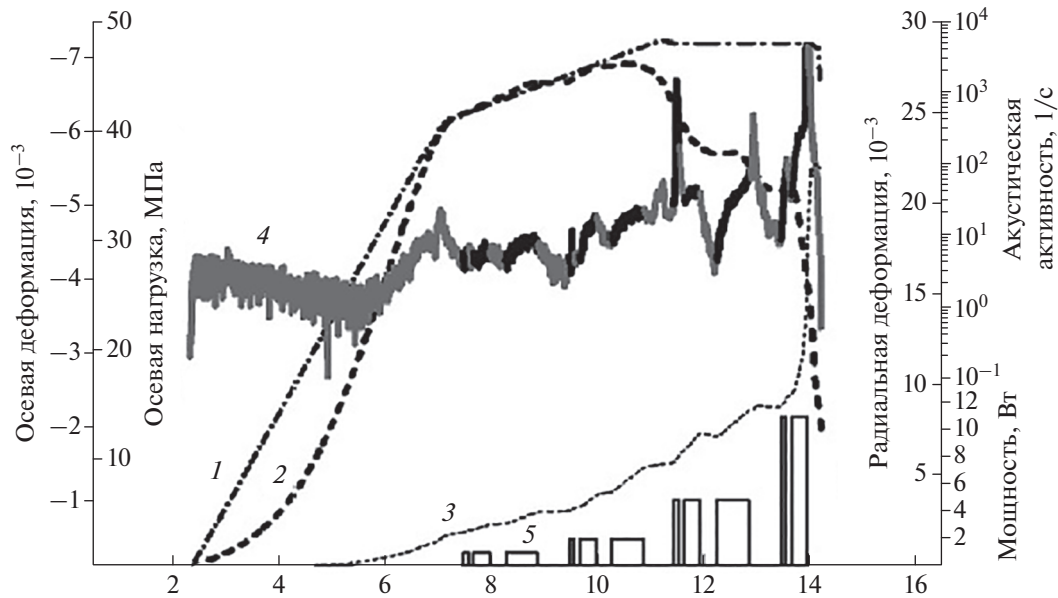
При сравнении откликов АЭ на этот вид ЭМ-воздействия и на тестовый прирост механической нагрузки (равный 1% от приложенного усилия (рис. 11а)), оказалось, что отклик АЭ на ЭМ воздействие оказался по амплитуде больше отклика на тестовый пригруз, а его длительность была примерно в 15 раз больше (было зарегистрировано последнее действие ЭМ поля), чем в случае отклика на механический пригруз. При этом соотношение сильных и слабых АЭ-сигналов в обоих случаях было практически равным. Однако спад активности АЭ после отклика на ЭМВ характеризу-

ется резким уменьшением количества “слабых” сигналов практически до нуля (рис. 11б) [Zakupin et al., 2009].

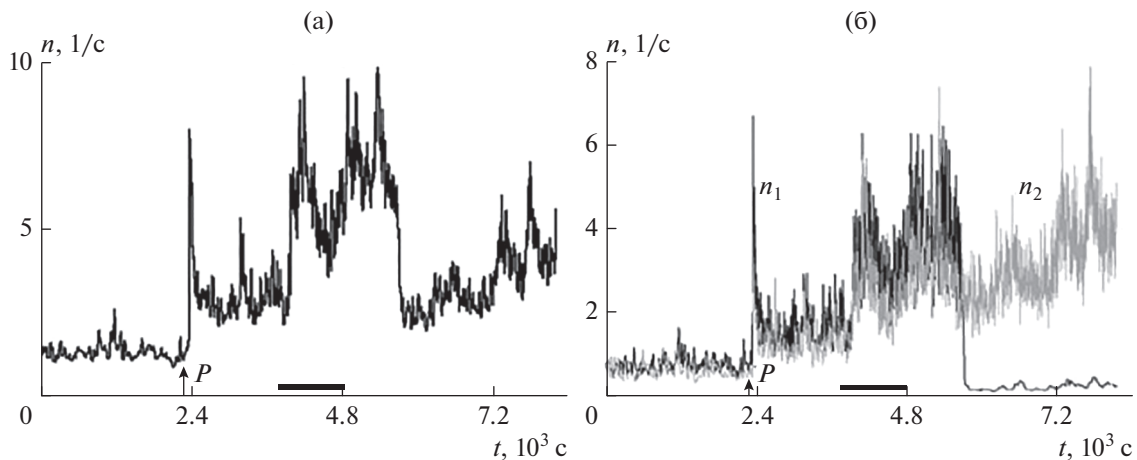
В дальнейших экспериментах для приближения условий нагружения образцов к натурным (медленный рост напряжения при подготовке очага землетрясения) воздействие ЭМ полем проводилось в период нарастающей нагрузки [Zakupin et al., 2012a; 2012b]. При этом применялись различные комбинации электровоздействий с разными амплитудами и длительностями токовых импульсов. Было обнаружено, что акустический отклик зависит от типа электровоздействия. В экспериментах (см. работу [Zakupin et al., 2012a]) было также выявлено изменение скорости продольной и поперечной деформации в результате ЭМ воздействия. Резкие всплески интенсивности акустической эмиссии, как правило, сопровождались заметным возрастанием скорости компонент деформации [Богомолов и др., 2017]. В этой работе было также показано, что при включении непрерывного ЭМ-воздействия наблюдается рост средней скорости деформации и снижается вероятность скачкообразных смещений (сдвигов) по поверхностям формирующихся разрывов.

В целом же результаты экспериментов, выполненных на разных установках, при разных схемах нагружения и режимах ЭВ/ЭМВ, показали, что наблюдаемые эффекты хорошо воспроизводятся





**Рис. 10.** Примеры вариаций скорости АЭ при воздействии переменным электрическим током разной мощности, согласно работе [Лапшин и др., 2016]: 1 – задаваемая осевая деформация; 2 – осевые напряжения; 3 – радиальная деформация; 4 – скорость АЭ; 5 – электрическая мощность. Темным тоном на кривой 4 отмечены интервалы воздействия электрическим током.



**Рис. 11.** Временные зависимости активности АЭ: (а) – активность всех зарегистрированных сигналов; (б) – активности “слабоамплитудных” сигналов (черная кривая,  $\dot{N}_1$ ) и “сильноамплитудных” (серая кривая,  $\dot{N}_2$ ) образца гранита Уэстерли при  $k_p = 0.85$  ( $\sigma = 107$  МПа), по материалам работы [Zakurin et al., 2009]. Серая линия на оси абсцисс – интервал ЭВ, стрелка и буква *P* указывают момент механического пригруза.

не во всех деталях: проявляется определенная зависимость от состава, структуры и текстуры образца, его влажности, в ряде случаев от типа и режима воздействия и ряда других факторов. Вместе с тем, как отмечалось в работах [Богомолов, 2010; Zakurin et al., 2009], для серий образцов гранитоидов и керамики двуокиси циркония из 26 случаев ЭМ воздействий отклик активности зарегистрирован в 22 случаях.

Отдельно стоит упомянуть работу [Sobotka, 2010], в которой приводятся результаты экспериментов по воздействию постоянным током до 1.5 А на достаточно большие образцы, изготовленные из смеси песка. Эксперименты проводились без нагрузки в условиях естественной влажности и с образцами, насыщенными соляным раствором. Как полагает автор, наблюдаемую акустическую эмиссию можно объяснить возникновением тер-

моэмиссионных напряжений на границах гранул песка и образованием газовых пузырьков за счет достаточно большой плотности тока.

Уместно заметить, что в ряде случаев лабораторного моделирования в условиях как одноосного, так и всестороннего сжатия фиксировалось и высокочастотное (кило- и мегагерцовое) электромагнитное излучение (ЭМИ), которое во многих случаях сопровождало АЭ. Как уже отмечалось выше, характеристики ЭМИ, и в частности спектральный состав излучения, давали дополнительную информацию об особенностях механизма трещинообразования. Обширную библиографию по исследованиям такого рода можно найти, например, в работах [Stavarakas et al., 2008; Baddari et al., 2011; Stergiopoulos et al., 2013; Cartwright-Taylor et al., 2014]. Было выявлено, что, в отличие от АЭ, сигналы ЭЭ появляются при достаточно больших нагрузках, близких к разрушению образца, т.е. в результате разделения зарядов при зарождении, распространении и слиянии трещин отрыва, а на стадии неустойчивого развития разрушения — при образовании трещин смещения [Thomson et al., 2006].

Наконец, следует отметить, что в случаях, когда АЭ сопровождается ЭМИ, появляется возможность более точного определения первых вступлений акустических сигналов АЭ, привязывая их ко времени первого вступления электромагнитных сигналов, которое определяется существенно точнее. В итоге, это позволяет надеяться на более точную локацию источников акустических сигналов.

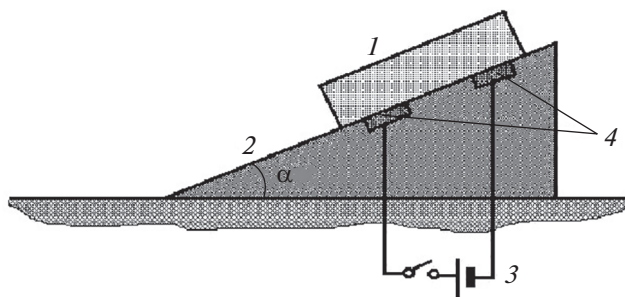
### 3.2. Исследования инициирования лабораторных “землетрясений” на пружинно-блочных моделях разлома земной коры

Результаты экспериментальных исследований отклика акустической эмиссии образцов горных пород и модельных материалов в напряженно-деформированном состоянии на электрическое воздействие, представленные в разделе 3.1, продемонстрировали рост трещинообразования в образце при пропускании через него импульсов электрического тока. При этом использовались и бетонные образцы, моделировавшие разлом земной коры [Соболев, Пономарев, 2003], но в этих работах электрическое воздействие вызывало только рост акустической эмиссии (трещинообразования), но не разрушение образца. Следует отметить, что эффект модуляции геоакустической эмиссии внешними воздействиями на среду хорошо известен: например, воздействие лунно-солнечных приливов [Гордеев и др., 1995]. Тем не менее, появление отклика акустической эмиссии на внешнее воздействие не означает, что оно может однозначно привести к инициации макрособытия (землетрясения или разрушения испыты-

ваемого образца) [Beeler, Lockner, 2003]. В связи с этим были проведены исследования условий инициации лабораторного “землетрясения” импульсами электрического тока, а также триггерного потенциала такого электрического воздействия.

Одной из наиболее известных моделей, применяемых для упрощенного описания механических процессов, происходящих в очагах землетрясений, является модель прерывистого скольжения (“*stick-slip*”) [Brace, Byerlee, 1966]. Она опирается на следующие наблюдения: землетрясения в большинстве случаев происходят не в результате зарождения и распространения новых трещин, а вследствие проскальзывания по уже существующим нарушениям сплошности — геологическим разломам земной коры [Садовский и др., 1987]. Такой подход получил широкое распространение и используется в большом количестве публикаций, посвященных моделям очага землетрясения и геомеханике разломов [Кочарян, 2016]. Согласно модели прерывистого скольжения (“*stick-slip*”), движение в очаге представляет собой акт неустойчивого проскальзывания, при котором смещение начинается после достижения напряжениями, касательными к плоскости разлома, определенного предела. Данные модели получили широкое распространение в лабораторных экспериментах по моделированию накопления и сброса напряжений в разломе земной коры [Rosenau et al., 2017] и были использованы в работах по изучению отклика модельного разлома на ЭВ.

Первые результаты по инициированию динамического срыва электрическим током были получены на упрощенной модели [Chelidze et al., 2002; 2004; 2016] (рис. 12), когда электрические импульсы подавались в зону контакта между подвижным блоком и неподвижной платформой. При этом подвижный блок устанавливался на платформу, затем ее наклоняли почти до критического угла, при котором происходило соскальзывание блока. В такой механически неустойчивой системе была проверена возможность инициирования подвижки блока в его метастабильном состоянии при подаче импульсов тока в зону контакта блока и платформы. Эксперименты проведены на сухом блоке и платформе из различных материалов (гранит, базальт, лабрадорит) при влажности окружающего воздуха 30–50%. Электрические импульсы, подаваемые параллельно плоскости контакта блока и платформы, с напряжением 1.3 кВ инициировали соскальзывание блока с вероятностью 0.07. При повышении напряжения воздействия до 10 кВ вероятность соскальзывания блока возрастала до 0.2. Если электрическое поле прикладывалось перпендикулярно плоскости контакта, то соскальзывание блока не наблюдалось. Более того, в таком ортогональном приложенном поле механическая система



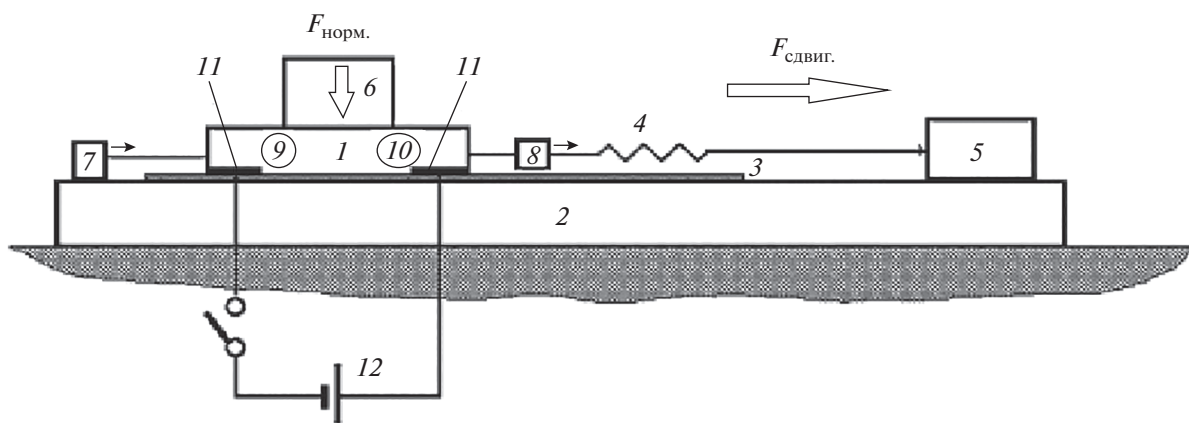
**Рис. 12.** Схема экспериментальной установки для изучения влияния электрического поля на соскальзывание подвижного образца (1) с наклонной платформы (2); (3) источник тока; (4) электроды. Платформа (2) с установленным образцом (1) наклоняется на угол  $\alpha$ , близкий к критическому, при котором соскальзывание образца происходит без электрического воздействия.

оставалась в равновесии даже при наклоне платформы на угол, превышающий критическое значение.

В лабораторных экспериментах на пружинно-блочной модели, имитирующей сейсмогенный разлом [Novikov et al., 2017], подтверждена возможность прямого инициирования сейсмического события импульсом электрического тока, протекающего вдоль разломной зоны. Эта пружинно-блочная трибологическая установка прерывистого скольжения, в которой подвижный и неподвижный блоки моделируют борта разлома, имитирует сейсмический цикл (накопление и сброс напряжений в сейсмогенном разломе)

(рис. 13). Контактная зона между неподвижным и подвижным блоками, где накапливаются сдвиговые напряжения, заполняется гранулированным материалом с контролируемой дисперсностью, имитирующим заполнение разлома земной коры. Вертикальная нагрузка создает нормальное давление образца на неподвижный блок. Электромеханический привод обеспечивает медленное линейное нагружение подвижного блока с минимальной скоростью до 0.13 мкм/с и рост сдвиговых напряжений в контактной зоне, что позволяет определять с высокой точностью критические напряжения сдвига, при которых внешнее триггерное физическое воздействие проявляется наиболее эффективно. Подробное описание устройства установки и диагностического оборудования представлено в работе [Кочарян, Новиков, 2015].

В этой установке, впервые для устройств такого класса, предусмотрена система электровоздействия на разломную зону, позволяющая имитировать протекание электрического тока через разлом и исследовать его возможное триггерное влияние на сейсмический процесс. В экспериментах использовался бетонный подвижный блок с размерами 227 × 112 × 53 мм, толщина заполнения контактной зоны гранулированным материалом (строительным песком с размерами частиц 0.2–0.5 мм) составляла несколько миллиметров. Нормальная нагрузка на контактную зону составляла около 1.12 кН, что обеспечивало нормальное напряжение в гранулированном наполнителе 45 кПа. Жесткость калиброванной пружины – 16.7 Н/мм. На первом этапе экспериментов были определены условия, при которых



**Рис. 13.** Функциональная схема установки прерывистого скольжения с системой подачи электрических импульсов в межблоковую контактную зону: 1 – подвижный блок; 2 – неподвижный блок; 3 – наполнитель контактной зоны (гранулированный материал); 4 – пружина; 5 – электромеханический привод; 6 – нормальная нагрузка контактной зоны; 7 – датчик перемещения подвижного блока; 8 – датчик усилия сдвига подвижного блока; 9 – высокочастотный датчик акустической эмиссии; 10 – низкочастотный датчик акустической эмиссии; 11 – электроды, встроенные в нижнюю поверхность подвижного блока; 12 – источник постоянного тока.

осуществляется равномерный сейсмический цикл (медленное накопление и резкий сброс сдвигового напряжения в контактной зоне). Для данных условий определено среднее (воспроизводимое) значение критического усилия сдвига  $F_{\max} = 0.31$  кН. На втором этапе экспериментов при помощи электромеханического привода пружинно-блочная система доводилась до критического состояния, когда сдвиговое усилие достигало  $0.95-0.98F_{\max}$ . После этого привод пружинно-блочной системы выключался, и в течение нескольких секунд производилась выдержка, при которой состояние системы контролировалось по интенсивности акустической эмиссии. Затем осуществлялось воздействие прямоугольными электрическими импульсами от генератора импульсов АНР-1120 с частотой 200 Гц. Амплитуда импульсов электрического тока варьировалась в диапазоне 1–5 мА.

При этом было показано, что инициация подвижки бортов разлома электрическим воздействием возможна только в области субкритического состояния системы, когда накопленные сдвиговые напряжения составляют  $0.98-0.99$  от критического значения (при котором происходит резкая подвижка). Экспериментально установленная пороговая плотность тока, инициирующая сейсмическое событие в модельных условиях, находится на уровне  $20 \text{ А/м}^2$ .

В работе [Новиков и др., 2017] представлены результаты экспериментальных исследований на пружинно-блочной модели (рис. 13) влияния импульсов электрического тока, пропускаемых через имитатор разлома земной коры, на сейсмический цикл (медленное накопление и резкий сброс напряжений в разломе). Было показано, что в опытах с пропуском импульсов постоянного электрического тока  $2.16$  мА с частотой  $6$  Гц через зону межблочного контакта пружинно-блочной модели, заполненной кварцевым песком, максимальное усилие сдвига, при котором происходит динамический срыв подвижного блока (лабораторное “землетрясение”), снижается на  $\sim 20\%$ . Таким образом, в лабораторных условиях показана возможность снижения магнитуды ожидаемого землетрясения за счет электрической обработки зоны разлома. Тем не менее, это снижение незначительно, а найти условия, при которых динамические срывы под воздействием электрических импульсов трансформируются в события медленного скольжения или крип (как, например, при изменении вещественного состава заполнителя межблочной зоны [Kocharyan et al., 2016; Адушкин и др., 2016; Кочарян, Новиков, 2015]) пока не удалось.

#### 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Попытки объяснения механизма влияния электромагнитных полей на сейсмичность принимаются в условиях, когда отсутствует общепринятая модель очага землетрясения. Здесь подразумевается модель физических процессов высвобождения энергии в очаге землетрясения, предопределяющая быструю подвижку по разлому и возбуждение сейсмических волн. Для определения терминологии стоит отметить, что в сейсмологии при чисто кинематическом описании очага землетрясения термины “модель” и “механизм очага” (фокальный механизм) приняты для обозначения набора геометрических параметров смещений по поверхности разрыва [Ризниченко, 1985; Юнга, 1990; Сычева и др., 2020]. При всей важности этих кинематических моделей для сейсмологии и геодинамики они не могут заменить описания физических механизмов в очаге землетрясения.

При таком состоянии дел возможно, скорее всего, лишь качественное объяснение “механизма ЭМ влияния на сейсмичность”, а по сути цепочки эффектов:

1) первичное взаимодействие со средой низкочастотных ЭМ полей, генерированных мощным естественным или антропогенным источником, поглощение части энергии структурными дефектами или неоднородностями, находящимися в метастабильном состоянии;

2) изменение состояния или свойств среды в некоторой области (в частности, усиление или ослабление движения флюида в поро-трещинном пространстве, изменение состояние ансамбля структурных дефектов);

3) изменения режима смещения блоков, проявляющиеся в модификации параметров сейсмичности по сравнению с предшествующим периодом.

Каждое из звеньев этой цепи требует детального изучения, так что большинство работ посвящено отдельным эффектам, относящимся к первому или второму звену. Характерным примером могут служить работы [Файнберг и др., 2004; Авагимов и др., 2005], посвященные оценкам поглощения энергии при аномальных магнитных бурях. В этих работах отмечено, что поток энергии ЭМ волн из ионосферы, описываемый вектором Умова–Пойнтинга, поглощается в проводящих слоях земной коры на глубинах  $\sim 10-40$  км, соответствующих слою, где сосредоточено большинство гипоцентров землетрясений.

Поглощение энергии ЭМ поля предположительно должно приводить к изменениям в структуре среды (от изменения плотности структурных

дефектов на микроуровне до увлажнения/осушения контактов блоков на макроуровне из-за вызванных вариаций притока воды). Условно все это можно отнести ко второму звену цепи, для которого исследования проводились, как правило, методами лабораторного моделирования (в частности на кристаллических образцах при обычных давлениях и температуре [Зуев, 1990]). Переход к третьему звену цепи, связывающему изменения сейсмичности с ЭМ воздействиями, можно проследить в случае, когда изменение состояния среды приведет к некоторому уменьшению ее жесткости в разломной зоне. Эти изменения обеспечивают возникновение сейсмической подвижки, если в достаточной степени меняется соотношение между жесткостью контакта блоков и жесткостью окружающего объема среды [Кочарян, 2016; Rosenau et al., 2017].

Подходы к объяснению ЭМ влияния на трещинообразование в образцах горных пород, испытываемых на лабораторных установках, строятся по аналогичной трехзвенной схеме, причем сигналы АЭ рассматриваются как аналоги сейсмических событий. Сначала остановимся на моделях (механизмах) электромеханической взаимосвязи, в большей степени относящихся к условиям лабораторных экспериментов. Затем перейдем к моделям для натурального масштаба.

#### 4.1. Физические модели влияния ЭМ полей на нагруженные образцы горных пород

В лабораторном масштабе экспериментальные и теоретические исследования ЭМ воздействий сочетаются весьма нетривиально. С одной стороны, известны результаты базовых экспериментов (обобщения в работах [Финкель, 1977; Зуев, 1990]) о влиянии электрических полей с напряженностью порядка 1–10 МВ/м на скорость роста трещины (в частности, ее торможение) и на подвижность дислокаций в кристаллах (электропластический эффект [Зуев, 1990; Conrad, 2000; 2002]). Исследования проводились на металлах и щелочно-галогенных кристаллах, т.е. веществах с относительно простым строением, а также на образцах керамик [Conrad, 2000]. Физический механизм воздействия электрического поля на дислокации обусловлен тем, что в ионных и полярных ковалентных кристаллах дислокации несут электрический заряд, который экранируется заряженными атом-вакансионными дефектами (облаком Коттрелла). Действие электрического поля способствует отрыву дислокации от экранирующего облака, что и означает увеличение ее подвижности [Зуев, Данилов, 2013]. Этот механизм, по-видимому, мог проявляться в электрических явлениях при деформировании и разрушении образцов, которые исследовались в работах [Пономарев, 1987; Куксенко и др., 1997; Махмудов,

Куксенко, 2005]. Но дислокационным механизмом невозможно объяснить результаты влияния электрического поля на рост сколовых трещин и разрушение образцов горных пород [Балбачан, Томашевская, 1900] и некоторые другие экспериментальные данные [Соболев, Демин, 1980].

Влияние магнитного поля определяется явлением депиннинга (открепления дислокации от стопоров [Головин, 2004; Альшиц и др., 2017]), для которого важны спин-химические эффекты в присутствии магнитного поля [Бучаченко, 2014; 2019]. Что касается влияния электрического поля на скорость роста трещины, то, согласно работам [Финкель и др., 1975; Финкель, 1977], оно обусловлено накоплением на поверхностях трещины разноименных электрических зарядов, взаимодействие которых играет ту же роль, что и Гриффитсова поверхностная энергия [Шпейсман, Жога, 2005]. Плотность этих зарядов зависит от электрического поля, которое, наряду с диффузией, вносит вклад в поток заряженных частиц (точечных дефектов) на поверхность трещины. Уточнение параметров структурных элементов, взаимодействующих с внешним ЭМ полем на микроуровне, позволяет ставить вопрос не только о качественном, но и полуквантовом объяснении экспериментальных данных об откликах АЭ на электромагнитные импульсы, описанные в работе [Соболев, Пономарев, 2003] и других работах.

С другой стороны, как раз для образцов горных пород (диэлектриков, не насыщенных водой) проявляется несоответствие между выше описанными результатами исследований откликов акустической эмиссии на ЭМ воздействие и оценками возмущений механических напряжений, которые получаются при макроскопическом описании взаимодействия ЭМ полей с веществом образцов в предположении обычных электрофизических (электропроводность, диэлектрическая проницаемость) и пьезоэлектрических свойств. Поясним этот момент. Из формулы взаимосвязи потенциальной энергии единицы объема и максимального главного напряжения  $\sigma_1$

$$\pi = \alpha(\sigma_1)^2/E_\sigma, \quad (1)$$

в которой  $E_\sigma$  обозначает модуль Юнга, а коэффициент  $\alpha$  зависит от соотношения между главными напряжениями (при одноосном сжатии  $\alpha = 1/2$ ), вытекает, что относительные вариации  $\pi$  и  $\sigma_1$  должны быть одного порядка:  $\delta\pi/\pi = 2\delta\sigma_1/\sigma_1$ . При “эффективных” триггерных воздействиях ЭМ полей в среду вкладывается энергия  $e_r$  (см. раздел 3.1), составляющая  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  от накопленной энергии  $\pi$ . Естественно, что относительные возмущения поля напряжений должны быть такого же порядка. Поскольку характерное значение главного напряжения при испытаниях образцов на одноос-

ное сжатие с воздействием ЭМ поля было  $\sim 100$  МПа, пороговое значение  $\delta\sigma$ , т.е. механический эквивалент триггерных воздействий, можно оценить:  $\delta\sigma \sim 1-100$  Па. Однако обычные механизмы взаимодействия электрических полей с образцами горных пород (диэлектриками со слабо выраженными пьезоэлектрическими свойствами) не могут объяснить генерацию таких возмущений  $\delta\sigma$  в выше описанных экспериментах, в которых напряженность электрического поля была порядка  $10^3$  В/м, а значения электропроводности  $\sigma_E$ , диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и пьезоэлектрических модулей  $d_E$  соответствовали значениям при комнатной температуре и влажности. Рассмотрим факторы, за счет которых можно нивелировать несоответствие по  $\delta\sigma$ .

В электродинамике сплошных сред описаны следующие механизмы влияния электрического поля, вызывающего возмущения механических напряжений: джоулев нагрев и термические напряжения, прямое воздействие на нескомпенсированные электрические заряды и электростриксию, а также пьезоэлектрический эффект. Джоулев нагрев проводящей среды может стать эффективным механизмом ЭВ, если материал испытываемых образцов насыщен проводящим флюидом. При этом важно наличие проводящих каналов, где выделяется основное количество энергии. Выше уже упоминались результаты экспериментов [Лапшин и др., 2016] — электростимулированный рост активности АЭ флюидонасыщенных образцов песчаника, находящегося в запредельной стадии деформирования. На этой стадии в образце, испытываемом на одноосное сжатие, уже возникла магистральная трещина, но установка еще не допускает разрушения за счет частичной разгрузки образца. Заполненная флюидом магистральная трещина как раз может играть роль канала, в котором происходит локальный нагрев и рост давления, что является триггером неупругой деформации в основной (“твердой”) фазе. Но поскольку увеличение активности АЭ при воздействиях ЭМ полей наблюдалось и на обычных, не насыщенных флюидом образцах горных пород, электротермический механизм не может быть единственным объяснением экспериментов.

Максимальный вклад пьезоэлектрического эффекта в возмущение напряжений можно оценить, полагая, что он реализуется при взаимодействии электрического поля [Соболев, Пономарев, 2003; Закупин и др., 2006а; Авагимов и др., 2011] с фракциями кварцитов, которые входят в состав образцов гранитов, при напряженности  $E \sim 10^3$  В/м. Значения продольного пьезомодуля кварцитов лежат в пределах  $d_E \sim 10^{-14}-10^{-12}$  Кл/Н, где верхнее значение приближается к величине модуля  $d_E$  для монокристаллов кварца [Воларович, Пархоменко, 1955; Пархоменко, 1965]. Воз-

мущение деформации  $\delta\epsilon$  при воздействии электрических импульсов с амплитудой напряженности  $E$  можно оценить по формуле электромеханической взаимосвязи  $\delta\epsilon \sim d_E E \sim 10^{-11}-10^{-9}$ . При использовании этой формулы стоит отметить соответствие размерностей:  $1 \text{ Кл/Н} = 1 \text{ м/В}$ , так что произведение  $d_E E$  безразмерно. Если учесть, что упругие модули гранитоидов, из которых изготавливались образцы,  $E \sim 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, то возмущения  $\delta\sigma$  вследствие пьезоэлектрического эффекта при воздействии поля  $E \sim 10^3$  В/м могут составлять  $\delta\sigma \sim 0.1-10$  Па. Таким образом, для образцов кварцитов или для фракций кварца пьезоэлектрический эффект может обеспечивать напряжения, необходимые (но, вообще говоря, не достаточные) для триггерного влияния на акустическую эмиссию.

Стоит отметить, что для образцов гранитоидов и мрамора, которые позволили получить большую часть данных об откликах на ЭМ воздействие, среднее значение модулей  $d_E$  на 3–4 порядка меньше приведенных выше [Пархоменко, 1965]. В такой же пропорции должны уменьшиться усредненные по объему образца возмущения  $\delta\sigma$ , связанные с пьезоэффектом. Кроме того, отклики АЭ на ЭМВ наблюдались и для образцов мрамора и каменной соли [Богомолов и др., 2008; 2017], в которых отсутствуют пьезоэлектрические фракции. Поэтому пьезоэлектрический эффект также не может быть единственным механизмом ЭМ триггера.

Гипотетически, более эффективным механизмом возбуждения напряжений  $\delta\sigma$  при ЭМ воздействиях на гранитные образцы может быть структурно-фазовый переход некоторых фракций фельдшпатитов в состояние несобственных сегнетоэлектриков, описываемое в электродинамике сплошных сред [Ландау, Лифшиц, 1982]. Предпосылкой для такого перехода, как и для обычного пьезоэлектрического эффекта, является отсутствие симметрии кристалла при повороте на  $180^\circ$ . Переход отдельных доменов в состояние несобственных сегнетоэлектриков и спонтанная поляризация окружающего объема может реализоваться, когда в выражении для энергии системы присутствует несколько параметров порядка. Это условие может выполняться для испытываемых на одноосное сжатие гранитных образцов при околоскритических нагрузках, когда кристаллическая решетка фельдшпатитов (имеющих сложное строение) сильно деформирована. Не исключено появление несобственных сегнетоэлектриков в условиях экспериментов на установках-слайдерах [Кочарян, Новиков, 2015; Novikov et al., 2017] в зонах концентрации напряжений на шероховатостях (*asperities*) на поверхности скольжения. Согласно работе [Ландау, Лифшиц, 1982], для несобственных сегнетоэлектриков фа-



зовый переход и сильная поляризация могут происходить не обязательно в присутствии электрического поля, так что в условиях экспериментов [Novikov et al., 2017] электрическое поле могло взаимодействовать с ранее возникшими поляризованными доменами, в которых эффективные значения диэлектрической проницаемости среды могут иметь порядок тысяч. Работы, непосредственно подтверждающие возникновение несобственного сегнетоэлектрического эффекта в нагруженных образцах гранитов или других горных пород, авторам не известны (хотя в работе [Корнфельд, 1974] близкие эффекты исследовались на кристаллах LiF). Косвенно о такой возможности свидетельствуют примеры измерений диэлектрической проницаемости увлажненных пород под нагрузкой [Черняк, 1987]: обнаруженные значения  $\epsilon \sim 10^3$  могут быть признаком перехода в состояние с сегнетоэлектрическими свойствами. Возможность аномальной поляризации среды с линейными структурами (диполей с переменными моментами) при возрастании диэлектрической проницаемости до сотен и тысяч была продемонстрирована в компьютерном эксперименте [Фатеев, 2001; 2005]. В этой связи особенно интересен результат недавней работы [Egorushkin et al., 2018], в которой утверждается, что "...при интенсивной пластической деформации чередуются трансляционные сдвиги и пластические ротации с сильной кривизной решетки. В зонах пластических ротаций возникает разделение электрического заряда с образованием локализованных электронных энергетических состояний, не связанных с основным электронно-энергетическим состоянием твердого тела". Цитированное положение можно описать феноменологически как аномальную поляризацию материала при интенсивной пластической деформации, предполагающей околокритические напряжения.

Ввиду универсальности механизма электрострикции (он реализуется для любых породных образцов, в отличие от омического нагрева и пьезоэлектрического эффекта) рассмотрим детальнее пондеромоторные силы и вызываемые ими колебания напряжения при ЭМ воздействиях. Для этого удобно воспользоваться следующим выражением для объемной плотности пондеромоторных сил  $f$  в сжимаемых и, вообще говоря, неоднородных диэлектриках [Ландау, Лившиц, 1982]:

$$f = \rho_e E + f_{el} = \rho_e E + (\epsilon_0/2)\nabla(E^2 \rho \partial\epsilon/\partial\rho) - (\epsilon_0/2)E^2 \nabla\epsilon, \quad (2)$$

где:  $\rho_e$  — плотность избыточных (сторонних) электрических зарядов;  $\rho$  — массовая плотность;  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума. Для упрощения и наглядности использовано изотропное "жидкостное" пред-

ставление: материал описывается одним параметром — плотностью  $\rho$ , что позволяет сфокусироваться на главном, не отвлекаясь на детали тензорного описания. В выражении (2) первое слагаемое, линейное по напряженности  $E$ , описывает взаимодействие заряженных дефектов с внешним электрическим полем. Прочие, квадратичные по  $E$  слагаемые описывают электростриксию  $f_{el}$ . Средние напряжения, вызываемые силами  $f$  внутри образца или домена с плотностью зарядов  $\rho_e$ , можно оценить как произведение  $\delta\sigma_e = fL$ , где  $L$  — характерный размер в направлении действия электрического поля.

Как известно, разрушение диэлектрического материала на микроуровне при трещинообразовании в геосреде может сопровождаться диссоциативным высвобождением зарядов, переносимых вакансионными дефектами и, возможно, дислокациями [Корнфельд, 1968; 1975; Молоцкий, 1976; 1978; Боев, Гаханов, 1980; Freund, 2000; 2002]. Поэтому в выражении (2) учтено возможное присутствие свободных заряженных частиц в некоторых зонах. По экспериментальным оценкам [Финкель, 1977], поверхностная плотность заряда  $\rho_s$  в некоторых случаях (при растрескивании в ионных кристаллах) может достигать  $\rho_s = \rho_e L = 3 \times 10^{-3} - 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>. Если принять эту оценку для условий обсуждаемых экспериментов, то даже без учета электрострикции (квадратичных по  $E$  слагаемых в (2)) возмущения напряжения  $\delta\sigma_e$ , возникающие при взаимодействии с полем с напряженностью  $\sim 10^3$  В/м, могут достигать  $\delta\sigma_e = \rho_s E \sim 3 - 10$  Па. Полученная оценка и множество публикаций по связанным вопросам деформационной электризации позволяют считать механизм образования избыточных зарядов одним из основных кандидатов для объяснения триггерного влияния электромагнитных полей на активность АЭ (скорость роста микротрещин) в нагруженных горных породах. Характерный размер, на котором происходит отступление от квазинейтральности среды, составляет порядка нескольких длин микротрещин и, по-видимому, не превышает единиц—десятков микрон [Zakurip et al., 2012b]. При этом можно найти объяснение и "последствию", т.е. медленной релаксации активности АЭ, иногда происходящей после прекращения ЭМ воздействия [Vogomolov et al., 2004b]. Оно обусловлено оседанием носителей избыточных зарядов на поверхностях микротрещин, оказавшихся в "заряженной" зоне. Взаимное отталкивание одноименных зарядов приводит к росту длины таких трещин.

Для оценки пондеромоторных сил, связанных с электростриксией, необходимо совместное решение задач электродинамики и теории упругости, что возможно лишь в частных случаях. Один из таких случаев, а именно модель нелинейного

взаимодействия ЭМ волн с возмущением плотности среды в зоне вокруг растущей трещины (источника АЭ, т.е. упругих волн), рассмотрен в работе [Богомолов, 2010]. Этот случай описывается аналогично известному в нелинейной оптике эффекту вынужденного рассеяния Бриллюэна – рассеяние света на временных флуктуациях диэлектрической проницаемости, возникающих вследствие флуктуаций плотности среды, в частности, при быстрой деформации [Шуберт, Вильгельми, 1973]. Низкочастотным аналогом эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна является нелинейное резонансное взаимодействие звуковых и двух электромагнитных волн с резонансом на разностной частоте.

Важно отметить принципиальное значение пространственной неоднородности электрического поля (в выражении (2) фигурируют градиенты  $E^2$  и др.), а также нестационарности поля  $E$  из-за зависимости от частоты фактора  $\rho$  ( $\partial E/\partial \rho$ ) для оценок пондеромоторных сил. Роль крутого нарастания поля  $E$  во времени, как и пространственная неоднородность, осознавались еще на стадии постановки ряда экспериментов: в качестве источников электрических импульсов выбирались генераторы, обеспечивающие крутые фронты нарастания напряжения. Конфигурация электродов, контактирующих с образцом, выбиралась асимметричной, так чтобы выполнялось соотношение  $|\nabla E^2| \sim E^2/L_0$ , где  $L_0$  – поперечный размер образца [Закупин и др., 2006б].

Используя (2) с вышеприведенными уточнениями, выражение для напряжений, связанных с электрострикцией, можно записать в виде:

$$\delta\sigma_{el} = (\epsilon_0/2)\rho \partial E/\partial \rho L_0 \nabla E^2 + (\epsilon_0/2)E^2 L_0 \nabla(\rho \partial E/\partial \rho - \epsilon). \quad (3)$$

Фактор  $\rho \partial E/\partial \rho$  в выражении (3) принимает большие значения, так как поляризация среды может происходить при совсем малых изменениях плотности. При аномальной поляризации горных пород (при динамических нагрузках), отмеченной в работе [Гончаров, Соловьев, 2004], его значения могут стать экстремальными, поскольку в этом случае  $\epsilon$  изменяется от десятых до единиц, а изменение плотности, как и прирост деформации оказываются порядка  $10^{-6}$ – $10^{-5}$ .

В некоторых работах, в частности, в работе [Финкель, 1977] для “практических”, но весьма грубых оценок пондеромоторных сил считается, что  $\rho (\partial E/\partial \rho) \approx \epsilon - 1$ . Строго говоря, это справедливо лишь для газов, когда разность  $(\epsilon - 1)$  примерно пропорциональна плотности  $\rho$ , и второе слагаемое в (3) становится значительно меньше первого; тогда выражение (3) сводится к простой форме, пригодной для практических оценок:

$$\delta\sigma_{el} \sim (\epsilon_0/2)(\epsilon - 1)L_0 \nabla E^2 \sim \epsilon_0(\epsilon - 1)E^2/2. \quad (4)$$

Оценки напряжений, вызванных электрострикцией, использовались для объяснения экспериментов [Chelidze et al., 2002; 2004; 2016] по воздействию электрических полей напряженностью  $10^4$ – $10^5$  В/м на проскальзывание блоков. Но при  $E \sim 10^3$  В/м, что соответствует условиям испытаний образцов на прессе с дополнительным ЭМ воздействием, выражение (4) дает пренебрежимо малый результат  $\delta\sigma_{el} \sim 10^{-4}$  Па при  $\epsilon \sim 10$ .

Более корректный учет взаимосвязи возмущений плотности и диэлектрической проницаемости в работах [Богомолов, 2010; Zakupin et al., 2012a], фактически повторяющий классическое (неквантовое) описание резонансного рассеяния Бриллюэна, позволил получить следующее выражение для возмущений  $\delta\sigma_{el}$ :

$$\delta\sigma_{el} \sim A Q \epsilon_0 \epsilon E_\omega^2, \quad (5)$$

где:  $A$  – числовой коэффициент (для параметров эксперимента  $A \sim 5$  [Богомолов, 2010];  $Q$  – добротность материала образца;  $E_\omega$  – спектральная плотность на “несущей” частоте  $\sim 10^7$  1/с, которая при резонансе Бриллюэна модулируется акустическими колебаниями.

Для горных пород без крупных трещин добротность при атмосферном давлении  $Q \sim 100$ – $400$ , а в сжатом состоянии может достигать нескольких тысяч или даже десятков тысяч [Родионов и др., 1986; Назаров, Радостин, 2007]. Если считать, что в экспериментах с использованием генератора импульсов с крутыми фронтами амплитуда высокочастотных гармоник  $E_\omega$  была сравнимой с амплитудой напряженности ( $\sim 10^3$  В/м), то выражение (5) может дать максимальную оценку  $\delta\sigma_{el} \sim 1$  Па. Это значение соответствует минимальному пороговому значению возмущений напряжения, эффективно воздействующих на рост микротрещин (активность АЭ). Но вклад электрострикции в возмущения напряжения, даже при учете нелинейного резонанса, оказался меньше, чем от взаимодействия электрического поля с избыточными зарядами. Механизм электрострикции и формула (5) позволяют предсказать отсутствие триггерного влияния ЭМ полей на материалы со сравнительно низкой добротностью, и это можно проверить экспериментально. Этот механизм не описывает триггерный эффект ЭМ полей в условиях, когда в образце уже начался рост макротрещины (коэффициент нагрузки  $k_p > 0.98$ ) и добротность снизилась.

В завершение обзора моделей (механизмов) взаимодействия ЭМ полей с нагруженными образцами горных пород стоит подчеркнуть, что для каждого из рассмотренных механизмов (непосредственное воздействие электрического поля на избыточные заряды, электрострикция, джоу-

лев нагрев с термическим расширением и пьезо-электрический эффект) существуют условия, когда данный механизм может дать вклад в триггерный эффект. Экспериментальные данные не всегда позволяют определить, выполнялись ли в проведенных экспериментах то или иное из этих условий. Различные механизмы взаимодействия ЭМ полей с материалом образцов становятся эффективными, когда этот материал не просто находится в напряженно-деформированном состоянии, но в нем происходят коллективные (нетепловые) движения (дислокационные процессы, рост микротрещин). Такие процессы в геоматериалах на микро- и мезоуровне т.е. при масштабах длин, значительно больших молекулярных, реализуются при достаточно высоких нагрузках. Это позволяет понять, почему триггерные эффекты ЭМ полей проявляются в определенном диапазоне нагрузок.

Упрощенное описание механизма непосредственного воздействия электрического поля (присутствие избыточных зарядов и электрострикция) указывает, что для триггерного эффекта необходимо выполнение критерия по напряженности электрического поля  $E \geq E_{\min}$ . Этот необходимый (но не достаточный) критерий согласуется с результатами экспериментов.

#### 4.2. Модели для экспериментов в натурном масштабе

В экспериментах по зондированию земной коры с применением мощных источников тока (кратко – в натуральных экспериментах) характерное значение напряженности электрического поля значительно меньше, чем в лабораторных экспериментах. Для оценки  $E$  можно воспользоваться формулой для электрического поля первичного (возбуждающего) диполя в приближении однослойной модели электропроводности среды [Колесников, 2007]:

$$|E| = (IL_d / \sigma_e) (2\pi r^3)^{-1}, \quad (6)$$

где:  $I$  – сила тока в диполе;  $L_d$  – расстояние между заземлениями диполя;  $\sigma_e$  – средняя электропроводность среды;  $r$  – расстояние между пунктом измерения и центром диполя. Из (6) следует, что для параметров натуральных экспериментов на Бишкекском полигоне  $I = 600\text{--}2000$  А,  $L_d = 4.2$  км,  $\sigma_e \sim 10^{-3}$  Ом $^{-1}$  · м $^{-1}$ , напряженность  $|E|$  на расстоянии  $r = L_d$  порядка  $10^{-2}$  В/м. При таких сравнительно небольших значениях напряженности поля эффекты прироста сейсмичности после ЭМ зондирований земной коры, установленные в работах [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 2001; Сычев и др., 2010; Смирнов, Завьялов, 2012; Chelidze et al., 2006], естественно связывать с другими механизмами.

Для полноты обзора стоит отметить работы, в которых для объяснения влияния ЭМ полей на сейсмичность рассматривалась возможность возникновения электрических полей с высокой напряженностью ( $\sim 10^5$  В/м и более) вблизи грозовых облаков [Ярославский, Капустян, 1990] или возможность протекания локализованных теллурических токов с плотностью до  $10^3$  А/м $^2$ , взаимодействующих с геомагнитным полем [Тренькин, 2015; Черногор, 2017]. При зондированиях земной коры с применением геофизических МГД-генераторов и установки ЭРГУ столь высокие значения напряженности электрического плотности тока в среде заведомо не достигались.

Более высокая чувствительность среды к воздействию ЭМ волн в натуральных условиях по сравнению с экспериментами на образцах определяется ее двухфазностью – наличием проводящего флюида в поро-трещинном пространстве. Электропроводность такой среды значительно выше, чем у сухих пород. Воздействие на такую среду внешних динамических нагрузок (например, сейсмических волн) или ЭМ полей может приводить к движению жидкости с ионной проводимостью относительно твердой фазы (см. обзор [Светов, 2008]). Разделение зарядов при движении поровой жидкости под механическим воздействием создает сторонний электрический ток, возбуждающий свое ЭМ поле (прямой сейсмоэлектрический эффект II рода). Обратный сейсмоэлектрический эффект II рода, или, по терминологии [Анцыферов, 1962; Ярославский, Капустян, 1990] электро-сейсмический эффект – заключается в возбуждении сейсмоакустических волн при прохождении нестационарного тока, в том числе индуцированного при распространении ЭМ волн. В пределе низких частот сейсмоэлектрические эффекты II рода становятся сопоставимыми со стационарными электрокинетическими эффектами (явлениями) в жидких проводниках [Ландау, Лившиц, 1982].

Прирост сейсмической активности после зондирований разрядами геофизических МГД-генераторов и электроимпульсной установки ЭРГУ-600-2 можно классифицировать как импульсную моду обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода. Наиболее общая физическая модель сейсмоэлектрических эффектов, которая может применяться и для описания воздействия на среду мощными источниками тока, представляет собой самосогласованную систему уравнений распространения упругих волн в двухфазной деформируемой среде (уравнений Био–Френкеля, [Biot, 1956]), уравнений Максвелла и электрокинетических уравнений, связывающих появление в среде сторонних токов с относительным движением жидких и твердых фаз [Светов, Губатенко, 1999; Pride, 1994; Pride, Haartsen, 1996]. Но урав-

нения упругости двухфазной среды, адаптированные для случая малых возмущений (задача распространения сейсмоакустических и ЭМ волн), не описывают сейсмических подвижек (событий разрушения). Кроме того, по имеющимся сейсмологическим данным проблематично сделать адекватный выбор значений всех параметров среды, входящих в полную систему уравнений. Поэтому физическая модель, основанная на уравнениях Френкеля–Био–Прайда, мало пригодна в компьютерных экспериментах для объяснения триггерных эффектов в земной коре при ЭМВ. Но, даже не решая эти уравнения, можно предвидеть (с некоторым предположением) одно из следствий физической модели двухфазной среды – наличие необходимого критерия по средней плотности тока для реакции среды на воздействие ЭМ поля [Богомолов, 2013; Богомолов, Сычев, 2013].

В теории Френкеля–Био и ее новых версиях [Pride, 1994; Pride, Naatsen, 1996] показано, что в трещиновато-пористых средах, насыщенных жидкостью, могут возбуждаться волны, скорость которых значительно меньше скорости обычного звука и составляет десятки м/с. Такие волны интерпретируются как бегущее возмущение порового давления (динамическая фильтрация, [Уайт, 1986]). “Медленные” волны довольно быстро затухают, но при наличии мощного источника с ними могут быть связаны нетривиальные эффекты. В системах с узкими водозаполненными каналами могут возбуждаться волны с еще меньшей скоростью: так называемые интерфейсные волны [Ferrazzini, Aki, 1987; Hong, Novem, 2011]. Наиболее известны волны Рэлея и Стоунли – частные случаи интерфейсных волн. Для этих волн, при отсутствии вязкого трения о стенки, скорость распространения можно оценить как  $V_R = (gh)^{1/2} \sim 0.1$  м/с при толщине слоя  $h \sim 1$  мм. Вязкое трение приводит к снижению скорости интерфейсных волн в узких каналах еще в несколько раз, т.е. до уровня сантиментов в секунду [Hong, Novem, 2011]. В физике полупроводников, как и в физике плазмы известен эффект возбуждения колебаний электрическим током (акустоэлектронное усиление звуковых волн [Красильников, Крылов, 1984]). Это происходит, если средняя направленная скорость заряженных частиц, пропорциональная плотности тока  $j$ , больше скорости волн (в классическом случае это ионно-звуковые волны). Сопоставление с эффектом Вавилова–Черенкова указывает на общефизический характер эффекта возбуждения волн в среде при движении в ней объекта (включении, неоднородности) со скоростью выше фазовой скорости волн. Чтобы определить, может ли в двухфазной среде (земной коре) реализоваться подобный эффект, проведем численную оценку пороговой плотности тока  $j_0$ , при которой средняя направленная скорость частиц

сравнивается со скоростью волны  $V_R \sim 10^{-2}$  м/с. Для однозарядных ионов, при их концентрации  $n_i$  в растворе порядка  $10^{18}$  1/м<sup>3</sup>, значение  $j_0$  составляет:

$$j_0 = en_i V_R \sim 2 \times 10^{-3} \text{ А/м}^2, \quad (7)$$

где  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл – заряд электрона. Согласно (6), при ЭМ зондированиях на Бишкекском полигоне (с силой тока в возбуждающем диполе  $I = 600\text{--}2000$  А) значение плотности тока  $j_{\text{eff}}$  вблизи диполя, на расстоянии  $r = L_d = 4.2$  км составляет  $j_{\text{eff}} \sim (0.7\text{--}2) 10^{-5}$  А/м<sup>2</sup>, т.е. меньше порогового значения  $j_0$ . Эти значения есть результат усреднения по поверхности, перпендикулярной линиям тока. Локальные значения плотности тока, концентрирующегося в жидкости в поро-трещинном пространстве, значительно больше средней величины (проводимость растворов выше проводимости твердой фазы более чем на 6 порядков; именно поэтому при “токопередаче” в среде образуются жидкие проводящие каналы). Значит, при ЭМ зондированиях возбуждение медленных волн вполне может происходить. Возбуждаемые “волны фильтрации” способствуют поступлению воды в сопряженные с каналом трещины, увлажнению контактов зацепов (asperities), что, в силу эффекта Ребиндера, снижает способность материала среды выдерживать тектонические напряжения. Кроме того, колебания передаются из жидкой фазы в скелетное вещество и там могут активизировать каскадное трещинообразование, начиная с наименьших размеров и до магистрального разрыва и сейсмической подвижки.

При концентрации плотности тока в каналах, значительно превышающей ту, что получается из (7), возможны специфические механизмы электромеханической взаимосвязи, дающие вклад в возбуждение колебаний при зондированиях земной коры. Один из таких механизмов – локальный нагрев жидкости в проводящем канале и термическая деформация окружающей твердой фазы [Зейгарник и др., 2010]. Эти эффекты рассматривались применительно к ближней зоне у электродов диполя, где средняя плотность тока наиболее высока. Но они могут стать важными и на больших глубинах, где вещество, в том числе флюида в поро-трещинном пространстве, разогрето до 300°C и более. При высокой электропроводности флюида (вследствие его минерализации) дополнительный джоулев нагрев при протекании тока может привести к вскипанию, т.е. реализоваться сценарий, описанный в экспериментальной работе [Лапшин и др., 2016]. А вот роль другого механизма: взаимодействия локализованного в каналах тока с геомагнитным полем [Тренькин, 2015] оказалась несущественной [Черногор, 2017].

Сопутствующим эффектом при протекании мощного тока может быть электролиз и выделение газообразного водорода, который может диф-

фундировать через среду и вызывать снижение сдвиговой прочности контактов [Гуфельд, 2018]. Снижение прочности технических материалов из-за водородной коррозии [Черепанов, 2012] хорошо известно, но для условий земной коры оно практически не исследовалось. Масштаб этого триггерного эффекта может быть значительно больше расстояния между токоподводящими электродами (длины диполя), так как локализованное выделение дополнительного количества водорода может нарушить баланс его переноса [Мао, Мао, 2020], формирующийся вследствие поступления воды вглубь Земли и восходящего потока водорода. Здесь прослеживается возможная взаимосвязь между вариациями сейсмичности после ЭМ воздействий и процессами глубинной геодинамики [Мао, Мао, 2020].

В работах [Богомолов, 2010; Сычева и др., 2011] обращено внимание на то, что зондирующие импульсы тока, после которых отмечались сейсмические отклики на Бишкекском полигоне, имели высокую крутизну фронтов нарастания и убывания; при этом могли проявиться динамические эффекты в трехфазной среде (твердое скелетное вещество—жидкость в токопроводящем канале—ее насыщенный пар). Один из таких электромеханических эффектов относится к формированию токового канала при быстром нарастании силы тока в импульсе, когда происходит “пробой” канала за счет схлопывания пузырей насыщенного пара, играющих роль разделителей отдельных полостей с проводящей жидкостью. Другой реализуется на стадии спада тока (в противоположном случае) при разрыве проводящей жидкости в канале за счет образования нового пузыря. Оба эффекта приводят к вынужденному движению границы жидкости с насыщенным паром, а это вызывает возбуждение колебаний (вибраций, гидроударов на микроуровне), которые передаются в скелетное вещество и могут способствовать развитию трещин. Стоит отметить сходство этих электромеханических эффектов с кавитацией в присутствии электрического тока.

Описанные выше механизмы первичного воздействия ЭМ полей при зондированиях земной коры опираются на гипотетические модели и пока не получили однозначного подтверждения в лабораторных или компьютерных экспериментах. Некоторые из них могут эффективно реализовываться только в натурном эксперименте. В то же время опосредованный механизм — интенсификация поступления воды на контактирующие поверхности геоблоков или к устьям трещин с их последующим разупрочнением (эффект Ребиндера) и сейсмическими подвижками — может считаться надежно подтвержденным [Соболев и др., 2006; 2010; Соболев, Пономарев, 2011; Panteleev, Gavrilov, 2015]. Усиленное поступление воды при зондированиях земной коры импульсами

тока обусловлено как электрокинетическими эффектами (исторически на них сфокусировано основное внимание), так и другими эффектами, в том числе рассмотренными выше. Электрокинетические явления вносят преобладающий вклад в перенос жидкости в узких (капиллярных) каналах [Светов, 2008].

Проведенный обзор моделей (механизмов) влияния ЭМ полей на разрушение горных пород и сейсмический процесс показывает, что на данном этапе исследований накопление экспериментальных данных опережает их интерпретацию в рамках физических моделей. Другими словами, ЭМ воздействия на материалы земной коры — развивающееся направление на стыке геомеханики, геоэлектрики и сейсмологии.

## 5. ВОЗМОЖНОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Уже в самом начале исследований по данному направлению, на основании того, что электромагнитные импульсы, подаваемые в земную кору, вызывают увеличение количества слабых толчков, было высказано предположение о возможном использовании обнаруженного явления для искусственной разрядки напряжений, накопленных в земной коре: инициирования большого количества слабых землетрясений, не опасных для окружающей инфраструктуры, вместо ожидаемого сильного события, способного привести к катастрофическим последствиям [Тарасов, 1997; Зейгарник и др., 1999]. Вместе с тем существуют и скептические мнения о практической реализуемости такого подхода [Jones, 2001], поскольку для безопасной разрядки энергии, накопленной в очаге землетрясения с магнитудой  $\sim 7$ , потребуется огромное число толчков с  $M = 2$ . Скорее следует рассматривать возможность инициирования ЭМ обработки земной коры не для инициирования большого числа слабых сейсмических событий, а для изменения физико-механических характеристик сейсмогенного разлома с целью перевода его деформирования из режима *stick-slip* (накопления и резкого сброса напряжений в виде динамического события) в режим неопасных низкочастотных землетрясений, либо — в идеальном случае — в события медленного скольжения или крип [Кочарян, Новиков, 2015]. Однако и в этом случае переход к такому режиму деформирования не исключает возникновения сильного землетрясения в данном регионе, поскольку события медленного скольжения приводят к перераспределению напряжений в разломе, а оно может породить триггер в другой секции разлома [Segall, Bradley, 2012]. При этом, без должного физического обоснования экспериментальных работ на натурном разломе, проведе-

ние его электромагнитной обработки может оказаться просто опасным [Мухамедиев, 2010].

Таким образом, можно констатировать необходимость дальнейшего развития работ по теоретическому обоснованию электромагнитного управления деформационными процессами в земной коре и проверке предложенных гипотез на крупномасштабных моделях в лабораторных условиях, близких к условиям в очаговой зоне землетрясения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате полевых экспериментов и наблюдений, лабораторных экспериментов и теоретического анализа, выполненных за последние 25 лет для различных геологических условий (Памир и Северный Тянь-Шань), на различном экспериментальном оборудовании (на гидравлическом, пружинном и рычажном прессе с нагрузкой образцов горных пород и модельных материалов, на пружинно-блочных моделях разлома земной коры), различными научными группами ИФЗ РАН, ОИВТ РАН, НС РАН, ИДГ РАН, Института геофизики НАН Грузии, ИМГиГ ДВО РАН, доказано существование нового типа триггерного воздействия на деформационные процессы в земной коре — ЭМ инициирование сейсмических событий.

С учетом наличия мощных мобильных импульсных источников электроэнергии типа геофизических МГД-генераторов или установок типа ЭРГУ, позволяющих обеспечить электрическую обработку сейсмоопасного разлома на большой длине, а также варьирования параметров электромагнитного воздействия в зависимости от региональных геолого-геофизических условий, представляется целесообразным продолжить исследования, направленные на определение перспектив применения электромагнитных триггерных эффектов в сейсмологии для искусственного безопасного снижения напряжений в земной коре.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-15-50215).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность рецензентам — чл.-корр. РАН Г.А. Соболеву и докт. физ.-мат. наук А.В. Пономареву за очень полезные замечания. Авторы также считают своим приятным долгом высказать благодарность канд. физ.-мат. наук Мубассаровой В.А. и канд. физ.-мат. наук Дихтер И.Я. за помощь в подготовке рукописи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энерговоздействии // *Физика Земли*. 2006. № 10. С. 36–42.
- Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 77–80.
- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Окунев В.И. Динамика энергообменных процессов в модельных образцах при воздействии упругим и электромагнитным полями // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 64–70.
- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // *Физика Земли*. 2005. № 6. С. 55–65.
- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации // *Докл. РАН. Геофизика*. 2012. Т. 444. № 3. С. 304–308.
- Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Исследование режимов движения по разлому // *Физика Земли*. 2016. № 5. С. 13–24.
- Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Котовский Р.К., Петржик Е.А., Трончик П. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно // *УФН*. 2017. Т. 187. № 3. С. 327–341.
- Анциферов М.С. Электросейсмический эффект // *Докл. АН СССР*. 1962. Т. 144. № 6. С. 1295–1297.
- Балбачан М.Я., Томашевская И.С. Эффект изменения прочности горных пород в результате механоэлектризации // *Докл. АН СССР*. 1962. Т. 296. № 5. С. 1085–1089.
- 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.
- Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Сычев В.Н., Сычева Н.А. и др. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмоэлектрическому мониторингу). Активный геофизический мониторинг литосферы Земли / Под ред. Гольдина С.В. Новосибирск: СО РАН. 2005. С. 112–116.
- Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности. Саарбрюкен: Lambert Academic Publishing. 2011. 1-е изд. 408 с.
- Богомолов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. Особенности влияния электромагнитных полей на скорость деформации образцов мрамора в условиях сложного напряженно-деформированного состояния // *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 7. С. 20–27.
- Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С., Мубассарова В.А., Сычев В.Н., Сычева Н.А. От экспериментов В.А. Степанова по электропластическим эффектам в кристаллах NaCl к современным исследованиям электрочувствительности трещинообразования в горных породах. Сб. материалов XVIII Петербургских чтений по проблемам прочности и роста кристаллов, посвя-



- шенных 100-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР профессора А.В. Степанова. СПб.: изд-во ФТИ. 2008. Ч. 1. С. 23–26. <http://www.imgg.ru/uploads/publications/747/71f056eefa43c9b90f4e88a825998da5.pdf>
- Богомолов Л.М.* Поиск новых подходов к объяснению механизмов взаимосвязи сейсмичности и электромагнитных эффектов // Вестник ДВО РАН. 2013. № 3. С. 12–18.
- Богомолов Л.М., Сычев В.Н.* От наблюдений перераспределения сейсмичности при зондировании коры мощными импульсами тока к моделям электромеханических преобразований в геосреде. Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы 2-го Всероссийского семинара-совещания. Институт динамики геосфер РАН / Адушкин В.В., Кочарян Г.Г. М.: ГЕОС. 2013. С. 219–227.
- Боев С.Г., Гаханов А.Н.* Заряджение монокристалла фтористого натрия при раскалывании // ФТТ. 1980. Т. 22. № 10. С. 3068–3079.
- Боровский Б.В., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Мубасарова В.А.* К вопросу о стимулировании акустической эмиссии при деформировании образцов геоматериалов // Физика Земли. 2011. № 10. С. 71–82.
- Бучаченко А.Л.* Магнитоупругость и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу. УФН. 2014. Т. 184. № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201401e0101>
- Бучаченко А.Л.* Микроволновое стимулирование дислокаций и магнитный контроль очага землетрясений. УФН. 2019. Т. 189. № 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038301>
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Крючков М.А.* Динамика и иерархия землетрясений // Физика Земли. 2006. № 9. С. 40–45.
- Воларович М.П., Пархоменко Э.И.* Пьезоэлектрический эффект горных пород // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1955. № 3. С. 215–222.
- Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. и др.* Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука. 1993. 158 с.
- Головин Ю.И.* Магнитоупругость твердых тел (обзор) // ФТТ. 2004. Т. 46. № 5. С. 769–803.
- Гончаров А.И., Соловьев С.П.* Ударная электрическая поляризация материалов // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 6. С. 52–57.
- Гольдин С.В.* Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37–54.
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами // Докл. РАН. 1995. Т. 340. № 3. С. 386–388.
- Гохберг М.Б., Колосницын Н.И.* Триггерные механизмы землетрясений. Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы Всероссийского Семинара-совещания, 2010. Москва.: ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 52–61.
- Гуфельд И.Л.* Сейсмическая опасность. От лабораторных исследований к мониторингу и исследованиям процессов в реальной геологической среде. М.: Openbook.ru. 2018. 78 с.
- Дамаскинская Е.Е., Томилин Н.Г.* Имитационное моделирование потока актов разрушения в гетерогенных материалах // ФТТ. 1991. Т. 33. № 1. С. 278–285.
- Дамаскинская Е.Е., Кадомицев А.Г.* Выявление пространственной области будущего очага разрушения на основе анализа энергетических распределений сигналов акустической эмиссии // Физика Земли. 2015. № 3. С. 78–84.
- Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Фролов Д.И., Василенко Н.Ф.* Признаки критической стадии разрушения деформированных гетерогенных материалов // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 3. С. 245–251. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.245-251>
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С.* Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений / М.: Институт физики Земли. 1980. С. 78–86.
- Завьялов А.Д.* От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // ФТТ. 2005. Т. 47. № 6. С. 1000–1008.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С. 3–15.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.
- Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М.* Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006а. № 10. С. 43–50.
- Закупин А.С., Аладьев В.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Ильичев П.В., Сычев В.Н., Сычева Н.А.* Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006 б. № 6. С. 1–12.
- Закупин А.С., Богомолов Л.М., Мубасарова В.А., Ильичев П.В.* Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне // Физика Земли. 2014. № 5. С. 105–120.
- Зейгарник В.А., Авагимов А.А., Тарасов Н.Т.* Можно ли управлять землетрясениями? // Наука в России. 1999. № 2. С. 16–21.
- Зейгарник В.А., Ключкин В.Н., Окунев В.И.* Влияние электрического тока на акустическую эмиссию механически нагруженных образцов искусственного песчаника // Успехи прикладной физики. 2018. № 3. С. 200–207.
- Зейгарник В.А., Конев Ю.Б., Новиков В.А.* Тепловое действие мощного тока на флюидонасыщенные пористые среды. Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы Всероссийского семинара-совещания. Институт динамики геосфер РАН / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС. 2010. С. 202–209.
- Зейгарник В.А., Сидорин А.Я.* МГД-генератор “Памир-1” в исследованиях по прогнозу землетрясений // Сейсмические приборы. 1997. № 27. С. 77–91.
- Зуев Л.Б.* Физика электроупругости щелочно-галогенных кристаллов. Новосибирск: Наука. 1990. 120 с.

- Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов: учебное пособие. Долгопрудный: Интеллект. 2013. 376 с.
- Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М.: Научный мир. 2007. 248 с.
- Корнфельд М.И. Избыточные электрические заряды в щелочно-галоидных кристаллах // ФТТ. 1968. Т. 10. № 8. С. 2422–2430.
- Корнфельд М.И. Пироэлектрические свойства пластически деформированного кристалла фтористого лития // ФТТ. 1974. Т. 16. № 1. С. 1943–1947.
- Корнфельд М.И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении // УФН. 1975. Т. 116. № 2. С. 328–339.
- Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 4. С. 94–104.
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов / Отв. ред. академик РАН В.В. Адушкин. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
- Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 400 с.
- Куксенко В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел. Физика прочности и пластичности / Под ред. С.Н. Журкова. Л.: Наука. 1986. С. 36–41.
- Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Влияние механического поля на поляризацию природных диэлектриков (горных пород) // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 14. С. 82–88.
- Куксенко В.С., Дамаскинская Е.Е., Кадоццев А.Г. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // Физика Земли. 2011. № 10. С. 25–31.
- Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках // ФТТ. 1997. Т. 39. № 7. С. 1202–1204.
- Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2000. 232 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Изд. 2. М.: Наука. 1982. 620 с.
- Лапшин В.Б., Патонин А.В., Пономарев А.В., Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Строганова С.М. Инициация акустической эмиссии в обводненных образцах песчаника // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 1. С. 97–100.
- Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / Л.Б. Зуев (отв. ред.). Новосибирск: Гео. 2007. 235 с.
- Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 856–890.
- Молоцкий М.И. Дислокационный механизм электризации ионных кристаллов при расщеплении // ФТТ. 1976. Т. 18. № 6. С. 1763–1764.
- Молоцкий М.И. Генерация ионизационных волн при разрушении // ФТТ. 1978. Т. 20. № 4. С. 250–251.
- Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических импульсов // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 919–938.
- Мухамедиев Ш.А. Предотвращение сильных землетрясений: реальная цель или утопия // Физика Земли. 2010. № 11. С. 49–60.
- Назаров В.Е., Радостин А.В. Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2007. 256 с.
- Новиков В.А., Окунев В.И., Ключкин В.Н. Влияние электрических импульсов на сейсмический цикл. Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 6–9 июня 2017 г.): материалы IV Всероссийского семинара-совещания / В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян (ред.). М.: ГЕОС. 2017. С. 171–176.
- Новиков В.А., Сорокин В.М., Яценко А.К. Может ли солнечная вспышка инициировать землетрясение? // Вестник ОИВТ РАН. 2019. Т. 3. С. 15–21. <https://doi.org/10.33849/2019203>
- Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Дамаскинская Е.Е., Богомолов Л.М., Наймарк О.Б. Влияние слабого электрического поля на пространственно-временную динамику акустической эмиссии при одноосном сжатии гранита. Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы Третьего Всероссийского семинара-совещания / В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян (ред.) М.: ГЕОС. 2015. С. 244–252.
- Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука. 1965. 164 с.
- Пономарев А.В. Изучение вариаций электрического состояния горных пород применительно к поискам предвестников землетрясений: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ АН СССР. 1987. 300 с.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука. 1985. 408 с.
- Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра. 1986. 302 с.
- Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Левина Е.А., Сверкунов С.А., Шилько Е.В. Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 3. С. 55–69. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13006>
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 6. С. 32–42.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука. 1987. 101 с.
- Светов Б.С., Губатенко В.П. Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. I. Постановка задачи // Физика Земли. 1999. № 10. С. 67–73.
- Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: изд-во ЛКИ. 2008. 656 с.
- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. 2012. № 7/8. С. 62–88.

- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 26–36.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурального моделирования // *Физика Земли*. 2010. № 2. С. 17–49.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН. 2011. 56 с.
- Соболев Г.А. Сейсмический шум. М.: ООО “Наука и образование”. 2014. 272 с.
- Соболев Г.А., Дёмин В.М. Механоэлектрические явления в Земле. 1980. М., Наука. С.215.
- Соболев Г.А., Кольцов А.В. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений. 1988. М.: Наука. С. 203.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н., Соболев Д.Г., Бойко А.Н. Влияние магнитных бурь на низкочастотный сейсмический шум // *Физика Земли*. 2020. № 3. С. 3–28.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // *Физика Земли*. 2002. № 11. С. 62–72.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Способ определения стадии неустойчивости модели геологической среды // Докл. РАН. 1997. Т. 356. № 4. С. 541–544.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Динамика акустической эмиссии при инициировании водой // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 48–63.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В. Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47. № 5. С. 608–621.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук Ю.Я., Закржевская Н.А., Понятовская В.И., Соболев Д.Г., Хромов А.А., Цывинская Ю.В. Динамика акустической эмиссии при инициировании водой // *Физика Земли*. 2010. № 2. С. 50–67.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Анализ процесса выделения энергии при формировании магистрального разрыва в лабораторных исследованиях по разрушению горных пород и перед сильными землетрясениями // *Физика Земли*. 2000. № 2. С. 44–55.
- 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 / В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян (ред.). Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 316–326.
- 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.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 2020. 358 с.
- Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542–545.
- Тарасов Н.Т. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 06–09 июня 2017 г.). Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН М.: ГЕОС. 2017. С. 356–365.
- Тарасов Н.Т. Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций // ДАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 689–692.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 82–96.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Активизация сейсмичности в области активного разлома под действием электромагнитных полей и взрывов. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы докладов Четвертой тектонофизической конференции, 3–7 октября 2016 г., г. Москва. М.: ИФЗ. 2016. Т. 1. С. 571–577.
- 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.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42. № 10. С. 1641–1649.
- Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С. Формирование очага разрушения при деформировании гетерогенных материалов (гранита) // *ФТТ*. 1994. Т. 36. № 10. С. 3101–3112.
- Тренкин А.А. Возможное влияние теллурических токов на сейсмичность земной коры в сейсмоактивных областях // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 1. С. 139–144.  
<https://doi.org/10.7868/S0016794015010113>
- Турунтаев С.Б., Ворохобина С.В., Мельчаева О.Ю. Выявление техногенных изменений сейсмического режима при помощи методов нелинейной динамики // *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 52–65.
- Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра. 1986. 261 с.
- 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.
- Файнберг Э.Б., Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Васильева Т.А. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми геомагнитными бурями // *Физика Земли*. 2004. № 4. С. 54–62.
- Фатеев Е.Г. Сверхчувствительность систем осцилляторов с переменными дипольными моментами // *ЖТФ*. 2001. Т. 71. № 1. С. 92–105.
- Фатеев Е.Г. Электрическая сверхчувствительность природных кристаллогидратов при высоких давлениях // *Физика Земли*. 2005. № 12. С. 58–65.
- Финкель В.М., Головин Ю.И., Середя В.Е. Электрические эффекты при разрушении кристаллов LiF в связи

- с проблемой управления трещиной // ФТТ. 1975. Т. 17. № 3. С. 770–776.
- Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия. 1977. 359 с.
- Черепанов Г.П. Механика разрушения. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2012. 872 с.
- Черногор Л.Ф. Невозможность существенного влияния теллурических токов на сейсмичность земной коры // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 1. С. 129–130. <https://doi.org/10.7868/S0016794016060079>
- Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М: Недра. 1987. 213 с.
- Шнейцман В.В., Жога Л.В. Кинетика разрушения поликристаллической сегнетокерамики в механическом и электрическом полях // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 843–849.
- Шуберт М., Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. М: Мир. 1973. 244 с.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука. 1990. 191 с.
- Ярославский М.А., Капустян Н.К. О возможности электро-сейсмического эффекта // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 2. С. 352–354.
- Bak P. How Nature works. The science of self-organized criticality. New York: Springer. 1996.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Phys. Rev. 1987. V. A38. № 1. P. 364–374.
- Baddari K., Frolov A., Tourchine V., Rahmoune F. An integrated study of the dynamics of electromagnetic and acoustic regimes during failure of complex macrosystems using rock blocks // Rock Mech. Rock Eng. 2011. V. 44. № 3. P. 269–280. <https://doi.org/10.1007/s00603-010-0130-5>
- Beeler N.M., Lockner D.A. Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № B8. P. 2391. <https://doi.org/10.1029/2001JB001518>
- Biot, M. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // J. Acoust. Soc. Am. 1956. V. 28. P. 168–178.
- Bogomolov L., Il'ichev P., Novikov V., Okunev V., Sychev V., Zakupin A. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // Ann. Geophys. 2004a. V. 47. № 1. P. 65–72.
- Bogomolov L., Zakupin A., Alad'ev A., Manjikov B., Sychev V., Tullis T. Applications of Cybernetics and Informatics in Optics, Signals, Science and Engineering. Proc. 8<sup>th</sup> Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, USA / Ed. by N. Callaos. 2004b. V. XII. P. 274–279.
- Bogomolov L., Zakupin A. Do Electromagnetic Pulses Induce the Relaxation or Activation of Microcracking Rate in Loaded Rocks? (Acoustic Emission Based Study) // Solid State Phenomena. 2008. V. 137. P. 199–208.
- Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes // Science. 1966. V. 153. № 3739. P. 62–64, 990–992.
- Bredy B.T., Glen A. Rowell Laboratory investigation of the electrodynamic of rock fracture // Nature. 1986. V. 321. № 6069. P. 488–492.
- Cartwright-Taylor A., Vallianatos F., Sammonds P. Superstatistical view of stress-induced electric current fluctuations in rocks // Physica A. 2014. V. 414. P. 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.07.064>
- Chelidze T., Varamashvili N., Devidze M., Tchelidze Z., Chikhladze V., Matcharashvili T. Laboratory study of electromagnetic initiation of slip // Ann. Geophys. 2002. V. 45. № 5. P. 587–598.
- Chelidze T., Gvelesiani A., Varamashvili N., Devidze M., Chikhradze V., Tchelidze Z., Elashvili M. Electromagnetic initiation of slip: laboratory model // Acta Geofizika Polonica. 2004. V. 52. № 1. P. 49–62.
- Chelidze T., Matcharashvili T., Mepharidze E., Tephnadze D., Zhukova N. Preliminary results of forced stick-slip synchronization area studies: experiments and theoretical models // Phys. Solid Earth. 2016. V. 19. № A. P. 35–48.
- Chelidze T., De Rubeis V., Matcharashvili T., Tosi P. Influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquake time distribution in the Bishken test area (Central Asia) // Ann. Geophys. 2006. V. 49. № 4/5. P. 961–975.
- Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // Materials science and Engineering. A. 2000. V. 287. № 2. P. 268–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(04\)004786-34-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(04)004786-34-4)
- Conrad H. Thermally activated plastic flow of metals and ceramics with an electric field or current // Materials Science and Engineering. A. 2002. V. 322. № 1–2. P. 100–107. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01122-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01122-4)
- Damaskinskaya E., Panteleev I., Gafurova D. Proc. AIP Conf. 2016. 1783, 020033. <https://doi.org/10.1063/1.4966326>
- Damaskinskaya E., Hilarov V., Frolov D. Defect structure evolution in deformed heterogeneous materials. Acoustic emission and X-ray microtomography // Proc. AIP Conf. 2017. 1909. 020029. <https://doi.org/10.1063/1.5013710>
- Daniel J.E., Schaefer A.M., Wenzel F. Losses Associated with Secondary Effects in Earthquakes // Frontiers in Built Environment. 2017. V. 3. Article 30. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00030>
- Diodati P., Marchesoni F., Piazza S. Acoustic emission from volcanic rocks—An example of self-organized criticality // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 2239–2243.
- Eftaxias K., Potirakis S. Current challenges for pre-earthquake electromagnetic emissions: shedding light from micro-scale plastic flow, granular packings, phase transitions and self-affinity notion of fracture process // Nonlin. Processes Geophys. 2013. V. 20. P. 771–792. <https://doi.org/10.5194/npg-20-771-2013>
- Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. Lattice curvature, shear bands, and electroplastic effect // Phys. Mesomech. 2018. V. 21. № 5. P. 390–395. <https://doi.org/10.1134/S102995991805002>
- Ferrazzini V., Aki K. Slow waves trapped in a fluid-filled infinite crack: implication for volcanic tremor // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 9215–9225.
- Freund F. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. B5. P. 11001–11020.
- Freund F. Charge generation and propagation in rocks // J. Geodynamics. 2002. V. 33. P. 545–572.

- Gomberg J., Reasenber P.A., Bodin P., Harris R.A.* Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes // *Nature*. 2001. V. 411. P. 462–466.
- Hill D.P., Reasenber P.A., Michael A., Arabaz W.J., Beroza G., Brumbaugh D., Brune J.N., Castro R., Davi S.* Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake // *Science*. 1993. V. 260. P. 1617–1623.
- Hong D., Hovem J.M.* Interface waves. *Waves in fluids and solids* / Ed. by R.P. Vila. Rijeka, Croatia, 2011. P. 153–176.
- Jones N.* Quake Machine // *New Scientist*. 2001. V. 2297. P. 34–37.
- Kocharyan G.G., Novikov V.A., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V.* A study of different fault slip modes governed by the gouge material composition in laboratory experiments // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 208. № 1. P. 521–528. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw409>
- Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D.* A two-stage model of fracture of rocks // *Pure Appl. Geophys.* 1996. V. 146. № 2. P. 253–263.
- Johnston D.H., Toksoz M.N.* Thermal cracking and amplitude dependent attenuation // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. № B2. P. 937–942.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A.* Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // *Nature*. 1991. V. 6313. P. 39–42.
- Lockner D.A.* The role of acoustic emission in the study of rock fracture // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1993. V. 30. № 7. P. 883–899.
- Mao H.K., Mao W.L.* Key problems of the four-dimensional Earth system // *Matter and Radiation at Extremes*. 2020. V. 5. № 3. 038102-1-9.
- Novikov V.A., Okunev V.I., Klyuchkin V.N., Liu J., Ruzhin Yu. Ya., Shen X.* Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models // *Earthquake Science*. 2017. V. 30. № 4. P. 167–172. <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0181-8>
- Novikov V., Ruzhin Yu., Sorokin V., Yaschenko A.* Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares // *Ann. Geophys.* 2020. V. 63. № 5. P. A554. <https://doi.org/10.4401/ag-7975>
- Ohnaka M., Mogi K.* Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. № B5. P. 3873–3884.
- Panteleev I.A., Gavrilo V.A.* Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoacoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2015. V. 15. № 4003. P. 1–14. <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>
- Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A.* Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones // *Tectonophysics*. 1997. V. 277. № 1–3. P. 57–81.
- Ponomarev A., Sobolev G., Koltsov A.* Acoustic emission under electric excitation // *ESC XXVIII General Assembly, Genova: Book of Abstracts*. 2002. P. 238.
- Pride S.R.* Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // *Phys. Review B*. 1994. V. 50. P. 15678–15696.
- Pride S. R., and Haartsen M. W.* Electro seismic wave properties // *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 100. P. 1301–1315.
- Rosenau M., Corbi F., Dominguez S.* Analogue earthquakes and seismic cycles: experimental modeling across timescales // *Solid Earth*. 2017. V. 8. P. 597–635. <https://doi.org/10.5194/se-8-597-2017>
- Segall P., Bradley A.M.* Slow-slip evolves into megathrust earthquakes in 2D numerical simulations // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L18308. <https://doi.org/10.1029/2012GL052811>
- Scholz C.H.* The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes // *Bull. Seismological Soc. Amer.* 1968. V. 58. № 1. P. 399–415.
- Sholtz C.H.* Fractal and chaotic properties of earthquakes. Berlin: Springer. 1998. Hh.189.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Koltsov A.V., Smirnov V.B.* Simulation of triggering earthquakes in the laboratory // *Pure Appl. Geophys.* 1996. V. 147. № 2. P. 345–355.
- Sobolev G.A.* Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
- Sobolev G., Ponomarev A., Avagimov A., Zeigarnik V.* Initiating acoustic emission with electric action. XXVII Gen. Ass. ESC. 2000. Lisbon: Lisbon Univ. P. 277–281.
- Subotka J.* DC-induced acoustic emission in saturated sand models of sedimentary rock // *Acta Geophysica*. 2010. V. 58. № 1. P. 163–172.
- Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Novikov V.A.* A possible mechanism of stimulation of seismic activity by ionizing radiation of solar flares // *Earthquake Science*. 2019. V. 32. P. 26–34. <https://doi.org/10.29382/eqs-2019-0026-3>
- Stavrakas I., Triantis D., Anastiadis C., Nardi A., Carluccio R., Vallianatos F.* Electric and electromagnetic signals emitted from rocks under stress up to fracture. Experimental results // *Proc. 2nd IASME/WSEAS Int. Conf. on GEOLOGY and SEISMOLOGY (GES'08)*. Cambridge, UK. Febr. 23–25, 2008. P. 77–83.
- Stergiopoulos C., Stavrakas I., Hloupis G., Triantis D., Vallianatos F.* Electrical and acoustical emissions in cement mortar beams subjected to mechanical loading up to fracture // *Engineering Failure Analysis*. 2013. V. 35 P. 454–461. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.04.015>
- Tarasov N.T., Tarasova N.V.* Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses // *Ann. Geophys.* 2004. V. 47. № 1. P. 199–212. <https://doi.org/10.4401/ag-32722013>
- Thompson B., Young R., Lockner D.* Fracture in Westerly granite under AE feedback and constant strain rate loading: nucleation, quasi-static propagation, and the transition to unstable fracture propagation // *Pure Appl. Geophys.* 2006. V. 163. P. 995–1019. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0054-x>
- Thompson B., Young R., Lockner D.* Premonitory acoustic emission and stick-slip in natural and smooth-faulted Westerly granite // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. B02205. <https://doi.org/10.1029/2008JB005753>
- Trapeznikov Yu.A., Bogomolov L.M., Manzhikov B.Ts.* On the origin of stepwise response of loaded samples to effect of microvibrations. *Proc. Int. Conf. Earthquake prediction and deep geodynamics*. Almaty. 1997. P. 167–172.

Zakupin A., Bogomolov L., Mubassarova V., Kachesova G., Borovsky B. Acoustic Emission and Electromagnetic Effects in Loaded Rocks Acoustic Emission / Ed. W. Sikorski. Croatia, Rijeka: InTech, 2012a. Ch. 8. P. 173–198.  
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/acoustic-emission-and-electromagnetic-effects-in-loaded-rocks>

Zakupin A., Bogomolov L., Mubassarova V., Kachesova G. Electromagnetic Effects in Loaded Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety. Kazan, Russia, 26–31 August, 2012. Kazan: Esis. 2012b. P. 107–114.

Zakupin A.S. Bogomolov L.M., Sycheva N.I. The Effect of Crossed Electric and Magnetic Fields in Loaded Rock Specimens // Materials Science and Engineering A. 2009. V. 521–522. P. 401–404.

Zeigarnik V., Kliuchkin V., Okunev V. Destruction of Artificial Sandstone Samples in a State Close to Unstable with Electrical Pulses / Kocharyan G., Lyakhov A. (Eds). Trigger Effects in Geosystems. 2019. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer. Cham. P. 207–217.

## Electromagnetic Initiation of Earthquakes—Field Observations, Laboratory Experiments, and Physical Mechanisms: A Review

V. A. Zeigarnik<sup>a,\*</sup>, L. M. Bogomolov<sup>b,\*\*</sup>, and V. A. Novikov<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

\*e-mail: [zeigarnik@ihed.ras.ru](mailto:zeigarnik@ihed.ras.ru)

\*\*e-mail: [l.bogomolov@imgg.ru](mailto:l.bogomolov@imgg.ru)

\*\*\*e-mail: [novikov@ihed.ras.ru](mailto:novikov@ihed.ras.ru)

A review of the pioneering studies on the electromagnetic triggered seismicity carried out in Russia in 1995–2020 is presented. Field observations of artificial and natural electromagnetic impacts on seismicity are analyzed. The results of physical modeling of fracture formation and a “laboratory earthquake” by electric impulses on a specialized press machine and on a spring-block model of a crustal fault are described. The probable mechanisms of a triggering electromagnetic impact on the deformation processes in the source of an earthquake are considered. The results of the field experiments, laboratory modeling, and theoretical analysis carried out over the past 25 years prove the existence of a new type of triggering impact on the deformation processes in the Earth crust – electromagnetic initiation of seismic events. The possible ways of using electromagnetic triggered seismicity to reduce seismic hazard are discussed.

*Keywords:* electromagnetic field, earthquake source, initiation of seismic events