

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА НАКОПЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В НАГРУЖЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

П. В. Ильичёв – зав. лаборат.

Л. М. Богомолов – канд. физ.-мат. наук

А. В. Лесников – инженер-программист

The results of laboratory modeling of process of elastic energy release during geomaterials specimens fracture have been represented. The effect of weak physical fields on rock specimens straining is studied; the change in acoustic emission regime being the manifestation of damage accumulation rate. Attention is paid to the characteristics of AE signals flow while a bifurcation of internal structure (like phase transition) triggered by external power impact occur. Driving mechanisms of observed effect have been speculated.

Введение. В настоящее время влияние физических полей на темп накопления дефектов в нагруженной геологической среде уже доказано. Свидетельствующие об этом эффекты активации эмиссионных событий (сейсмоэмиссия, сейсмоакустическая эмиссия, акустическая эмиссия, АЭ) наблюдались как на естественном для сейсмологии масштабе [1–7], так и для лабораторных моделей [8–11]. Приведенные в этих работах, а также в [12, 13] примеры иницирующего влияния вибраций естественной и техногенной природы и электромагнитных полей на режим выделения сейсмической энергии позволили наметить подходы к проблеме о возможности технологического воздействия на геологическую среду для разрядки избыточных напряжений и снижения вероятности сильного землетрясения. Подразумевалось, что релаксация напряжений будет происходить в результате высвобождения энергии вследствие стимулированного прироста числа слабых событий при неизменной мощности “накачки” энергии (ответственные за это глобальные факторы, такие, как столкновение тектонических плит, значительно более инерционны). Было отмечено, что лишь вибрационное и электромагнитное поля (в силу их универсальности и экологичности) в

перспективе могут быть приемлемым инструментом для разрядки избыточных напряжений.

Соответствие результатов лабораторного моделирования воздействия нестационарных физических полей (так называемых энерговоздействий, ЭВ) с натурными наблюдениями является важным звеном в обосновании того, что стимулирование эмиссионных событий может рассматриваться в качестве базового, опорного эффекта для вышеупомянутой технологии будущего. В общих чертах, аналогия откликов эмиссионных событий различного масштаба на энерговоздействия констатировалась во многих работах [8–10, 12, 14], так что наличие подобного соответствия уже не вызывает сомнений. Однако в некоторых работах [15, 16] высказаны сомнения в правомерности опоры на аналогию натуральных и лабораторных наблюдений применительно к проблеме разрядки избыточных напряжений. Аргументация авторов [15, 16] в значительной степени сводится к тому, что все еще не установлен механизм (или механизмы) активации эмиссионных событий физическими полями, у которых объемная плотность энергии на много порядков меньше, чем плотность запасенной упругой энергии. В связи с этим представляется целесообразным

проанализировать более детально аналогичность эффектов, стимулированных электромагнитным и вибровоздействием на различных масштабах длин. Это включает сопоставление характеристик откликов эмиссионных событий, энергетических параметров полей-инициаторов и т.п. Настоящая работа посвящена одному из подобных аспектов – сопоставлению времен задержек активации после начала энерговодействий. При попытке проследить аналогию среди задержек реакции на ЭВ на разных пространственных масштабах возникает следующее затруднение. В натуральных условиях в большинстве случаев активация (прирост микросейсмичности) происходит с заметной задержкой после ЭВ. Примером этого могут быть запаздывающие сейсмические вариации при нагнетании воды в скважину [7, 17], магнитных бурях [2], электромагнитных импульсах при пусках геофизических МГД-генераторов [3] и т.д. Однако отмечены и случаи отсутствия задержки. Показательным примером является наблюдение сейсмичности, наведенной землетрясением на Аляске (Denali fault earthquake, 2002 [18]). В работах [18, 19] установлено, что далеко за пределами афтершоковой области наведенная сейсмичность синхронизована (по большинству событий) с приходом рэлеевских волн от землетрясения на разломе Denali. Что касается лабораторных экспериментов, то для них во всех случаях отмечалось наличие задержки акустоэмиссионного отклика. Длительность задержек откликов АЭ была самой различной: от миллисекунд при воздействиях ударником [9], до нескольких сотен или даже тысяч секунд при воздействиях весьма слабыми вибрациями [10] или электромагнитными полями [11]. Отметим, что лишь в работе [8] при описании эффекта виброупругости ничего не говорится о задержках. Однако виброупругость (особая форма отклика на ЭВ) исследовалась в [8] по деформационным измерениям без контроля АЭ, т.е. с меньшей разрешающей способностью по времени. На первый взгляд, это может создавать впечатление о несоответствии такой характеристики

откликов на ЭВ, как наличие задержек, т.е. о весьма ограниченной аналогии эффектов на разных масштабах длин.

Важный вклад в объяснение того, что несоответствие по задержкам лишь кажущееся, внесен недавними работами [19, 20]: при более детальном рассмотрении откликов на дополнительное внешнее воздействие было выявлено наличие у них двух фаз – быстрой и медленной. При исследовании подвижек бортов разлома при динамическом воздействии (взрывов, нагрузок при ветровых порывах и т.п.) в этих работах показано, что на медленной, задержанной фазе реакция среды более значительна, чем на быстрой фазе, наступающей сразу с прибытием упругих волн возмущения или с небольшой задержкой. Естественно, что с учетом этого обстоятельства, имеет смысл сравнивать времена задержек лишь для медленных фаз откликов. До сих пор практически все исследования модельных энерговодействий на образцах были сфокусированы на вопросе о наличии или отсутствия отклика АЭ как такового. В частности, в наших предыдущих работах [11, 21–23], где были представлены кривые хода активности АЭ, именно задержанная фаза засчитывалась как отклик геоматериала на ЭВ. Выделению разных фаз не уделялось достаточного внимания из-за трудностей распознавания первой (малоамплитудной) фазы среди шумов и флуктуаций.

В ИС РАН проведена серия специальных экспериментов, нацеленная на идентификацию “быстрых” откликов АЭ образцов на воздействие импульсных физических полей. Были также переобработаны данные, накопленные при регистрации АЭ в предшествующих экспериментах. Для расчета параметров сигналов АЭ по цифровым записям их волновых форм (“осциллограммам”) создано новое программное обеспечение. Это позволило доказать, что для небольших образцов в условиях сжатия имеется две фазы акустоэмиссионного отклика на макетные ЭВ. Для рассматриваемых временных зависимостей АЭ образцов геоматериалов существование первой, быстрой фазы, удается

проследить по изменению усредненных параметров сигналов АЭ: длительности огибающей и энергии.

Постановка эксперимента.

Эксперименты по исследованию влияния слабых вибро- и электровоздействий на параметры АЭ различных геоматериалов проведены в Научной станции РАН (г. Бишкек) на пружинной реологической установке УДИ (максимальная сжимающая нагрузка 100 т) и на реологическом стенде с длинноходовой пружинной, обеспечивающей сжатие испытываемого образца с усилием до 20 тонн. Испытания на одноосное сжатие были проведены с образцами различных горных пород с выраженными акусто-эмиссионными свойствами: гранит, гранодиорит, габбро и кварцит, а также каменная соль. Методика экспериментов детально описана в предыдущих работах [10, 11, 21]. Сигналы акустической эмиссии регистрировались в частотном диапазоне от 80 кГц до 5 МГц с контролем формы сигнала. Аппаратура работала в стандарте КАМАК в ждущем режиме с запуском по превышению сигналом АЭ порога дискриминации. Проводилась запись волновой формы сигнала на персональный компьютер. Все измерительные сеансы проходили при фиксированной нагрузке. Перед воздействием образец выдерживался 60–120 минут после пригрузки для минимизации переходных процессов. Воздействия физическими полями проводились в течение сессий, длительностью 90–120 минут, для набора представительной выборки. Как и ранее, модельные энерговоздействия осуществлялись с помощью источников трех типов: генератора прямоугольных импульсов Г5-54 (амплитуда импульсов около 50 В, выбранный диапазон частот 1–7 кГц); 10-киловольтного индукционного искрового генератора и конденсаторного разрядника с напряжением порядка 1 кВ (крутизна фронта нарастания около 1 мкс). Для вибровоздействий использовалась звуковая электродинамическая головка мощностью около 1 Вт, установленная жестко на конструкции прессы. Сигнал на электродинамическую головку подавался от внешнего звукового генератора.

Использовался также специальный малогабаритный преобразователь (буззер), закрепляемый непосредственно на одной из граней исследуемого образца.

При обработке результатов эксперимента с конкретным источником дополнительных ЭВ для каждого одиночного сигнала АЭ определялась огибающая мгновенной электрической мощности, по которой вычислялись амплитудное значение и длительность сигнала АЭ. Одновременно с этими параметрами рассчитывалась полная энергия сигнала АЭ. Для потока событий АЭ определялись следующие временные зависимости: накопление числа событий, изменение активности АЭ, суммарная энергия сигналов АЭ, средняя скорость высвобождения энергии в потоке событий АЭ, изменения амплитуды и длительности сигналов АЭ.

При вычислении энергии сигнала АЭ учитывалось, что выходной электрический сигнал измерительного канала пропорционален колебаниям давления $p(t)$, создаваемого звуковой волной на рабочей поверхности датчика АЭ. При достаточно большой присоединенной массе первичного пьезопреобразователя можно считать, что максимум огибающей (как и первое вступление акустической волны) формируется в условиях бегущих от источника волн [24]. Тогда с достаточной точностью выполняется пропорциональность $p(t)$ и колебаний скорости $V(t)$. Связь между этими величинами определяется формулой

$$p(t) \cong \rho C_s V(t), \quad (1)$$

где произведение плотности среды ρ на скорость звуковых (продольных) волн C_s имеет смысл акустического сопротивления.

За энергетическую характеристику события АЭ можно принять энергию электрического сигнала (W) на выходе измерительного канала, которая вычисляется по формуле:

$$W = \frac{1}{R \cdot K_U} \int_{t_1}^{t_2} U_e^2(t) \cdot dt, \quad (2)$$

где $U(t)$ – напряжение на выходе измерительного канала (в вольтах); K_U –

коэффициент усиления измерительного канала; R – входное сопротивление канала; t_1 – время начала сигнала, определяемое по превышению заданного уровня дискриминатора; t_2 – время окончания сигнала АЭ. Пределы интегрирования t_1 и t_2 соответствуют началу и концу зарегистрированного сигнала. Время t_1 определяется по первой полуволне сигнала АЭ, для которой входное напряжение по абсолютной величине превысило уровень дискриминатора, а t_2 – по последней полуволне, вслед за которой $|U_i(t)|$ уже не превышает дискриминатор.

Результаты эксперимента. В проведенной серии экспериментов по моделированию энерговоздействий на геосреду применение широкополосной регистрации АЭ и вновь созданного программного обеспечения для обработки первичных данных позволило выявить ранее не известные особенности акустоэмиссионных откликов на ЭВ. Необходимо отметить соответствие полученных данных с результатами предыдущих работ [10, 11, 21–23]. В частности, подтверждено снова, что отклики АЭ, свидетельствующие о триггерных эффектах при воздействиях внешних электрических и вибрационных полей, проявлялись при нагрузках, сравнимых с разрушающими (как правило, в диапазоне главных сжимающих напряжений: 70–95% от максимального для данного образца).

Существенным новым моментом является выделение двух характерных типов откликов на воздействие электромагнитных импульсов (рис. 1), которые различаются по длительности и фронту нарастания активности и свидетельствуют о наличии нескольких мод откликов АЭ даже на однотипное ЭВ. Уже здесь проявляется нетривиальность эффекта электромагнитных импульсов, не сводящегося

к простому стимулированию активности АЭ с одним и тем же источником – генератором прямоугольных импульсов Г5-54. Отклик первого типа (рис. 1а) представляет собой кратковременный всплеск активности с возвратом к прежнему либо более низкому фоновому уровню при продолжающемся воздействии. В этом случае активационный фронт достаточно резкий. Такие отклики чаще наблюдаются при относительно небольших напряжениях сжатия образцов.

Второй тип (рис. 1б) характеризуется квазистационарным повышением активности АЭ, сохраняющимся и после окончания ЭВ. Далее, если нет повторных воздействий, он постепенно спадает до исходного уровня, т.е. имеет место последствие. Как правило, отклики второго типа обнаруживаются при значительных нагрузках (вблизи разрушения). Краткосрочное увеличение активности с крутым фронтом в откликах первого типа можно увязывать с образованием разрывов и сбросов внутри ограниченных доменов. Для откликов второго типа квазистационарный временной профиль свидетельствует о бифуркации материала образца с переходом его в новое состояние, в котором достигнут баланс между возникновением очаговых областей (доменов) благодаря притоку энергии и энерговыделением вследствие дефектообразования, проявляющегося как рост АЭ.

Для большинства откликов, обнаруженных по временным графикам активности АЭ в проведенных экспериментах, изменения таких параметров, как средняя энергия АЭ сигналов и длительность огибающей, оказались существенно слабее, чем вариации активности. Для многих измерительных сеансов (рис. 1) изменения параметров сигналов АЭ не превышают

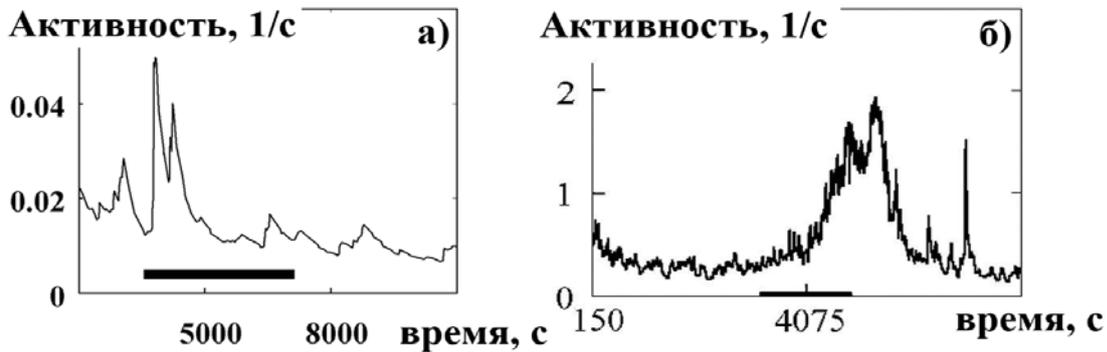


Рис. 1. Два типа отклика активности АЭ на воздействие квазипериодическими импульсами. Период включения источника – генератора Г5-54 отмечен полосой. Амплитуда напряжения (50 В) и частота следования импульсов (2кГц) в обоих случаях одинаковы; а) отклик первого типа, зарегистрированный на образце гранита; б) отклик второго типа для образца габбро.

среднеквадратичного отклонения по соответствующему временному окну. Тем не менее, в выборке по измерительным сеансам с ЭВ расчет усредненной энергии и длительности огибающей АЭ сигналов дал содержательный результат для наиболее контрастных откликов (рис. 2) и временных зависимостей этих параметров в сеансе с вибровоздействием, вызвавшим сильный отклик 2 типа. Ход средней длительности и энергии различен на трех участках: 1) до воздействия; 2) сразу после начала ЭВ, но до крутого нарастания активности; 3) после прироста активности. Примечательно, что изменение средней длительности и энергии сигналов АЭ на втором участке началось практически сразу с включением источника ЭВ (микровибратора, в данном случае). В течение периода “задержки” отклика активности средняя энергия и длительность сигналов АЭ возрастают по сравнению со значениями до начала вибровоздействия. После резкого нарастания активности, т. е. на третьем участке, нарастание средней энергии и длительности сигналов АЭ сменяется убыванием до исходного или несколько более низкого уровня.

Априорно предполагалось уменьшение энергетики сигналов АЭ при росте их количества. Снижение средней энергии и длительности сигналов АЭ действительно отмечено после перехода активности на новый

уровень, что соответствует второй фазе отклика (участок 3, рис. 2).

Но перед этим, на участке 2 средняя энергия и длительность увеличиваются, что можно рассматривать как проявление первой фазы отклика на включение вибраций. Отметим, что и на графике активности есть вариации, коррелирующие с началом ЭВ. Довольно неожиданный результат – восстановление средних параметров АЭ на второй фазе при возросшей активности АЭ – может быть проявлением самоподобия процесса деструкции геоматериалов. Подразумевается, что динамические воздействия вызывают отклонения в распределении возникающих дефектов по размерам, что соответствует изменению средней энергии и длительности. Однако через некоторое время среда “приспосабливается” к ЭВ за счет возрастания активности, что обеспечивает переход на более высокий уровень высвобождения энергии. При этом распределение дефектов (источников АЭ) по размерам вновь, как и до воздействия, становится самосогласованным.

Показательный пример изменений параметров АЭ в ходе сеанса с воздействием электроимпульсов, в котором был зарегистрирован отклик в виде очень резкой активации АЭ, приведен на рис. 3. Значительное (на порядок) возрастание активности в этом сеансе было связано не с макроразрушением образца, а с выходом на его боковую поверхность неподалеку от места

расположения датчика АЭ субмиллиметровой трещины. Отклик АЭ по своему профилю не

отличался от откликов первого

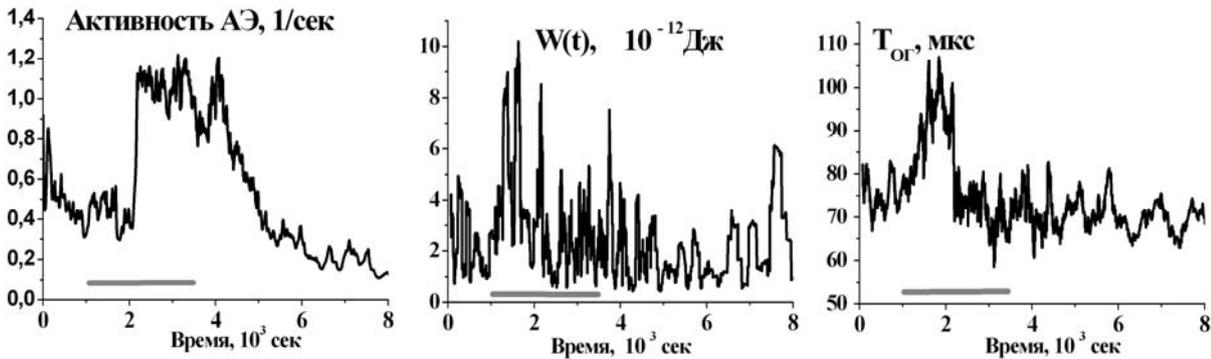


Рис. 2. Изменения активности АЭ, средней энергии и длительности сигналов АЭ гранитного образца, испытываемого на одноосное сжатие, в сеансе с вибровоздействием (период воздействия отмечен полосой).

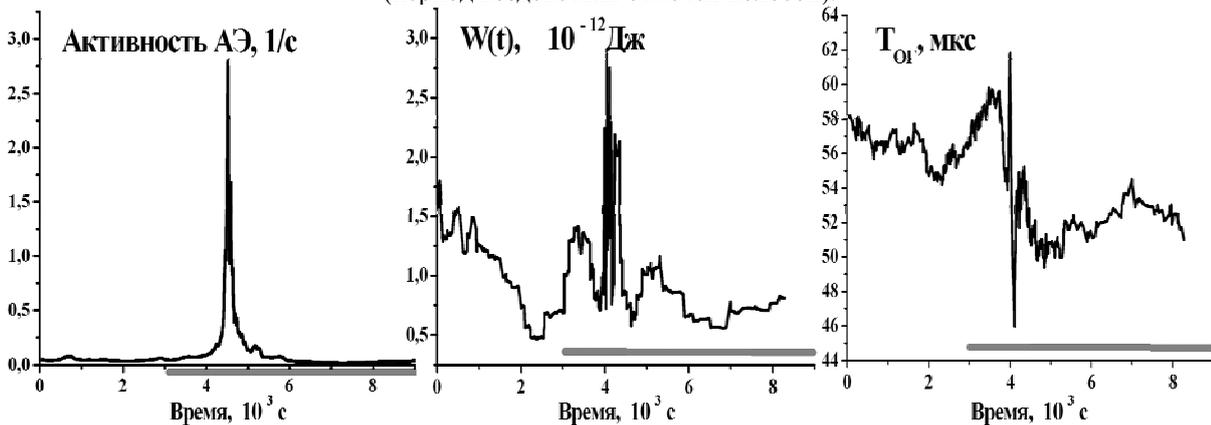


Рис. 3. Изменения активности АЭ, средней энергии и длительности сигналов АЭ образца гранодиорита при одноосном сжатии, в сессии с подачей импульсов Г5-54: амплитуда напряжения – 50 В, частота – 2,5 кГц, длительность импульса – 20 мкс (период электровоздействия отмечен полосой).

типа, а необычно высокий пик активности стал отражением того обстоятельства, что стимулированный электроимпульсами очаг оказался неподалеку от датчика, и при этом регистрировались даже очень слабые события АЭ. Можно отметить формальное сходство всплеска активности АЭ нагруженного образца гранодиорита с эффектом сверхизлучения Дике, т.е. кооперативного, сравнительно низкочастотного электромагнитного излучения, которое может генерироваться при прохождении по образцу волны электрической поляризации [25]. Для

зависимостей энергии сигналов АЭ и длительности их огибающей (рис. 3) заметен рост средних значений этих параметров в период задержки активации после начала ЭВ (как на рис. 2), т.е. и здесь прослеживается первая фаза отклика на ЭВ, в данном случае электромагнитная.

После кратковременного всплеска активности (рассмотрим отклик первого типа) средняя энергия сигналов АЭ возвращается к уровню, который был до начала ЭВ, а длительность огибающей становится даже ниже своего исходного уровня. В данном

случае последствие проявляется лишь по длительности. Обращает на себя внимание аналогичность поведения зависимостей средней энергии и длительности огибающей при воздействии вибраций (рис. 2) и электромагнитных импульсов (рис. 3). Это новое подтверждение возможного использования эффекта стимулирования эмиссионных событий как основы технологии разрядки избыточных напряжений.

Релаксацию параметров АЭ после всплеска активности (пусть большого, с выходом трещины на поверхность, но не ведущего к макроразрушения) можно сопоставить с концепцией “аккомодации” среды, по которой до некоторого предела среда может приспосабливаться к действующему напряжению [26].

В этой концепции макроразрушение (землетрясение) трактуется как исчерпание возможностей аккомодации при мощном притоке энергии извне. С точки зрения концепции аккомодации активация эмиссионных событий внешними ЭВ является благоприятным фактором, даже, несмотря на некоторое сокращение оценок долговечности по Журкову [27], если при этом темп аккомодации возрастает благодаря ускорению релаксационных процессов.

Заключение. Наиболее важным результатом проведенной серии экспериментов является выделение на фоне шумов и флуктуаций характерных изменений параметров сигналов АЭ, являющихся следствием внешних электрических и вибрационных воздействий. Для всего набора испытанных материалов (гранит, гранодиорит, габбро, кварцит и каменная соль) отклики на эти воздействия ярко проявились в изменениях активности АЭ. Прирост активности АЭ (вторая фаза отклика) происходит с задержкой относительно начала ЭВ, что свидетельствует о нелинейности деформационных процессов в исследуемых образцах с переходом дефектообразования с низшего на более высокий уровень. Изменения параметров сигналов АЭ: средней энергии и длительности огибающей проявляются при ЭВ раньше, чем вариации в виде прироста активности. Эти изменения отражают наличие первой фазы

отклика на внешнее воздействие. Хотя они не столь контрастны, как прирост активности АЭ, но в универсальности задержек их роль очень важна, поскольку за подобными изменениями стоят процессы, которые являются связующим звеном между влиянием ЭВ на микроуровне (причина) и запаздывающим ростом трещинообразования, т.е. активностью АЭ (следствие). По существу, в работе предпринята попытка приступить к анализу таких процессов. В целом, полученные результаты показывают, что выбранный метод исследований разумен, дальнейшая работа позволит приблизиться к пониманию физических процессов, происходящих в энергонасыщенной геосреде под действием статических (тектоническое и литостатическое напряжения) и динамических (ЭВ) факторов.

Литература

1. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Докл. РАН. – 1995. – Т. 343. – № 4. – С. 543–546.
2. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 3–15.
3. 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. – 152 с.
4. Влияние механических вибраций на выделение сейсмической энергии. Прогноз землетрясений / Под ред. В.А. Садовского. – Душанбе–Москва, 1983. – № 4. – С. 365–372.
5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И. и др. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. – 1996. – Т. 396. – № 5. – С. 664–667.
6. Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т.6. – № 1. – С. 41–53.
7. Tadokoro K., Nishigami K., Ando M., Hirata N.A. et. al. Seismicity changes related to a water injection experiment in the Nojima Fault Zone //

- Island Arc. – 2001. – V. 10. – N 3/4. – P. 235–243.
8. *Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузобаев З.* Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // *Физика Земли*. – 1991. – № 12. – С. 69–72.
 9. *Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В., Челидзе Т.Л.* Экспериментальное изучение инициированной неустойчивой подвижкой // *Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения*. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – Вып. 1. – С. 38–47.
 10. *Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н., Трапезников Ю.А. и др.* Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1678–1689.
 11. *Bogomolov L.M., P'ichev P.V., Zakupin A.S., et.al.* Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // *Annals of Geophysics*. – 2004. – V.47. – N 1. – P. 65–72.
 12. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
 13. *Николаев А.В.* Наведенная сейсмичность. Природные опасности России. Сейсмические опасности / Под. ред. Г.А. Соболева. – М.: Крук, 2000. – С. 139–164.
 14. *Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Пономарев А.В., Соболев Г.А.* Некоторые вопросы изменения состояния геологической среды при электромагнитном воздействии импульсами МГД-генератора // *Научные тр. ИТЭС ОИВТ РАН / Ред. В.Е. Фортов и А.П. Лихачев*. – М.: ОИВТ РАН, 2000. – Вып. 3. – С. 217–224.
 15. *Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Собисевич А.Л.* Правомерна ли постановка работ по предотвращению сильных коровых землетрясений? // *Уральский геофизический вестник*. – 2005. – № 7. – С. 5–15.
 16. *Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Собисевич А.Л.* Управление сейсмическим процессом: реальность и проблемы // *Геофизика XXI столетия: 2003–2004 годы*. Сб. тр. 5 и 6 геофизических Чтений им. В.В. Федынского. – Тверь: Изд-во ГЕРС, 2005. – С. 97–104.
 17. *Prejean S.G., Hill D.P., Brodsky E.E., Hough S.E. et.al.* Remotely Triggering Seismicity on the United States West Coast following the M_w 7.9 Denali Fault Earthquake // *Bull. Seim. Soc. Am.* – 2004. – V. 94. – N 6B. – P. 348–359.
 18. *Pankov K.L., Abarasz W.J., Pechmann J.C., Nava S.J.* Triggered seismicity in Utah from the November 3, 2002, Denali fault earthquake // *Bull. Seim. Soc. Am.* – 2004. – V. 94. – N 6B. – P.342-347.
 19. *Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. и др.* Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 23–30.
 20. *Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др.* Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // *Физическая мезомеханика*. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 41–53.
 21. *Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др.* Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // *Геодинамика и геологические проблемы высокогорных регионов / Ред. С.В. Гольдин и Ю.Г. Леонов*. – Москва–Бишкек, 2003. – С. 304–318.
 22. *Аладьев А.В., Авагимов А.А., Богомолов Л.М.* О характеристиках сигналов АЭ нагруженных образцов геоматериалов при дополнительных воздействиях физических полей // *Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска / Ред. Е.Н. Нусипов, С.В. Гольдин*. – Алматы: Институт сейсмологии МОН РК, 2005. – С. 320–327.
 23. *Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С. и др.* Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энерговодействиях физическими полями // *Проблемы сейсмологии 3-го тысячелетия*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 168–172.
 24. *Бобровский В.В., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Горбанева Л.Н. и др.* Применение широкополосных АЭ измерений при моделировании энерговодействий на геологическую среду для разрядки

избыточных напряжений // Физические, геофизические и геодинамические исследования в Центральной Азии в начале XXI века. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2004. – С. 59–67.

25. *Меньшиков Л.И.* Сверхизлучение и некоторые родственные проблемы // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 2. – С. 113–154.
26. *Гольдин С.В.* Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
27. *Журков С.Н., Куксенко В.С. Петров В.А. и др.* К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. – 1977. – № 6. – С. 8–13.