

УДК 551.24

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА МОДЕЛЬНОГО ПРОТЯЖЕННОГО РАЗЛОМА НА ФЛЮИДНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2024 г. И. А. Пантелеев^{1,*}, В. А. Новиков^{2,3}, В. И. Окунев²¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия³Институт динамики геосфер имени М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: pia@icmm.ru

В статье приведены результаты экспериментов по воспроизведению процесса прерывистого скольжения по модельному разлому и инициирования подвижки борта разлома флюидными и электрическими воздействиями. Отличительной особенностью использованной экспериментальной установки является протяженный подвижный блок, позволяющий существенно увеличить площадь межблочного контакта, заполненного сухим мелкозернистым песком. Это позволило исследовать пространственную картину развития зон активного деформирования контактной зоны посредством решения задачи локации источников акустической эмиссии. Отдельное внимание уделено изучению отклика контактной зоны на инъекцию в неё воды и прямое воздействие электрического тока. В результате проведенных экспериментальных исследований определены пространственно-временные закономерности отклика модельного разлома на увеличение сдвиговой нагрузки и флюидные и электрические воздействия. Показано, что воздействие электрического тока вызывает рост акустико-эмиссионной активности во всей области между электродами за исключением области активизации эмиссии на этапе инъекции воды. Установлено, что электрическое воздействие может приводить к инициированию динамической подвижки с активизацией пространственных областей, проявленных на предыдущих этапах воздействия.

Ключевые слова: физическое моделирование, слайдер-модель, акустическая эмиссия, локация сигналов, триггерные воздействия.

Для цитирования: Пантелеев И.А., Новиков В.А., Окунев В.И. Пространственно-временные закономерности акустического отклика модельного протяженного разлома на флюидные и электрические воздействия // Динамические процессы в геосферах. Т. 16. № 3. С. 102–113. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_102

Введение

Лабораторный эксперимент является одним из широко применяемых методов научного познания применительно к изучению закономерностей развития разломных зон, стадийности подготовки и реализации подвижки по магистральному сместителю как потенциальному очагу сейсмического события [Кочарян и др., 2022; Marone, 1998; Ben-David et al., 2010; Kocharyan et al., 2014a,б; Bornyakov et al., 2016a,б]. При этом лабораторные исследования по типу объекта изучения можно разделить на два класса: изучение особенностей подготовки и режимов скольжения по уже сформированному модельному разлому [Sobolev et al., 1996; Кочарян и др., 2014] и изучение процесса формирования и развития разломных зон в различных геодинамических обстановках на оптически-активных и упруговязкопластичных материалах [Корбутяк и др., 2018; Пантелеев и др., 2023; Cheremnykh, 2005; Sherman et al., 2005; Goncharov et al., 2014].

Наиболее распространенными являются исследования первого класса, которые, как правило, реализуются на моделях прерывистого скольжения или «stick-slip» [Brace, Byerlee, 1966]. Наличие локальной ослабленной зоны, содержащей контактную поверхность, определяет единственно

возможный механизм деформирования такой системы – смещение по контакту. Согласно модели прерывистого скольжения движение в очаге представляет собой акт неустойчивого проскальзывания, при котором движение начинается после достижения напряжениями, касательными к плоскости разлома, определенного предела. Повышение действующих напряжений в плоскости модельной разломной зоны до субкритического уровня без проскальзывания приводит к ее метастабильному состоянию, чувствительному к слабым воздействиям различной природы. Этот факт определяет возможность триггерного инициирования динамической подвижки блоков по контакту, когда энергия инициирующего воздействия на порядки ниже энергии инициированного события. Изучению триггерных эффектов воздействия слабых физических полей на разломную зону, в том числе формирующуюся при деформировании образцов горных пород, посвящено большое количество лабораторных исследований, в особенности изучению триггерного влияния флюида [Sobolev et al., 2010; Sobolev, Ponomarev, 2011; Kartseva et al., 2022] и электромагнитных полей [Bogomolov et al., 2004; Zakupin et al., 2006; Богомолов, 2010; Borovskii et al., 2011; Mubassarova et al., 2014; Novikov et al., 2017; Zeigarnik et al., 2022].

Необходимо отметить, что, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению закономерностей подготовки и реализации прерывистого скольжения по модельной разломной зоне, изучению триггерных эффектов его инициирования, мало внимания уделяется изучению пространственной картины активизации отдельных зон в плоскости контактной зоны. Настоящая работа нацелена на устранение этого пробела и посвящена исследованию пространственно-временных закономерностей подготовки динамической подвижки по протяженному разлому, а также ее инициирования инъекцией воды и воздействием электрического тока на основе анализа данных акустической эмиссии. Весь комплекс экспериментальных исследований выполнен на базе лаборатории импульсной энергетики и геофизики Объединенного института высоких температур РАН (г. Москва) при непосредственном участии сотрудников лаборатории цифровизации горнотехнических процессов Института механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь).

Методика физического моделирования и методы обработки

Для исследования условий подготовки и реализации динамической подвижки по модельному разлому, в том числе вызванной воздействием физических полей различной природы, была использована установка прерывистого скольжения, представляющая собой модифицированную слайдер-модель [Brace, Byerlee, 1966]. Основу установки составляют неподвижный блок из высокомодульного стекла и подвижный блок, изготовленный из бетона марки М250. Конструкция блоков и их геометрия представлена на рис. 1. Отличительной особенностью изготовленного подвижного блока от российских и зарубежных аналогов является его длина, равная 700 мм. Отношение длины к ширине в этом случае составило 5.64, тогда как у других слайдер-моделей оно, как правило, не превышает 2–2.5. В центре подвижного блока размещается трубка диаметром 3.6 мм, позволяющая подавать дистиллированную воду непосредственно в плоскость контакта между блоками. При изготовлении бетонного блока в его центральной части были заложены алюминиевые уголки, выполняющие функцию электродов, длиной 150 мм и шириной (на контактной поверхности) 15 мм. Высота подвижного блока – 119 мм. Между блоками располагался слой сухого мелкозернистого песка толщиной 3 мм.

На рис. 2 представлена функциональная схема модифицированной слайдер-модели. Для реализации прерывистого скольжения на подвижном блоке размещался статический груз весом 200 кг, а сам блок через пружину жесткостью 16.57 Н/мм соединялся с электромеханическим приводом, обеспечивающим заданную скорость перемещения конца пружины, соединенного с приводом. Для измерения сдвигового усилия был использован датчик УММА-К200 (точность измерения 0.01 кгс), перемещение блока регистрировалось датчиком СТЕ-3000 (точность измерения 0.1 мм). Электрическое воздействие на контактную зону осуществлялось посредством подключения к электродам источника постоянного тока с регулируемым уровнем напряжения.

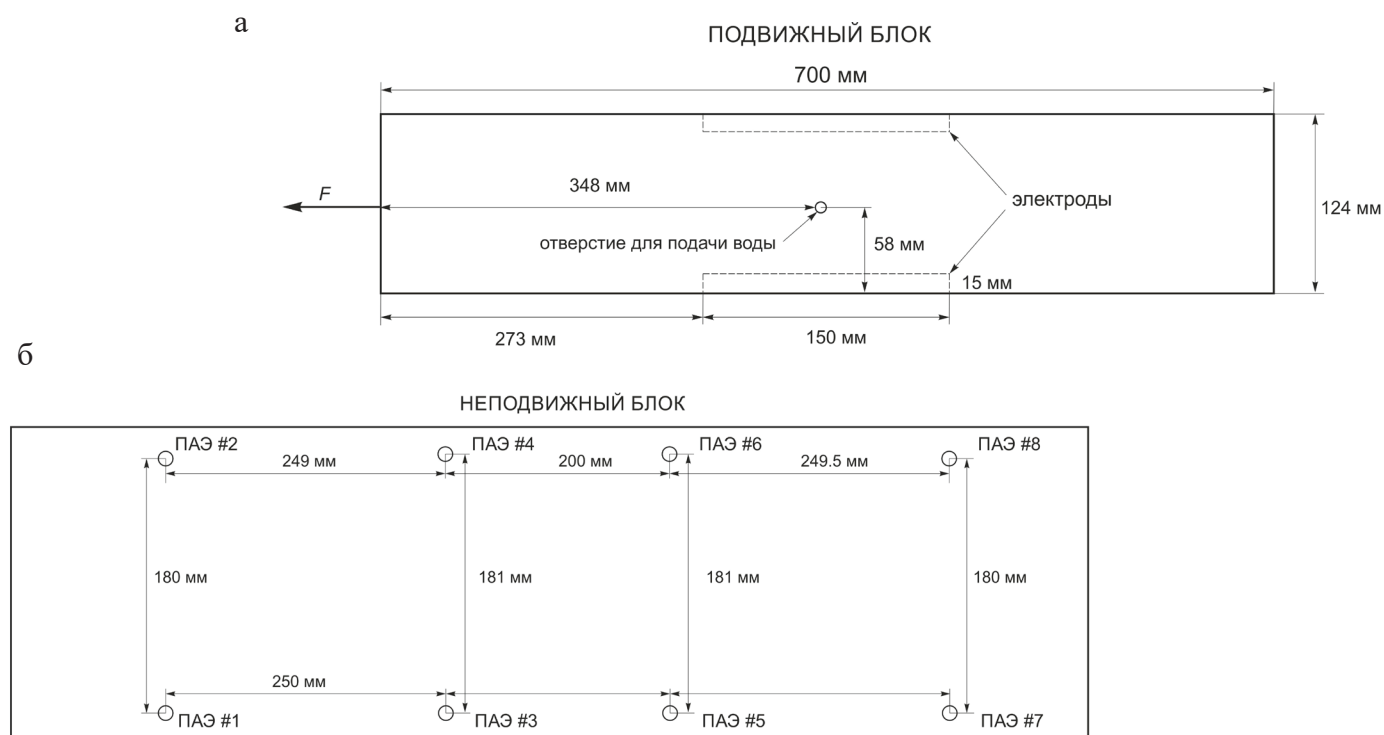


Рис. 1. Устройство подвижного блока (а), схема размещения преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) на неподвижном блоке (б)

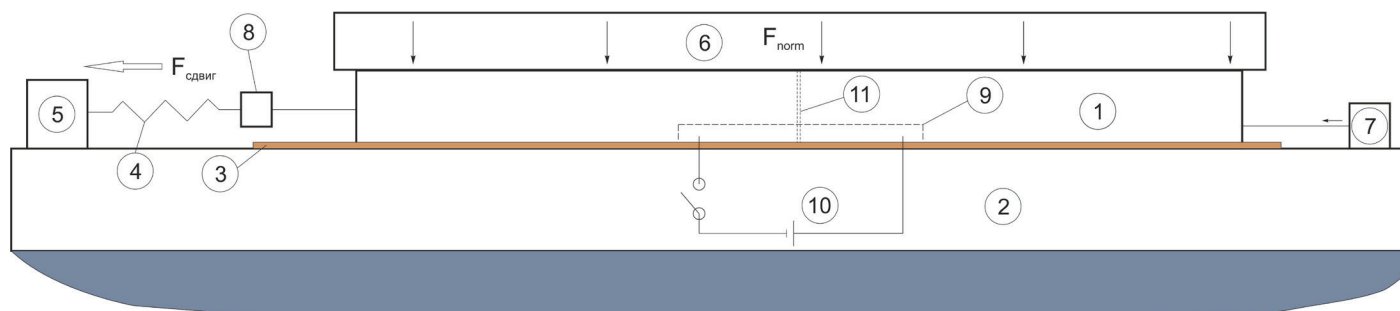


Рис. 2. Функциональная схема установки прерывистого скольжения с системой подачи воды и электрических импульсов в межблоковую контактную зону: 1 – подвижный блок, 2 – неподвижный блок, 3 – заполнитель контактной зоны, 4 – пружина, 5 – электромеханический привод, 6 – нормальная нагрузка контактной зоны, 7 – датчик перемещения подвижного блока, 8 – датчик усилия сдвига подвижного блока, 9 – электроды, 10 – источник тока, 11 – трубка для подачи воды в зону контакта

Для мониторинга состояния контактной зоны в ходе эксперимента был использован метод акустической эмиссии. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась с помощью восьмиканальной системы Amsy-6 (Vallen, Germany) с предусилителями АЕР4Н (усиление 34 дБ) и пьезокерамическими преобразователями М31 (рабочий частотный диапазон 300–800 кГц). Преобразователи акустической эмиссии крепились к поверхности неподвижного блока посредством цианакрилатного клея. Всего было использовано восемь преобразователей, установленных по обе стороны от контактной зоны (рис. 1б) и образующих три группы по четыре преобразователя. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась в пороговом режиме с порогом дискриминации 34.7 дБ и запись волновых форм по каждому из восьми каналов с частотой 10 МГц. Лоцирование источников акустической эмиссии осуществлялось по разности времен прихода сигнала на преобразователи отдельно каждой из трех групп преобразователей. Определение времени первого вступления на каждом из восьми измерительных каналов осуществлялось в автоматическом

режиме по одноступенчатому критерию Акайке. Полученные решения объединялись в единый набор с фильтрацией источников, не попадающих внутрь зоны, оконтуренной каждой из групп преобразователей акустической эмиссии.

Экспериментальная программа исследования состояла из двух этапов: подготовительного и основного. На подготовительном этапе было реализовано 9 прогонов подвижного блока по неподвижному без заполнителя со скоростью 100 мкм/мин с целью притирания поверхностей блоков друг к другу и устранения на них крупных неоднородностей. После добавления заполнителя контактной зоны была осуществлена калибровка преобразователей акустической эмиссии – оценка чувствительности каждого из них источником Су-Нильсена и определение средней скорости упругих волн для каждой из трех групп преобразователей. В заключение предварительного этапа подбиралась скорость перемещения конца пружины, соединенной с приводом, позволяющая получить стабильные циклы прерывистого скольжения и определить критический уровень сдвигового усилия. Эксперименты в рамках основного этапа исследований проводились со скоростью перемещения конца пружины, подсоединенного к приводу, 10 мкм/мин.

Основной блок экспериментальных исследований состоял из шести последовательных этапов: 3 цикла прерывистого скольжения по контакту, инъекция воды в зону контакта, воздействие электрического тока на контактную зону, повышение сдвигового усилия до субкритического уровня, инъекция воды в зону контакта, электрическое воздействие на зону межблокового контакта. Подробности реализации каждого из этапов представлены в следующем разделе.

Отклик модельного разлома на флюидные и электрические воздействия

Этап № 1. Циклы прерывистого скольжения по контакту

На первом этапе исследования модельного протяженного разлома было реализовано несколько циклов прерывистого скольжения с непрерывной регистрацией акустической эмиссии в плоскости контактной зоны. На рис. 3 представлены совмещенные зависимости сдвигового усилия и максимальной амплитуды лоцированных событий акустической эмиссии от времени. Видно, что при приближении величины сдвигового усилия к критическому уровню наблюдается увеличение акустико-эмиссионной активности с последующим ее спадом после реализации подвижки. Наиболее высокоамплитудные события акустической эмиссии наблюдаются непосредственно в момент динамической подвижки.

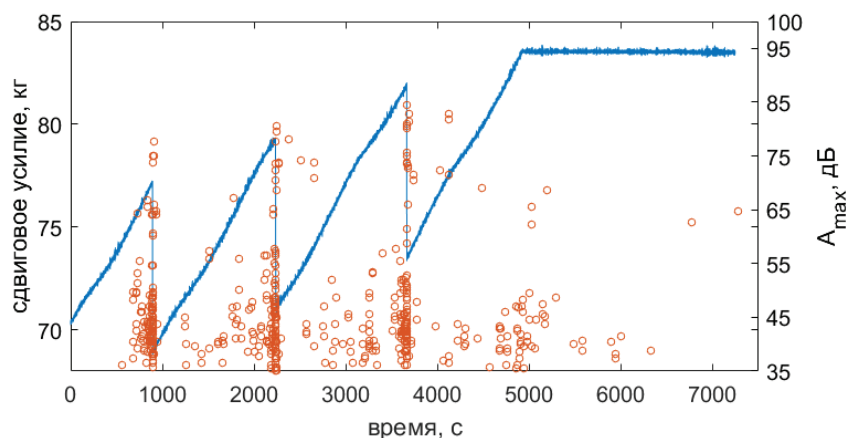


Рис. 3. Совмещенные диаграммы эволюции сдвигового усилия и максимальной амплитуды лоцированных событий акустической эмиссии от времени

Решение задачи локации событий акустической эмиссии для каждой из трех групп преобразователей в рамках настоящего исследования осуществлялось в системе координат подвижного блока, что позволяет сравнивать картины распределений событий акустической эмиссии для различных моментов времени вне зависимости от величины накопленного сдвига подвижного блока. На рис. 4 представлено пространственное распределение лоцированных событий акустической эмиссии, зарегистрированной при подготовке и реализации трех динамических подвижек. Для построения

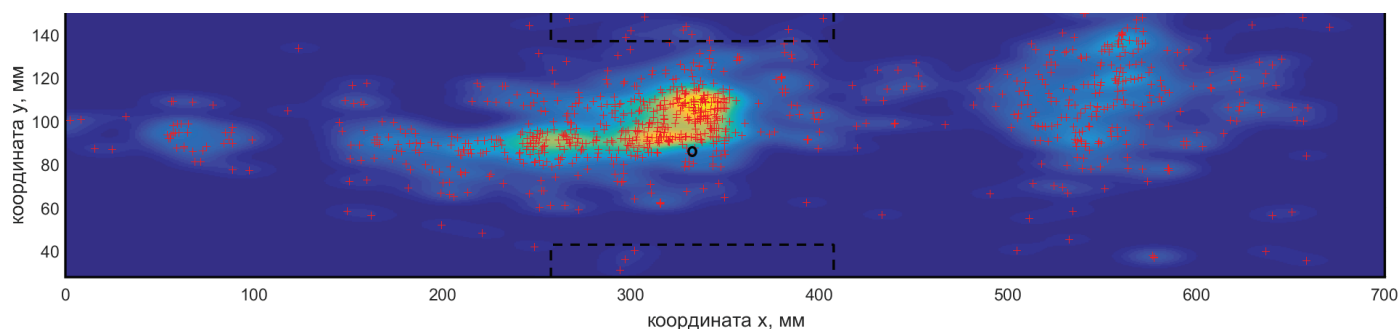


Рис. 4. Пространственное распределение лоцированных событий акустической эмиссии (направление подвижки справа налево): красные точки – отдельные события, цветовое распределение – плотность событий на единицу площади, черный пунктир – граница металлических электродов

распределения (плотности событий акустической эмиссии на единицу площади) использована ядерная оценка плотности вероятности с гауссианной в качестве функции ядра [Пантелеев и др., 2016].

Из представленного распределения видно, что в плоскости контакта акустико-эмиссионная активность локализована в трех пространственных областях. Наиболее активная зона расположена в центральной части контактной зоны, еще две зоны в ее левой и правой частях. Необходимо отметить, что эти области также имеют место при построении пространственного распределения событий акустической эмиссии отдельной для каждой из трех подвижек. Анализ изменения положения этих областей во времени показывает (рис. 5), что при приближении динамического срыва наблюдается медленная миграция событий акустической эмиссии (белые линии на рис. 5).

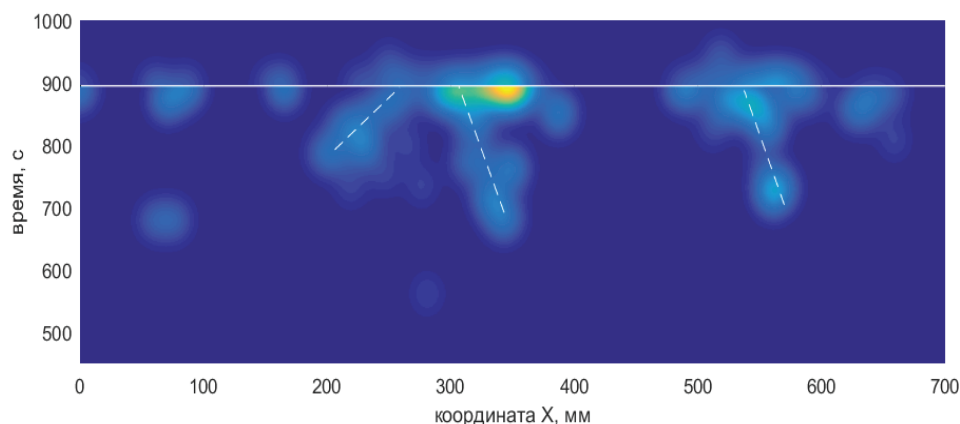


Рис.5. Пространственно-временное распределение лоцированных событий акустической эмиссии при подготовке и реализации первой динамической подвижки: (направление подвижки справа налево) белая сплошная линия – момент подвижки, белые пунктирные линии – направления миграции событий акустической эмиссии

Этап № 2. Инжекция воды в контактную зону

После трех последовательных динамических подвижек по модельному разлому смещение блока было остановлено на уровне сдвигового усилия, превышающего усилие предыдущего срыва (см. рис. 3). В таком состоянии система выдерживалась в течение получаса. После этого через металлическую трубку в зону контакта была инжестрирована дистиллированная вода объемом 50 мл со скоростью введения не более 10 мл/мин. Регистрация акустической эмиссии после введения воды осуществлялась в течение 10 часов. Итоговое пространственное распределение событий акустической эмиссии представлено на рис. 6.

Инжекция воды в контактную зону между двумя блоками привела к активизации акустической эмиссии в окрестности точки ввода (рис. 6). При этом, с одной стороны, размер «активированной» области в диаметре не превышает 40 мм, с другой – геометрия этой области указывает на отсутствие выделенного направления миграции акустико-эмиссионной активности, а также на то, что область контакта в окрестности точки ввода находится в одинаковых физико-механических условиях.

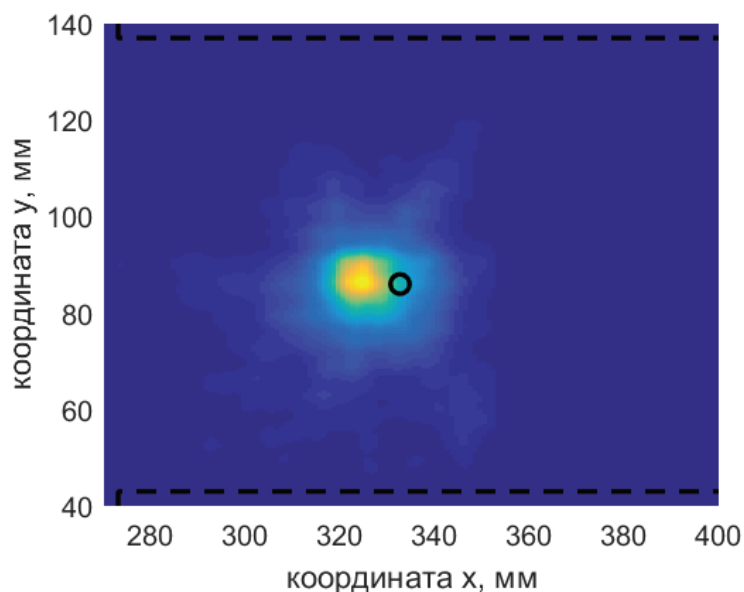


Рис. 6. Пространственное распределение лоцированных событий акустической эмиссии в области электродов, зарегистрированной в течение 10 часов после инъекции воды: (направление подвижки справа налево) черная окружность – точка ввода воды, черный пунктир – граница поверхности электродов

Этап № 3. Воздействие электрического тока на контактную зону

На следующем этапе после инъекции воды для возможного инициирования динамической подвижки контакт между двух блоков подвергался воздействию электрического тока посредством его подачи на металлические электроды, установленные на подвижном блоке заподлицо с его нижней поверхностью. Напряжение электрического тока составило 225.9 В при длительности воздействия 15 мин. Подведенная за это время электрическая энергия (без учета потерь на теплообмен контактной зоны с подвижным и неподвижным блоками) на два порядка превышает энергию, запасенную в пружине (3.3 кДж и 28 Дж соответственно).

а

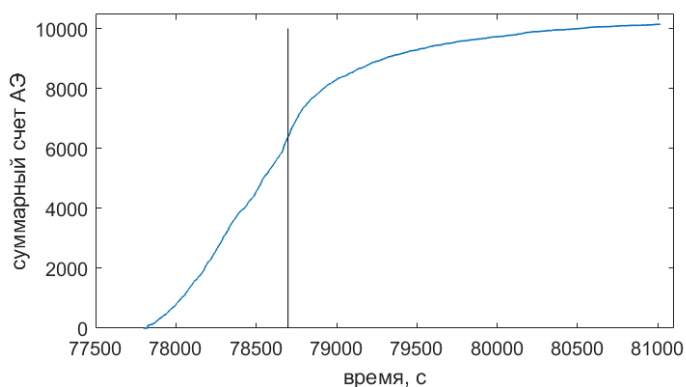
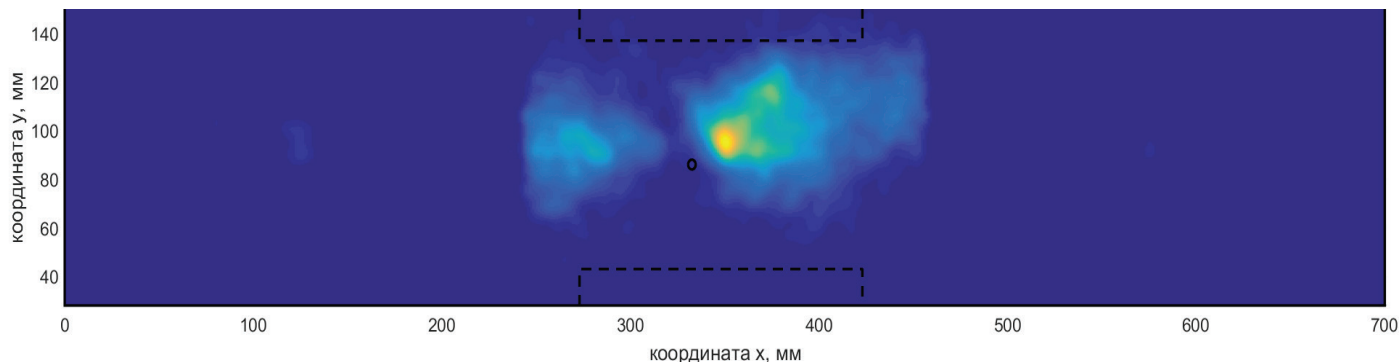


Рис. 7. Изменение суммарного счета лоцированных событий акустической эмиссии с течением времени (а): черная линия – момент выключения электрического тока и пространственное распределение этих событий во время и после электрического воздействия (б): черная окружность – точка ввода воды, черный пунктир – граница металлических электродов

б



Подача электрического тока на электроды вызывает активную генерацию акустической эмиссии в контактной зоне (начало роста количества событий акустической эмиссии совпадает с моментом начала подачи тока). Из изменения суммарного счета лоцированных событий акустической эмиссии с течением времени (рис. 7а) следует, что электрическое воздействие приводит к линейному росту суммарного количества лоцированных событий акустической эмиссии. К моменту выключения тока (черная линия на рис. 7а) количество лоцированных событий составило более 6000.

Релаксационная стадия после остановки электрического воздействия характеризуется постепенным снижением акустико-эмиссионной активности. Менее чем через час после остановки электрического воздействия активность акустической эмиссии прекращается. При этом суммарное число лоцированных событий акустической эмиссии на этой стадии вдвое меньше количества событий, зарегистрированных на стадии электрического воздействия.

Пространственное распределение лоцированных событий акустической эмиссии на этапе электрического воздействия характеризуется локализацией событий в двух зонах, расположенных между электродами (рис. 7б). Интенсивность генерации акустической эмиссии в этих зонах неравномерная. Максимальная интенсивность имеет место в зоне справа от точки инъекции воды. Необходимо отметить, что обнаруженные на этапе электрического воздействия зоны локализованной акустико-эмиссионной активности не пересекаются с зоной, выявленной на этапе инъекции воды. Этот факт показывает, что область контакта между двумя блоками, подвергшаяся увлажнению, является «нечувствительной» к воздействию электрического тока. Это в свою очередь позволяет сделать выводы о том, что механизмы генерации акустической эмиссии при этих двух способах воздействия на контактную зону различны.

Этап № 4 + Этап № 5. Повышение сдвигового усилия до субкритического уровня с последующей инъекцией воды в зону контакта

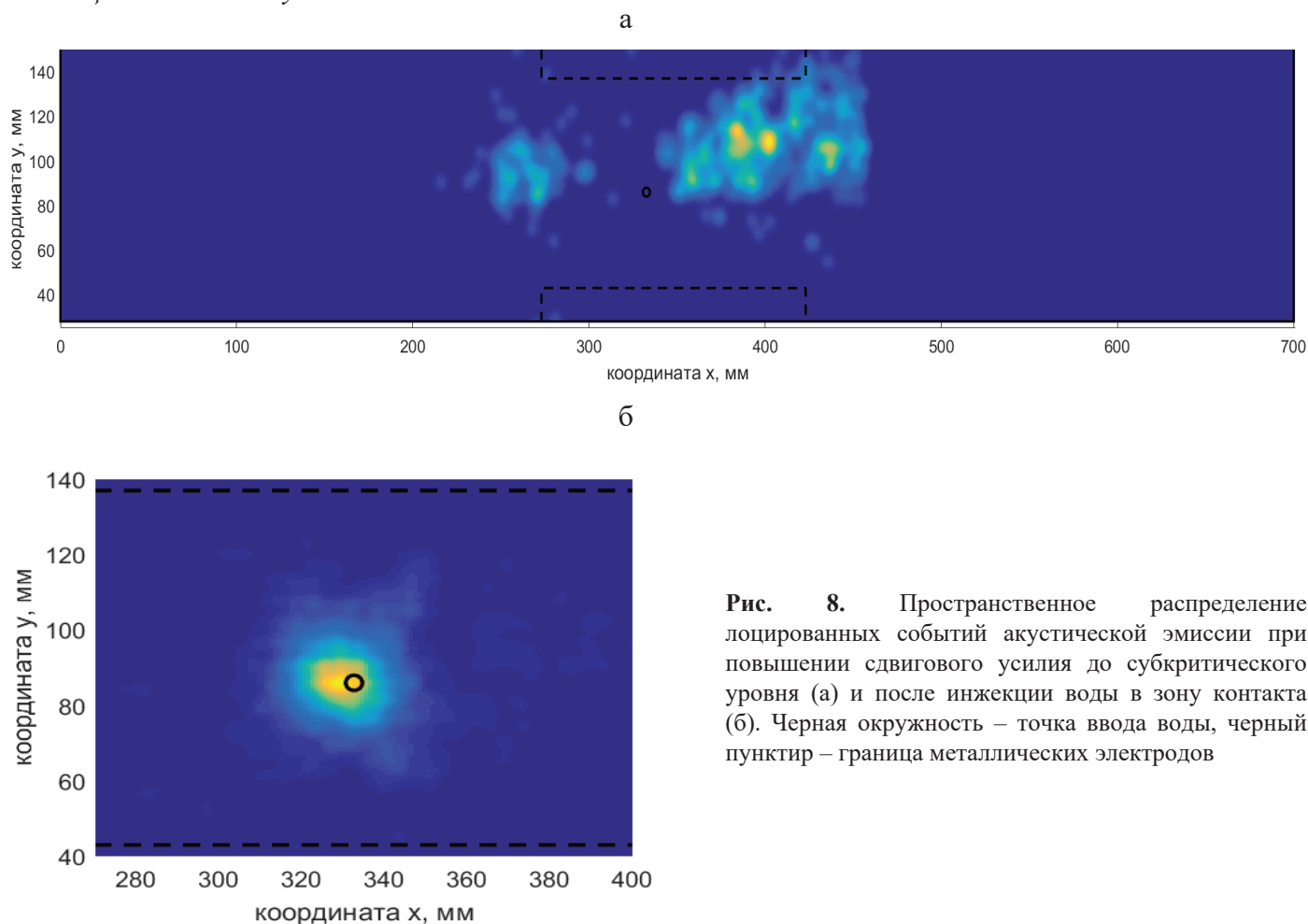


Рис. 8. Пространственное распределение лоцированных событий акустической эмиссии при повышении сдвигового усилия до субкритического уровня (а) и после инъекции воды в зону контакта (б). Черная окружность – точка ввода воды, черный пунктир – граница металлических электродов

Электрическое воздействие на зону контакта на третьем этапе исследования не привело к инициированию срыва подвижного блока, поэтому было принято решение об увеличении действующего сдвигового усилия на 10 кгс с такой же скоростью перемещения конца пружины, подсоединенной к приводу. Пространственное распределение событий акустической эмиссии, зарегистрированной во время увеличения сдвигового усилия до заданного уровня, представлено на рис. 8а. Видно, что в отличие от последовательных динамических подвижек на первом этапе, акустическая эмиссия локализована в пространственных областях, проявленных ранее на этапе электрического воздействия (этап № 3). Это позволяет сделать вывод о том, что воздействие электрического тока изменило в целом состояние всей зоны контакта между блоками.

После увеличения сдвиговой нагрузки в зону контакта с целью инициации подвижки одного блока относительно другого было инжестрировано 30 мл дистиллированной воды. Как и на втором этапе исследования, инъекция воды вызвала активизацию акустической эмиссии только в окрестности точки ввода (рис. 8б). Форма зоны локализации также близка к кругу, что указывает на отсутствие выделенных направлений активизации акустической эмиссии.

Этап № 6. Электрическое воздействие на зону контакта с последующей инициацией динамической подвижки

Дополнительное электрическое воздействие на контактную зону с параметрами, аналогичными параметрам воздействия на третьем этапе исследования, привели через 48 с после подачи электрического

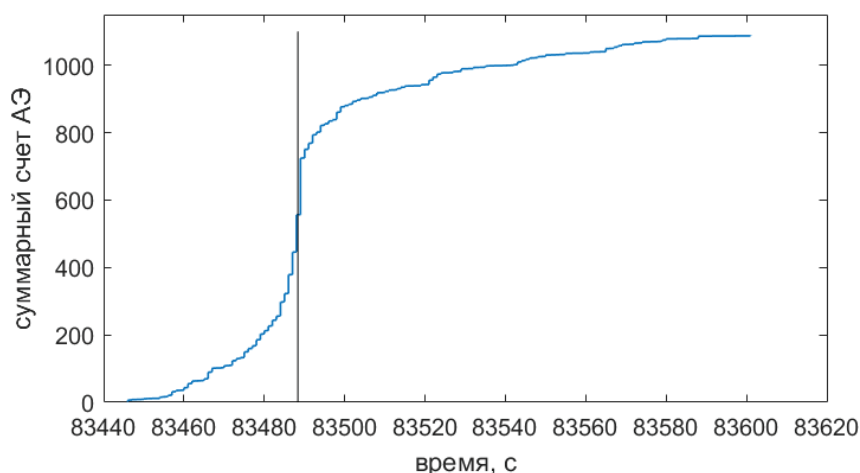


Рис. 9. Изменение суммарного количества лоцированных событий акустической эмиссии с течением времени. Черная линия – момент динамической подвижки

тока в контактную зону к страгиванию подвижного блока и сбросу усилия на 12 кгс. Таким образом, это обстоятельство указывает на то, что контактная зона модельного протяженного разлома после нескольких циклов динамического срыва и последующего увеличения усилия сдвига на первом этапе находилась далеко от критического метастабильного состояния, когда слабое воздействие может привести к инициированию глобального события – динамической подвижки одного блока относительно другого.

Динамика акустической эмиссии (суммарное количество лоцированных событий акустической эмиссии) после начала электрического воздействия и после подвижки представлена на рис. 9. В отличие от третьего этапа, на котором имел место линейный рост суммарного количества лоцированных событий акустической эмиссии с течением времени после подачи электрического тока на электроды, здесь наблюдается нелинейный (степенной) рост акустической эмиссии, заканчивающийся в момент подвижки. После этого наблюдается постепенный спад акустико-эмиссионной активности.

Анализ пространственного распределения лоцированных событий акустической эмиссии показал, что после начала электрического воздействия события акустической эмиссии группируются в двух пространственных областях, расположенных между электродами и ранее проявившихся на этапах

3 и 4 (рис. 10а). Непосредственно после динамической подвижки акустико-эмиссионная активность концентрируется в центральной области контактной зоны между двух электродов (рис. 10б). Эта зона пересекается с зоной наибольшей активности акустической эмиссии, проявившейся после начала электрического воздействия.

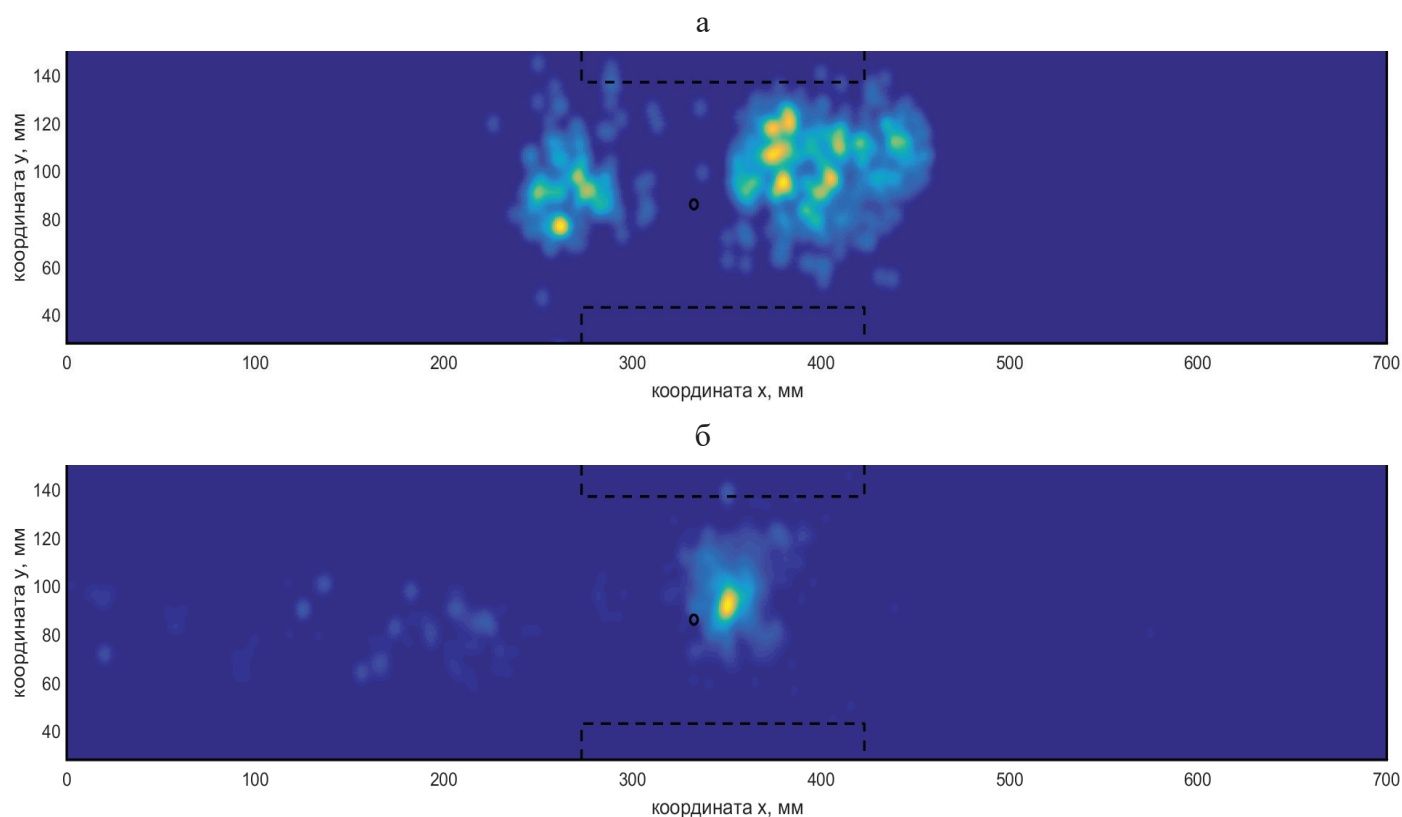


Рис. 10. Пространственное распределение лоцированных событий акустической эмиссии после начала электрического воздействия (а) и после динамической подвижки (б). Черная окружность – точка ввода воды, черный пунктир – граница металлических электродов

Сравнительный анализ медианной частоты событий акустической эмиссии, зарегистрированных на каждом из этапов экспериментального исследования, показал, что акустическая эмиссия, зарегистрированная при динамических подвижках и электрических воздействиях, имеет схожие частотные спектры со значением медианной частоты в районе 465 кГц, тогда как медианная частота импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной на этапах инъекции воды в контактную зону, составляет 365 кГц. По амплитудному распределению все зарегистрированные импульсы акустической эмиссии делятся на три группы. На этапах инъекции воды в контактную зону преобладают импульсы низкой максимальной амплитуды (до 50 дБ), при подготовке и реализации динамической подвижки наоборот имеет место средне- и высокоамплитудная акустическая эмиссия (до 80 дБ). Соответственно импульсы акустической эмиссии, зарегистрированной при электрическом воздействии, занимают промежуточное положение между этими двумя группами, т.е. преобладают низко- и среднеамплитудные импульсы акустической эмиссии.

Выводы

В работе проведено исследование пространственно-временных закономерностей отклика модельного протяженного разлома на флюидные и электрические воздействия на основе анализа данных акустической эмиссии. Решение задачи локации источников акустической эмиссии в трех последовательно расположенных зонах позволило выявить пространственную структуру областей

акустико-эмиссионной активности. Показано, что в процессе подготовки и реализации динамических подвижек активность акустической эмиссии локализована в нескольких пространственных областях. Распределение и количество источников акустической эмиссии в таких областях варьируется от подвижки к подвижке.

Установлено, что инъекция дистиллированной воды в контактную область инициирует акустическую эмиссию, локализованную у точки ввода воды. При этом область инициации имеет форму близкую к кругу, что указывает на отсутствие выделенных направлений активизации акустической эмиссии. Воздействие электрического тока, в свою очередь, вызывает рост акустико-эмиссионной активности во всей области между электродами за исключением области активизации эмиссии на этапе инъекции воды. Показано, что электрическое воздействие может приводить к инициированию динамической подвижки с активизацией пространственных областей, проявленных на предыдущих этапах воздействия.

Полученные результаты показали, что подготовка динамических событий сопровождается активизацией акустической эмиссии в локальных пространственных областях, подверженных наибольшей деформации. При этом электрическое воздействие избирательно активизирует эти области так, что подготовка подвижки после воздействия сопровождается повторной активностью акустической эмиссии в этих областях. Противоположная ситуация наблюдается для случая инъекции воды в область контакта двух блоков, заполненную мелким речным песком. Инъекция вызывает генерацию акустической эмиссии локально, в окрестности точки ввода. Отличия в параметрах импульсов акустической эмиссии указывают на то, что механизмы источников акустической эмиссии при деформировании зоны контакта и ее активизации в результате электрического и флюидного воздействий имеют различную природу.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30008).

Список литературы

- Богомолов Л. М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 3. С. 39–56. <https://elibrary.ru/mtvxiv>
- Корбутяк А. Н., Фролова Н. С., Мишакина А. А. Физическое моделирование структурообразования в осадочном чехле над разломом фундамента. Сопоставление с эшелонированными нефтегазоносными валлообразными поднятиями севера Западно-Сибирской плиты // Каротажник. 2018. № 3. № 285. С. 57–67. <https://elibrary.ru/ytnoav>
- Кочарян Г. Г., Остапчук А. А., Павлов Д. В., Гридин Г. А., Морозова К. Г., Hongwen J., Пантелеев И. А. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174. <https://doi.org/10.31857/S0002333722060060>
- Пантелеев И. А., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 4. С. 64–73. <https://elibrary.ru/wirmfp>
- Пантелеев И. А., Борняков С. А., Вишнев А. Н., Каримова А. А. Экспериментальное исследование особенностей подготовки и реализации подвижки по модельному разлому в упруговязкопластической модели литосферы // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 23–37. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_23
- Ben-David O., Rubinstein S. M., Fineberg J. Slip-stick and the evolution of frictional strength // Nature. 2010. Vol. 463. P. 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature08676>
- Bogomolov L. M., Il'ichev P. V., Sychev V. N., Zakupin A. S., Novikov V. A., Okunev V. I. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. Vol. 47 (1). P. 65–72. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-3259>
- Borniyakov S. A., Tarasova A. A., Panteleev I. A. Dynamics of intrafault deformation waves: results of physical simulation // Doklady Earth Sciences. 2016a. Vol. 471 (2). P. 1316–1318. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16120175>

Bornyakov S.A., Panteleev I.A., Tarasova A.A. Discrete deformation wave dynamics in shear zones: physical modelling results // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016b. Vol. 7 (2). P. 289–302. <https://doi.org/10.5800/GT2016-7-2-0207>.

Borovskii B.V., Zakupin A.S., Mubassarova V.A., Bogomolov L.M. On the stimulation of acoustic emission in rock samples by electromagnetic fields // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011. Vol. 47 (10). P. 926–936. <https://doi.org/10.1134/S1069351311100028>

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Vol. 153. P. 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>

Cheremnykh A.V. Active stress field in the Baikal rift zone: laboratory modeling // *Russian Geology and Geophysics*. 2005. Vol. 46 (10). P. 1071–1080.

Goncharov M.A., Rogozhin E.A., Frolova N.S., Rozhin P.N., Zakharov V.S. Riedel megashears R' and the trend to gravitational equilibrium as main factors of tsunamigenic earthquakes // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5 (4). P. 939–991. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0164>

Kartseva T.I., Smirnov V.B., Patonin A.V., Sergeev D.S., Shikhova N.M., Ponomarev A.V., Stroganova S.M., Mikhailov V.O. Initiation of Rock Fracture by Fluids of Different Viscosities // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. Vol. 58 (4). P. 576–590. <https://doi.org/10.1134/s106935132204005x>

Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014a. Vol. 5 (4). P. 863–891. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>

Kocharyan G.G., Markov V.K., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. Mesomechanics of shear resistance along a filled crack // *Physical Mesomechanics*. 2014b. Vol. 17 (2). P. 123–133. <https://doi.org/10.1134/S1029959914020040>

Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1998. Vol. 26. P. 643–696. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.643>

Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A., Naimark O.B. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5 (4). P. 919–938. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0163>

Novikov V.A., Okunev V.I., Klyuchkin V.N., Liu J., Ruzhin Y.Y., Shen X. Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models // *Earthquake Science*. 2017. Vol. 30 (4). P. 167–172. <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0181-8>

Sherman S.I., Cheremnykh A.V., Miroshnichenko A.I. New data on stress field structure in the Baikal rift system: Modeling Results // *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 401 (2). P. 249–252.

Sobolev G. A., Ponomarev A.V. Dynamics of fluid-triggered fracturing in the models of a geological medium // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011. Vol. 47 (10). P. 902–918. <https://doi.org/10.1134/S1069351311100119>

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Koltsov V.B., Smirnov V.B. Simulation of triggered earthquakes in the laboratory // *Pure and Applied Geophysics*. 1996. Vol. 147 (2). P. 345–355. <https://doi.org/10.1007/bf00877487>

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Maibuk Y.Y., Zakrzhevskaya N.A., Ponyatovskaya V.I., Sobolev D.G., Khromov A.A., Tsyvinskaya Y.V. The dynamics of the acoustic emission with water initiation // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. Vol. 46 (2). P. 136–153. <https://doi.org/10.1134/S1069351310020035>

Zakupin A.S., Avagimov A.A., Bogomolov L.M. Responses of acoustic emission in geomaterials to the action of electric pulses under various values of the compressive load // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42 (10). P. 830–837. <https://doi.org/10.1134/S1069351306100077>

Zeigarnik V.A., Novikov V.A., Bogomolov L.M. Electromagnetic Earthquake Triggering: Field Observations, Laboratory Experiments, and Physical Mechanisms-A Review // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. Vol. 58 (1). P. 30–58. <https://doi.org/10.1134/S1069351322010104>

SPATIAL-TEMPORAL REGULARITIES OF ACOUSTIC RESPONSE OF MODEL EXTENDED FAULT TO FLUID AND ELECTRICAL EFFECTS

© 2024 г. **I. A. Panteleev^{1,*}, V. A. Novikov^{2,3}, V. I. Okunev²**

¹Institute of Continuous Media Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: pia@icmm.ru*

This paper presents the results of experiments to reproduce the stick-slip process along a model fault and to induce fault edge movement by fluid and electrical effects. A special feature of the experimental setup used is an extended movable block, which allows to significantly increase the area of the interblock contact filled with dry fine-grained sand. This makes it possible to study the spatial pattern of the development of active deformation zones of the contact zone by solving the problem of locating acoustic emission sources. Particular attention has been paid to the study of the response of the contact zone to the injection of water into it and to the direct application of electric current. As a result of the experimental studies, spatio-temporal patterns of the response of the model fault to an increase in shear load and fluid and electrical effects have been determined. It is shown that the effect of electric current causes an increase in acoustic emission activity throughout the area between the electrodes, except for the emission activation area at the water injection stage. It was found that the electrical action can lead to the initiation of dynamic motion with the activation of spatial areas manifested in previous action stages.

Keywords: physical modeling, slider model, acoustic emission, signal location, trigger effects.