

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Потанина Мария Георгиевна

**Особенности флюидной инициации сейсмических роев
(по натурным и лабораторным данным)**

1.6.9 Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре физики Земли физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: ***Смирнов Владимир Борисович,***
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Шебалин Петр Николаевич
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, директор

Турунтаев Сергей Борисович
доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, и.о. директора

Вознесенский Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля

Защита диссертации состоится «22» апреля 2026 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет, аудитория 5-52.

E-mail: diss.sov.016.3@org.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3823>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

С.В. Колесов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования степень ее разработанности. Диссертация посвящена исследованию особенностей флюидной инициации сейсмических роев. Среди сейсмических роев особый интерес представляют невулканические, возникающие в регионах, не связанных с активными вулканическими системами. В отличие от вулканических роев, обусловленных движением магмы, невулканические проявляются преимущественно во внутриконтинентальных зонах разломов, рифтах и других тектонически активных структурах. При этом физические механизмы их генерации до конца не установлены и остаются предметом научных исследований. В последние десятилетия накоплены убедительные свидетельства того, что существенным триггером невулканических роев является флюид, проникающий в напряжённо-деформированную земную кору (см., например, монографии Gupta, 1992; Wang, Manga, 2010; Адушкин, Турунтаев, 2015). Лабораторное моделирование флюидной инициации землетрясений, проводившееся Г.А. Соболевым, А.В. Пономаревым и В.Б. Смирновым в ИФЗ РАН, продемонстрировало возможность запуска акустической эмиссии при проникновении флюида даже без заметного роста порового давления. Тем не менее, остаются существенные пробелы в понимании физических механизмов флюидной инициации сейсмичности. Большинство работ, посвящённых сейсмическим роям, фокусируются на пространственно-временной миграции и геодинамической интерпретации, но уделяют недостаточное внимание энергетическим характеристикам роев и особенностям их эволюции. В частности, слабо изучены вариации сейсмической активности и наклона графика повторяемости (параметр Гутенберга-Рихтера или более привычное *b-value* в англоязычной литературе) в невулканических роях, хотя именно эти показатели рассматриваются часто как индикаторы напряжённого состояния геосреды. Сопоставление природных сейсмических роев и их лабораторных аналогов способно не только подтвердить флюидную природу невулканических роев, но и позволит дифференцировать физические механизмы их инициации.

В качестве **объектов исследования** выбраны две геологические системы, репрезентативные для различных механизмов флюидной инициации сейсмичности, дополненные лабораторными моделями. Коринфский рифт (Греция) представляет собой типичную внутриконтинентальную рифтовую зону с высокой фоновой сейсмичностью и выраженной ролью флюидов в активизации разломов. Геодинамическая обстановка региона характеризуется интенсивной тектоникой растяжения и миграцией глубинных флюидов, что создает благоприятные условия для изучения естественных процессов флюид-индуцированной

сейсмичности. Район водохранилищ Койна-Варна (Индия) является классическим примером техногенно-индуцированной сейсмичности, где наблюдается четкая корреляция между режимом водохранилища и сейсмической активностью на протяжении более полувека. Этот регион демонстрирует как немедленные, так и отсроченные реакции литосферы на гидрологические нагрузки, что позволяет исследовать долгосрочные эффекты флюидного воздействия. Лабораторные модели нагруженных образцов горных пород с контролируемым внесением флюидов обеспечивают возможность исследования физических механизмов инициации разрушения в изолированных условиях, что дополняет полевые наблюдения и позволяет выявлять фундаментальные закономерности процессов.

Предметом исследования выступают: динамические характеристики сейсмического (и акустического) режима – активность и наклон графика повторяемости; задержки между временем инициации и максимумом активности; миграция сейсмических (акустических) событий.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является прояснение особенностей флюидной инициации сейсмических роев на основе совместного рассмотрения природных невулканических сейсмических роев, инициированных флюидами, и их лабораторных моделей. Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Разработать и адаптировать методику совместного анализа сейсмической активности и наклона графика повторяемости в скользящих временных окнах при строгом контроле полноты (представительности) сейсмических данных, обеспечивающую статистически корректное выявление изменений режима сейсмичности.

2. Исследовать роевую сейсмичность в натуральных условиях на примере серии невулканических роев в Коринфском рифте (Греция).

3. Исследовать наведённую сейсмичность в районе водохранилищ Койна-Варна (Индия).

4. Провести анализ данных лабораторного моделирования сейсмических роев, вызванных флюидным воздействием (путём поверхностного внесения воды, механического повышения порового давления и пропускания электрического тока через насыщенные образцы).

5. Сопоставить результаты натуральных и лабораторных исследований для выявления особенностей флюидной инициации сейсмических роев, выяснения физических механизмов их возникновения и развития.

Научная новизна и значимость работы. Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе к анализу сейсмических и акустических роев. Впервые выполнен последовательный совместный анализ двух параметров сейсмического процесса – активности и наклона графика повторяемости – в скользящих окнах при условии строгого учёта полноты данных для роев Коринфского рифта, области Койна–Варна и их лабораторных моделей. Впервые выявлена двухфазная миграция очагов акустических событий при внесении флюида без создания избыточного давления; определены временные задержки акустической активности относительно инициирующих воздействий. Эти результаты существенно расширяют понимание энергетических и кинематических особенностей флюид-индуцированной роевой сейсмичности.

Методы исследования. В работе применялись общепринятые методы анализа сейсмических каталогов и сигналов акустической эмиссии, а также предложена модифицированная методика оценки наклона графика повторяемости. Использовались статистические критерии для оценки представительности сейсмических данных (минимальной полной магнитуды событий) и обеспечения корректного сравнения параметров сейсмичности в разных условиях. Применялась концепция моделирования переходных режимов сейсмического процесса в лабораторных экспериментах применительно к режимам с флюидной инициацией, разработанная в (Смирнов, Пономарев, 2020).

Положения, выносимые на защиту.

1. Особенностью флюид-иницированных сейсмических роев является противофазное изменение наклона графика повторяемости и сейсмической активности.

2. Степень обводненности среды контролирует величину задержки роевой активности при флюидной инициации разрушения: при большей обводненности меньше задержка.

3. Характерный для сейсмических роев процесс миграции сейсмичности может быть обусловлен как движением флюида в среде, так и саморазвитием процесса разрушения.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается репрезентативностью использованных данных, корректностью методологии. В работе использованы стандартные подходы и проверенные временем методы анализа сейсмических каталогов и сигналов акустической эмиссии. Статистическая значимость выявленных эффектов обоснована: например, по приведенному анализу

на синтетических каталогах, изменения активности и b -value превышают доверительные интервалы. Лабораторные эксперименты проведены в контролируемых условиях с применением современного оборудования и по методикам, принятым в физике разрушения горных пород.

Основные результаты диссертации докладывались на 11 российских и международных конференциях: Научная конференция студентов и аспирантов ИФЗ РАН (2012 г., Москва); 33rd и 36th General Assembly of the European Seismological Commission (ESC) (2012 г., Москва; 2018 г., Мальта); Международная конференция “Ломоносовские чтения” (2014, 2015, 2019, 2024, 2025 гг., Москва); Conference “Seismic Sources and Prediction, X General Assembly of the Asian Seismological Commission (ASC)” (2014 г., Филиппины); XXVI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (2015 г., Прага); Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (2019 г., 2025 г., Москва). Материалы диссертации также обсуждались на заседаниях кафедры физики Земли физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (с 2011 г. - 2026 г.).

Основные идеи и положения диссертационной работы изложены в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Личный вклад автора. Все приведённые в диссертации результаты являются оригинальными и получены самим автором либо при его непосредственном участии. Автором проведён детальный анализ сейсмических роев в Коринфском рифте (Греция) и в районе водохранилищ Койна–Варна (Индия), а также анализ данных об акустической эмиссии в лабораторных экспериментах. Автор самостоятельно выполнила вычисление представительной магнитуды с использованием специализированного программного обеспечения, для остальных расчётов разработала собственные программные коды. В проведении лабораторных исследований автор участвовала на стадиях планирования экспериментов и анализа данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. В работе приведён обзор современного состояния проблемы флюидной инициации сейсмичности (Глава 1). Описаны применяемые методы расчёта статистических параметров сейсмичности (Глава 2). Представлены результаты анализа двух ключевых примеров флюидной инициации сейсмичности – роев землетрясений в Коринфском рифте и наведённой

сейсмичности в районе водохранилищ Койна–Варна (Глава 3). Глава 4 посвящена результатам серии лабораторных экспериментов по моделированию флюида-индуцированных роев. В заключении приведено сопоставление полученных результатов, их обсуждение, сформулированы выводы и намечены перспективы исследований.

Общий объём работы составляет **142 страницы**, включая **6 таблиц** и **50 рисунков**. Список литературы содержит **221** наименование.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я глубоко признательна научному руководителю д.ф.-м.н. В.Б. Смирнову за наставничество во время обучения, постановку интересных и сложных задач, за всецелую помощь в работе, ценные замечания и увлекательные плодотворные дискуссии, за вдохновение, поддержку и настойчивость, которые помогали мне преодолевать все трудности и верить в мои силы. Большое спасибо д.ф.-м.н. А.В. Пономареву за возможность участвовать в лабораторных экспериментах, интересных научных проектах, командировках и конференциях, за всецелую поддержку, дружеское участие и мудрые советы. Благодарю к.т.н. А.В. Патонина (ГО «Борок» ИФЗ РАН) за проведение на высочайшем современном уровне уникальных лабораторных экспериментов. Сердечно благодарю коллег по кафедре физики Земли физического факультета МГУ за поддержку и доброжелательную плодотворную атмосферу. Особенно признательна Т.А. Версан за искреннее общение и всестороннюю помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Роль флюида в инициации землетрясений. Эта глава представляет обзор литературы и теоретические основы проблемы флюид-индуцированной сейсмичности. *В разделе 1.1* рассмотрены исследования, показывающие, что естественные гидрологические процессы (атмосферные осадки, сезонные колебания уровня грунтовых вод, снеговая нагрузка) способны модулировать сейсмическую активность (Смирнов, Пономарев, 2020; Shebalin et al., 2020). Основным механизмом влияния флюида считается изменение порового давления: его рост снижает эффективную прочность породы, приближая её к разрушению. Кроме чисто механического воздействия, флюиды взаимодействуют с горными породами и физико-химически: адсорбция молекул воды на поверхности трещин изменяет поверхностную энергию вблизи вершин трещин и способствует их росту (Ребиндер, Щукин, 1972). Наблюдаемая в природных роях миграция

сейсмической активности также связывается с диффузией флюида в трещинных зонах разломов (Кузьмин, 2023).

В разделе 1.2 освещается сейсмичность, связанная с наполнением крупных водохранилищ. Известно, что заполнение водохранилищ может вызывать индуцированную сейсмичность даже в тектонически стабильных областях (Gupta, 1992). Механизмы включают пороупругую реакцию: нагрузка водной массы увеличивает как напряжения в горных породах, так и поровое давление (Bell, Nur, 1978). Остаётся дискуссионным вопрос о времени возникновения роев относительно цикла наполнения водохранилищ – немедленно или с задержкой.

Раздел 1.3 посвящён инициированию сейсмичности при закачке жидкости в глубокие скважины: такое техногенное воздействие провоцирует землетрясения за счёт повышения порового давления в очаговой зоне, что неоднократно подтверждалось сейсмическим мониторингом (Смирнов, Пономарев, 2020; Wang, Manga, 2010; Адушкин, Турунтаев, 2015; Vorobieva et al., 2020).

В разделе 1.4 вводится понятие «сейсмический рой». Сейсмический рой определяется как скопление землетрясений без выделяющегося главного события, возникающее как в вулканических, так и в невулканических зонах. Если вулканические рои обычно связаны с движением магмы, то природа невулканических роев до конца не ясна; в качестве одного из возможных факторов рассматривается проникновение флюидов (Bougeois, Cornet, 2009). При этом энергетические характеристики невулканических роев остаются малоизученными.

В разделе 1.5 приведён обзор лабораторного моделирования сейсмического режима. Эксперименты с акустической эмиссией дают возможность физического моделирования сейсмической активности, инициируемой флюидами (Соболев, Пономарев, 2011; Смирнов, Пономарев, 2020) и температурными воздействиями [Шкуратник и др., 2015].

По итогам главы 1 сформулированы основные выводы:

1. Флюиды влияют на сейсмичность по крайней мере тремя механизмами: внешнее нагрузочное воздействие (например, снеговой покров, вода в водохранилищах), изменение порового давления (закачка или откачка флюида, диффузия), а также физико-химическое действие (например, эффект Ребиндера).

2. Индуцированная сейсмичность, вероятно, проявляется в форме роев, особенно в неоднородной среде; данная гипотеза требует дальнейших исследований.

3. Лабораторные эксперименты подтверждают роль флюидов в инициации разрушения горных пород, однако необходимо проведение дополнительных опытов с варьированием условий и параметров.

4. Энергетические характеристики невулканических сейсмических роев остаются недостаточно изученными и требуют особого внимания в дальнейших работах.

Глава 2. Методы оценки характеристик сейсмического и акустического режимов. Описаны методические подходы, использованные для анализа данных. **В разделе 2.1** изложен применяемый в работе стандартный метод определения представительной магнитуды, то есть минимальной магнитуды, начиная с которой каталог землетрясений можно считать полным по составу событий.

В разделе 2.2 представлена модифицированная методика расчёта наклона графика повторяемости (*b-value*). Отмечено, что стандартная оценка методом максимального правдоподобия для не группированной выборки, цензурированной снизу по представительной магнитуде M_0 ($b = \frac{1}{\bar{M} - M_0} \cdot \frac{1}{\ln 10}$, где b - *b-value*, \bar{M} — среднее значение магнитуды в выборке) оказывается смещённой, если применять её к нестационарному сейсмическому режиму, используя временные окна фиксированной длительности. При неизменном наклоне графика повторяемости (т.е. истинном *b-value*) более высокая активность приводит к включению в выборку более сильных событий, что увеличивает среднюю магнитуду и, соответственно, занижает оценку *b-value*, создавая ложную обратную зависимость активности и *b-value*. Для устранения этого эффекта в работе использована оценка максимального правдоподобия для дважды цензурированного экспоненциального распределения α (ссылка А.1)¹:

$$p = \frac{\alpha e^{\alpha X_1}}{1 - e^{-\alpha(X_2 - X_1)}} e^{-\alpha x}, \quad x \in [X_1, X_2], \text{ где } X_1 \text{ и } X_2 \text{ — границы цензурирования;}$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\Delta X}{e^{\alpha \Delta X} - 1}, \text{ где } \Delta X = X_2 - X_1 \text{ и } \alpha_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - X_1; b = \frac{\alpha}{\ln 10}$$

Предложено интерпретировать стандартную оценку *b-value* как верхнюю границу, а модифицированную – как нижнюю границу истинного значения, что позволяет корректно проследить динамику *b-value*.

В разделе 2.3 описаны методы вычисления параметров сейсмического режима. Расчёт осуществляется в скользящих окнах (выборках размера N), при этом все параметры определяются совместно — в одних и тех же выборках. Такой подход обеспечивает согласованность оцениваемых параметров и

¹ Здесь и далее ссылками в форме (А.1), (А.2) и т.д. обозначены публикации автора по теме диссертации, список которых приведен в конце автореферата.

позволяет выявлять динамические особенности развития роевой последовательности на единой временной основе. Активность рассчитывается как $A = \frac{N}{dt}$, число событий, произошедших за интервал времени dt ; фрактальная размерность d оценивается через корреляционный интеграл $C(r) \sim r^d$ ($C(r) = \frac{n(\Delta r \leq r)}{N_0}$, $n(\Delta r \leq r)$ — количество пар событий в выборке, расстояние между которыми не превосходит r , N_0 — общее число возможных пар событий); пространственный размер роя L определяется через радиус гирации R_g как $L = 4R_g$,

$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2 + (z_i - Z_0)^2]}$, (x_i, y_i, z_i) — координаты гипоцентра i -го землетрясения роя из выборки, (X_0, Y_0, Z_0) — координаты барицентра, рассчитываемые как средние арифметические по всем событиям роя.

В разделе 2.4 рассмотрены подходы к анализу временной реакции геосреды на флюидное воздействие. Для выделения сезонной компоненты наведённой сейсмичности строятся гистограммы числа землетрясений по месяцам года с последующим усреднением по многолетнему периоду. Задержка отклика рассчитывается как интервал между началом триггерного воздействия и временем максимума сейсмической (или акустической) активности.

Глава 3. Флюидная инициация роев землетрясений (натурные данные), построенная на результатах, опубликованных автором в статьях (А.1, А.2, А.5, А.6, А.9). В этой главе представлен анализ полевых данных по двум регионам: невулканическим сейсмическим роям в Западном Коринфском рифте (Греция) и сезонной индуцированной сейсмичности в районе водохранилищ Койна–Варна (Индия). **Раздел 3.1** посвящён роевым землетрясениям Коринфского рифта (А.1). Описан регион исследования и исходные данные: использован каталог Коринфской рифтовой лаборатории (CRL) за 2000–2006 гг., включающий 34 122 события. Проведён первичный анализ каталога: для последующих исследований отобраны события с $M \geq 1.4$; погрешность локации гипоцентров (~ 1 – 2 км) оценена по методу корреляционного интеграла. Выделены два роя: рой 2001 г. и рой 2003–2004 гг. Второй рой (2003–2004) характеризуется монотонной миграцией гипоцентров во времени. В заключительной части раздела приведены оценки статистических параметров выделенных роев (рис. 1).

Установлено противофазное изменение наклона графика повторяемости (b -value), параметра цикла разрушения q и пространственного размера роя L , при одновременном синфазном изменении фрактальной размерности по мере развития роев.

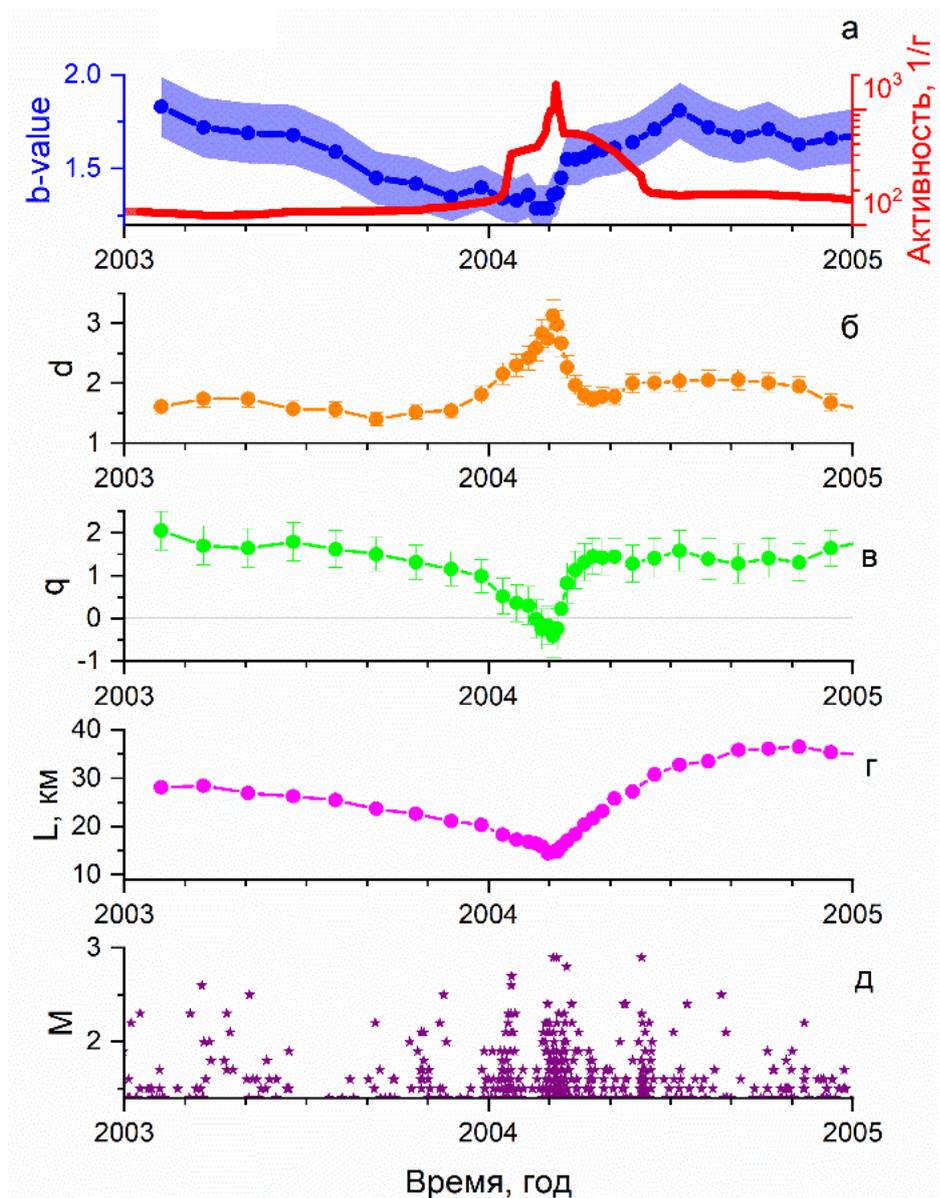


Рис. 1. Вариации во времени параметров сейсмичности роя 2003-2004 гг (А.1).

Раздел 3.2 посвящён исследованию сезонной наведённой сейсмичности в районе водохранилищ Койна–Варна (Индия) (А.2, А.5, А.6, А.9). Этот регион является классическим примером индуцированной сейсмичности, связанной с заполнением водохранилищ (Gupta, 2002). Для анализа использован региональный каталог землетрясений (1964–2015 гг., 6996 событий). Выявлены сезонные вариации сейсмической активности, синхронные с годовым циклом уровня воды в водоёмах. Выделение сезонных компонент осуществлялось усреднением помесечных данных за весь период наблюдений. На рис. 2 показано распределение числа землетрясений по месяцам года; серым цветом для каждого месяца обозначен средний уровень воды.

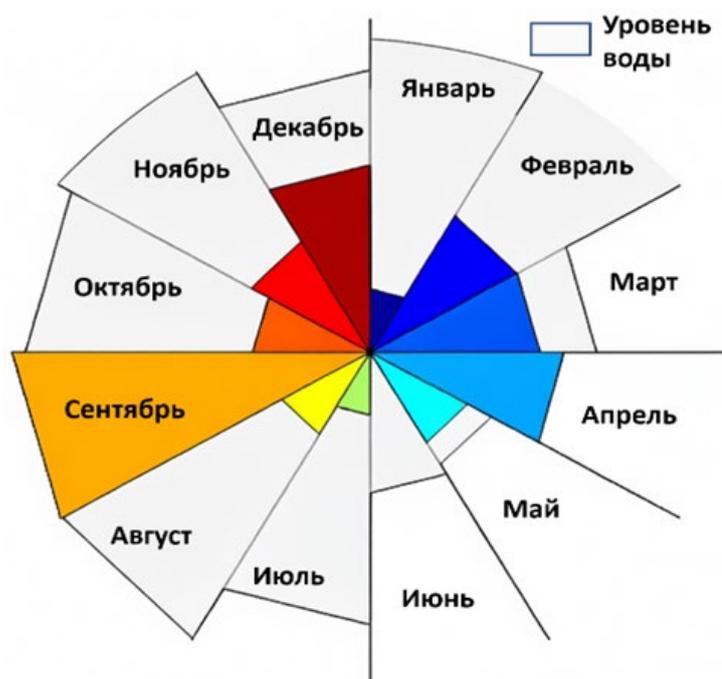


Рис. 2 Диаграмма распределения количества землетрясений по месяцам года за весь исследуемый интервал времени, серым цветом показан уровень воды в каждом месяце (в сентябре максимальный уровень воды).

Выявлено наличие трёх пиков сейсмичности, соответствующих разным фазам гидрологического цикла. Осенний (сентябрьский) пик совпадает с максимальным уровнем воды в водохранилищах и объясняется мгновенной дополнительной нагрузкой на кору. Весенний (февральский–апрельский) пик отстаёт от максимума уровня воды на 5–7 месяцев; он связан с диффузией повышенного порового давления в глубину разломов (Pandey, Chadha, 2003). Зимний (ноябрьский–декабрьский) пик появился после 2005 г. и, вероятно, обусловлен разгрузкой напряжений при понижении уровня воды. Временное и пространственное распределение сезонных сейсмических событий показало, что «осенние» рои локализуются ближе к водохранилищам, тогда как «весенние» – в более удалённых зонах к югу, что подтверждает диффузионную природу задержанного отклика. В заключительной части раздела проведена количественная оценка годовых вариаций сейсмической активности и *b-value* по 33-летнему каталогу событий $M \geq 3.0$ методом накопления эпох; для проверки значимости использован метод статистического моделирования на синтетическом каталоге (рис. 3) (А.9). На основе 3000 сгенерированных синтетических каталогов показано, что наблюдаемое снижение *b-value* в определённые фазы года статистически значимо. Установлено, что в периоды осеннего и весеннего пиков значение *b-value* уменьшается одновременно с ростом сейсмической активности.

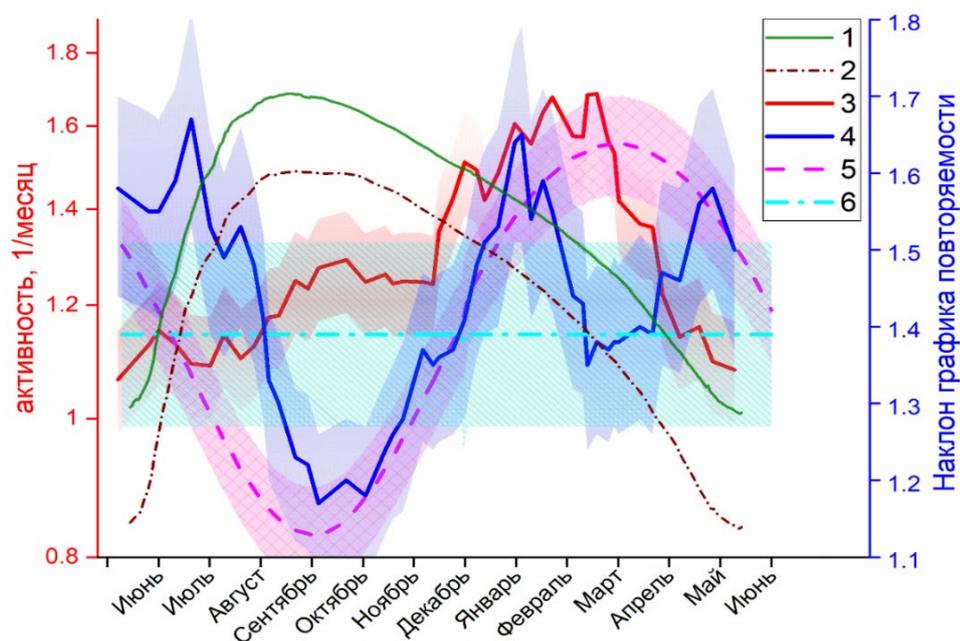


Рис. 3. Оценки активности и наклона графика повторяемости в годовом цикле. Уровень воды в водохранилищах: 1 – Койна, 2 – Варна. Активность по данным сейсмического (3) и случайного синтетического (5) каталога. Наклон графика повторяемости по данным сейсмического (4) и случайного синтетического (6) каталога (А.9).

Таким образом, в районе водохранилищ Койна–Варна реализуются два типа флюидной инициации: немедленный (за счёт прямого нагрузочного воздействия) и задержанный (за счёт диффузии порового давления). Их относительный вклад со временем изменяется: до 1993 г. доминировал осенний (немедленный) отклик, а после заполнения водохранилища Варна значительно усилился весенний (задержанный) отклик.

На основе анализа обоих регионов (Коринфского рифта и Койна–Варна) получены обобщающие результаты.

1. Эволюция параметров сейсмичности как в естественных (Коринфский рифт), так и в техногенных (Койна-Варна) роях демонстрирует качественную общность сценариев развития разрушения. Снижение b -value, увеличение фрактальной размерности d гипоцентров и переход комплексного параметра $q = 2b - d$ в отрицательную область на стадии активизации роя соответствует стадии лавинообразного развития микротрещин по модели ЛНТ (Соболев, 2019).

Это свидетельствует о том, что флюиды выступают как триггерный фактор, инициирующий стандартный сценарий лавинообразного развития трещин в среде, находящейся в напряженном состоянии.

2. Как в Коринфском рифте миграция сейсмичности в рое 2003–2004 годов, локализованном под заливом, так и миграция сейсмичности в районе

водохранилища Койна-Варна по разлому землетрясения 1962 г., указывает на распространение фронта порового давления вдоль разломной системы.

3. В районе Койна-Варна динамика сезонных компонент активности демонстрирует эволюцию от немедленного отклика на гидрологическую нагрузку к задержанному механизму, обусловленному диффузией порового давления вглубь земной коры.

4. Двойственная роль флюидов в инициации землетрясений: с одной стороны, они вызывают землетрясения, снижая порог инициации разрушения за счёт снижения эффективных напряжений, с другой стороны, ограничивают масштаб разрушений за счёт диссипации энергии и предотвращения накопления больших критических напряжений.

Глава 4. Параметры акустического режима в лабораторных экспериментах по моделированию флюидной инициации роев (построенная на результатах (А.3, А.4, А.7, А.8)). В лабораторных условиях воспроизведены разные варианты инициирования акустической активности в образцах горных пород, сопровождаемые регистрацией сигналов акустической эмиссии (аналога сейсмических событий в масштабе образца). Эксперименты различались по способу воздействия (увлажнение, нагнетание жидкости под давлением, пропускание электрического тока), материалу и состоянию образцов (сухие или насыщенные водой, нагруженные механически или разгруженные). В главе 4 приведена сводная таб. 1.

Таблица 1. Сводка лабораторных экспериментов, проанализированных в 4 главе работы.

№	Тип воздействия	Состояние образца	Материал
1	Однократное внесение воды на сухую поверхность (без давления)	Сухой, предварительно нагруженный до метастабильного состоя	Бетон с ослабленной внутренней зоной
2	Повторные (3 раза) заливы воды на ту же поверхность	Сначала сухой, затем насыщенный, нагруженный	Бетон с ослабленной внутренней зоной
3	Ступенчатое нагнетание воды под давлением (1–2.6 МПа)	Сначала сухой, затем насыщенный, нагруженный	Гранит (пористость ~0.2%)
4 5	Ступенчатое нагнетание воды под давлением (1–2.6 МПа)	Сначала сухой, затем насыщенный, нагруженный	Гранит (пористость ~1%), с макротрещинами (открытыми и закрытыми)
6	Ступенчатое нагнетание воды под давлением (1–2.6 МПа)	Сначала сухой, затем насыщенный, нагруженный	Песчаник Буффало (пористость 15–20%)

№	Тип воздействия	Состояние образца	Материал
7	Импульсное воздействие постоянным/переменным током (60–1500 В, 100–600 с.)	насыщенный, нагруженный	Песчаник Береа (насыщен 0.06 н. NaCl, 35–55% порового пространства)
8	Бесконтактное электростатическое поле (без тока)	Сухой / насыщенный, нагруженный	Песчаник Береа
9	Длительное непрерывное нагревание током (1.25 ч., 2–5 Вт)	насыщенный, нагруженный	Песчаник Береа
10	Импульсное воздействие током	насыщенный, ненагруженный	Песчаник Береа
11	Импульсное воздействие током (ступенчатое и треугольное)	насыщенный, ненагруженный	Бетон
12			

Раздел 4.1 посвящен экспериментам № 1–2 из таб. 1 (А.3), моделирующим флюидную инициацию разрушения при поверхностном увлажнении образца (аналог инфильтрации атмосферных осадков или первичного заполнения водохранилища). Были использованы призматические образцы бетона с ослабленной внутренней зоной, подвергнутые ступенчатому одноосному нагружению при горизонтальном сжатии. Вода вносилась на свободную поверхность образца без давления, имитируя сезонное промокание горных пород в природе (рис. 4).

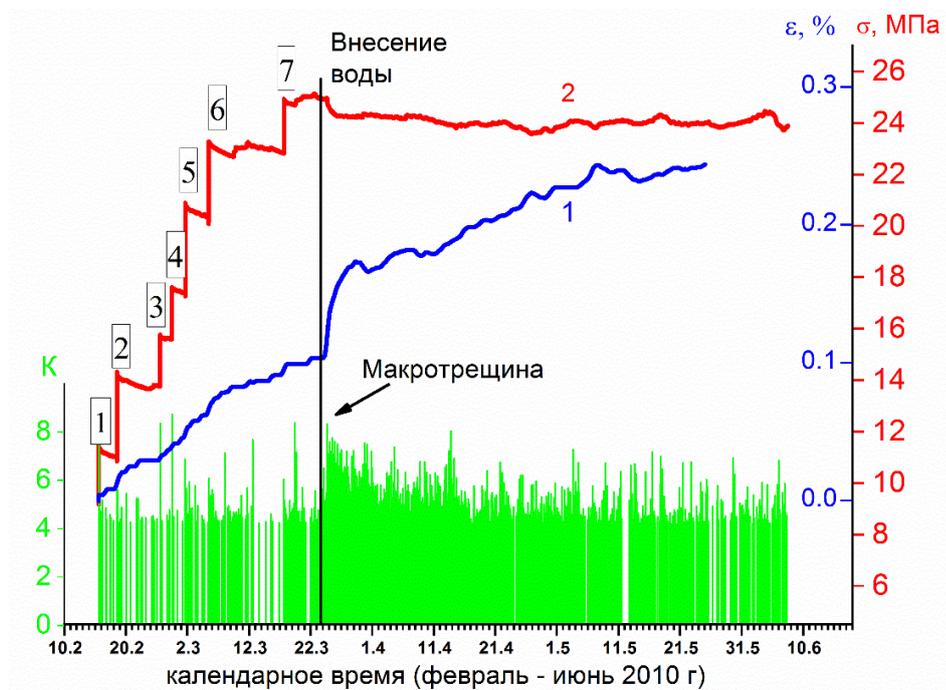
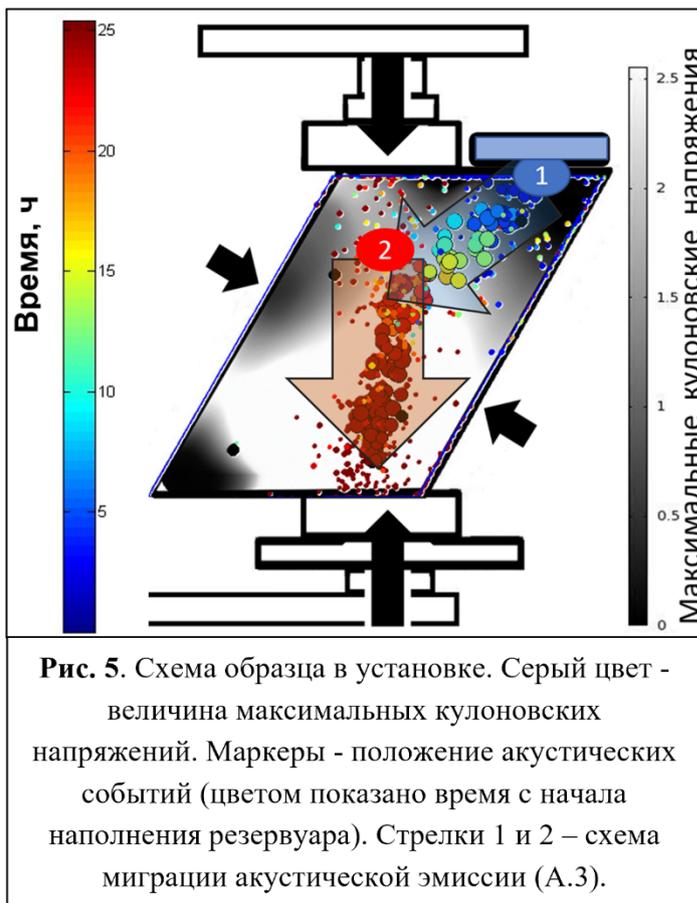


Рис. 4. История нагружения: продольная деформация (1) и усилие (2), приложенное на площадках пуансонов и энергетические классы (А.3).



Сразу после добавления воды фиксировался акустический рой, а спустя ≈ 25 ч. образовалась сквозная макротрещина, видимая на боковой поверхности.

Установлено, что очаги акустической эмиссии мигрируют в две фазы. Первая фаза (первые ~ 12 ч.) – медленное распространение зоны активности от увлажнённой границы к центру образца со скоростью, сопоставимой со скоростью диффузии воды ($D \sim 3\text{--}4 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$).

Вторая фаза ($\approx 12\text{--}25$ ч.) – ускоренная миграция активности вдоль оси нагрузки в зоне максимальных кулоновских напряжений, завершившаяся образованием макротрещины (рис. 5, (А.3).

Динамика акустической эмиссии характеризовалась противофазным изменением активности и *b-value*: рост числа событий сопровождался снижением *b-value*, что указывает на лавинообразный характер разрушения (рис. 6, (А.3).

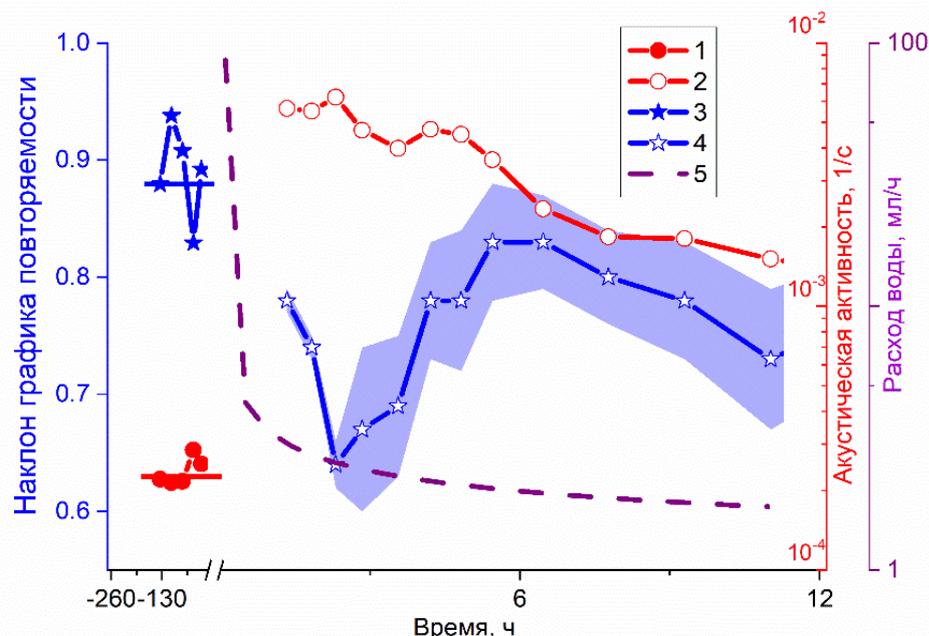


Рис. 6. Акустическая активность (1,2) и наклон графика повторяемости (3 и 4) до и после внесения воды в образец. 5 – расход воды (А.3).

В эксперименте № 2 на той же установке вода вводилась повторно в уже увлажнённый образец (три последовательных залива). При повторных увлажнениях задержка между началом заливки и пиком акустической активности возрастала от 13 ч. (первый залив) до 27 ч. (третий залив). Одновременно увеличивалась интенсивность акустической эмиссии и более выраженным становилось снижение b -value к моменту пика активности. Во всех случаях фиксировалась противофазная динамика: минимум b -value совпадал с максимумом активности, что соответствует концепции лавинно-неустойчивого трещинообразования и подтверждает триггерную роль флюида.

Полученные результаты демонстрируют, что флюидная инициация сейсмической активности возможна даже без роста порового давления – за счёт диффузионного проникновения воды и локального ослабления материала. Наблюдаемые закономерности (временная задержка активности, миграция источников, снижение b -value) качественно соответствуют характеристикам природных невулканических роев. Тем самым, лабораторная модель воспроизводит ключевые аспекты физики флюид-индуцированной сейсмичности.

Раздел 4.2 посвящён экспериментам № 3-6 из таб. 1 (А.8), моделирующим процессы повышения порового давления (аналог закачки жидкости в скважины или повышения уровня воды в водохранилище). В этих опытах флюид нагнетался под давлением сначала в сухие, а затем и насыщенные образцы пород с различной пористостью и проницаемостью. Поровое давление увеличивали ступенчато (дискретными порциями) или линейно; при каждом повышении давления регистрировалась серия акустических событий («акустический рой») с определённой задержкой относительно момента приложения нагрузки

Сопоставление измеренных задержек времени пиков акустической эмиссии на «сухих» ступенях давления с характерным временем насыщения порового пространства показало, что для трёх из четырёх образцов задержка отклика акустической эмиссии приблизительно совпадает с расчётным временем обводнения образца. При многократных воздействиях проявлялась кумулятивная активизация: во второй и третьей фазах число событий акустической эмиссии возрастало в 2–3 раза, а время задержки уменьшалось. В сухом образце вода сначала вытесняет воздух из пор, преодолевая капиллярное сопротивление, поэтому процесс продвижения флюида замедлен и приводит к длительной задержке отклика. В насыщенном образце, где поры уже заполнены несжимаемой жидкостью, любое дополнительное поступление объёма вызывает более быстрый рост порового давления – задержка сейсмического отклика сокращается в 3–10 раз. Таким образом, степень насыщения породы контролирует

эффективность передачи порового давления и, следовательно, временные характеристики инициации разрушения. По данным акустической эмиссии рассчитаны изменения *b-value*. Обнаружено характерное противофазное поведение *b-value* и акустической активности, аналогичное наблюдавшемуся в первой серии опытов.

Полученные лабораторные результаты свидетельствуют, что в и природных условиях триггерная сейсмичность, обусловленная флюидами, может проявляться с различной задержкой после начала воздействия – особенно если породы изначально мало насыщены. В существенно обводнённых средах отклик будет значительно более быстрым. Кроме того, возможна реализация одновременно обоих типов отклика – немедленного и задержанного – что как раз и наблюдается в наведённой сейсмичности района Койна–Варна.

Раздел 4.3 посвящён экспериментам № 7–12 из таб. 1 (А.4, А.7) по пропусканию электрического тока через насыщенные проводящим раствором образцы песчаника, которые моделируют термически опосредованную флюидную инициацию, характерную для геотермальных областей (например, гейзерных систем). При пропускании тока поровый флюид в образце нагревался за счёт джоулева тепла. Даже при сравнительно небольшой мощности (1–5 Вт) и длительности импульса 100–600 с. наблюдалось резкое усиление акустической эмиссии (в 10–30 раз), сопровождавшееся ростом радиальной деформации образца и увеличением осевых напряжений (рис. 7).

Рост акустической эмиссии согласуется с гипотезой о расклинивающем воздействии расширяющегося при нагреве флюида. По оценкам, температура поровой жидкости повышалась на 40–70°C, что вызывало её тепловое расширение и рост порового давления до ~29 МПа, при этом энергия иницирующего воздействия (нагрева) на два порядка превышала упругую энергию от внешней механической нагрузки, а вызванное увеличение порового давления сравнимо с максимальными приложенными осевыми напряжениями. Важное отличие данной серии опытов от предыдущих – отсутствие значимых изменений *b-value*. Хотя акустическая активность возростала на порядки, распределение событий акустической эмиссии по энергии оставался практически неизменным. Эффект повышения активности акустической эмиссии был обнаружен как на механически нагруженных образцах (рис. 7), так и в опытах «на столе» – на ненагруженных образцах, что подтверждает термомеханическую природу активации акустической эмиссии.

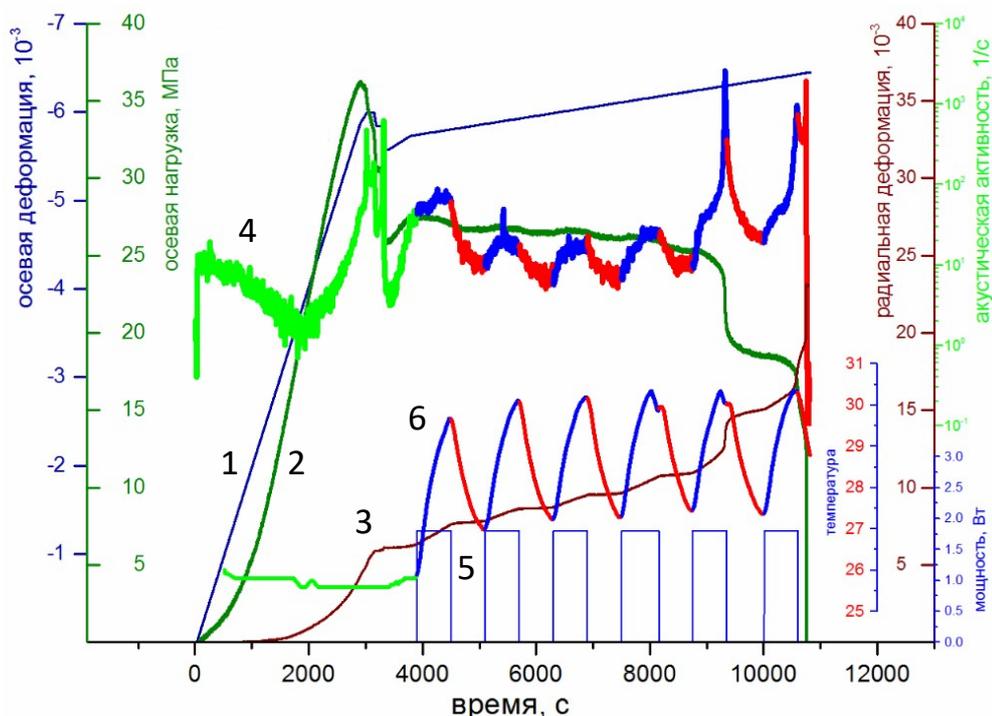


Рис. 7. Пример вариаций скорости акустической эмиссии при воздействии электрическим током. Кривые: 1 – задаваемая осевая деформация; 2 – осевые напряжения; 3 – радиальная деформация; 4 – скорость счета АЭ; 5 – электрическая мощность; 6 – температура на цилиндрической поверхности образца. Синим тоном на кривых отмечены интервалы воздействия электрическим током (А.4)

Полученные данные указывают на возможность термически опосредованной флюидной инициации сейсмичности и в природных условиях – когда локальный нагрев флюида (например, за счёт геотермального теплового потока или экзотермических реакций) способен приводить к росту порового давления и микросейсмической активности.

Анализ трёх серий лабораторных экспериментов показал, что флюидная инициация может реализовываться тремя способами:

1. Диффузионное проникновение флюида без избыточного давления (аналог атмосферных осадков или начального наполнения водохранилища). Характеризуется миграцией очагов, заметной задержкой сейсмической активности и противофазной динамикой b -value и активности.

2. Инжекция или подпор флюида с повышением порового давления (аналог техногенной закачки или подъёма уровня воды в водохранилище). Отличается выраженной зависимостью времени задержки от предварительной насыщенности породы, при сохранении диффузионного контроля процесса. Также, как и первом случае, характеризуется противофазной динамикой b -value и активности.

3. Термическое расширение флюида (аналог геотермальных систем и гейзеров). Проявляется резким усилением сейсмической активности без заметного изменения *b-value* и без пространственной миграции.

Обобщение результатов лабораторного моделирования трёх сценариев флюидной инициации приведено в таб. 2.

Таблица 2. Обобщение результатов лабораторного моделирования трёх сценариев флюидной инициации.

Признак	Серия 1 (диффузия без давления)	Серия 2 (инжекция под давлением)	Серия 3 (нагрев флюида)
Миграция акустической эмиссии	Есть	Есть (в начальных стадиях, до насыщения)	Нет
Задержка активности	Есть, растёт при повторных заливах	Есть, уменьшается при увеличении насыщенности породы флюидом	Минимальная или отсутствует
<i>b-value</i>	Снижается на пике активности	Снижается на пике активности	Значимо не изменяется
Энергия инициации	Слабая, триггерная инициация	Умеренная, триггерная инициация	Высокая, сравнимая с запасенной в образце упругой энергией, вероятно, прямая инициация
Природный аналог	Осадки, первичное заполнение	Закачка, водохранилища	Гейзеры, геотермальные зоны

Лабораторное моделирование не только воспроизвело основные особенности природных роев, но и позволило дифференцировать их по физическому механизму.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приведены итоги выполненного исследования, выводы, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы, а также обобщены основные результаты исследования, обосновывающие положения, выносимые на защиту.

Лабораторное моделирование сейсмических роев позволило выявить факторы, определяющие закономерности их флюидной инициации. Как повышение давления флюида в поровом пространстве образца, так и просто внесение воды на его поверхность инициируют роевые режимы акустической эмиссии, воспроизводящие режимы природных сейсмических роев. Они характеризуются миграцией, задержкой акустического отклика, определяемой степенью

обводненности среды, и устойчивым минимумом наклона графика повторяемости на фазе возрастания акустической активности.

Следующие основные результаты диссертационного исследования обосновывают положения, выносимые на защиту.

1. Невулканические сейсмические рои, инициированные флюидом, демонстрируют противофазную динамику изменения наклона графика повторяемости и сейсмической активности. Такое развитие сейсмических роев аналогично сценариям подготовки очагов сильных землетрясений и соответствует физической модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, что подтверждает гипотезу о триггерной природе флюидной инициации сейсмических роев: флюиды выступают не как непосредственная причина разрушения, а как триггерный фактор, инициирующий стандартный физический сценарий развития трещинообразования в горных породах. Лабораторные исследования подтверждают этот вывод.

Эти результаты обосновывают первое защищаемое положение:

Особенностью флюид-иницированных сейсмических роев является противофазное изменение наклона графика повторяемости и сейсмической активности.

2. При сезонных изменениях гидрологического режима реализуются два режима флюидной инициации сейсмических роев: немедленный – за счёт прямого нагрузочного воздействия и роста порового давления, и задержанный – вследствие диффузионного проникновения флюида в зону очага.

Лабораторное исследование показало, что доминирование того или иного механизма определяется степенью предварительной обводнённости среды. Согласно полученным данным, время задержки между началом флюидного воздействия и максимумом акустической активности определяется степенью насыщенности порового пространства. Для первичного внедрения флюида в сухую породу задержка практически совпадает с характерным временем обводнения порового пространства. В предварительно насыщенном среде задержка сокращается в 3-10 раз, что связано с гораздо более быстрой пороупругой передачей давления флюида.

Эти лабораторные результаты объясняют смену сезонных пиков сейсмичности в районах водохранилищ и подтверждают универсальность флюидного триггерного механизма генерации невулканических сейсмических роев. В природных условиях временная эволюция сезонных компонент наведенной сейсмичности в районе Койна-Варна демонстрирует переход от немедленного к задержанному механизму флюидной инициации под влиянием длительного водонасыщения разломных зон. Данный переход сопровождается пространственной

перестройкой активности (миграцией от северной к южной части района) и качественной трансформацией механизмов очагов от сдвиговых к сбросовым.

Эти результаты обосновывают второе защищаемое положение:

Степень обводненности среды контролирует величину задержки роевой активности при флюидной инициации разрушения: при большей обводненности меньше задержка.

3. Миграция сейсмической/акустической активности является характерным признаком роев, инициированных флюидом. В экспериментальной серии с диффузионным проникновением воды в сухой образец (без роста порового давления) наблюдалась двухстадийная миграция очагов акустической эмиссии. Вначале, при обводнении образцов, активность источников последовательно распространялась от точки увлажнения к центру образца с относительно небольшой скоростью, определяемой скоростью диффузии воды. Затем, при достижении фронта флюида области с максимальными напряжениями вдоль оси образца, миграция происходила с высокой скоростью, отвечающей лавинному развитию процесса разрушения.

В динамике наведенной сейсмичности в области Койна-Варна также отмечались две стадии миграции сейсмической активности: связанные с диффузией флюида и более быстрой миграцией вдоль образовавшегося разлома.

При чисто термической инициации (нагрев флюида) во всем объеме образца миграция не проявлялась. Это отличие открывает возможности для диагностирования природы роев по наличию или отсутствию миграции активности.

Эти результаты обосновывают третье защищаемое положение:

Характерный для сейсмических роев процесс миграции сейсмичности может быть обусловлен как движением флюида в среде, так и саморазвитием процесса разрушения.

Список опубликованных работ по теме диссертации

А.1. *Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П.* Особенности развития сейсмической роевой активности в Коринфском рифте в 2000-2005 гг. // Физика Земли. – 2011. – № 7. – С. 54-66. – EDN: NXQHND (1.50 п.л., импакт-фактор 1.412 (РИНЦ), вклад автора: анализ литературы, обработка и подготовка данных, написание программного кода, проведение расчётов, построение графиков, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка текста публикации).

Переводная версия: *Potanina M.G., Smirnov V.B., Bernard P.* Patterns of seismic swarm activity in the Corinth rift in 2000-2005 //

Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2011. – Vol. 47, No. 7. – С. 610-622. – EDN: OHWGFF (1.50 п.л., импакт-фактор 1.310 (РИНЦ)).

А.2. *Smirnov V., Ponomarev A., Potanina M., Chadha R.K., Srinagesh D.* Triggered and tectonic driven earthquakes in the Koyna-Warna region, Western India // Journal of Seismology. – 2014. – Vol. 18, No. 3. – С. 587-603. – EDN: UGINNJ (1.96 п.л., импакт-фактор 0.530 (SJR), вклад автора: написание программного кода, проведение части расчётов, построение части графиков, участие в формулировании выводов и подготовке текста публикации).

А.3. **Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Любушин А.А., Шозиёев Ш.П.** Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования // Физика Земли. – 2015. – № 2. – С. 126-138. – EDN: TJFEWF (1.50 п.л., импакт-фактор 1.412 (РИНЦ), вклад автора: анализ литературы, обработка и подготовка данных, написание программного кода, проведение расчётов, построение графиков, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка текста публикации).

Переводная версия: **Potanina M.G., Smirnov V.B., Shoziyoev S.P., Ponomarev A.V., Lyubushin A.A., Bernard P.** The pattern of acoustic emission under fluid initiation of failure: laboratory modeling // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2015. – Vol. 51, No. 2. – С. 278-289. – EDN: UFMLGZ (1.39 п.л., импакт-фактор 1.310 (РИНЦ)).

А.4. *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 // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 469. № 1. – С. 97-101. – EDN: UBXPFN (0.58 п.л., импакт-фактор 0.911 (РИНЦ), вклад автора: написание программного кода, проведение расчётов, построение графиков, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка текста публикации).

Переводная версия: *Lapshin V.B., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Stroganova S.M., Potanina M.G., Smirnov V.B.* Initiation of acoustic emission in fluid-saturated sandstone samples // Doklady Earth Sciences. – 2016. – Vol. 469, No. 1. – С. 705-709. – EDN: WVNSRD (0.58 п.л., импакт-фактор 0.863 (РИНЦ)).

А.5. *Смирнов В.Б., Шринагеш Д., Пономарев А.В., Чадда Р., Михайлов В.О., Потанина М.Г., Карташов И.М., Строганова С.М.* Режим сезонных вариаций наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна-Варна, Западная Индия // Физика Земли. – 2017. – № 4. – С. 40-49. – EDN: YTMДНТ (1.16 п.л., импакт-фактор 1.412 (РИНЦ), вклад автора: обработка и подготовка данных, написание программного кода, проведение

расчётов, построение части графиков, анализ результатов, участие в формулировании выводов и подготовке текста публикации).

Переводная версия: *Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Mikhailov V.O., Potanina M.G., Kartashov I.M., Stroganova S.M., Srinagesh D., Chadha R.* The behavior of seasonal variations in induced seismicity in the Koyna–Warna region, Western India // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2017. – Vol. 53, No. 4. – С. 530-539. – EDN: XNWPBI (1.16 п.л., импакт-фактор 1.310 (РИНЦ)).

- А.6. *Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Пономарев А.В., Арора К., Chadha R.K., Srinagesh D., Потанина М.Г.* О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия // *Физика Земли*. – 2018. – № 4. – С. 100-109. – EDN: UWWJZI (1.16 п.л., импакт-фактор 1.412 (РИНЦ), вклад автора: написание программного кода, проведение части расчётов, построение части графиков, участие в анализе результатов, участие в формулировании выводов и подготовке текста публикации).

Переводная версия: *Smirnov V.B., Mikhailov V.O., Ponomarev A.V., Potanina M.G., Arora K., Chadha R.K., Srinagesh D.* On the dynamics of the seasonal components of induced seismicity in the Koyna–Warna region, Western India // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2018. – Vol. 54, No. 4. С. – 632-640. – EDN: YCHLOP (1.04 п.л., импакт-фактор 1.310 (РИНЦ)).

- А.7. *Лапшин В.Б., Смирнов В.Б., Скубачевский А.А., Пономарев А.В., Патонин А.В., Хромов А.А., Потанина М.Г.* Численные и лабораторные эксперименты по разрушению конструкционных материалов под воздействием электромагнитного поля // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия*. – 2018. – № 5. – С. 90-95. – EDN: YXPUHR (0.69 п.л., импакт-фактор 0.169 (РИНЦ), вклад автора: анализ литературы, обработка и подготовка данных, написание программного кода, проведение расчётов и построение графиков для части лабораторного эксперимента, анализ результатов, подготовка текста публикации).

Переводная версия: *Lapshin V.B., Smirnov V.B., Potanina M.G., Skubachevsky A.A., Ponomarev A.V., Chromov A.A., Patonin A.V.* Numerical and laboratory experiments on the destruction of construction materials under the impact of an electromagnetic field // *Moscow University Physics Bulletin*. – 2018. – Vol. 73, No. 5. – С. 558-563. – EDN: CGIYME (0.69 п.л., импакт-фактор 0.428 (РИНЦ)).

- А.8. *Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Исаева А.В., Бондаренко Н.Б., Патонин А.В., Казначеев П.А., Стrogанова С.М., Потанина М.Г., Chadha R.K., Arora K.* Флюидная инициация разрушения в сухих и водонасыщенных

горных породах // Физика Земли. – 2020. – № 6. – С. 86-105. – EDN: NHULHG (2.31 п.л., импакт-фактор 1.412 (РИНЦ), вклад автора: анализ литературы, обработка и подготовка данных, написание программного кода, проведение части расчётов, построение части графиков, анализ результатов).

Переводная версия: *Smirnov V.B., Isaeva A.V., Bondarenko N.B., Potanina M.G., Ponomarev A.V., Patonin A.V., Kaznacheev P.A., Stroganova S.M., Chadha R.K., Arora K.* Fluid initiation of fracture in dry and water saturated rocks // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2020. – Vol. 56, No. 6. – С. 808-826. – EDN: ZYLZDO (2.19 п.л., импакт-фактор 1.310 (РИНЦ)).

А.9. *Смирнов В.Б., Потанина М.Г., Карцева Т.И., Пономарев А.В., Патонин А.В., Михайлов В.О., Сергеев Д.С.* Сезонные вариации наклона графика повторяемости землетрясений в наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия // *Физика Земли*. – 2022. – № 3. – С. 76-91. – EDN: TGHPTV (1.85 п.л., импакт-фактор 1.412 (РИНЦ), вклад автора: анализ литературы, обработка и подготовка данных, написание программного кода, проведение расчётов, построение графиков, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка текста публикации).

Переводная версия: *Smirnov V.B., Potanina M.G., Kartseva T.I., Mikhailov V.O., Sergeev D.S., Ponomarev A.V., Patonin A.V.* Seasonal variations in the *b-value* of the reservoir-triggered seismicity in the Koyna-Warna region, Western India // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2022. – Vol. 58, No. 3. – С. 364-378. – EDN: FFMLHE (1.73 п.л., импакт-фактор 1.310 (РИНЦ)).

Список цитируемых литературных источников:

1. *Gupta H.K.* Reservoir-induced earthquakes. – Amsterdam: Elsevier, 1992.
2. *Wang C.-Y., Manga M.* Earthquakes and water. – Berlin: Springer, 2010. – 225p.
3. *Адушкин В.В., Турунтаев С.Б.* Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. – Москва: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2015. – 364 с.
4. *Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН – 2020. 412 с.
5. *Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Aftershock rate changes at different ocean tide heights // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8. – Article 559624.
6. *Рибиндер П.А., Щукин Е.Д.* Поверхностные явления в твёрдых телах в процессах их деформации и разрушения // *Успехи физических наук*. – 1972. – Т. 108, № 1. – С. 3–42.

7. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 5–65.
8. Bell M.L., Nur A. Strength changes due to reservoir-induced pore pressure and stresses and application to Lake Oroville // J. Geophys. Res.: Solid Earth — 1978. — Vol. 83., № B9. — P. 4469–4485
9. Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Condition of occurrence of large man-made earthquakes in the zone of oil production, Oklahoma // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2020. – Vol. 56, No. 6. – P. 911–919.
10. Быков В.Г., Кузьмин Ю.О. Медленные деформационные волны в геофизике // Физика Земли. – 2024. – № 6. – С. 3–38.
11. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Вознесенский А.С., Винников В.А. Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. — М.: Горная книга, 2015. — 241 с.
12. Bourouis S., Cornet F.H. Microseismic activity and fluid fault interactions: some results from the Corinth Rift Laboratory (CRL). Greece // Geophys. J. Int. 2009. V. 178. P. 561-580.
13. Соболев, Г.А., Пономарев, А.В. Динамика разрушения моделей геосреды при совместном влиянии жидкости // Физика Земли. — 2011. — № 10. — С. 48–63.
14. Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. No 1. С. 166–179.
15. Pandey A.P., Chadha R.K. Surface loading and triggered earthquakes in the Koyna–Warna region, western India // Phys. Earth Planet. Inter. — 2003. — Vol. 139, № 3–4. — P. 207–223.