

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Потаниной Марии Георгиевны на тему: «Особенности флюидной инициации сейсмических роев (по натурным и лабораторным данным)» по специальности 1.6.9. Геофизика

Представленная работа изложена на 142 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 221 источник, содержит 50 рисунков и 6 таблиц.

1. Актуальность темы исследования.

Диссертационное исследование посвящено одной из фундаментальных проблем современной физики Земли – выявлению механизмов инициирования сейсмической активности флюидами. Актуальность темы обусловлена возрастающим интересом к проблеме индуцированной и триггерной сейсмичности в связи с интенсивным освоением недр, созданием крупных гидротехнических сооружений и необходимостью оценки сейсмической опасности в регионах с высокой фоновой активностью. Несмотря на наличие обширного массива наблюдательных данных, физическая природа невулканических сейсмических роев остаётся дискуссионной. В работе предпринята попытка комплексного подхода, сочетающего анализ натуральных каталогов землетрясений (Коринфский рифт, район водохранилищ Койна–Варна) с результатами контролируемых лабораторных экспериментов. Такой подход позволяет преодолеть ограничения, свойственные исключительно полевым исследованиям, и верифицировать гипотезы о роли порового давления, диффузии флюидов и термических эффектов. Тема исследования соответствует паспорту специальности 1.6.9 – Геофизика и отвечает современным приоритетам развития геофизической науки.

2. Анализ содержания работы.

Диссертация имеет чёткую структуру, обеспечивающую логическую последовательность изложения материала от обзора литературы к натурным наблюдениям, лабораторному моделированию и обобщающим выводам. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.6.9 – Геофизика.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования. Чётко изложены положения, выносимые на защиту, и научная новизна.

Глава 1 представляет собой подробный аналитический обзор современного состояния проблемы флюидной инициации сейсмичности. Автор систематизирует данные о влиянии естественных гидрологических процессов, эксплуатации водохранилищ, закачке флюидов в скважины.

Особое внимание уделено классификации сейсмических роев и механизмам их возникновения. Обзор демонстрирует глубокое знание соискателем литературы (221 источник), включая фундаментальные монографии и свежие публикации.

Глава 2 посвящена методологии анализа. Критически важным элементом работы является модификация метода оценки наклона графика повторяемости (b -value). Автор справедливо указывает на артефактную антикорреляцию b -value и активности при использовании стандартной формулы Аки для нестационарных процессов. Предложенный алгоритм учёта цензурирования выборки сверху и снизу повышает достоверность оценок. Также подробно описаны методы оценки фрактальной размерности, параметра цикла разрушения q , анализа сезонных компонент и миграции гипоцентров.

В главе 3 приведены результаты анализа натуральных сейсмических данных, полученных в двух репрезентативных регионах с различными механизмами флюидной инициации сейсмичности. Исследование сейсмических роев в Коринфском рифте (2001 г. и 2003–2004 гг.) выявило различия в эволюции статистических параметров в зависимости от геодинамической обстановки и режима флюидного насыщения. Рой 2001 г., локализованный в материковой части рифта, носил «гибридный» характер с событием $M=4.2$, тогда как рой 2003–2004 гг., расположенный под заливом в зоне длительного насыщения, протекал без аномально сильных толчков. Анализ наведённой сейсмичности в районе водохранилищ Койна–Варна продемонстрировал эволюцию сезонных компонент активности и механизмов очагов во времени: переход от доминирования осеннего (немедленного) пика к преобладанию весеннего (задержанного) пика после длительной эксплуатации водохранилищ. Выявлена устойчивая противофазная динамика активности и b -value на стадиях активизации роев. Этот результат подтверждает первое защищаемое положение, отражающее особенность флюид-иницированных сейсмических роев: противофазное изменение наклона графика повторяемости и сейсмической активности является диагностическим признаком триггерной природы флюидного воздействия.

В главе 4 описана серия лабораторных экспериментов по моделированию флюидной инициации разрушения в контролируемых условиях. Рассмотрены три сценария флюидного воздействия: диффузия воды без давления, нагнетание под давлением и нагрев флюида электрическим током. Эксперименты подтвердили возможность воспроизведения роевого режима акустической эмиссии, качественно соответствующего природным сейсмическим роям. Особенно ценным является выявление зависимости

времени задержки активности от степени водонасыщения образца (сокращение в 3–10 раз при переходе от сухого к насыщенному состоянию) и обнаружение двухфазной миграции источников акустической эмиссии (медленная диффузионная фаза сменяется быстрой напряжённо-контролируемой фазой). Эти результаты подтверждают второе и третье защищаемые положения: степень обводнённости среды влияет на величину задержки роевой активности, а миграция сейсмичности может быть обусловлена как движением флюида в среде, так и саморазвитием процесса разрушения.

В заключении сформулированы основные выводы, которые непосредственно следуют из результатов исследования и обосновывают три положения, выносимые на защиту. Показана универсальность физического сценария лавинно-неустойчивого трещинообразования как в природных, так и в лабораторных условиях. Обосновано, что флюиды выступают как триггерный фактор, инициирующий стандартный сценарий развития трещинообразования в напряжённой среде. Отдельно показано, что в экспериментах с нагревом флюида противофазная динамика b -value и активности не наблюдается, что открывает возможности для дифференцирования термически и механически инициированных роев в природных условиях.

3. Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов.

Научная новизна работы заключается в комплексном сопоставлении натуральных и лабораторных данных с применением единой методологии анализа статистических параметров сейсмического режима. Впервые для роев Коринфского рифта и района Койна–Варна выполнен последовательный совместный анализ активности и b -value в скользящих окнах с контролем полноты данных. Впервые выявлена двухфазная миграция очагов акустических событий при внесении флюида без избыточного давления.

Обоснованность выводов подтверждается репрезентативностью выборок (каталоги землетрясений за длительные периоды, серия лабораторных опытов на различных материалах). Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных статистических методов, проверкой на синтетических каталогах, воспроизводимостью лабораторных экспериментов и соответствием выводов современным физическим представлениям о процессе разрушения.

4. Апробация результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в международные базы данных. Материалы работы докладывались на 11

международных и всероссийских конференциях, включая ассамблеи ESC и IUGG, что свидетельствует о высоком уровне апробации.

5. Замечания и вопросы

Вместе с тем, в ходе изучения диссертации возникли следующие замечания и вопросы:

1. На странице 36 приведён вывод модифицированной формулы для оценки b -value. Не вполне ясно, как именно выбирается верхняя граница цензурирования в случае, когда в скользящем окне происходит сильное землетрясение, выбивающееся из общего распределения. Не приведёт ли это к занижению оценки b -value в окне с главным событием?

2. В разделе 2.3 упоминается метод «складного ножа» (jackknife) для оценки погрешностей фрактальной размерности. Желательно было бы видеть оценку вычислительной эффективности этого метода при больших объёмах выборки (десятки тысяч событий), так как это может быть критично для оперативного анализа.

3. В главе 4 при описании экспериментов с электрическим током (стр. 113) указано, что энергия нагрева на два порядка превышает упругую энергию образца. Не является ли в этом случае механизм разрушения не триггерным, а прямым термическим разрушением, что несколько размывает аналогию с природными процессами, где флюидное воздействие слабее тектонических напряжений?

4. В разделе 4.2 (стр. 105) описывается эксперимент с нагнетанием воды под давлением. Не вполне ясно, как контролировалась температура образца в процессе эксперимента, учитывая, что адиабатическое сжатие флюида или трение могут давать локальный нагрев, влияющий на результаты АЭ.

5. На странице 119 (Таблица 4.3) в столбце «Энергия инициации» для серии 3 указано «Высокая...». Желательно привести конкретные цифры в Джоулях или отношение к упругой энергии, чтобы читатель мог оценить масштаб различий между сериями экспериментов.

Указанные замечания носят частный характер и не снижают общей научной ценности диссертационного исследования.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

6. Заключение

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9 Геофизика (по физико-математическим наукам), а также критериям,

определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Потанина М.Г. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 Геофизика.

Официальный оппонент:

профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, доктор технических наук, профессор

Вознесенский Александр Сергеевич
«06» апреля 2026 г.

Контактные данные:

тел.: [REDACTED], e-mail: asvoznenskkii@misis.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 05.15.11 – Физические процессы горного производства (технические науки), 1997 г.

Адрес места работы:

119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, тел.: +7 (499) 230-25-70, e-mail: asvoznenskkii@misis.ru

Подпись сотрудника ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, Вознесенского Александра Сергеевича удостоверяю:

Проректор по науке и инновациям НИТУ МИСИС

М. Р. Филонов

«06» апреля 2026 г.