

**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**

1. Актуальность темы исследования.

В современной сейсмологии актуальными являются вопросы о физических механизмах, определяющих процессы разрушения в земной коре без значительного изменения тектонических напряжений. Диссертационное исследование Потаниной М.Г. посвящено изучению роли флюидов как триггера сейсмических роев. Актуальность темы подтверждается ростом числа случаев индуцированной сейсмичности, связанных с добычей полезных ископаемых, захоронением жидких отходов и созданием водохранилищ. Работа вносит вклад в понимание того, как гидрологические циклы влияют на сейсмический режим, что имеет прямое прикладное значение для оценки рисков при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений и при разработке технологий повышения продуктивности месторождений углеводородов. Комплексный подход, объединяющий сейсмологический анализ и физическое моделирование, делает исследование своевременным и востребованным.

2. Анализ содержания работы.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, материал изложен последовательно и аргументированно.

Первая глава даёт актуальный детальный обзор механизмов флюидной инициации. Автор корректно разграничивает понятия индуцированной и триггерной сейсмичности. Особый интерес представляет анализ литературы по сейсмическим роям, где показано, что энергетические характеристики роев изучены слабее, чем их пространственно-временная структура.

Вторая глава обосновывает выбор методов анализа. Модификация оценки b -value является существенным методическим вкладом, позволяющим

корректно сравнивать параметры режима при различной активности. Описание методов выделения сезонных компонент и анализа миграции даёт необходимый инструментарий для проверки гипотезы о флюидной природе активизации.

В третьей главе содержатся результаты анализа сейсмических роев в Коринфском рифте (Греция) и наведённой сейсмичности в районе водохранилищ Койна–Варна (Индия). Исследование роев 2001 г. и 2003–2004 гг. в Коринфском рифте выявило различия в эволюции статистических параметров (активность, b -value, фрактальная размерность d , параметр $q=2b-d$) в зависимости от геодинамической обстановки. Рой 2001 г. характеризовался гибридной структурой с событием $M=4.2$ и резким скачком b -value в момент главного толчка, тогда как рой 2003–2004 гг. демонстрировал монотонную эволюцию параметров без сильных событий. Анализ наведённой сейсмичности в районе Койна–Варна продемонстрировал эволюцию сезонных компонент активности и механизмов очагов во времени: после заполнения водохранилища Варна (1993 г.) возобновилась и усилилась весенняя компонента, осенняя практически исчезла, появился зимний пик (2005–2010 гг.). Выявлена противофазная динамика активности и b -value на стадиях активизации роев.

В четвёртой главе описана серия лабораторных экспериментов по моделированию флюидной инициации разрушения. Рассмотрены три сценария: диффузия воды без давления (аналог влияния атмосферных осадков), нагнетание под давлением (аналог закачки жидкости и водохранилищ), нагрев флюида, содержащегося в порах, электрическим током (аналог геотермальных зон). Эксперименты подтвердили возможность воспроизведения роевого режима акустической эмиссии как аналога сейсмических роев. Особенно ценным является выявление зависимости времени задержки активности от степени водонасыщения образца (задержка сокращается в 3–10 раз для насыщенных образцов) и обнаружение двухфазной

миграции источников акустической эмиссии (диффузионная фаза 0–12 ч сменяется напряжённо-контролируемой фазой 12–25 ч).

В заключении сформулированы основные выводы, которые непосредственно следуют из результатов исследования и обосновывают положения, выносимые на защиту. Показана универсальность физического сценария лавинно-неустойчивого трещинообразования для флюид-индуцированных роев. Обосновано, что флюиды выступают не как непосредственная причина разрушения, а как триггерный фактор, инициирующий стандартный сценарий развития трещинообразования в горных породах. Первое защищаемое положение обосновывается результатами анализа динамики b -value и сейсмической активности: в натуральных роях и лабораторных экспериментах по диффузии и инъекции жидкости зафиксировано снижение b -value на пике активности, тогда как в опытах с нагревом эта закономерность отсутствует. Второе защищаемое положение подтверждается экспериментальными данными о зависимости времени задержки от степени насыщенности порового пространства, что объясняет эволюцию сезонных компонент сейсмичности в районе водохранилищ Койна–Варна. Третье защищаемое положение обосновывается результатами анализа миграции акустической эмиссии: в эксперименте выделены диффузионная и напряжённо-контролируемая фазы, что соответствует наблюдениям в природных условиях. Все три защищаемых положения получили подтверждение на основе сопоставления натуральных и лабораторных данных.

3. Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов.

Новизна работы состоит в выявлении универсальных закономерностей эволюции параметров сейсмического режима при флюидной инициации. Впервые показано, что противофазное изменение активности и b -value является диагностическим признаком триггерного механизма разрушения. Обоснованность выводов подкреплена статистическим анализом больших массивов данных и серией контролируемых экспериментов. Достоверность

подтверждается независимой проверкой результатов на различных объектах (Греция, Индия, лаборатория) и использованием стандартных процедур оценки погрешностей.

4. Апробация результатов.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых журналах («Физика Земли», «Геофизические процессы и биосфера» и др.). Результаты докладывались на представительных международных форумах. Личный вклад автора заключается в обработке данных, разработке программных кодов для анализа и интерпретации результатов.

5. Замечания и вопросы.

По материалам диссертации имеются следующие замечания и пожелания:

1. На стр.38 формула для оценки корреляционного интеграла не переведена в форму, позволяющую рассчитывать его значения и содержащую сумму функций Хэвисайда от разностей между параметром близости и расстояниями в парах событий, отнесенную к квадрату числа событий.
2. Стр.47-48. Для определения линейных участков зависимости логарифма корреляционного интеграла от логарифма параметра близости (скейлинговой области) лучше использовать графики Раппа, показывающие изменение производной корреляционного интеграла при изменении параметра близости.
3. Стр.55. Неясно, почему увеличение фрактальной размерности означает расширение области, охваченной землетрясениями.
4. Стр.63. Неточное использование понятия «взаимосвязь»: если изменение уровня воды оказывает влияние на сейсмическую активность, то изменение сейсмической активности вряд ли влияет на уровень воды.

5. Стр.64 рис.3.15 – не очень удачное представление результатов, в сентябре серый сектор не виден, что не позволяет сопоставить уровень воды в этом месяце с сейсмической активностью.
6. Стр.66, «демонстрирует устойчивую корреляцию» - не понятно, устойчивую по отношению к чему? Устойчивую по времени?
7. Стр.82, «угол наклона – 65» - наклона чего по отношению к чему?; рис.4.1, «стрелками обозначено...» - на рисунке нет стрелок, обозначающих направление приложения нагрузок.
8. Стр.86, определение энергетического класса – как определялся энергетический класс для АЭ?
9. Стр.104-105. Был ли образец вакуумирован? Какие условия были на боковых поверхностях образцов? Как определялось достижение полного насыщения порового пространства? Что такое «резкое увеличение давления флюида»?
10. Рис.4.22 – легенды рис.4.22а и рис.4.22б не соответствуют друг другу.
11. Стр.113 рис.4.26 – чему соответствуют разные линии не указано.
12. Местами в тексте встречается не очень точная терминология, например, «скорость диффузии» (судя по размерности имеется в виду коэффициент диффузии), «скорость АЭ» (видимо, имеется в виду активность АЭ).

Приведенные замечания не снижают научной ценности работы и могут быть учтены в дальнейших исследованиях.

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:

и.о. директора ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского Российской академии наук
доктор физико-математических наук

ТУРУНТАЕВ Сергей Борисович

подпись

06.04.2026 Дата подписания

Контактные данные:

тел.: [REDACTED], e-mail: stur@idg.ras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес места работы:

119334, Ленинский проспект, 38, корпус 1,

ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН

тел.: [REDACTED] e-mail: stur@idg.ras.ru

Подпись сотрудника ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН
Сергея Борисовича Турунтаева удостоверяю:

Ученый секретарь ИДГ РАН

Д.Н. Локтев

дата

06.04.2026