

**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**

Работа в целом представляется самостоятельным законченным научным исследованием со значимыми результатами и потенциалом практического применения, имеет чёткую структуру, отражающую логику изложения материалов. Разделение на главы хорошо отражает особенности разнопланового исследования. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.6.9 – Геофизика.

Актуальность темы исследования. Проблема индуцированной сейсмичности приобретает всё большую значимость в условиях расширения техногенного воздействия на земную кору. Диссертация Потаниной М.Г. посвящена исследованию роли флюида как триггерного фактора возникновения сейсмических роев. Актуальность работы определяется необходимостью разграничения природных и техногенных причин активизации сейсмичности, что критически важно для сейсмической безопасности промышленных объектов и населённых пунктов. Особую ценность представляет сочетание анализа долгосрочных натуральных наблюдений в уникальных полигонах (Коринфский рифт, Койна–Варна) с физическим моделированием процессов разрушения в лабораторных условиях. Исследование направлено на заполнение существующего пробела в понимании энергетических характеристик роев и эволюции параметров сейсмического режима под воздействием флюидов, что соответствует стратегическим направлениям развития геофизики.

Анализ содержания работы. Работа имеет чёткую структуру, обеспечивающую логическую последовательность изложения материала с учетом разноплановости исследования. Первая глава содержит традиционный

литературный обзор. Вторая глава посвящена методам исследования. В третьей главе анализируется роевая сейсмичность в природных условиях и вызванная наполнением водохранилищ. В четвертой главе автор переходит к анализу роевой сейсмичности в масштабе лабораторного эксперимента. Обобщение полученных результатов сделано в Заключение.

Особенностью первой главы является проведенная автором механизмов флюидной инициации: поверхностная нагрузка, изменение порового давления, химическое взаимодействие. В главе подробно рассмотрена проблематика сейсмических роев. Обзор подчёркивает недостаточную изученность энергетических параметров роев, указывая тем самым на важность такого анализа в диссертации. Обзор представляется полным, содержит около 200 ссылок, оставаясь при этом весьма компактным (23 страницы).

Вторая глава описывает методический аппарат для оценки представительной магнитуды, параметра b -value закона Гутенберга-Рихтера, сейсмической и акустической активности, фрактальной размерности области гипоцентров, размера роя и параметра цикла разрушения. Также описаны алгоритмы выделения сезонных компонент и оценки миграции гипоцентров, что является основным для диагностики флюидной природы активизации.

В третьей главе представлены результаты комплексного анализа сейсмических данных Коринфского рифта (Греция) и района водохранилищ Койна-Варна (Индия). Детальное исследование двух роевых эпизодов в Коринфском рифте (2001 г. и 2003–2004 гг.) показало существенные различия в эволюции параметров сейсмичности в зависимости от локализации (материковая часть и зона под заливом) и режима флюидного насыщения (эпизодический и устойчивый). Высказана гипотеза, что в зонах длительного насыщения наблюдается «чистый» роевой режим без сильных событий, тогда как в зонах эпизодического насыщения возможна генерация относительно сильных землетрясений. В районе водохранилищ Койна-Варна проанализирована наведённая сейсмичность за период 1964–2015 гг.,

продемонстрировавшая эволюцию сезонных компонент активности (осенний, весенний, зимний пики) и механизмов очагов (от сдвиговых к сбросовым) во времени. Установлена противофазная динамика активности и *b*-value на стадиях активизации сезонных компонент (апрель-октябрь). Это дает возможность предположить существование неизвестной ранее особенности флюид-иницированных сейсмических роев - противофазного изменение наклона графика повторяемости и сейсмической активности, которая в качестве первого защищаемого положения окончательно доказана в лабораторных экспериментах.

В четвёртой главе приведены результаты лабораторного моделирования флюидной инициации разрушения на образцах горных пород (гранит, песчаник) и бетона в условиях всестороннего сжатия. Реализованы три сценария: внесение воды на поверхность без давления, нагнетание под давлением (1–2.6 МПа), нагрев флюида электрическим током. Эксперименты подтвердили возможность воспроизведения роевого режима акустической эмиссии с характерными фазами нарастания, пика и релаксации. Особенно ценным является выявление зависимости времени задержки активности от степени водонасыщения образца и обнаружение двухфазной миграции источников АЭ со скоростью диффузии воды ($\sim 10^{-9}$ м²/с) на начальном этапе и на порядок более быстрой миграцией в зоне максимальных напряжений на заключительной стадии. Эти результаты легли в основу второго и третьего защищаемых положений: степень обводнённости среды контролирует величину задержки роевой активности при флюидной инициации разрушения, а характерный для сейсмических роев процесс миграции сейсмичности может быть обусловлен как движением флюида в среде, так и саморазвитием процесса разрушения.

В заключении приведены сводные результаты проведённых исследований, их анализ и обсуждение. Важным результатом работы является вывод о различии в механизмах разрушения при термической и механической/диффузионной инициации: в опытах с нагревом флюида

снижение b -value не наблюдается при росте активности, в отличие от опытов с диффузией и инъекцией. Этот вывод подтверждает первое защищаемое положение, отражающее диагностический признак триггерной природы флюидного воздействия. Другим важным выводом диссертационного исследования и основой второго защищаемого положения является подтверждение представлений о влиянии предварительной насыщенности флюидом на динамику инициации разрушения: для первичного внедрения флюида в сухую породу задержка практически совпадает с характерным временем обводнения, в предварительно насыщенной среде задержка сокращается в 3–10 раз. Третье защищаемое положение обосновывается результатами анализа миграции: в эксперименте выделены две фазы миграции — медленная (диффузионная) и быстрая (напряжённо-контролируемая), что соответствует наблюдениям в природных условиях.

Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов.

Научная новизна работы определяется впервые полученными данными о зависимости времени задержки роевой активности от степени обводнённости среды. Впервые показано, что миграция сейсмичности может иметь двухфазный характер (диффузионная и напряжённо-контролируемая фазы). Защищаемые положения диссертации доказаны. Обоснованность защищаемых положений подтверждается статистической значимостью выявленных закономерностей, включая проверку на синтетических каталогах, и воспроизводимостью лабораторных экспериментов на образцах различного состава (гранит, песчаник, бетон). Достоверность обеспечивается использованием стандартного оборудования и применением математического аппарата, соответствующего задачам.

Апробация результатов. Результаты исследования опубликованы в 9 научных статьях, материалы докладывались на 11 конференциях различного уровня. Автор принимала участие в планировании лабораторных

экспериментов и лично выполнила анализ данных, что подтверждает её личный вклад в получение результатов.

Замечания и вопросы. В процессе ознакомления с диссертацией возникли следующие замечания и вопрос.

1) Автор ошибочно утверждает, что применение формулы Аки приводит к артефактной анти-корреляции величин b -value и активности. Это утверждение автор иллюстрирует рис. 2.1, представленном в логарифмическом масштабе по числу событий. В формулу Аки входит средняя магнитуда, график неверно отражает среднее значение магнитуды, поскольку соотношение числа событий и магнитуды нелинейно. По-видимому, автор имела в виду, что при уменьшении активности увеличивается разброс оценки b -value и поэтому может действительно наблюдаться анти-корреляция максимальных получаемых оценок b -value с активностью. Существенно также то, что распределение оценок (по Аки или полученных другими методами) несимметрично (ошибка в сторону больших значений больше). Но это не отражено на графиках в диссертации: везде ошибка оценки b -value принимается симметричной. При малых выборках правильнее было бы оценивать доверительный интервал оценок b -value с помощью бутстрепа – такие оценки хорошо отражают асимметрию распределения ошибки оценки параметра. Это касается оценок в разделе 3.2 и в главе 4 диссертации. В разделе 3.1 это несущественно, поскольку b -value оценивается в скользящем окне 150 событий.

2) Фактически это продолжение предыдущего замечания. Обоснование применения формулы для оценки параметра b -value по цензурированной выборке вместо формулы Аки неубедительно. Автором не продемонстрировано, что для таких оценок не возникает артефактной антикорреляции b -value и активности. Вместе с тем, предлагаемое автором использование пары оценок b -value: по Аки и по цензурированной выборке как оценок сверху и снизу, возможно, является оправданным. В тексте диссертации, тем не менее, нигде не встречаются такие парные оценки. Замечу

также, что автор лишь упомянула влияние на оценки b -value группирования значений магнитуды (например, магнитуда обычно дается с одной значащей цифрой), но не обосновала в работе, что для исследуемых данных это влияние не существенно. Тем не менее, стоит отметить, что автором продемонстрировано, что выявленные вариации b -value являются значимыми, поэтому два приведенных выше замечания не существенны для основных выводов диссертации.

3) На Рис. 3.12 нет пояснения, что обозначают линии и штриховые линии.

4) На Рис. 3.18, 3.19, 3.20 активность, по-видимому, представлена в логарифмической шкале, но это не следует из рисунка или подписи к нему.

5) Как для сейсмических роев можно проинтерпретировать противофазное изменение наклона графика повторяемости и сейсмической активности, то есть одновременное увеличение или снижение числа слабых событий и доли сильных событий?

Заключение. Приведенные выше замечания не затрагивают основные научные результаты и выводы диссертации и не умаляют значимости диссертационного исследования. Обращает на себя внимание огромный объем проведенных лично диссертантом исследований как на натуральных, так и на лабораторных данных. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. 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:

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

06.04.2016 г.

Контактные данные:

тел.: [REDACTED], e-mail: shebalin@mitp.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук

тел.: [REDACTED], e-mail: shebalin@mitp.ru

Подпись сотрудника ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики

Петра Николаевича Шебалина удостоверяю:

*Ученый секретарь ИТПС РАН
Владимирова И.С.*