

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Смирнова Владимира Борисовича "Закономерности и природа переходных режимов сейсмического процесса", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

### **Актуальность темы исследований.**

Проблема прогноза изменений сейсмической активности, рассматриваемая в диссертации, является актуальной не только в силу жизненной важности своевременного определения места, времени и магнитуды очередного катастрофического землетрясения, но и в связи с тем, что понимание физических механизмов, управляющих вариациями сейсмичности во времени и в пространстве, позволит в перспективе ставить вопросы управления сейсмическими процессами. Пониманию природы тех или иных закономерностей должно предшествовать выявление этих закономерностей, обобщение многочисленных наблюдений и экспериментальных данных. Физический подход заключается в прогнозировании отклика тех или иных объектов и систем на воздействие. Физическое прогнозирование базируется на построении моделей рассматриваемых процессов различной степени детальности и сложности. Сложность и многопараметричность геофизических процессов приводит к необходимости разработки сложных моделей с многими параметрами. Вместе с тем очевидна необходимость выделения основных параметров, управляющих рассматриваемыми геофизическими процессами. Накопление наблюдательного материала вместе с развитием средств наблюдений, методов обработки данных приводит к формулировке все более сложных моделей для описания выявляемых закономерностей, что, в свою очередь, требует обоснования физического смысла и допустимости с точки зрения математики применения этих моделей для описания наблюдаемых процессов.

Все эти вопросы нашли отражение в рассматриваемой диссертации. Автор выделил в проблеме сейсмичности особый класс переходных сейсмических процессов, представляющих, с некоторой степенью допущений, процесс релаксации возмущенного состояния геофизической среды к стационарному состоянию. Выделенный автором класс включает афтершоковые процессы и реакцию на техногенное воздействие. Наличие возмущающего воздействия (сильного землетрясения в первом случае и действий человека во втором) до известной степени упрощает решаемую задачу, не снижая ее актуальности. Помимо очевидной важности прогнозирования последствий техногенного воздействия на недра, переходные режимы сейсмичности позволяют верифицировать модели сейсмического процесса и обосновать их перспективность.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Защищаемые научные положения, выводы и рекомендации обоснованы путем сочетания анализа натурных данных с помощью строгих методов математической статистики с проведением многочисленных лабораторных экспериментов и разработкой и верификацией моделей изучаемых процессов, основанных на физических представлениях о процессах разрушения геоматериалов. Автор продемонстрировал прекрасное владение современными методами анализа сложных процессов, знакомство со всеми базовыми представлениями, положенными в основу современных моделей сейсмических процессов. Знакомство с современным состоянием вопроса не ограничено перечислением работ других авторов, достижения других специалистов активно используются в работе автора.

**Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Проведенные исследования являются достаточно уникальными. Под руководством автора и при его непосредственном участии выполнены несколько серий оригинальных лабораторных экспериментов по изучению связи акустической эмиссии (являющейся аналогом сейсмических событий в натурном масштабе) с напряженным состоянием, типом и величиной воздействий в форме насыщения флюидом, изменения порового давления, электромагнитного воздействия.

Полученные результаты позволили автору выдвинуть обоснованные гипотезы о природе закономерностей переходных сейсмических режимов и выявить физические факторы, определяющие динамику рассматриваемых переходных режимов. Гипотезы, сформулированные для объяснения натурных закономерностей, проверялись в лабораторных экспериментах.

Достоверность основных выводов работы основана на тщательном анализе качества и однородности исходных данных, на проверке отсутствия артефактов, на применении обоснованных статистических методов анализа данных сейсмологических наблюдений. В результате проведенных исследований впервые продемонстрированы общие закономерности афтершоковой и наведенной сейсмичности. Автору удалось разделить влияние структурных и динамических факторов на параметры переходных сейсмических режимов, что позволяет не только решать прямые задачи прогнозирования развития наведенных сейсмических процессов в разных ситуациях, но и ставить задачу об оценке структурных параметров в тех или иных районах. Автор убедительно продемонстрировал необходимость совместного рассмотрения конкурирующих процессов возбуждения и релаксации при построении адекватных моделей переходных сейсмических режимов и учета перехода высвобождения энергии накопленных деформаций с одного масштабного уровня на другие.

Результаты, полученные в ходе исследований, были доложены на крупных международных конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** Научная значимость работы определяется разработкой принципов перехода от традиционных региональных оценок параметров сейсмического режима к оценке физических параметров процесса разрушения по данным сейсмологических наблюдений. Разработанные автором принципы позволяют подойти к одной из самых важных и сложных проблем физики землетрясений: применение физических представлений о разрушении горных пород и о движении с трением, развиваемых на основе лабораторных экспериментов, для описания процессов деформирования породных массивов с характерными размерами десятки и сотни километров. Методики обработки сейсмических данных, разработанные автором, найдут свое применение для анализа техногенной сейсмичности, связанной с воздействием на недра при заполнении водохранилищ, при разработке месторождений полезных ископаемых, при добычи углеводородов.

**Содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, объем диссертации 444 страницы, она включает 140 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемых научных публикаций содержит 582 наименования.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы, решаемые задачи, приводятся основные оригинальные результаты, защищаемые положения, даются сведения о вкладе автора в работу, об апробации и об основных публикациях автора по теме диссертации.

**Первая глава** является обзорно-постановочной. В ней автор детально рассматривает состояние проблемы исследования переходных сейсмических режимов, обосновывает выбор объектов исследования. Автор сосредотачивается на афтершоковых последовательностях и наведенной сейсмичности, связанной с заполнением водохранилищ. Систематизируются современные представления о физических механизмах афтершоковых процессов и особенностей наведенной сейсмичности, рассматривается роль флюидов в разрушении пород, представлен обзор состояния лабораторных исследований по моделированию очага землетрясения и сейсмического режима. Определены направления диссертационной работы.

Во **второй главе** описана концепция перехода от региональных оценок параметров сейсмического режима к оценкам физических параметров разрушения, предложен вариант реализации такого перехода, приведено описание используемых методик первичного анализа сейсмических каталогов и получения статистически достоверных оценок. В качестве статистических параметров рассматриваются наклон графика повторяемости, фрактальная корреляционная размерность или размерность кластера пространственного распределения эпицентров или гипоцентров сейсмических событий, сейсмическая активность (рассчитывается на основе функциональной зависимости от энергии землетрясений), размер сей-

смогенерирующего объема и мера влияния очагов землетрясений. Рассматривается длительность цикла разрушения литосферы (средний период повторяемости землетрясений в области, равной размеру их очага), которая характеризуется введенным автором параметром  $q = \alpha b - d$  (здесь  $b$  – угол наклона графика повторяемости,  $d$  – фрактальная размерность пространственного распределения эпицентров землетрясений), показывающим различие показателей статистических распределений размеров очагов землетрясений и расстояний между землетрясениями. Показано, что для стационарной фоновой сейсмичности этот параметр близок к нулю.

Автор показывает, что для нормировки показателей сейсмической активности на разном масштабном уровне следует использовать не геометрический объем, пропорциональный кубу характерного размера рассматриваемой области, а некоторый условный «фрактальный» объем, пропорциональный размеру в дробной степени, равной фрактальной размерности пространственного распределения гипоцентров (или эпицентров) землетрясений. Такой подход позволил автору решить проблему сопоставления сейсмических режимов в областях разного масштаба. Для учета неравномерного распределения событий во времени, характерного для переходных режимов сейсмичности, автор предлагает использовать показатель самоподобия (например, показатель степени в случае выполнения закона Омори).

**Третья глава** посвящена рассмотрению афтершоковой и наведенной сейсмичности. Изучен вопрос о связи фрактальных свойств афтершоковой последовательности и неоднородностей литосферы в очаговой области, исследовано изменение во времени параметра цикла разрушения, изучено формирование структуры временного группирования афтершоков. В качестве объектов исследования использовались данные об афтершоках Рачинского землетрясения 29.04.1991г., данные о наведенной сейсмичности при заполнении Нурекского водохранилища, о сейсмичности в районе водохранилищ Койна-Варна (Индия). Показано, что для переходного режима релаксационного типа (афтершоков) характерно увеличение параметра длительности цикла разрушения  $q$  от отрицательных значений до нуля, что можно интерпретировать, как следствие перераспределения интенсивности процесса разрушения от старших масштабов к младшим в процессе возвращении сейсмического режима к фоновому состоянию.

На примере сейсмичности, наведенной заполнением Нурекского водохранилища, показано, что переходный наведенный сейсмический режим в сейсмически активной области, как и в случае афтершоков, характеризуется перераспределением процесса разрушения по его масштабам, но увеличение  $q$  (т.е. увеличение интенсивности процесса разрушения на младших масштабах) начинается не от возмущенного, а от фонового состояния. Затем разрушение переходит на более высокие масштабные уровни.

Рассмотрение сейсмичности в районе водохранилищ Койна-Варна показало, что сезонные максимумы возбужденной сейсмичности приходятся как на интервал максимальных уровней воды в водохранилищах, так и примерно на середину интервала уменьшения глубин водохранилищ, что позволило подтвердить наличие двух механизмов сезонной активизации – немедленной и задержанной, первый из которых обусловлен сжатием каркаса пород, второй – диффузией порового давления флюида. Исследования автора позволили предположить, что в сейсмическом режиме в районе водохранилищ Койна-Варна имеется как наведенная составляющая, так и тектоническая.

**В четвертой главе** рассматриваются результаты анализа данных по сейсмичности, вызванной закачкой воды в 3-х километровую скважину в Сультс-су-Форе (Soultz-sous-Forêts), Франция, в 1993 г., и по сейсмичности в районе электромагнитного зондирования литосферы на Бишкекском геодинамическом полигоне. Анализ индуцированной сейсмичности в Сультс-су-Форе привел автора к выводу, что динамика роста области сейсмогенерации не может быть объяснена только диффузией порового давления вследствие закачки жидкости в пласт с постоянной проницаемостью, необходим учет процесса разрушения и соответствующего изменения проницаемости пласта. Возбуждение и дальнейшая релаксация сейсмичности, инициированной ступенькообразным ростом порового давления, сопровождаются перераспределением интенсивности процесса разрушения по масштабам, при этом возбуждение сопровождается переходом разрушения с младших уровней на старшие, а релаксация – переходом со старших уровней на младшие.

Анализ возможного воздействия на сейсмический режим мощными электрическими импульсами при проведении электромагнитного зондирования позволил обнаружить немедленный отклик сейсмического режима, проявляющийся в увеличении наклона графика повторяемости непосредственно на интервале проведения зондирований. Спустя 10-15 часов после прекращения электрического зондирования наклон графика повторяемости начинает уменьшаться при увеличении сейсмической активности. К середине третьих суток после сеанса зондирования наклон графика повторяемости снова достигает локального максимума, а затем медленно спадает примерно в течение 4-5 суток. Вопрос о природе и механизме воздействия электрических полей на процесс генерации сейсмических событий давно дискутируется, но до сих пор остается открытым. Автор приводит сведения об исследовании возможного механизма в экспериментах по повышению порового давления флюида в горных породах при нагреве электрическим током.

**В пятой главе** подробно рассмотрены результаты уникальных экспериментов, проведенных при участии автора, приведены результаты лабораторного моделирования переходных сейсмических режимов при различных способах инициации, различных уровнях напряжений и всестороннего сжатия, различных структурных особенностях нагружа-

емых образцов и различных свойствах материалов (сухие, насыщенные жидкостью, целые, содержащие трещину, горные породы, искусственные материалы). Получен обширный экспериментальный материал, результаты анализа которого позволили прояснить физику переходных режимов сейсмического процесса. Лабораторные эксперименты показали, что при переходе разрушения в стадию локализации внутри образца возникает небольшая область нуклеации, в которой сосредотачивается процесс разрушения. Далее эта область разрушения увеличивается так, что зависимость размера области разрушения от времени оказывается близка к диффузионному процессу. Этот результат важен для понимания природы увеличения области сейсмогенерации при закачке жидкости в недра, поскольку он показывает, что динамика развития индуцированной сейсмичности может быть обусловлена не только диффузией порового давления флюида, но и собственно кинетикой разрушения.

В случае роеподобных переходных режимов автором обнаружена задержка момента максимальной активности акустических импульсов относительно начала инициации, причем величина этой задержки увеличивается с ростом напряжений. Описанные в диссертации лабораторные эксперименты со ступенчатой инициацией также продемонстрировали перераспределение процесса разрушения по масштабам на стадиях возбуждения и релаксации, как и аналогичное явление, обнаруженное в режимах сейсмичности, связанной с заполнением и вариациями уровня воды в водохранилищах, закачкой жидкости в недра и электромагнитным зондированием.

**Шестая глава** является обобщением всей объемной работы, описанной автором в предыдущих главах. На основе этого обобщения автор выявляет общие закономерности рассмотренных переходных режимов сейсмичности и выдвигает гипотезы об их природе. Так, автор показывает, что использование кулоновских напряжений при изучении переходных режимов разрушения не только удобно, но и физически обосновано. Инициация переходных сейсмических режимов может быть как результатом изменения напряженного состояния среды, так и носить параметрический характер и быть обусловленной изменением прочностных свойств среды с силу тех или иных аспектов воздействий. Выявленная задержка максимума активности в переходном режиме может объясняться не только конечной скоростью передачи инициации в среде, но и определяться процессами собственно разрушения материала.

Автор обращает внимание на то, что корреляция между изменением угла наклона графика повторяемости и фрактальной размерностью сейсмичности может иметь положительные и отрицательные значения. Положительная корреляция этих параметров наблюдается в фоновом режиме сейсмичности, отрицательная корреляция проявляется во вре-

менных вариациях в переходных режимах сейсмичности и отражает характерные для этих режимов перераспределения процесса разрушения по масштабам.

#### **Замечания.**

1. Автор не очень аккуратно использует термин «диффузия воды» в тех случаях, когда речь идет о диффузии порового давления. Продвижение фронта жидкости описывается, по сути, уравнениями Навье-Стокса в том или ином приближении, о чем автор, безусловно, знает.
2. При рассмотрении сезонных компонент вариаций наведенной сейсмичности в районе Койна-Варна не очень корректным выглядит отсутствие оценок величин корреляции сейсмической активности с временем года и с уровнем водохранилищ.
3. Упрощенные модели изменения порового давления в пространстве и времени, используемые в работах С.А.Шапиро с коллегами, на которые ссылается автор, не рассматривают изменения проницаемости при изменении пористости в результате изменения порового давления. Учет изменения проницаемости приводит к более точному описанию процесса распространения сейсмических событий, индуцированных закачкой жидкости, и представляется более обоснованным способом устранения противоречий между моделью и измерениями, чем предлагаемая автором «волна разрушений».
4. Не ясен смысл термина «фрактальная размерность литосферы».
5. Недостаточна четкость некоторых формулировок положений, выносимых на защиту, например: «... характер проявления структурных и динамических факторов в значениях показателей...» - в чем заключается этот характер?

Высказанные выше замечания не снижают высокой значимости работы и носят терминологический характер либо могут быть использованы автором в его дальнейшей работе.

**Заключение.** В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области геофизики (физики сейсмических процессов). Результаты работы опубликованы в ведущих журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, представлены на крупных российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержимое диссертации.

Диссертационная работа В.Б.Смирнова "Закономерности и природа переходных режимов сейсмического процесса" отвечает всем критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова для докторских диссертаций, а ее автор Смирнов Владимир Борисович безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, доктор физико-математических наук

**Турунтаев Сергей Борисович**



12.03.2018г.

Адрес: 119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1

E-mail: s.turuntaev@gmail.com

Тел.: +7(499)1376611

Подпись С.Б.Турунтаева удостоверяю  
ученый секретарь ИДГ РАН Н.В. Болдовский

