

## ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора физико-математических наук Быкова Виктора Геннадьевича о диссертационной работе Каримовой Анастасии Алексеевны “Сегментная активизация разрывов и дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования)”, представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика**

Диссертационная работа Каримовой А.А. посвящена выявлению на основе физического моделирования временных и пространственно-временных тенденций при разрывообразовании и активизации разрывов в сдвиговой зоне.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Диссертационная работа Каримовой А.А. имеет непосредственное отношение к решению важнейших проблем современной геодинамики – выяснению физических механизмов передачи тектонических напряжений в геосреде и процессов, определяющих формирование и смену режимов скольжения в разломах. Эти проблемы имеют фундаментальное значение не только для понимания динамики и энергетики планеты, но и чрезвычайно актуальны для оценки сейсмической опасности.

К тому же, знание основных тенденций структурно-деформационного развития внутриразломной зоны, периодичности активной фазы разрывов разных масштабных уровней, активности разрывов по их простиранию, в конечном итоге, обязательно для ответа на вопросы: как происходит скольжение в разломах? и существует ли волновой механизм медленного перераспределения тектонических напряжений в крупных разломных зонах?

Разработке теоретических моделей и физическому моделированию сдвиговых зон уделено немало внимания исследователей [Кочарян, 2016; Dooley, Schreurs, 2012], но воздействие миграции деформаций на тело разломной зоны ранее не рассматривалось.

Актуальность темы диссертации поэтому и определяется, прежде всего, необходимостью экспериментального исследования динамики разрывов в сдвиговых зонах, условий активизации отдельных разрывов и физического механизма миграции деформаций в сдвиговых зонах.

Основная цель диссертации – выявить и изучить методом физического моделирования наиболее характерные черты деформационной динамики разрывно-блоковой структуры формирующейся крупной сдвиговой зоны.

Именно на решение этих и других задач были направлены усилия автора. Физическое моделирование разломообразования, расчеты деформации сдвига, компьютерная обработка цифровых изображений методом DIC, интерпретация

цифровых фотографий позволили соискателю выполнить детальное исследование особенностей деформационной динамики разрывно-блоковой структуры и миграции деформаций; изучить динамику смещений по разрывам; обнаружить (в соавторстве) деформационные волны в сдвиговой зоне.

#### **НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ**

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в дальнейшем развитии ранее сформированных представлений об эволюции сдвиговых зон в моделях литосферы и выявлении периодического характера эволюции внутренней структуры сдвиговых зон. Установлено, что активные разрывы в сдвиговой зоне имеют сегментную структуру, причиной которой является отличие динамики деформаций в смежных с разрывом блоках. Показано, что деформационный процесс в сдвиговой зоне модели литосферы имеет дискретно-волновой характер, а перенос деформаций может осуществляться в виде локализованных фронтов. Впервые экспериментально обнаружены и исследованы (в соавторстве) деформационные волны в формирующейся сдвиговой зоне и показана их связь с аномальными деформациями внутриразломных блоков.

В диссертации поставлены и решены конкретные задачи, получен ряд существенных результатов, основными среди которых могут быть выделены следующие.

В **I главе** кратко представлена история учения о разломах литосферы, основные этапы его формирования и современное состояние. Приведены наиболее значительные результаты исследований, основные данные о методах анализа параметров разломов и их связи с геодинамическими процессами и сейсмической опасностью.

Во **II главе** содержатся общие сведения о методе физического моделирования разломообразования и его современном состоянии. Дано описание истории развития методов физического моделирования, результатов, полученных в разное время различными исследователями. Из приведенной информации следует вывод об объекте исследования: сдвиговая зона - это линейно вытянутое объемное тело с трехстадийной внутренней разрывной структурой. Каждая стадия имеет собственный набор систем разрывов.

Основные понятия физического моделирования и методика проведения экспериментов описаны в **III главе**. Моделирование разломообразования проводилось с соблюдением теории подобия. Выбор модельного материала производился с учетом реологии и структуры объекта. Кроме того, описана схема проведения экспериментов, сбора фактического материала, а также методы обработки, позволившие получить достоверные результаты. Представлен внешний вид экспериментального оборудования, которое состояло из установки “Разлом” для моделирования, вискозиметров для

определения вязкости модельного материала и аппаратуры для фото- и видеорегистрации деформационных процессов. Подробно описана процедура измерений и изменения параметров модельных ситуаций. Анализ эволюции полей деформаций в сдвиговой зоне проведен с применением метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC) на базе программного обеспечения Strain Master.

При выполнении исследований соискателем внесен существенный вклад в совершенствование методики физического моделирования динамики сдвиговых зон. Получено дополнительное обоснование оптимальности выбора глиняной пасты в качестве модельного материала и переноса результатов опытов на природные ситуации. Показано, что структурная неоднородность такого природного объекта как литосфера в условиях эксперимента может регулироваться гранулометрическим составом модельного материала.

Наиболее значительные результаты представлены в **IV главе**, где описаны исследования разномасштабных периодичностей при эволюции внутренней структуры сдвиговых зон, активизации протяженных разрывов в формирующейся сдвиговой зоне, механизмов передачи деформаций в нарушенных и ненарушенных разрывами моделях литосферы.

При обработке фактического материала установлены основные тенденции развития разрывной структуры сдвиговых зон. Обобщающие результаты серии экспериментов состоят в следующем.

Разрывно-блоковая структура сдвиговой зоны развивается неравномерно в виде периодически повторяющихся активизаций деформационного процесса и подразделяется на три стадии. Предложено первую стадию развития сдвиговой зоны разделить на менее продолжительные этапы и периоды активизации, соответствующие временной последовательности период – группа периодов – этап – стадия. Протяженные разрывы в сдвиговой зоне представляют собой активные и пассивные сегменты, чередующиеся по простиранию разрывов. Причиной сегментной структуры разрывов, по мнению соискателя, является отличие динамики деформаций в смежных с разрывом блоках.

В ходе экспериментов выявлены устойчивые периодические изменения расстояния между реперами, отражающие смену режимов деформирования сжатие-растяжение-сжатие и так далее, которые идентифицированы как деформационные волны. Измерены характеристики этих волн (скорости, амплитуды, формы) и их изменения во времени и в пространстве. Отсюда следует, что деформационный процесс в крупной сдвиговой зоне обусловлен перемещением её активного крыла под действием приложенной нагрузки и периодическим прохождением фронтов деформаций вдоль зоны.

Оценено влияние деформационных волн на динамику процесса деформации в целом и исследованы особенности распространения этих волн на различных этапах развития сдвиговой зоны. Показано, что фронты деформационных волн проходят сдвиговую зону без изменения размеров и формы, если её внутренняя структура включает мелкие разрывы. Структурные неоднородности в виде крупных разрывов препятствуют прохождению волн и

разделяют их на серию вторичных волн, которые изменяют направление движения и перемещаются по простирацию блоков.

Деформационные волны, зарождающиеся вне сдвиговой зоны, при вхождении и продвижении по зоне разлома превращаются в серию фрагментов, перемещающихся по блокам с разной скоростью. Прохождение волны вдоль разрыва вызывает резкое увеличение продольной деформации и активизацию сдвиговых смещений в отдельных сегментах разрыва. Кстати, такое развитие событий считается одним из наиболее вероятных механизмов миграции землетрясений.

Итак, деформационный процесс в сдвиговой зоне имеет дискретно-волновой характер и реализуется в виде медленных локализованных фронтов. Пространственно-временная динамика деформационных волн в сдвиговой зоне определяется ее внутренней структурой, а средняя скорость деформационных волн в зависимости от уровня накопленных в зоне напряжений составляет  $(0.65-4.65) \cdot 10^{-3}$  м/с.

В V главе проведено сопоставление полученных результатов физического моделирования сдвиговых зон с поведением природных структур и процессов.

Показано очевидное визуальное сходство выявленной сегментации разрывов в межблоковом контакте с сегментной структурой Северо-Анатолийского разлома (Турция), разломов Сан-Андреас (Калифорния, США), Марлборо (Новая Зеландия).

Возвратно-поступательные смещения по активным разрывам сдвиговых зон модели литосферы аналогичны знакопеременным смещениям в пределах Центрально-Сахалинского разлома и Южно-Байкальского геодинамического полигона.

Дискретно-волновые деформации в сдвиговых зонах моделей литосферы, представленные в диссертации, могут служить лабораторными аналогами медленных деформационных волн, возбуждаемых в литосфере и проявляющихся в миграции сейсмичности, в изменениях геофизических полей, в геодезических наблюдениях. Более того, полученные результаты физического моделирования не только подтверждают сложившиеся представления о волновой природе медленных деформационных процессов, но и служат еще одним убедительным обоснованием реальности крупномасштабных медленных деформационных волн в горных массивах.

#### **ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертационная работа Каримовой А.А. – заметный вклад в дальнейшее развитие теории разломообразования, в понимание волновой природы переноса энергии медленных деформационных процессов.

Выводы диссертации будут способствовать дальнейшей разработке физически содержательных моделей волновой динамики медленных деформационных процессов и сопровождающей их миграции сейсмической активности.

Практическая значимость научных результатов соискателя определяется возможностью их применения при решении фундаментальных задач прикладного характера, связанных с реконструкцией полей напряжений геолого-структурными методами, с оценкой сейсмической опасности.

#### **ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ**

По тексту диссертации есть замечания, которые не снижают общего положительного впечатления о работе.

1. Ссылка на известную модель самоорганизованной критичности (СОК) П. Бака в конце 1 главы на стр. 22 не совсем удачна. Более уместным было бы упоминание моделей stick-slip, в которых переход устойчивого скольжения в прерывистое контролируется коэффициентом трения. Ведь схема опыта (рис. 4.13) близка к этим моделям. Именно эти теоретические модели усиливают выводы соискателя, в том числе о различии трения в сегментах разрыва (с.74).

Что же касается модели СОК, то здесь сформировалась довольно странная ситуация. Утверждений о возможности применения модели в сейсмологии и геодинамике много, а публикаций, содержащих доказательства СОК в конкретных событиях или процессах, практически нет. Сам автор модели считает, что причиной землетрясений является СОК земной коры в целом, а не отдельных ее частей [Bak P. How nature works: The science of self-organized criticality. Springer-Verlag, New York, Inc. 1996].

2. Не всегда четко сформулировано, какие новые результаты получены именно автором.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация Каримовой А.А. является законченной научной квалификационной работой с практической значимостью. Содержание диссертации изложено ясно, в логически последовательной форме. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации.

В диссертации содержится решение ряда актуальных научных задач, имеющих значение для развития технологий обнаружения и мониторинга предвестников землетрясений, для выявления основных пространственно-временных тенденций и особенностей при активизации разломов земной коры и литосферы. Содержание и выводы диссертации развивают представления о медленных деформационных волнах, вносят существенный вклад в понимание процесса перераспределения тектонических напряжений в разломных зонах и миграции сейсмичности.

Защищаемые положения являются новыми, полностью обоснованы результатами работы и получены соискателем самостоятельно или при его непосредственном участии. Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задач, проведением экспериментов с соблюдением

условий подоби́я и многократным их повторением при одинаковых условиях, получением статистически значимых количественных данных по исследуемым параметрам.

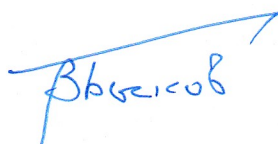
Полученные в диссертации Каримовой А.А. результаты представлены в 25 публикациях, включая 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК Российской Федерации.

Автореферат диссертации и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации и характеризуют соискателя как высококвалифицированного специалиста.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук. Каримова Анастасия Алексеевна заслуживает присуждения искомой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

*Я даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

Главный научный сотрудник  
лаборатории сейсмологии и сейсмотектоники  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт тектоники и  
геофизики им. Ю.А. Косыгина  
Дальневосточного отделения РАН  
доктор физико-математических наук



Быков  
Виктор Геннадьевич  
26 июля 2022 г.

680000, Хабаровск, ул. Ким Ю. Чена, 65.  
Тел: +7 (4212) 22-71-89  
E-mail: bykov@itig.as.khb.ru  
Шифр специальности: 25.00.10.

Подпись д.ф.-м.н. В.Г. Быкова заверяю:

Ученый секретарь ФГБУН Институт тектоники  
и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН  
Тел: +7(4212)22-74-84



Алексеев  
Светлана Николаевна