

ОТЗЫВ

Официального оппонента

на диссертацию Каримовой Анастасии Алексеевны

«Сегментная активизация разрывов и дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования)», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности

25.00.03 - Геотектоника и геодинамика.

Изучение сдвиговых разломных зон, играющих огромную роль в строении земной коры, влияющих на степень сейсмической опасности, содержащих как рудные полезные ископаемые, так и углеводороды, является весьма важной задачей. Такие зоны изучались разными методами, а их аналоговое физическое моделирование началось без малого сто лет назад. С помощью моделирования удалось получить впечатляющие результаты: показана стадийность развития этих зон, структурные парагенезы, формирующиеся на каждой стадии, их зависимость от свойств эквивалентного материала, скорости деформации и других параметров. Но зоны сдвига – сложные саморазвивающиеся системы и мы до сих пор не знаем многих деталей и особенностей процессов, происходящих в них. Таким образом, исследование А. А. Каримовой является важным и **актуальным**. А.А. Каримова поставила перед собой цель выявить неизвестные или малоизученные закономерности деформации, развивающейся с течением времени на разных структурных уровнях сдвиговой зоны. Для этого ей было выполнено около ста экспериментов, обработано сотни фотографий, выполнено тысячи высокоточных замеров различных параметров, характеризующих деформацию. Все это было обработано, построены графики значений разных параметров во времени и пространстве. Кроме того, ей был использован редко применяемый метод корреляции цифровых изображений, работающий на базе специализированного программного обеспечения. Все это позволило автору выявить неравномерность развития сдвиговой зоны в виде периодических процессов разных порядков, вложенных друг в друга; получить представление о существовании в каждый момент времени активных и пассивных сегментов разрывов в пределах зоны, получить конкретную картину прохождения через сдвиговую зону локализованных фронтов деформации. Все это является научной **новизной** работы. Полученные результаты вносят вклад в теорию разломообразования. Развитие теоретической базы всегда, в конечном итоге, приводит к использованию различных ее аспектов в практических целях. В данном случае видимое сейчас **практическое значение** заключается в использовании отдельных результатов в сеймотектонике и при реконструкции полей напряжений по совокупности сколовых трещин.

Диссертационная работа А.А. Каримовой состоит из Введения, 5 глав и Заключения. Общий объем работы составляет 122 страницы, включает 64 рисунка и 1 таблицу. Список литературы представлен 196 работами.

Во **Введении** раскрывается научная новизна, актуальность и практическая значимость, формулируются цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** «История представлений о разломах и их современное состояние» описано развитие знаний о разломах, при этом особое внимание уделено представлению о глубинных разломах и деструктивных зонах литосферы, возможных причинах их формирования, особенностям строения. Подчеркнуто значение активных разломов. Дается общая оценка существующих к настоящему времени представлений о разломах, указывается на пробелы в наших знаниях и, таким образом, обосновывается необходимость исследований, изложенных в данной диссертации. Глава написана достаточно полно и показывает хороший кругозор автора.

Во **второй главе** «Общая характеристика метода физического моделирования в приложении к изучению процессов формирования зон разломов» дана история развития метода физического моделирования, результаты изучения строения сдвиговых зон с помощью этого метода. На основе анализа и обобщения литературных данных приводится схема последовательного развития дислокаций в зоне сдвига. Этот раздел написан весьма детально, но к нему можно сделать небольшие *замечания*. В главе весьма полно описан структурный парагенез в моделях из влажной глины, однако в мире сделано множество экспериментов по воспроизведению зон сдвига с использованием песка, и надо сказать, что структурные парагенезы в этих двух случаях заметно различаются. В то же время многие природные зоны сдвигов похожи как раз на песчаные модели. Кроме того, автор описал структурный парагенез сдвиговой зоны с неоднородным по латерали и вертикали напряженным состоянием (т. наз. зона сдвига Риделя), которая моделируется с помощью двух жестких блоков основания и вышележащего чехла. Однако существуют модели и с квазиоднородным напряженным состоянием (distributed strike-slip shear experiments), в которых развивается более простой структурный парагенез. То есть надо было вначале сказать, что описываются только зоны сдвига Риделя, выполненные из влажной глины. Также в главе сказано, что пластическая деформация имеет место именно на первой стадии развития сдвиговой зоны и эта деформация выражается в формировании складок. Но такие складки в экспериментах образуются далеко не всегда. Кроме того, на второй стадии появляются валобразные поднятия (структуры pop-up), которые в принципе тоже можно назвать складками и в развитии которых принимает участие пластическая деформация. Такие структуры описаны, в частности, в работах А.С. Алексева.

В выводах к главе обоснована необходимость дальнейших исследований сдвиговых зон с помощью экспериментальных методов.

В третьей главе изложены «Методические вопросы физического моделирования и обработки фактического материала». Особое внимание уделено условиям подобия при физическом моделировании. В рамках работы применялся критерий подобия

$$\eta / \rho g L T = \text{const}$$

Замечание: этот критерий подходит для пластической деформации в широком смысле этого слова. При моделировании разрывов необходимо учитывать подобие по таким параметрам, как коэффициент внутреннего трения и когезия, что и делается в большинстве зарубежных работ. В главе обозначен объект моделирования – это крупные разломные зоны, охватывающие всю литосферу. Но такой параметр как вязкость различается в разных частях этого объекта, может меняться с течением времени.

А.А. Каримова принимает во внимание, что деструктивные зоны литосферы являются крайне сложно устроенным объектом с самоподобием (квазифрактальностью) блоковой делимости. Это приводит автора к необходимости учесть структурный фактор подобия и видит его в микроблоковой структуре глинистой пасты. *Замечание:* уже довольно давно было показано, что структурного подобия при моделировании нельзя добиться принципиально (см., например, труды А.А. Наймарка). С другой стороны, часто простые физические модели имеют сходство в основных чертах с весьма крупными структурами в неоднородной геологической среде. Конечно, этот вопрос далек от своего разрешения, но в любом случае уподоблять структурную неоднородность глины и огромной деструктивной зоны литосферы вряд ли правильно, да видимо, и не нужно. Думается, что не следует вообще настаивать на том, что моделируются именно огромные деструктивные зоны литосферы. Такие зоны очень сложны, имеют длительную историю развития, они могут в разное время находиться в разных геодинамических обстановках (имеется в виду, прежде всего, характер напряженного состояния), поля напряжений в разных частях структуры тоже различны; они имеют блоковую делимость многих порядков, которая к тому же все время меняется. Кроме того, непонятно, чему в таких зонах можно уподобить жесткие блоки основания (доски в модели). Зоны сдвига Риделя в моделях, конечно сложнее, чем это кажется на первый взгляд, но ни в какое сравнение не идут с деструктивными зонами литосферы. Представляется, что закономерности, полученные автором и представленные в настоящей главе, можно отнести к любой сдвиговой зоне. Более того, взбросы и сбросы с физической точки зрения тоже представляют собой зоны сдвига.

В этой же главе описаны техника подготовки и проведения эксперимента, способы получения фактического материала и методы его обработки. Все это создает основу для понимания результатов, изложенных в следующей главе.

Глава 4. «Основные закономерности развития разрывной структуры сдвиговых зон». Глава состоит из трех разделов. В первом из них рассмотрена эволюция

сдвиговой зоны как периодический процесс. Фактическим материалом для этого раздела послужили серии фотографий, в которых был измерен целый ряд параметров для структур разных порядков. Был построен ряд графиков изменений этих параметров во времени и пространстве. Анализ графиков позволил автору сформулировать первое защищаемое положение о неравномерности и периодичности деформационного процесса на различных структурных уровнях сдвиговой зоны.

Следующий раздел посвящен сегментной структуре разрывов в сдвиговой зоне. Здесь анализировались отдельные разрывы, вдоль которых измерялись как амплитуда смещения вдоль разрыва, так и изменение расстояний между реперами, указывающее на деформацию материала. Результатом обработки явилось построение нескольких графиков изменения амплитуды и ее приращения вдоль разрыва во времени, а также вариации деформаций по простиранию разрыва. Эти построения привели автора к возможности сформулировать второе защищаемое положение о сегментации единичных разрывов в сдвиговой зоне, о чередовании пассивных и активных сегментов и разнонаправленной динамике смещений на активных сегментах.

Последний раздел посвящен дискретно-волновой динамике деформаций в сдвиговой зоне. Выводы этого раздела основаны всего на трех экспериментах, из которых первый является главным – это анализ модели именно сдвиговой зоны. В данном случае исследовалась эволюция полей деформации в определенной области на очень детальном уровне. Для этого использовался метод корреляции цифровых изображений. Два других эксперимента – моделирование двухосного сжатия-растяжения образца лишь дополняют результаты, полученные в результате анализа первого опыта. Выводы, полученные в результате анализа экспериментов, представляют собой третье защищаемое положение: «деформационный процесс в сдвиговой зоне имеет дискретно-волновой характер и реализуется в виде периодически проходящих по ней локализованных фронтов деформаций. Пространственно-временная динамика деформационных волн в сдвиговой зоне определяется граничными условиями экспериментов и степенью развития ее внутренней разрывно-блоковой структуры». Это, безусловно, важные результаты, тем более, что о деформационных волнах в литературе говорится достаточно давно, здесь же представлено конкретное подтверждение прохождения таких волн в модельной сдвиговой зоне. *Замечание:* жаль, что сделан только один опыт по сдвиговой зоне - и в физике, и в экспериментальной тектонике обычно требуется проводить ряд экспериментов.

Почти вся глава написана достаточно детально, нельзя не согласиться с выводами автора, однако есть *замечания* к ее третьему разделу. Неплохо было бы детальнее рассмотреть ПО Strain Master, понять, производилась ли с помощью него предварительная обработка и анализ оптических изображений и т.д. В работе сразу после описания эксперимента помещен рисунок 4.16 (на котором и строится основной вывод автора), озаглавленный «Пространственная миграция деформационных волн в

формирующейся сдвиговой зоне» и представляющий собой прямоугольник с линиями разрывов и цепочками красных точек. Для того, чтобы разобраться в том, что же это означает, пришлось обратиться к другим источникам информации. Диссертация – это квалификационная работа, а не краткие тезисы, при ее чтении хотелось бы во все вникнуть и удостовериться в том, что автор хорошо понимает то, что он пишет.

В 5 главе А.А. Каримова проводит «Сравнение полученных результатов физического моделирования сдвиговых зон с результатами исследований их природных аналогов». Автор справедливо замечает, что провести такое сравнение очень трудно из-за недостатка данных о поведении разломов в аспекте тематики данной работы. А.А. Каримова проделала большую работу по поиску и анализу подходящих объектов. Особенно убедительны примеры разломных зон, в которых проводились инструментальные наблюдения, что дало возможность построить графики амплитуды перемещений и ее приращения в зависимости от времени, причем некоторые из них построены самим автором. Приведенная информация подтверждает выводы диссертационной работы о сегментной активизации разломов и возвратно-поступательной динамике смещений. Хуже дело обстоит с доказательством дискретно-волнового характера деформаций, но это не является недоработкой автора.

В заключении суммируются основные результаты, полученные автором в ходе работы над диссертацией.

Следует подчеркнуть, что автором проделан большой объем работы. Приведенные в диссертации материалы изложены, за некоторым исключением, достаточно детально. Вместе с тем, работа не лишена некоторых недочетов и упущений - замечания приведены в анализе каждой из глав. Указанные недостатки не умаляют общей высокой оценки диссертации и не ставят под сомнение полученные автором результаты. А.А. Каримова проанализировала и обобщила обширный фактический материал, включая опубликованные результаты исследований предшественников, а также результаты, полученные в ходе проведения большого количества собственных экспериментов. Автором был обработан колоссальный комплекс данных, проведена интерпретация результатов, что отражено в работе в виде многочисленных иллюстраций, в том числе различных графиков.

Подводя итог, следует отметить, что автором диссертации выполнены исследования, в ходе которых обнаружен ряд особенностей деформационной динамики разрывно-блоковой структуры сдвиговых зон. Полученные результаты о сегментной активизации разломов, возвратно-поступательной кинематике смещений, периодичности развития разрывной структуры на разных уровнях, дискретно-волновом характере процесса деформирования сдвиговой зоны существенно расширяют наши представления о развитии таких зон и вносят вклад в дальнейшее совершенствование теории разломообразования. Полученные новые знания будут востребованы сейсмологами для моделирования очагов землетрясений и структурными геологами при реконструкции полей напряжений.

Диссертация А.А. Каримовой представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Полученные результаты прошли апробацию на многочисленных научных конференциях и совещаниях. Текст диссертации написан хорошим языком, структура изложения логична. По теме диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ. Эти научные публикации в полной мере отражают содержание исследований, основные выводы и защищаемые положения диссертации. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа А.А. Каримовой соответствует требованиям «Положения о порядке присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842). Анастасия Алексеевна Каримова заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика».

Официальный оппонент,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник
кафедры динамической геологии геологического
факультета Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

23 августа 2022 г.

/Н.С. Фролова/

Подпись *Н.С. Фролова* *Зав. канцелярией геологического ф-та*
М.Г. Вебер

