

На правах рукописи



Каримова Анастасия Алексеевна

**СЕГМЕНТНАЯ АКТИВИЗАЦИЯ РАЗРЫВОВ И ДИСКРЕТНО-ВОЛНОВАЯ
ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИЙ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ
(ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)**

25.00.03 – геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Научный руководитель:

Борняков Сергей Александрович, кандидат геолого-минералогической наук, ведущий научный сотрудник лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН.

Официальные оппоненты:

Быков Виктор Геннадьевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск

Фролова Наталья Сергеевна, кандидат геолого-минералогической наук, ведущий научный сотрудник кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ, г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН, г. Москва).

Защита состоится «14 сентября» 2022 года в 09:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull214/3129.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «23» мая 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.022.03 кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Крупные сдвиговые зоны имеют широкое распространение в литосфере и являются важными структурными элементами литосферы, во многом определяющими её тектоническую эволюцию и контролирующими широкий комплекс генетически связанных с их развитием процессов [Пейве, 1945; Шерман и др, 1991, 1992, 1994; Шерман, 2014]. Они имеют сложное, но закономерное внутреннее строение, представленное совокупностью разломов и вычленяемых ими блоков [Семинский, 2003, 2005]. Известно, что из всей совокупности внутриразломных разрывных нарушений активными является только часть из них [Трифонов, 1985, 2001]. При этом активность последних может меняться во времени, вплоть до их перехода в латентное, пассивное состояние. Напротив, разрывы, длительное время находившиеся в состоянии тектонического покоя, могут активизироваться с проявлением сейсмогенных смещений по ним. Существуют ли периодичности в активности разрывов на разных масштабных уровнях, меняется ли их активность по простиранию и чем она обусловлена, каков механизм передачи неупругих деформаций в зоне крупного разлома? Все эти вопросы, имеющие высокую степень актуальности, как с теоретической, так и с практической точки зрения, являются предметом исследования настоящей диссертационной работы.

Цель работы: Выявить основные закономерности деформационной динамики разрывно-блоковой структуры формирующейся крупной сдвиговой зоны методом физического моделирования.

Задачи исследования:

1. Выполнить с соблюдением условий подобия физическое моделирование процесса формирования крупной сдвиговой зоны Риделя в упруговязкопластичной модели литосферы и собрать с моделей необходимый фактический материал, характеризующий деформационную динамику её разрывно-блоковой структуры.

На основе анализа полученного фактического материала:

2. Выявить наличие периодичностей в деформационном развитии разрывно-блоковой структуры на разных масштабных уровнях;

3. Изучить динамику смещений по разрывам и их связь с деформациями смежных с ними блоков;

4. Оценить особенности пространственной миграции неупругих деформаций в разрывно-блоковой структуре сдвиговой зоны.

Методы исследования и фактический материал:

Основным методом исследования являлся метод физического моделирования [Гзовский, 1975].

За время проведения диссертационного исследования автором выполнено более 100 экспериментов. Фотографии, формирующихся в моделях сдвиговых зон, составили исходную основу для сбора необходимого фактического материала в виде измерений определённых параметров. Всего с фотографий собрано более десяти тысяч замеров разных количественных параметров, характеризующих деформационную динамику разрывно-блоковой структуры сдвиговых зон.

Фактический материал, характеризующий деформационную динамику разрывов в сдвиговой зоне, получен при компьютерной обработке фотографий программным комплексом «StrainMaster».

Основные выводы, полученные в процессе анализа и обобщения полученного фактического материала, сформулированы в виде трех защищаемых положений.

Защищаемые положения:

1. Разрывно-блоковая структура сдвиговой зоны развивается неравномерно в виде периодически повторяющихся активизаций деформационного процесса, по длительности реализации укладываемых в последовательность: период–группа периодов – этап – стадия.

2. Протяженные разрывы в сдвиговой зоне в каждый момент времени представлены совокупностью чередующихся по их простиранию активных и пассивных сегментов. Сегментация разрывов и кинематика активных сегментов определяются особенностями деформаций в смежных с ними блоках.

3. Деформационный процесс в сдвиговой зоне имеет дискретно-волновой характер и реализуется в виде 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.

Научная новизна исследования

На основе результатов физического моделирования процессов формирования крупных сдвиговых зон в упруговязкопластичных моделях литосферы впервые установлено:

1. При постоянной скорости деформирования модели развитие разрывно-блоковой структуры сдвиговой зоны происходит неравномерно, а именно в виде повторяющихся последовательностей разномасштабных активизаций. В масштабе всего процесса формирования сдвиговой зоны выделены три таких активизации, определяемые как стадии. В пределах стадий выделяются менее продолжительные активизации, определяемые как этапы, которые подразделяются на периоды, в рамках которых реализуются единичные активизации. Таким образом, расширены ранее выявленные представления о периодичности развития сдвиговых зон в виде стадий [Шерман и др., 1991; Семинский, 2003, 2005].

2. Все активные разрывы в сдвиговой зоне имеют сегментную структуру. Активные сегменты имеют разную деформационную активность, а нередко и кинематику. Показано, что причиной сегментации разрывов является разная динамика деформаций в смежных с разрывом блоках.

3. Деформации в упруговязкопластичной среде могут распространяться в виде уединенных локализованных линейных фронтов. В частности, показано, что деформационный процесс в сдвиговой зоне, формирующийся в модели с такой реологией, имеет дискретно-волновой характер.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что полученные новые результаты вносят вклад в дальнейшее развитие теории разломообразования. В частности, существенно расширены представления о ранее выявленной неравномерности в деформационной эволюции внутренней структуры зон разломов [Шерман и др., 1991, 1992, 1994; Семинский 2003, 2005]. Показана избирательная, сегментная активность протяженных разломов по их простиранию и её физическая природа. Получено дополнительное подтверждение возможности передачи неупругих деформаций в литосфере в виде локализованных фронтов деформаций.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что выявленная сегментная динамика разрывов в сдвиговой зоне создает предпосылки для разработки тектонофизической модели подготовки очага землетрясения. Кроме того, факт возможности реализации смещений разного знака на разных активных сегментах в пределах даже одного разрыва, в условиях равномерного нагружения модели с постоянной скоростью, следует учитывать при реконструкции полей напряжений геолого-структурными методами.

Личный вклад автора.

Работа представляет собой итог и обобщение результатов исследований, проведенных автором в лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. Выполнено физическое моделирование процессов формирования сдвиговых зон при разных граничных условиях экспериментов, собран фактический материал с фотографий экспериментов, проведён анализ, обобщение и интерпретация полученных результатов.

Степень достоверности и апробация работы.

Положенный в основу диссертационного исследования фактический материал получен автором методом физического моделирования в период с 2010 по 2020 гг. Степень достоверности фактического материала обеспечивается проведением экспериментов с соблюдением условий подобия и многократным их повторением при одинаковых граничных условиях для получения статистически значимых количественных данных по исследуемым параметрам.

Количество опубликованных автором или при его участии научных работ - 25, из них 6 в рецензируемых журналах из списка ВАК.

Представленные в диссертации научные результаты докладывались на семинарах и конференциях различного уровня: молодёжная тектонофизическая школа-семинар (Москва, 2013, 2017); IX международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Иркутск, 2013); VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2014); Всероссийская молодёжная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2015, 2017, 2021); III Всероссийское совещание «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» (Иркутск, 2016); четвертая тектонофизическая конференция (Москва, 2016); 3-ья международная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике, географии» (Севастополь, 2018); Молодежная научная конференция-школа «Геология на окраине континента» (Владивосток, 2019); Всероссийское совещание «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ» (Иркутск, 2021).

Диссертационная работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты 15-55-53023-ГФЕН-а; 16-35-00349 мол_а и 16-35-00141 мол_а).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 25.00.03.

Диссертационная работа представляется по научной специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

Согласно паспорту научной специальности 25.00.03 работа соответствует пункту № 8.

Пункт №8: Экспериментальная тектоника (тектонофизика), включающая физическое и компьютерное моделирование условий формирования тектонических структур и их сочетаний.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, общий объём работы составляет 122 страницы, включает 64 рисунка и 1 таблицу. Список литературы состоит из 196 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю – к.г.-м.н. С.А. Борнякову за постановку темы исследования, за руководство и за помощь в создании данной работы, к.ф.-м.н. И.А. Пантелееву за обработку фотоматериалов методом корреляции цифровых изображений и консультации по интерпретации полученных расчетных результатов. За обсуждение, критику и ценные советы автор благодарен д.г.-м.н. К.Ж. Семинскому, д.г.-м.н. В.В. Ружичу, д.г.-м.н. О.В. Луниной, к.г.-м.н. А.В. Черемных, к.г.-м.н. Ю.П. Бурзуновой и другим коллегам из лаборатории тектонофизики. Также автор выражает благодарность А.А. Каримову за моральную поддержку, советы и редакционную помощь в оформлении текста диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Эволюция и современное состояние представлений о разломах литосферы

В главе приведены общие сведения о формировании представлений о разломах в историческом аспекте. Показано, что на каждом этапе развития геологической науки эти представления определялись основными концепциями о тектоническом развитии Земли. В период становления и развития идей контракционной гипотезы разломы рассматривались как второстепенные, мелкомасштабные структуры, сопутствующие процессу складкообразования. В эпоху фиксизма произошла трансформация во взглядах на разломы как на самостоятельные структуры литосферы и на масштаб их проявления. Этому способствовало выделение линеаментов, которые впоследствии стали отождествляться с крупными разломами. Поворотной вехой в признании разломов как важнейших структурных элементов литосферы стало учение о глубинных разломах, заложенное И.Г. Кузнецовым и позднее развитого А.В. Пейве, Н.С. Шатским, А.Н. Заварицким и другими. Было показано, что глубинные разломы имеют большую протяженность и глубину заложения, развиваются длительно и унаследованно, имеют определенную связь с формациями горных пород, играют главную роль в закономерностях образования и размещения магматических пород и рудных месторождений. Во времена доминирования идей фиксизма глубинные разломы связывались преимущественно с вертикальными движениями разграничиваемых ими крупных блоков. Признание роли больших горизонтальных движений в тектоническом развитии земной коры положено в начале шестидесятых годов прошлого столетия А.В. Пейве и его последователями и окончательно утвердилось в семидесятых годах с открытием системы срединно-океанических хребтов и последовавшим за этим развитием концепции тектоники плит [Ле Пишон, 1977]. Было установлено, что глубинные разломы являются составными элементами более крупных межплитных разломных зон. Для таких разломных зон предложено понятие «деструктивные зоны литосферы» [Шерман, 1996]. Показано, что такие зоны в ходе своего развития контролируют широкий комплекс процессов, в том числе сейсмичность. Урбанизация территорий, расположенных в областях динамического влияния крупных разломных зон, масштабное развитие в их пределах архитектурных и транспортных систем потребовала изучения не только структурных, но и деформационных параметров разломов. Было введено понятие «активный разлом», начато исследование их деформационной динамики инструментальными методами, в том числе методами космической геодезии, оценены направления и скорости смещений по ним. На сегодняшний день показано, что крупные разломные зоны имеют сложную, но закономерно устроенную масштабно-иерархическую внутреннюю разрывную структуру, определяемую их морфолого-генетическим типом и развивающуюся стадийно [Hirata, 1986; Шерман и др., 1991, 1992, 1994; Turcotte 1992, 1995; Cowie et al., 1995; Ouillon et al., 1996; Ружич, 1997; Legrand, 2002 и др.].

Глава 2. Физическое моделирование как метод исследования разломов

В главе приведены общие сведения о развитии метода физического моделирования процессов разломообразования и его современное состояние.

Первые попытки физического моделирования в тектонике относятся ко второй половине 19 века и связаны с изучением механизмов формирования складок. Эксперименты того времени носили качественный, иллюстративный характер. Несмотря на низкий уровень теоретической обоснованности моделирования того времени, первые попытки воспроизведения складок и разрывов, связанные с именами Г. Кеделя, А. Фавра, А. Добрэ, Б. Виллиса, Э. Рейера сыграли

положительную роль в развитии взглядов на механизм образования тектонических структур и положили начало использованию экспериментальных моделей при решении структурно-тектонических проблем.

Предпосылками создания теоретической базы моделирования явились исследования по экспериментальному изучению механических свойств горных пород при высоких давлениях и температурах. На их основе М. Хаббертом [1937], Б.Л. Шнеерсоном [1947] и Е.Н. Люстихом [1949] были предприняты первые попытки разработки теории подобия тектонических явлений и лабораторных моделей. Позднее М.В. Гзовским, на основе новых данных по теории прочности материалов и механики горных пород были разработаны физические основы моделирования [Гзовский, 1954].

Активное развитие физического моделирования зон разломов началось в 60х – 70х годах прошлого века. Отечественные экспериментальные исследования определялись деятельностью коллективов, возглавляемых М.В. Гзовским, В.В. Белоусовым, И.В. Лучицким и их последователями: Д.Н. Осокиной, А.Н. Бокуном, М.А. Гончаровым, В.Г. Гутерманом, А.В. Михайловой, Е.И. Паталахой, А.И. Шемендой, С.И. Шерманом, Н.С. Фроловой, и другими.

За рубежом физическое моделирование процессов разломообразования всегда было актуально и востребовано. Развернутое представление об объеме и содержании ранее выполненных работ дают обзорные статьи [McClay, 1996; Dooley, Schreurs, 2012]. О современном их состоянии можно судить по текущим публикациям в специализированных журналах и по тезисам конференций по физическому и математическому моделированию «GEOMOD», проводимых в Европе с периодичностью раз в два года.

В настоящее время в России физическое моделирование процессов разломообразования проводится на геологическом факультете и музее землеведения МГУ и в лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. За рубежом экспериментальные центры существуют во Франции, в Италии, Германии, Швеции, Канаде, США, Австралии и во многих других странах.

Отличительной особенностью физического моделирования на современном этапе является его высокая техническая оснащенность как в части экспериментального оборудования, так и в части регистрации результатов моделирования и их компьютерной обработки.

Глава 3. Методика физического моделирования

3.1. Условия подобия

Физическое моделирование процессов формирования крупных разломов и других структур литосферы, должно выполняться с соблюдением пяти основных принципов, вытекающих один из другого и взаимно дополняющих друг друга: принципа подобия моделей природным объектам; принципа селективности; принципа сепарации; принципа аппроксимации; принципа статистической обоснованности результатов [Гзовский, 1975].

Наиболее важным из перечисленных принципов является первый. Существует качественный и количественный подходы к его реализации. Представители первого из них (В.В. Белоусов, М.А. Гончаров, В.Г. Гутерман, Х. Рамберг и другие) считают, что достаточно достижения подобия модели и её природного аналога на качественном уровне, тогда как сторонники второго подхода убеждены в том, что такое подобие должно осуществляться на количественной основе. Второй подход разработан М.В. Гзовским с учетом ранее имеющегося опыта использования условий подобия при моделировании в геотектонике Г. Кенинсбергом, Е.Н. Люстихом, О. Моратом, М. Хаббертом, Б.Л. Шнеерсоном и физике А.А. Гухманом В.Л. Кирпичевым, М.В. Кирпичевым, Л.С. Эйгенсоном и другими. Позднее предпринимались неоднократные попытки его

совершенствования А.А. Бабичевым, А.И. Шемендой, С.И. Шерманом. Настоящее диссертационное исследование опирается на второй подход.

В нашем случае граничные условия экспериментов определялись в соответствии с критерием-комплексом подобия:

$$\eta / \rho g L T = \text{const}, \quad (1)$$

где η - вязкость, Па·с; ρ - плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – линейные размеры, м; T – время, с. Правомерность использования данного критерия-комплекса обсуждалась в серии работ [Гзовский, 1975; Шеменда, 1983; Шерман, 1984; Бабичев, 1987]. Уравнение 1 позволяет вычислить масштабные коэффициенты для каждого из использованных в нем физических параметров. Так, при моделировании крупномасштабных тектонических процессов средним значениям вязкости 10^{20-23} Па·с, плотности $2.7 \cdot 10^4$ н/м³, толщине $(60-100) \cdot 10^4$ м континентальной литосферы и продолжительности формирования крупных зон разломов 10-100 млн. лет, соответствуют средние значения вязкости 10^{4-7} Па·с, плотности $2.0 \cdot 10^4$ н/м³ и толщины $(6-10) \cdot 10^{-2}$ м модели и продолжительности моделируемого процесса 10-100 минут. Из принятых значений параметров, определяющих подобие процессов в эксперименте и в природе масштабные коэффициенты вязкости C_η , плотности C_ρ , линейных размеров C_l и времени C_t составляют $\sim 10^{16}$, ~ 1 , $\sim 10^6$, $\sim 10^{11}$ соответственно. При полученных масштабных коэффициентах C_l и C_t 1 мм в модели соответствует 1 км в её природном аналоге, а 1 минута эксперимента эквивалентна 1 млн. лет природного процесса.

3.2. Модельный материал

Литосфера в целом в зависимости от времени и масштабов силового воздействия проявляет широкий спектр механических и реологических свойств. Так при кратковременных нагрузках небольших её объемов она ведет себя как упругое тело, тогда как при длительном и масштабном их действии она проявляет свойства вязкости. Для правильного подбора модельного материала и определения граничных условий экспериментов при моделировании деформационных процессов в литосфере следует оценить пространственно-временной масштаб воспроизводимого в модели процесса, в нашем случае процесса формирования крупной разломной зоны. Принимая во внимание оценки [Монин, Сорохтин, 1979], примем вероятную длительность её формирования 10-100 млн лет. В рамках такого временного интервала литосфера в больших масштабах проявляет обратимые, а также необратимые деформации и ведет себя как упруговязкое тело [Шерман, 1977]. Модельный материал должен проявлять аналогичные свойства в рамках граничных условий эксперимента.

Необходимыми свойствами обладают водные пасты глин различного состава. Нами в качестве модельного материала использована водная паста монтмориллонитовой глины, правомерность использования которой для моделирования обоснована специально проведенным исследованием [Семинский, 1986].

3.3. Экспериментальное оборудование

Экспериментальное оборудование включает в себя установку для моделирования, вискозиметры для определения вязкости модельного материала и аппаратуру для фото- и видеорегистрации протекающих в моделях процессов разломообразования.

Эксперименты проводились на установке «Разлом» (рис. 1). Рабочая поверхность установки имеет размеры 1.5·1.0 м и состоит из четырех штампов, взаимное перемещение которых позволяет воспроизводить в моделях процессы формирования всех основных типов разломных зон в

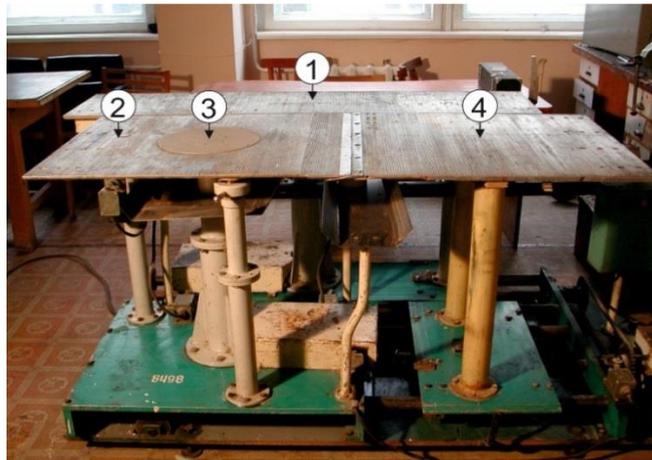


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки «Разлом» для физического моделирования процессов разломообразования.

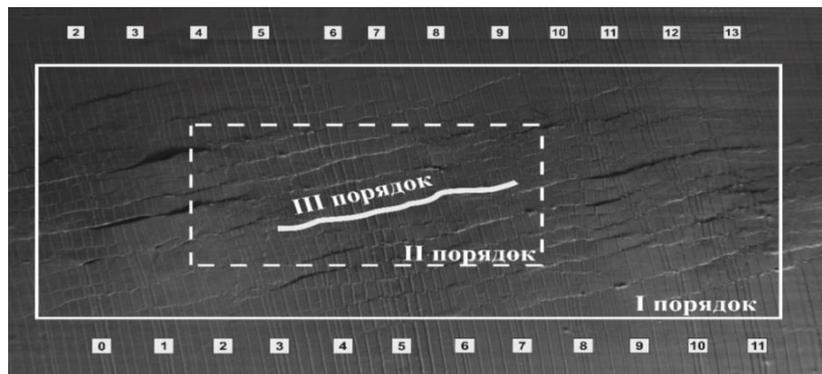


Рис. 2. Принятые масштабные уровни в сдвиговой зоне.

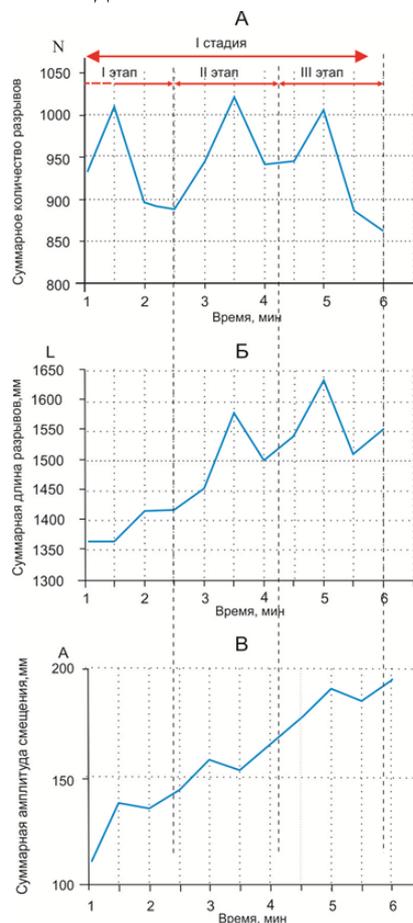


Рис. 3. Этапы процесса разрывообразования в первую стадию развития сдвиговой зоны, выделяемые по повторяющимся однотипным вариациям тестовых параметров.

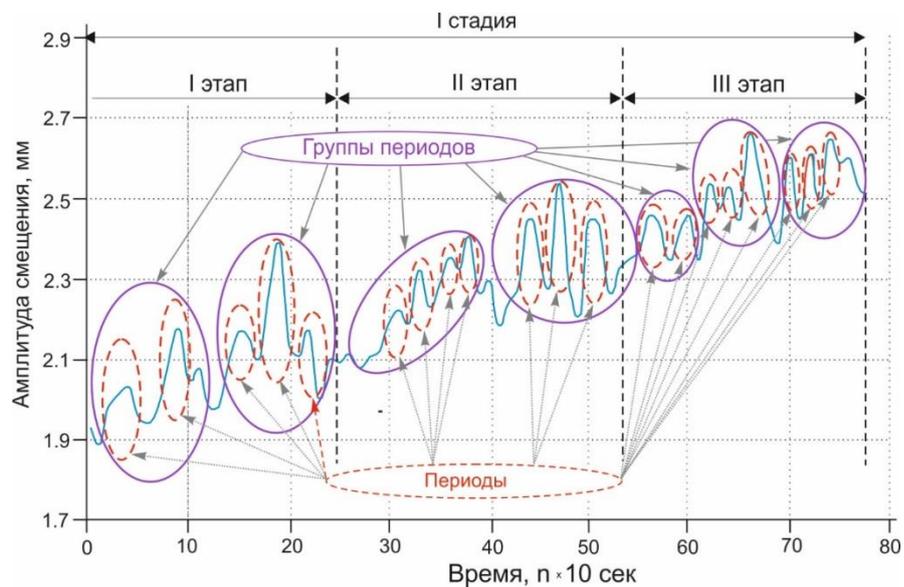


Рис. 4. Группы периодов и периоды в пределах этапов, выделяемые по вариациям накопленной амплитуды смещения на разрыве.

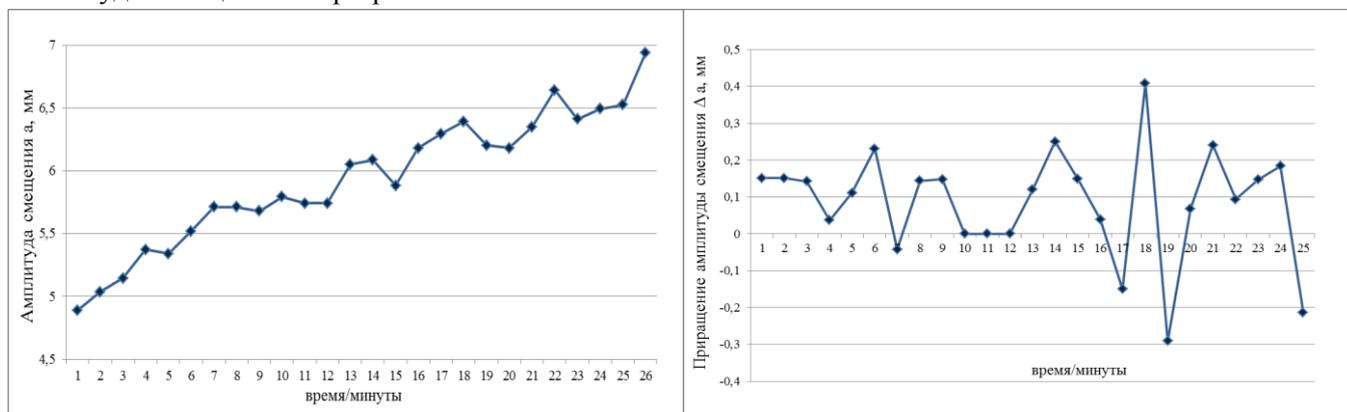


Рис. 5. Вариации накопленной амплитуды смещения a_i (А) и её поминутных приращений (Б) во времени на одном контрольном репере на разрыве

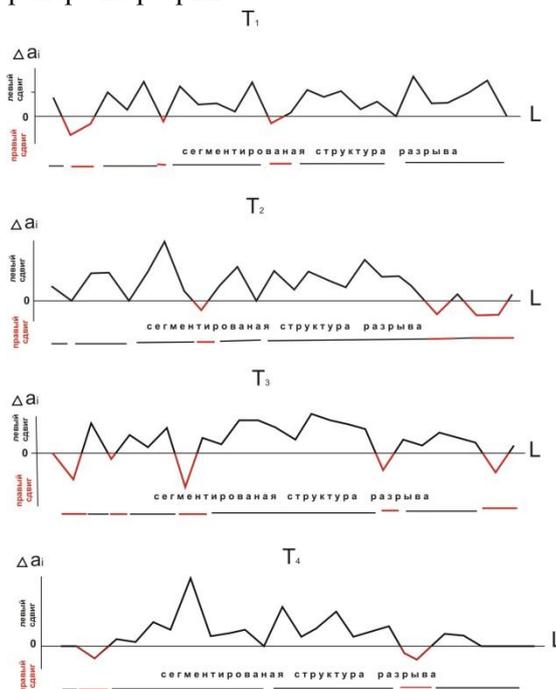


Рис. 6. Вариации приращения амплитуды смещения Δa_i по простиранию разрыва L в формирующейся сдвиговой зоне, зафиксированные во временной последовательности T_1, T_2, T_3, T_4 с дискретностью 1 минута

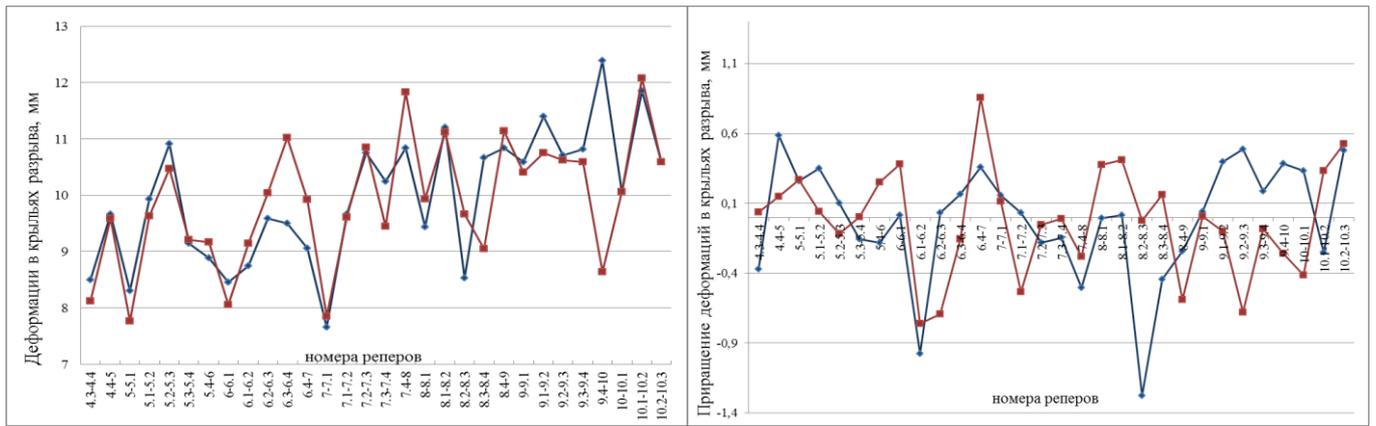


Рис. 7. Деформации (А) и их приращения (Б) в смежных с разрывом верхнем (красная кривая) и нижнем (синяя кривая) блоках по его простираюнию

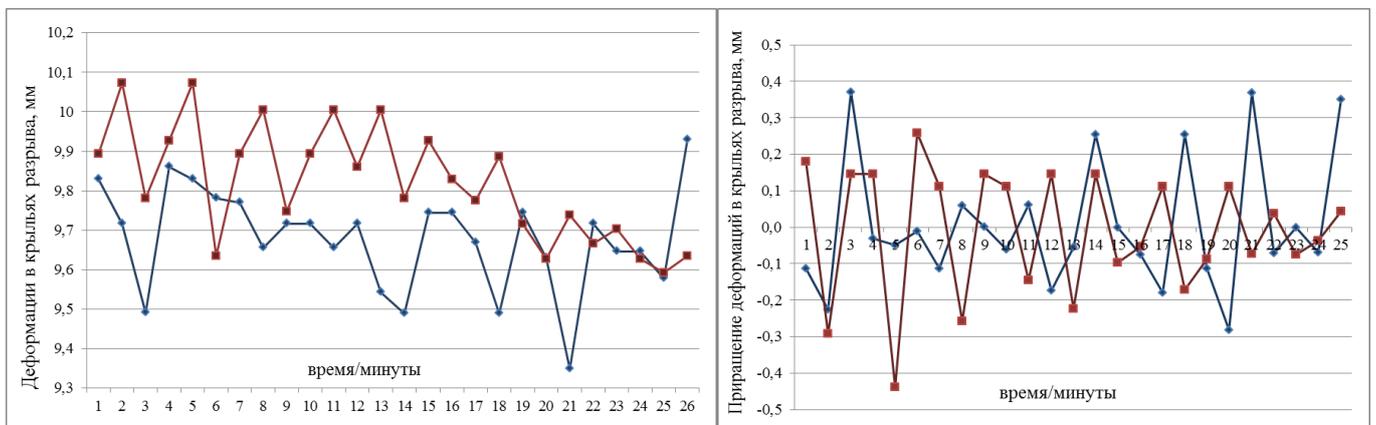


Рис. 8. Деформации (А) и их приращения (Б) в смежных с разрывом верхнем (красная кривая) и нижнем (синяя кривая) блоках во времени в локальном его участке во времени.

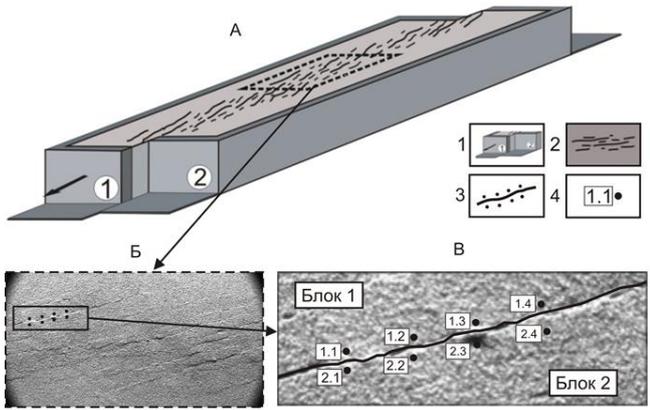


Рис. 9. Схема эксперимента первого типа (А), оптическое изображение поверхности модели с реперными точками в крыльях активного разрыва (Б) и его увеличенный фрагмент. 1 – подвижный (1) и неподвижный (2) штампы; 2 - модель; 3 – разрыв с реперными точками; 4 - номера реперных точек.

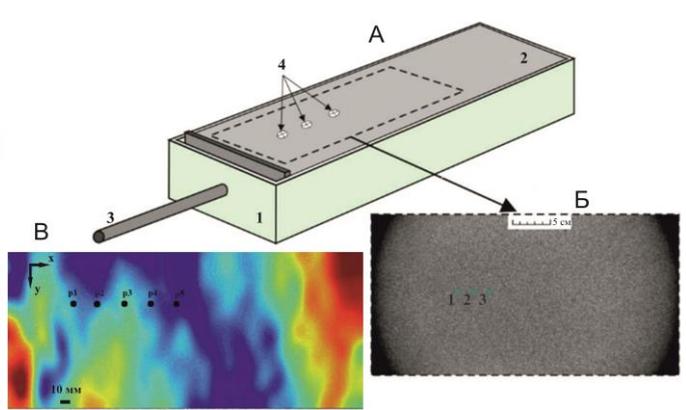


Рис. 10. Схема эксперимента второго типа (А), оптическое изображение поверхности модели с реперными точками 1, 2 и 3 (Б), расположение 5 точек на расчетной области (В). 1 – форма; 2- модель; 3 – подвижный штамп; 4 – расположение точек

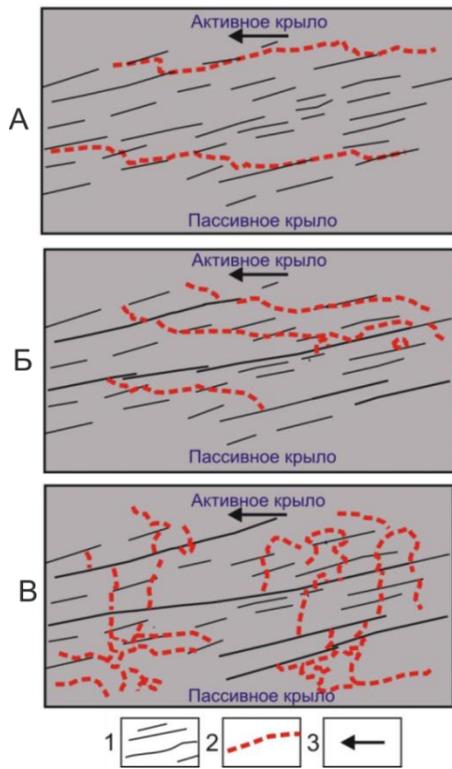


Рис. 11. Пространственная миграция деформационных волн в формирующейся сдвиговой зоне. 1 – разрывы; 2 – локализованный фронт деформации сдвига; 3 – направления смещения активного крыла

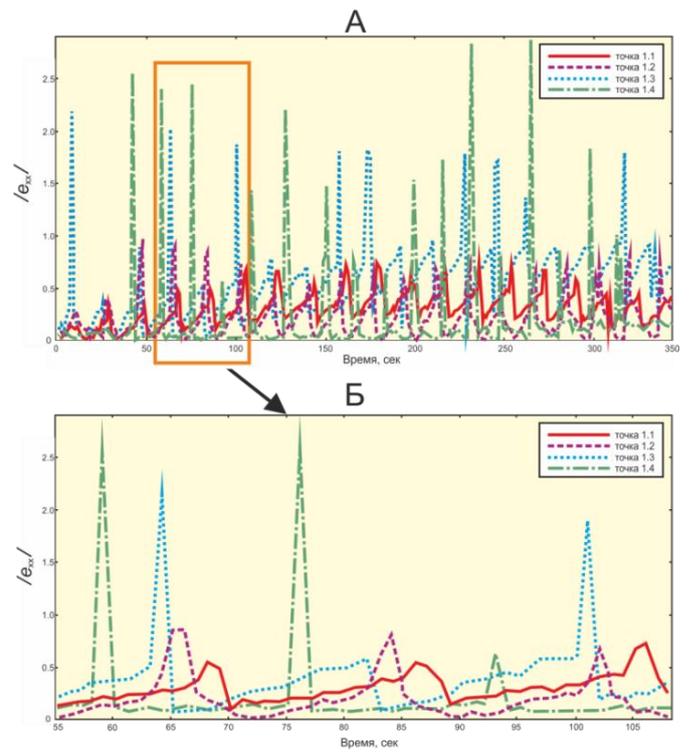


Рис. 12. Зависимость модуля продольной деформации от времени для четырех реперных точек за расчетный интервал 350 секунд (А) и её детализация на временном отрезке с 55 по 108 секунду (Б).

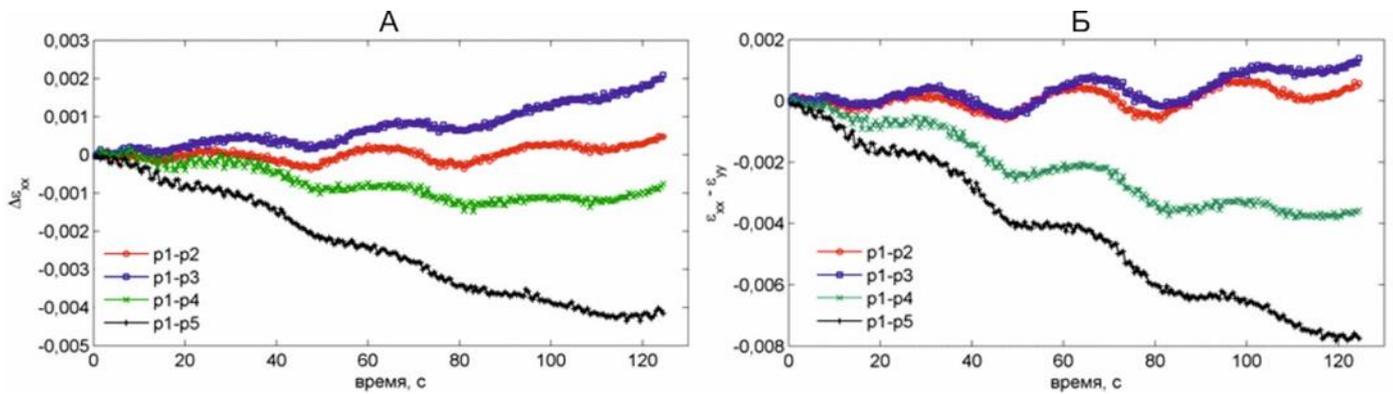


Рис. 13. Зависимости относительных горизонтальных деформаций (А) и скоростей деформаций (Б) от времени между точками 1 и 2 (p1-p2), 1 и 3 (p1-p3), 1 и 4 (p1-p4), 1 и 5 (p1-p5).

условиях растяжения, сжатия, сдвига или их комбинаций, при трех скоростях деформирования (10^{-5} , 10^{-4} и 10^{-3} м/с). В нашем случае модель размещалась на штампах 1, 2 и 4 и деформировалась по типу простого сдвига за счет горизонтального перемещения штампа 1 при неподвижных других штампах.

Контроль вязкости модельного материала осуществлялся вискозиметром ПДС-10, разработки М.В. Гзовского и Д.Н. Осокиной, позволяющим измерять вязкость упруговязкопластичных модельных материалов в диапазоне 10^{4-10} Па·с.

3.4. Техника подготовки и проведения эксперимента

Эксперименты выполнялись на моделях длиной 1.2 м, шириной 0.5 м и высотой 0.1 м. Модель с заданными реологическими параметрами размещалась на штампах экспериментальной установки (рис. 1), один из которых оставался неподвижным, другой перемещался с заданной постоянной скоростью. На плановую поверхность модели до начала деформирования наносились либо сетка реперных линий, вкрест простираемая будущей сдвиговой зоны, либо тонким слоем насыпался мелкозернистый песок. Реперные линии были необходимы для замеров тестовых структурно-деформационных параметров, осуществляемых с цифровых изображений в ручном режиме в графическом редакторе. Песок был необходим для создания множественного цветового контраста поверхности модели, что является неотъемлемым техническим условием компьютерной обработки цифровых изображений модели.

Ход каждого эксперимента фотографировался цифровыми фотокамерами, а также специализированной скоростной цифровой фотокамерой «Basler acA2000-50gm» с дискретностью от 1 секунды до нескольких минут.

3.5. Фактический материал и методы обработки

Исходным фактическим материалом для диссертационного исследования являлись полученные в ходе экспериментов серии цифровых изображений плановых поверхностей моделей, по которым строились структурные схемы и собиралась необходимая качественная и количественная информация.

На цифровых изображениях замерялись следующие параметры разрывов:

- количество разрывов (N);
- длины разрывов (L);
- амплитуды смещения по разрывам (a);
- расстояния между реперами в ограничивающих разрыв блоках сверху (m) и снизу (n).

Для параметров a, m и n впоследствии пересчитывались их приращения (Δa). Под приращением здесь понимается относительное приращение, которое определяется как приращение в расчете на единицу изменения переменной и рассчитывается по формуле ($\Delta a = a_2 - a_1$).

Замеры параметров осуществлялись, как в пределах выбранных тестовых площадок, так и в пределах отдельных протяженных разрывов, на сериях фотографий, последовательно от одной фотографии к другой, в ручном режиме в графическом редакторе. Затем составлялись таблицы по необходимым параметрам и строились графики.

Для анализа эволюции полей деформаций в сдвиговой зоне в целом и в пределах отдельных разрывов, использовался метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation), (DIC), основанный на анализе последовательности фотографий деформируемой поверхности материала [Sutton et al., 2009] (на базе программного обеспечения Strain Master). Данный метод

позволяет рассчитывать распределения компонент вектора перемещений, тензора деформации на поверхности испытываемого материала и их эволюцию во времени [Panteleev et al., 2014, 2015]. Расчет полей деформации и перемещений на фотографиях осуществлялся в пределах прямоугольной рабочей области размером 220 x 72.17 мм. Для объекта съемки обработка изображений может проводиться по двум сценариям: интегральному и дифференциальному. При интегральном сценарии оценка поля деформации объекта съемки проводится путем сравнения каждого кадра с первым кадром (исходное изображение). Такой подход позволяет восстановить картину последовательной деформации объекта съемки в процессе нагружения. При дифференциальном сценарии оценка поля деформации объекта съемки проводится путем последовательного сравнения двух соседних кадров. Таким образом, в результате получается картина последовательной деформации объекта съемки от кадра к кадру.

Глава 4. Основные закономерности развития разрывной структуры сдвиговых зон

4.1. Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс

Раздел посвящен результатам исследования проявления разномасштабных периодичностей при деформационной эволюции внутренней разрывной структуры сдвиговых зон.

В работах [Шерман, 1991, 1992, 1994; Семинский, 2003; Борняков, 2014] было показано, что внутренняя разрывная структура крупных разломных зон развивается периодически в рамках трех стадий. В этом разделе приводятся результаты физического моделирования, посвященные исследованию проявления периодичности на меньших временных масштабах в пределах одной стадии.

При исследовании априори выделены масштабные уровни I, II, и III порядка. К первому относится вся сдвиговая зона, ко второму её часть, ограниченная тестовой площадкой, и к третьему, отдельный протяженный разрыв в пределах этой площадки (рис. 2).

На рисунке 3 представлены результаты обработки одного из экспериментов, отражающие коллективную деформационную динамику разрывных нарушений в сдвиговой зоне на уровне II порядка в первую стадию её формирования. Приведенные графики отражают изменение во времени в пределах тестовой площадки суммарного количества всех разрывов (N), их длин (L) и амплитуд смещений по ним (a). Из графиков следует, что процесс разрывообразования в сдвиговой зоне реализуется с определенной периодичностью в виде повторяющихся закономерных вариаций тестовых параметров, длительностью 1.5 – 2.0 минуты (табл. 1), что позволяет говорить о реализации трех качественно повторяющихся деформационных этапов в рамках исследуемой стадии. Аналогичная, а также более дробная периодичности деформационного процесса в виде группы периодов и отдельных периодов выделяются при более детальном рассмотрении деформационного процесса на уровне III порядка (см. рис. 2). Их наличие демонстрирует график вариаций накопленной амплитуды смещения на одном крупном разрыве (рис. 4) [Каримова, Борняков, 2020].

Приведенные результаты составляют доказательную базу первого защищаемого положения.

Табл. 1

периодичность скорость	период		группа периодов		этап		стадия	
	модель, сек	природа, лет	модель, сек	природа, лет	модель, сек	природа, лет	модель, сек	природа, лет
0,5 мм/мин	40	650 000	120	2 000 000	250	4 000 000	800	13 000 000
5 мм/мин	4	65 000	12	200 000	25	400 000	80	1 300 000

4.2. Сегментная структура разрывов в сдвиговой зоне.

В разделе представлены результаты исследования закономерностей активизации протяженных разрывов в формирующейся сдвиговой зоне. На рисунке 5 приведены графики, отражающие вариации амплитуды смещения (a_i) и её изменение за контрольный временной интервал (Δa_i) на одном из реперов. Из первого графика видно, что в целом амплитуда со временем возрастает, однако на фоне этого общего тренда выделяются моменты не только роста параметра, но и его уменьшения (рис. 5 А). Последнее указывает на то, что на разрыве имело место смещение обратного знака, противоположное общему смещению крыльев сдвиговой зоны. Более отчетливо разнонаправленная динамика смещений по разрыву прослеживается в вариациях приращения их амплитуды, где прямым и обратным смещениям соответствуют положительные и отрицательные значения параметра Δa_i соответственно (рис. 5 Б).

Аналогичная деформационная динамика проявляется и по простиранию разрыва. Из сопоставления характера распределения приращения амплитуды смещения вдоль разрыва в разные времена T_1 , T_2 , T_3 и T_4 следует, что в каждый фиксированный момент времени разрыв разделяется на совокупность чередующихся по его простиранию активных и пассивных сегментов, часть из которых имеет обратный тип смещения (рис. 6). При этом положение сегментов и их длины не остаются постоянным и меняются во времени.

Одной из возможных причин сегментации разрывов является неравномерный характер реализации пластической деформации в их крыльях, в пределах прилегающих к разрыву краевых частей блоков. Это подтверждается результатами изменений деформаций модельного материала и их приращений в каждом из смежных с разрывом блоках, как по его простиранию в фиксированный момент времени (рис. 7), так и в локальном его участке во времени (рис. 8).

Видно, что блоки в крыльях разрыва деформируются неравномерно и не всегда согласовано по его простиранию в фиксированный момент времени (рис. 7 А).

Приращения деформаций за минутный интервал отчетливо показывают пространственную дифференциацию блоков на участки сжатия и растяжения, которым на графике соответствуют отрицательные и положительные значения параметра (рис. 7 Б). При этом нередки ситуации, когда в одном крыле разрыва существует сжатие, а в симметрично расположенной точке другого крыла фиксируется растяжение. При определенном сочетании таких деформационных обстановок в смежных блоках на самом разрыве реализуются смещения обратного знака.

Приведенные результаты, а также аналогичные результаты других экспериментов составляют доказательную базу второго защищаемого положения.

4.3. Дискретно-волновая динамика деформаций в зоне разлома

В разделе представлены результаты двух типов экспериментов, ориентированных на исследование механизма передачи деформаций в нарушенном и ненарушенном разрывами упруговязкопластичных моделях литосферы.

Эксперименты первого типа были направлены на регистрацию деформационных волн в формирующейся сдвиговой зоне, на изучение влияния её внутренней разрывной структуры на их пространственную миграцию, и на выяснение влияния волн на динамику смещений по разрывам. Эксперименты первого типа проведены по стандартной схеме (рис. 9 А). В экспериментах второго типа модель, не имеющая разрывных нарушений, подвергалась сжатию (рис. 10 А). Такая модель имитировала отдельный ненарушенный блок в сдвиговой зоне, вычлененный двумя разрывами.

В ходе экспериментов модели фотографировались в пределах тестовой площадки с дискретностью 1 секунда и полученные цифровые изображения в последующем обрабатывались программным комплексом «Strain Master». Для моделей первого типа экспериментов рассчитывались деформации сдвига в пределах всей тестовой площадки (рис. 9 Б) и продольных деформаций в пределах линейных профилей точек в двух смежных блоках, в непосредственной близости от разделяющего их активного разрыва (рис. 9 В). Для моделей второго типа экспериментов оценивалось относительное перемещение контрольных пар точек по дифференциальному сценарию (рис. 10 Б).

Результаты обработки цифровых изображений модели первого типа экспериментов показали, что процесс формирования сдвиговой зоны сопровождается периодическим прохождением по ней локализованных фронтов деформаций (рис. 11 А). Сформировавшись у активного штампа в ненарушенном модельном материале, они заходят в сдвиговую зону и свободно проходят через неё транзитом, не меняя свои размеры и форму пока её внутренняя структура представлена мелкими разрывами. Зарождающиеся впоследствии крупные разрывы, как структурные неоднородности, препятствуют прохождению через них деформационных волн. Вошедшая в сдвиговую зону единая протяженная деформационная волна, встречая на своем пути такие разрывы, разделяется ими на серию частных волновых фрагментов. Концы крупных разрывов разрезают перемещающуюся им навстречу деформационную волну. Новообразованные фрагменты волн меняют направление движения и перемещаются по простиранию блоков (рис. 11 Б). По мере приближения межстадийной структурной перестройки, в условиях существенного роста уровня напряжений в сдвиговой зоне [Разломообразование..., 1991], направленная миграция фрагментов деформационных волн по блокам ослабевает и дополняется формированием неподвижных, пульсирующих округлых и эллипсовидных фронтов локализованной деформации (рис. 11 В).

Рисунок 12 демонстрирует отклик блоков 1 и 2 на движение по ним деформационных волн. Отчетливо видно, что они с некоторой дискретностью последовательно проходят через реперные точки 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 от последней (1.4) к первой (1.1), инициируя возникновение в каждой из них короткопериодных деформационных аномалий (рис. 12 А). За выбранный контрольный временной интервал с 55 по 108 секунду зафиксировано прохождение трех деформационных волн с периодичностью 17-18 секунд (рис. 12 Б).

Результаты второго типа экспериментов представлены в виде зависимостей относительных горизонтальных деформаций и относительных скоростей деформаций от времени между парами реперных точек, расположенных на одной линии с шагом 26,7 мм (рис. 13). Здесь для обоих компонент наблюдается волновой характер изменения от времени с характерным периодом 33.5 секунды, что указывает на волновой механизм передачи неупругих деформаций в модели, не имеющей разрывных нарушений.

Приведенные результаты, а также аналогичные результаты других экспериментов составляют доказательную базу третьего защищаемого положения.

Глава 5. Сравнение полученных результатов физического моделирования сдвиговых зон с результатами исследований их природных аналогов

В главе рассмотрены примеры, заимствованные из литературных источников, подтверждающие выявленные по результатам моделирования сегментную активность разломов, возвратно-поступательную динамику смещений по ним, а также волновой механизм передачи неупругих деформаций в их пределах и в литосфере.

Сегментная активность разломов может быть рассмотрена на примере хорошо изученного разлома Сан-Андреас, который находится на заключительной стадии развития и является своеобразным эталоном континентальных сдвиговых зон. Разлом имеет сегментированную структуру, каждый из сегментов которого в свою очередь имеет разные характеристики и разную степень риска землетрясений. Почти по всей его протяженности (порядка 1300 км) неоднократно регистрировались землетрясения с горизонтальными смещениями до 5-6 м; скорость горизонтальных смещений, инструментально определяемых с 1970 г., колеблется от 20 до 35 мм/год [Koehler et al., 2005].

Сегментная активность также отмечается у разлома Марлборо [Robert Langridge, 2003] и Северо-Анатолийского разлома [Bohnhoff et al., 2017].

Для демонстрации возвратно-поступательной динамики смещений по разломам в природе можно привести результаты их инструментальных измерений в пещере Медвежья (Судеты, Польша) [Makolski, 2008]. Измерения проводились датчиками ГМ – 71 закрепленными на противоположных крыльях разломов. Деформации в противоположных бортах разлома чаще всего отличается по абсолютным значениям, и иногда по знаку, также зафиксированы абсолютные годовые изменения до 1 мм

Ярким примером возвратно-поступательной динамики крыльев активных сегментов являются результаты инструментальных измерений на геодинамическом полигоне в пределах Центрально-Сахалинского разлома, где фиксировалась неоднократная смена направления смещения его крыльев в течение нескольких месяцев [Василенко, 1986; Захаров, 1986]. Более короткопериодные смены направления смещений по локальному разлому инструментально регистрируются в процессе деформационного мониторинга на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне [Борняков, 2019].

Прямые инструментальные наблюдения дискретно-волновой передачи деформаций в литосфере на сегодняшний день отсутствуют, а косвенные подтверждения, вытекающие из результатов математического моделирования и результатов анализа пространственной миграции сейсмичности в сейсмоактивных зонах, показывают, что такой процесс вероятен [Быков, 2005, 2018; Кузьмин, 2004, 2012, 2020; Шерман, 2014].

Таким образом, сравнение рассмотренных в основных главах экспериментальных результатов и данных с результатами исследования различных аспектов активных разломов прямо или косвенно показывают, что выявленные в моделях сегментная активизация разломов, возвратно-поступательная динамика смещений и дискретно-волновой характер деформаций имеют место и в природных условиях.

Заключение

В результате проведенного диссертационного исследования ранее выявленная предшественниками периодичность развития разрывной структуры сдвиговой зоны в виде стадий дополнена новыми периодичностями более низких масштабных уровней в виде этапов-групп периодов и периодов.

На основе анализа вариаций количественных параметров, характеризующих деформационную динамику разрывов и блоков установлено, что протяженные разрывы в сдвиговой зоне имеют сегментную структуру, представленную в каждый момент времени совокупностью чередующихся по их простиранию активных и пассивных сегментов. Активизация пассивных сегментов и переход активных сегментов в пассивное состояние обусловлены разным деформационным поведением смежных блоков. Несогласованность деформационной динамики смежных блоков порождает разнонаправленную динамику смещений на активных сегментах.

По результатам компьютерной обработки цифровых изображений методом DIC установлено, что деформационный процесс в сдвиговой зоне имеет дискретно-волновой характер, что проявляется в периодическом прохождении по ней локализованных фронтов деформаций. Пространственно-временная динамика деформационных волн в сдвиговой зоне определяется степенью развития ее внутренней разрывно-блоковой структуры, уровнем накопленных в ней напряжений.

Пространственная миграция деформаций в ненарушенной модели также имеет волновой характер.

В подтверждение экспериментально найденных закономерностей приведены адресные природные примеры, заимствованные из литературных источников.

Публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России:

1. Тарасова А.А., Борняков С.А. Экспериментальное исследование закономерностей пространственно-временной активизации разломов в деструктивных зонах литосферы // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 9. С. 118–131.

2. Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. Иркутск. 2014. Т. 5 (4). С. 823-861.

3. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Дискретно – волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7 (2). С. 289-302.

4. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Динамика внутриразломных деформационных волн (по результатам физического моделирования) // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471. № 6. С. 722-724.

5. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Черемных А.В., Каримова А.А. Экспериментальное исследование периодической активизации разлома в сейсмической зоне // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9 (3). С. 653–670. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0366.

6. Каримова А. А., Борняков С. А. Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс (по результатам физического моделирования) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 44–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>.

Статьи в периодических изданиях:

1. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Салко Д.В., Тарасова А.А. Экспериментальная проверка волнового характера реализации деформаций при пассивном механизме Байкальского рифтогенеза // Вопросы естествознания. 2016. 4 (12). С. 41 – 47.

2. Борняков С.А., Каримова А.А. Динамика смещений по разрывам в структурах растяжения: по результатам физического моделирования // Евразийский союз ученых. 2018. № 10 (55). Ч. 3. С. 4–9.

Основные тезисы докладов и материалы научных конференций

1. Тарасова А. А. Сегментная активизация разломов (по результатам физического моделирования) // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы третьей молодёжной школы-семинара. М.: ИФЗ, 2013. Т. 1. С. 310-320.

2. Тарасова А.А. Изучение избирательной активизации разломов методом физического моделирования // Материалы VII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов). Новосибирск, 2014. С. 191 – 193.

3. Тарасова А.А., Борняков С.А., Пантелеев И.А. Экспериментальное изучение сегментной активизации разломов // Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции. Иркутск, 2015. С. 188 – 189.

4. Тарасова А.А., Пантелеев И.А., Черемных А.С. Развитие структуры сдвиговой зоны на разных масштабных уровнях // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы пятой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ, 2017. С. 354-356.

5. Каримова А.А., Борняков С.А. Метод Физического моделирования при изучении закономерностей развития деструктивных зон литосферы // Инновации в геологии, геофизике, географии. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции. Москва: Изд-во «Перо», 2018. С. 58-59.

6. Каримова А.А., Борняков С.А. Физическое моделирование как метод изучения сегментной активизации разломов // Материалы I молодежной научной конференции-школы, приуроченной к 60-летию юбилею ДВГИ ДВО РАН. Владивосток : Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2019. С. 15-18.

7. Каримова А. А. Сравнение результатов физического моделирования деструктивных зон сдвига и данных натурных наблюдений // Инновации в геологии, геофизике, географии. Материалы 5-ой Международной научно-практической конференции. Москва: Изд-во «Перо», 2020. С. 69-70.

8. Каримова А. А., Борняков С. А., Пантелеев И. А. Основные закономерности развития разрывной структуры сдвиговых зон: по результатам физического моделирования // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск: Изд-во ИГУ. 2021. С. 118.

Подписано к печати 12.05.2022 г. Формат 60x84/8.

Печать Riso. Усл. печ. л. 1.5. Усл. изд. 1.25. Заказ № 272. Тираж 150.

Отпечатано в Институте земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.