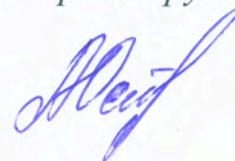


На правах рукописи



Остапчук Алексей Андреевич

**РЕЖИМЫ МЕЖБЛОКОВОГО СКОЛЬЖЕНИЯ:
УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И
ТРАНСФОРМАЦИИ**

Специальность 25.00.10 – «геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Кочарян Геворг Грантович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта Российской академии наук

Ребецкий Юрий Леонидович

доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Стефанов Юрий Павлович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН)

Защита состоится «23» июня 2016 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д002.050.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д.38, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru.

Автореферат разослан

«___» _____ 04 _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д002.050.01

кандидат физико-математических наук

Рыбаков В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В науках о Земле одной из важных является проблема эволюции деформационных режимов на различных участках разломных зон земной коры. Зачастую при внешней схожести напряженного состояния и структуры разломов, реализуются совершенно разные деформационные моды – от асейсмического крипа до динамических срывов (землетрясений и горно-тектонических ударов). Выявление закономерностей формирования различных режимов деформирования необходимо при решении многих фундаментальных и прикладных задач сейсмологии, механики разломообразования, сейсмотектоники, горных наук.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование закономерностей реализации различных режимов межблокового скольжения и разработка модели их возникновения и трансформации.

Основные задачи исследования

- Анализ имеющихся сведений о параметрах разломных зон и определение закономерностей локализации очагов слабой сейсмичности в зоне влияния разломов.
- Установление закономерностей формирования и трансформации различных режимов межблокового скольжения в результате выполнения лабораторных и полевых экспериментов.
- Выявление особенностей деформирования природных нарушений сплошности на основе данных деформационного мониторинга.
- Разработка геомеханической модели формирования и трансформации различных режимов межблокового скольжения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом экспериментальных данных, полученных с помощью апробированных методик измерений, регистрации и обработки рядов данных, тщательным анализом имеющихся опубликованных сведений, сопоставлением полученных результатов исследования с существующими представлениями, результатами численных расчетов и аналитическими оценками.

Научная новизна состоит в том, что впервые в эксперименте детально исследован процесс трансформации режимов скольжения по нарушениям сплошности массива горных пород; разработана новая модель формирования различных режимов межблокового скольжения, описывающая основные режимы деформирования нарушений сплошности и эффекты их трансформации в рамках единого подхода.

Личный вклад автора

В ходе работы автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментов, обработке полученных данных и анализе полученных результатов. Автором

разработана геомеханическая модель, выносимая на защиту. В работах, посвященных анализу геологических и сейсмологических данных, выполненных с соавторами, автор диссертации участвовал во всех стадиях выполнения работ.

Практическая значимость работы

Полученные в диссертации результаты способствуют более глубокому пониманию механики деформационных процессов, происходящих в земной коре на разном масштабном уровне. Выявленные закономерности возникновения и эволюции различных режимов скольжения по разломам и развитые основы новой модели могут быть использованы при постановке и проведении фундаментальных и прикладных исследований, направленных на разработку инженерных методов снижения ущерба от техногенных землетрясений при разработке месторождений полезных ископаемых, строительстве и эксплуатации крупных подземных сооружений.

Защищаемые положения:

- Активные деформационные процессы в разломных зонах, сопровождающиеся сейсмичностью, локализуются в узких областях, ширина которых в диапазоне длин разломов $L = 10 - 100$ км составляет величину порядка $(10^{-3} - 10^{-2}) \cdot L$. Для зон ветвления разломов степень локализации деформаций существенно ниже. Как правило, меньшая сейсмогенная ширина разломной зоны свидетельствует о более высокой интенсивности деформационных процессов.
- В условиях скоростного разрушения контакта бортов разлома, режим скольжения определяется соотношением двух параметров, которые могут быть определены из результатов сейсмологических наблюдений – сдвиговой жесткости разлома и жесткости вмещающего массива. Сдвиговая жесткость разлома является макроскопическим параметром, интегрально учитывающим структуру и деформационные свойства нарушения сплошности, и весьма чувствительна к изменению этих свойств.
- Эпизоды деформации нарушений сплошности массива горных пород, имеющие продолжительность от нескольких секунд до многих суток и обладающие фазами нарастания скорости, торможения и покоя, являются типичным явлением в широком диапазоне структурных параметров.
- Вариация сдвиговой жесткости отдельных участков разломной зоны является одним из наиболее вероятных механизмов, регулирующих долю энергии, излучаемой при землетрясении.

- Разработанная геомеханическая модель формирования и трансформации различных режимов межблокового скольжения, основанная на представлениях о том, что режим деформирования определяется мезоструктурой центральной части разлома и особенностями контактного взаимодействия геоматериала в областях концентрации напряжений.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на 10 российских и 6 международных конференциях: 53-ей, 54-ой, 55-ой, 56-ой и 58-ой научных конференциях МФТИ (г. Москва, 2010-2013, 2015 гг.), III Тектонофизической конференции в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (г. Москва, 2012 г.), Объединенной Ассамблее Общества стран Азии и Океании по геонаукам и Американского геофизического союза (г. Сингапур, Сингапур, 2012 г.), IX международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (г. Иркутск, 2013 г.), Третьей и Четвертой молодежных тектонофизических школах-семинарах (г. Москва, 2013, 2015 гг.), Втором и Третьем Всероссийских семинарах-совещаниях «Триггерные эффекты в геосистемах» (г. Москва, 2013, 2015 гг.), 33-ей Генеральной ассамблее Европейской сейсмологической комиссии (г. Москва, 2012 г.), Генеральной Ассамблее 2014 года Европейского геофизического союза (г. Вена, Австрия, 2014 г.), 20-ой международной конференции по деформационным механизмам, реологии и тектонике (г. Аахен, Германия, 2015 г.), Чапменской конференции Американского геофизического союза по явлениям медленного скольжения (г. Икстапа, Мексика, 2016 г.), а также на научных семинарах ИДГ РАН 2012-2016 гг.

Материалы диссертации опубликованы в 24 научных статьях, в том числе 9 статьях, входящих в список ВАК.

Исследования проводились в рамках выполнения работ по Государственному заданию ИДГ РАН, при поддержке Российского научного фонда (грант №14-17-00719) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№10-05-01064, 13-05-00780).

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 135 страницах, включая 70 рисунков, 6 таблиц, 1 приложение и список литературы из 171 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определены цели и задачи работы, сформулированы выносимые на защиту положения и новизна полученных в диссертации результатов, описана её структура.

Одним из существенных достижений последних лет в области исследований деформационных процессов в земной коре является обнаружение и доказательство существования различных режимов межблокового скольжения вдоль разломов (Г.Г. Кочарян, Ю.О. Кузьмин, С.Г. Псахье, В.В. Ружич, Н.В. Шебалин, G. Beroza, J. Gomberg, Z. Peng, и др.). Открытие таких явлений, как низкочастотные землетрясения, эпизодический невулканический тремор, события медленного скольжения изменяют понимание того, как высвобождается энергия, накопленная в земной коре. Различные исследования, посвященные переходным деформационным явлениям, сформировали несколько научных направлений:

- Интенсивное накопление высокоточных данных инструментальных сейсмологических, геодезических и деформометрических наблюдений (Ю.О. Кузьмин, В.В. Ружич, И.А. Санина, J.Gomberg, V.Kostoglogov, G.Ekström, N.Cotte, A. Tonnellier, и др.);
- Увеличение чувствительности аппаратуры для инструментального обнаружения асейсмических и «инфрасейсмических» событий и разработка методов локации данных источников (Н.В. Кабыченко, А.В. Рыков, J.L. Rubinstein и др.);
- Исследование напряженного состояния и деформационных характеристик разломов 'in situ' (В.В. Адушкин, В.Н. Костюченко, Г.Г. Кочарян, Ребецкий Ю.Л., А.А. Спивак, и др.);
- Исследование структуры разломных зон по результатам глубинного бурения (Т.В. Романюк, F.M. Chester, M. Zoback, L.Wallace, и др.);
- Исследование различных режимов деформирования в лабораторных экспериментах (Г.Г. Кочарян, В.А. Новиков, А.В. Пономарев, В.Л. Попов, Г.А. Соболев, С. Marone, С. Collettini, M. Ikari, и др.);
- Численное моделирование процесса деформирования разломных зон на мезо- и макро-масштабе (С.Г. Псахье, А.Ф. Ревуженко, Ю.П. Стефанов, Е.В. Шилько, J.-P. Ampiero и др.).

Хотя по мере накопления наблюдательного и экспериментального материала появляется все больше моделей, направленных на объяснение и уточнение наблюдаемых закономерностей процесса деформирования разломных зон, закономерности пространственно-временных вариаций режимов межблокового скольжения вдоль разломных зон остаются пока плохо понятыми, а проблема трансформации одного режима деформирования в другой практически неисследованной.

В первой главе диссертации выполнен обзор сведений о видах реализации энергии деформирования, запасенной в земной коре и моделей, объясняющих формирование деформационных событий разного типа. Наблюдения, проведенные в последние десятилетия, позволили нескольким авторам (*G. Gombert, S. Ide, Z. Peng*) предложить следующую классификацию деформационных явлений, приуроченных к зонам разломов: нормальные землетрясения, низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения, явления медленного скольжения. Выполненный обзор позволяет сделать вывод о том, что закономерности пространственных и временных вариаций деформационных режимов на различных участках разломных зон изучены недостаточно.

В главе проведен анализ сведений о структуре разломных зон и многообразии деформационных событий, приуроченных к ним. Исследованы примеры пространственно-временного расположения очагов землетрясений.

Изучению структуры разломных зон посвящено множество работ отечественных и зарубежных специалистов (*М.В. Рац, Е.А. Рогожин, В.В. Ружич, К.Ж. Семинский, С.Н. Чернышев, С.И. Шерман, R.S. Sibson, D.R. Faulkner, E.E. Brodsky, F.M. Chester и др.*). Выполненные исследования приводят разных исследователей к примерно одной и той же концептуальной модели их строения – выделяют зону влияния разлома, центральную часть разлома, магистральный сместитель. Многие авторы (*В.В. Ружич, С.И. Шерман, J. Hull и др.*) сходятся во мнении о существовании корреляционных связей между длиной разлома L , шириной разломной зоны W и амплитудой смещения по разрыву D . Проведенный анализ большого объема данных параметров разломных зон, выполненный в последние годы, в том числе в рамках диссертации, продемонстрировал, что в процессе разломообразования нарушается принцип подобия. При линейном размере $L = 500 - 1000$ м наблюдается изменение масштабных соотношений для линейных характеристик разломов, что обусловлено переходом к стадии сформировавшегося разлома. Эффективная мощность зоны влияния сформировавшегося разлома изменяется с масштабом заметно медленнее, чем в самоподобной среде, в которой продолжается процесс разломообразования.

Одним из методов, который способен дать важную информацию о структуре разломных зон, является исследование тонкой структуры пространственного расположения очагов слабой сейсмичности. Для количественного исследования закономерностей пространственной локализации очагов внутри крупной разломной зоны использовались совершенные сейсмические каталоги, полученные разветвленной сетью сейсмических станций Калифорнии. Сейсмический каталог, используемый в данном исследовании, составлен по базе данных Сейсмической Системы Северной Калифорнии (NCSS) и включает 301888 событий. Уровень ошибки определения эпицентра события определяется авторами

каталога (Waldhauser et al., 2008), как первые метры в горизонтальной плоскости и не хуже ста метров по глубине. Основную массу событий составляют землетрясения с магнитудой $M_L = 1-1.5$.

Для детального анализа закономерностей распределения сейсмичности в зоне влияния разлома были выбраны ограниченные области, в которых эпицентры концентрируются вдоль узких протяженных структур геометрически близких к прямой. Пример исследуемой области представлен на рис.1.

Для более подробного исследования закономерностей пространственной локализации

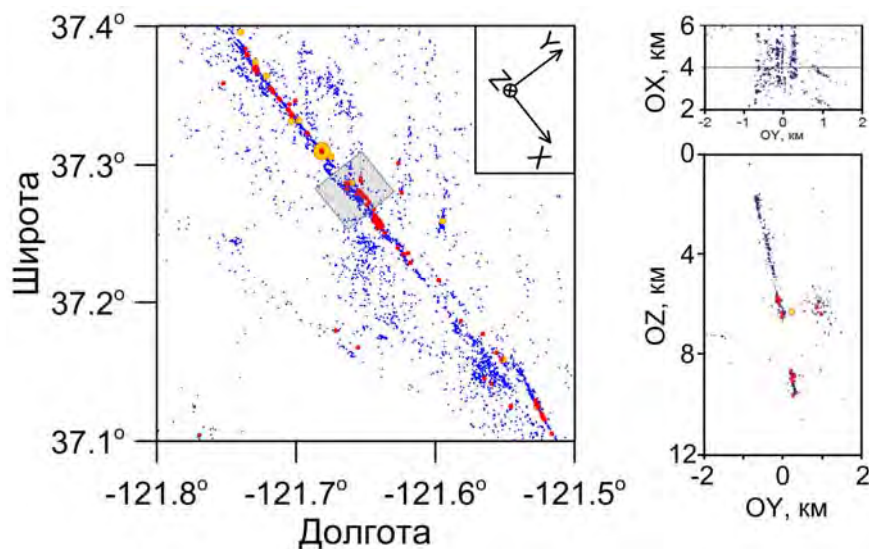


Рис. 1. Местоположение очагов землетрясений, попавших в область, ограниченную координатами (37,4° с.ш., 121,8° з.д.) и (37,1° с.ш., 121,5° з.д.). В системе координат, связанной с разломом, ось OX сонаправлена с линию наибольшей концентрации эпицентров землетрясений, ось OY – перпендикулярно оси OX в направлении на северо-восток, ось OZ – по нормали к земной поверхности по направлению к центру Земли.

Слева представлено расположение очагов выделенной 4х-километровой области в плоскости сечений XOY и YOZ.

Большой желтый круг – эпицентр события «Морган Хилл» $M_L=6,2$ (24.04.1984 г.; 37,310° с.ш., 121,681° з.д.; $h=8,04$ км); маленькие желтые кружки – эпицентры событий с магнитудами M_L от 4,0 и выше; красные круги – события с M_L в диапазоне от 2,5 до 4,0.

очагов событий, область была разбита на интервалы длиной 4 км вдоль оси OX – линии наибольшей концентрации эпицентров землетрясений. При

рассмотрении сечений 4х-километровых участков разлома отчетливо видно, что события локализуются

в окрестности поверхности, близкой к плоскости (условно, «плоскость разлома») (рис.1, справа).

Кроме этого, из сопоставления проекций очагов в разных сечениях можно заключить, что

разброс расположения эпицентров (плоскость XOY) происходит как за счет невертикального падения плоскости разлома очагов, так и за счет наличия локальных областей разрушения, расположенных несколько в стороне и содержащих в основном мелкие события. Наблюдаемая картина нарушается на окончаниях разлома и в зонах ветвления, где степень локализации очагов становится существенно ниже. Зона разлома, где плотность гипоцентров событий резко уменьшается, а доминирующая структура локализации сейсмичности перестает прослеживаться, считалась границей зоны локализации сейсмичности разлома.

Наблюдаемая пространственная локализация гипоцентров землетрясений в плоскости YOZ позволяет ввести понятие «сейсмогенная» зона разлома (СЗР) – зона, в которой

концентрируется основная масса (не менее 75 %) очагов землетрясений. Для определения ширины СЗР строились гистограммы распределения расстояний гипоцентров до плоскости разлома.

Анализ построенных гистограмм показал, что наиболее активный деформационный процесс локализуется в довольно узких областях, ширина которых в диапазоне длин разломов $L = 10 - 100$ км составляет величину порядка $(10^{-3} - 10^{-2}) \cdot L$. Для зон ветвления

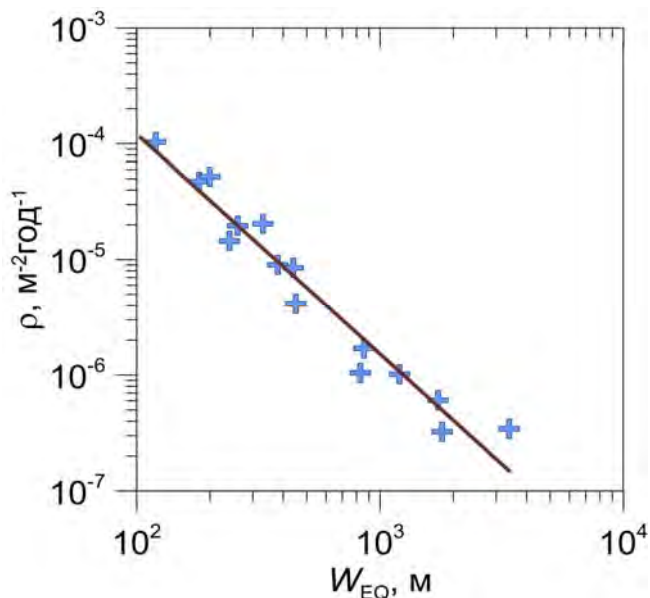


Рис. 2. Зависимость плотности распределения эпицентров событий (ρ), нормированная на год, от ширины СЗР (W_{EQ}) для исследованных участков системы разломов Сан-Андреас.

Линия соответствует зависимости: $\rho = 0,8 / (W_{EQ}^{1,9})$.

Результаты, содержащиеся в первой главе диссертации, обосновывают первое защищаемое положение.

Вторая глава посвящена результатам экспериментального исследования закономерностей формирования и эволюции различных режимов скольжения по границе между блоками горной породы. Для проведения лабораторных экспериментов была выбрана классическая постановка эксперимента типа «слайдер»-модели, в которой блок под действием приложенного через пружину жесткостью K сдвигового усилия скользит по поверхности раздела (рис.3). Пружина растягивалась с постоянной скоростью $u_s = 1-20$ мкм/с.

разломов и их концевых участков характерны рассеянные области относительно слабой сейсмичности.

Интенсивность деформационного процесса в разломной зоне предложено характеризовать поверхностной плотностью эпицентров землетрясений, произошедших в единицу времени:

$$\rho = \frac{N}{WL} \cdot \frac{1}{\Delta T}. \quad (1)$$

Анализ зависимости ρ от структурных параметров разломов, показал, что наиболее активный деформационный процесс наблюдается на участках разломов, характеризующихся минимальной шириной СЗР (рис.2).

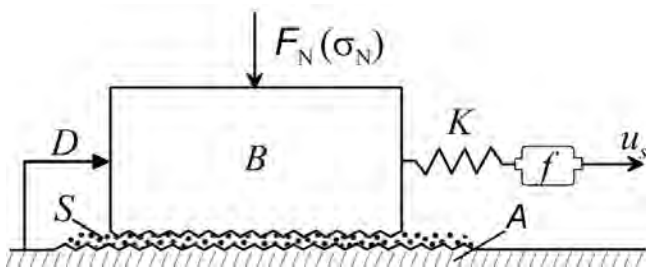


Рис. 3. Схема установки.

A – гранитное основание, B – подвижный гранитный блок, S – слой гранулированного материала-заполнителя, K – упругий элемент, F_N – нормальная нагрузка, D – датчик смещения, f – датчик силы, u_s – скорость деформации упругого элемента.

В качестве заполнителя использовались различные природные и искусственные материалы. В ходе экспериментов регистрировались приложенное сдвиговое усилие и динамика смещения блока относительно неподвижного основания в диапазоне частот 0–5 кГц. Точность измерений силы и перемещения составляла соответственно 1 Н и 0,1 мкм.. Примеры зависимостей величины сдвигового напряжения от смещения блока приведены на рис.4.

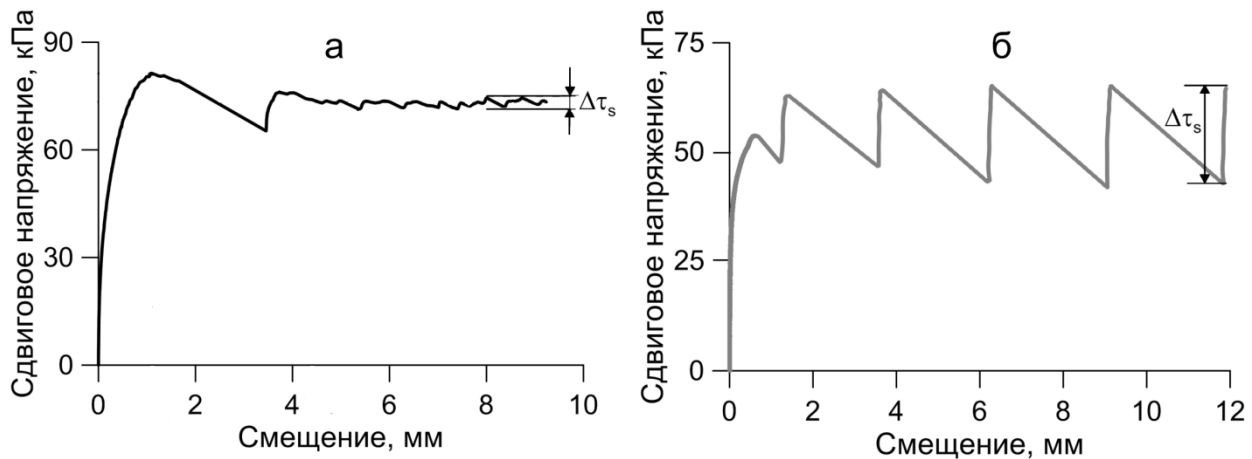


Рис. 4. Пример реологических кривых нарушения сплошности, заполненного искусственным грунтом с шириной распределения частиц по размерам $n = 1$ (а) и песком с 0,5 %-м содержанием жидкости с вязкостью 100 мПа·с (б). Нормальная нагрузка $\sigma_N = 110$ кПа.

Используя разные материалы-заполнители трещин, удалось реализовать широкий спектр режимов скольжения, которые качественно соответствуют различным типам движений по природным разломам. Здесь и далее под «динамическим событием» будет пониматься акт относительного проскальзывания блока с максимальной скоростью V_M , превышающей скорость деформирования пружинного элемента u_s . В качестве ключевых параметров, характеризующих динамические события, использовались максимальная скорость смещения V_M , амплитуда межблокового перемещения (A) и его длительность (T).

Анализ зависимостей силы сопротивления сдвигу от скорости скольжения показал, что во всех экспериментах имеет место режим скоростного разупрочнения контакта, т.е. выполнялось необходимое условие возникновения прерывистого скольжения.

Все реализованные динамические события условно можно разделить на 3 типа: эпизоды медленного скольжения, медленные срывы и динамические срывы. К эпизодам медленного скольжения относились события с максимальными скоростями лишь в

несколько раз превышающими скорость протяжки $V_M \leq 5u_s$. Для событий этого типа наблюдается тенденция увеличения амплитуды смещения при увеличении их длительности ($A \sim T$). Их можно считать аналогами «медленных землетрясений» (англ. slow slip events) на природных разломах.

Медленные срывы (диапазон максимальных скоростей скольжения $5u_s < V_M \leq 10^2 u_s$) являются переходным звеном от эпизодов медленного скольжения к динамическим срывам. Для этих событий характерно постепенное увеличение скорости, за которым следует плавное замедление. Закономерности изменения параметров событий данного типа сильно зависят от состава материала заполнителя. Так, если заполнитель нарушения сплошности состоит из хрупких гранул (например, стеклянные шарики, кварцевый песок), то наблюдается уменьшение длительности событий T с увеличением амплитуды смещения A ; если же заполнитель характеризуется большим содержанием пластичных гранул (например, глина и тальк), то, наоборот, наблюдается увеличение длительности с увеличением амплитуды смещения как при эпизодах медленного скольжения. Этот класс лабораторных событий можно считать аналогами «низкочастотных» и «очень низкочастотных» землетрясений (англ. low-frequency earthquakes и very low-frequency earthquakes) в соответствии с принятой терминологией.

К динамическим срывам относились эпизоды скольжения со значениями скоростей $V_M > 10^2 u_s$. Динамический срыв характеризуется резким сбросом сдвигового усилия, следующим за длительной стадией роста нагрузки. Сброс сдвигового усилия сопровождается быстрым проскальзыванием подвижного блока. Максимальная скорость, реализованная в экспериментах, достигала 0,5 м/с. Продолжительность всех событий данного типа примерно одинакова и при жесткости $K = 6 \cdot 10^4$ Н/м варьируется в диапазоне от 40 до 80 мс ($T \approx \text{const}$).

В опытах исследовалось влияние формы гранул, распределения гранул по размерам, молекулярного состава гранул, наличия увлажняющего флюида и его свойств, геометрии межблокового контакта на параметры режима скольжения.

В ходе выполнения исследований было показано, что в лабораторных экспериментах при постоянных внешних условиях формирование динамических событий обусловлено такими факторами, как геометрия гранул заполнителя и интенсивность их контактного взаимодействия. Чем сильнее взаимодействие между гранулами, тем меньшую роль играет форма гранул заполнителя.

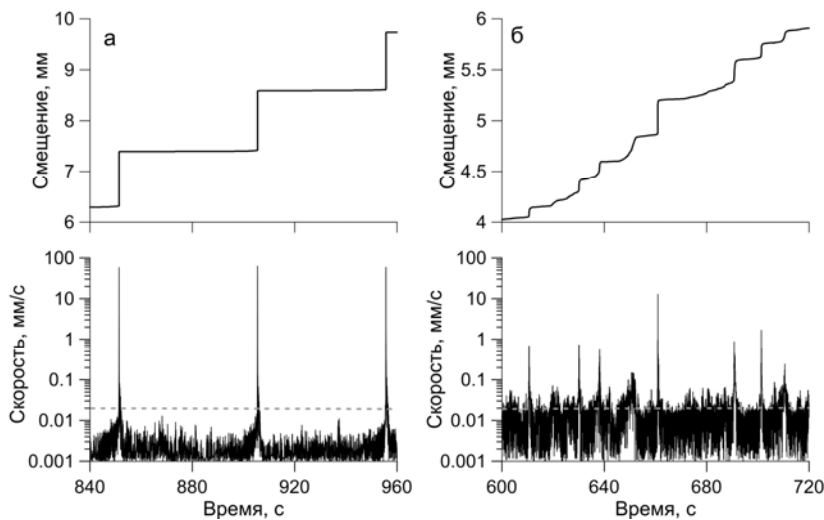


Рис. 5. Примеры изменения кинематических параметров при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах деформирования. Пунктирная линия соответствует скорости протяжки.

В зависимости от свойств материала-заполнителя динамические события одного типа могут быть реализованы либо как регулярно повторяющиеся (регулярный режим), либо как случайные стохастические (нерегулярный режим) (рис.5).

В отличие от упрощенных моделей прерывистого скольжения, в

которых между участками скольжения движения нет, выполненные эксперименты показали, что блок на протяжении всего цикла движется, при этом свойства контакта непрерывно изменяются. Нарушенный в процессе динамического события контакт упрочняется на стадии относительного покоя, на которой скорость смещения мала. Накопление энергии упругой деформации приводит к постепенному увеличению скорости скольжения и величины межблокового перемещения, что в свою очередь вызывает быстрое разупрочнение контакта.

Макроскопическим деформационным параметром, которым удобно характеризовать текущие свойства нарушения сплошности, является сдвиговая жесткость: $k_s = d\tau/dW_s$, где τ – сдвиговые напряжения; W_s – относительное сдвиговое смещение берегов нарушения сплошности. В экспериментах показано, что на заключительном этапе подготовки наблюдается радикальное снижение сдвиговой жесткости по мере накопления перемещений. Снижение жесткости разломной зоны перед возникновением события является чувствительным индикатором перехода системы в метастабильное состояние. В природе одним из возможных проявлений снижения жесткости разломной зоны перед землетрясением может оказаться появление в спектре микросейсм специфических низкочастотных колебаний (Соболев, 2011).

При использовании в качестве заполнителя трещин узкодисперсных смесей различных гранулированных сред был воспроизведен и исследован процесс трансформации режимов деформирования модельной трещины. Используя в разных пропорциях кварцевый песок со средним размером зерна 0,3 мм и стеклянные шарики того же диаметра, было исследовано влияние формы гранул на режим деформирования (рис.6). Для угловатых гранул сухого песка реализуется стабильное скольжение. Увеличение количества

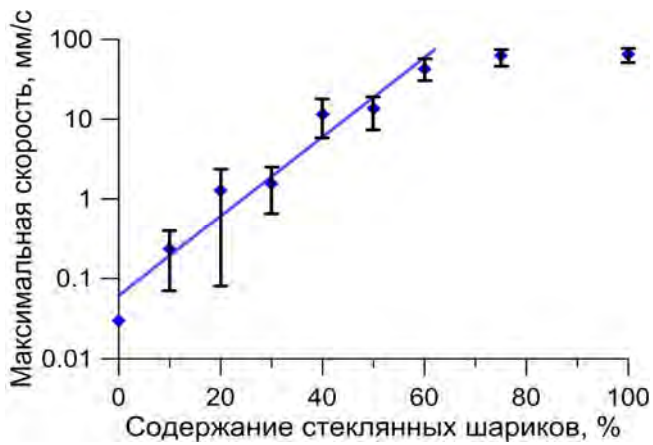


Рис. 6. Изменение максимальной скорости перемещения V_M при изменении структуры заполнителя (смесь кварцевого песка и стеклянных шариков). Вертикальные отрезки указывают диапазон изменения значений V_M . Нормальная нагрузка составляет 63 кПа.

Линия – аппроксимация данных в диапазоне от 0 до 60% экспоненциальной функцией.

сферических частиц до 20 % приводит к появлению одиночных медленных срывов с V_M в несколько мм/с. Дальнейшее увеличение содержания стеклянных шариков приводит к возрастанию как среднего значения $\langle V_M \rangle$, так и числа циклов, которые можно квалифицировать как динамические срывы ($V_M > 10^2 u_s$). При массовой доле стеклянных шариков ~ 40 % характер движения представляет собой режим повторяющихся динамических срывов с относительно малой величиной сброшенного напряжения. При деформировании заполнителя, целиком состоящего из стеклянных шариков, скачок сдвигового усилия возрастает до ~ 15 % от значения τ_s .

Похожий процесс трансформации наблюдается и при изменении интенсивности контактного взаимодействия гранул заполнителя (например, эксперименты с заполнителем из смеси кварцевого песка и натрия хлорида). Увеличение доли гранул с сильным электрохимическим взаимодействием (NaCl) обуславливает переход от стабильного скольжения к прерывистому.

Радикальное влияние на режим скольжения оказывает наличие флюида и его свойства. В проведенных экспериментах добавление менее 1 % по массе флюида с вязкостью менее 1 Па·с в заполнитель с хрупкими угловатыми гранулами приводило к формированию динамической неустойчивости, при этом если для кварцевого песка наблюдались динамические срывы, то для гранитной крошки – регулярные медленные срывы; увлажнение стеклянных шариков и гранул хлорида натрия, в свою очередь, увеличивало амплитуду динамических срывов. Вероятно, добавление даже небольшого количества флюида обуславливает формирование вокруг зерен тонкой пленки, что приводит к более сильному межгранулярному взаимодействию. Этот эффект хорошо виден на микрофотографиях заполнителя.

Влияние на режим скольжения оказывает и вязкость флюида (рис.7). При малом содержании (0,5 % по массе) флюида изменение его вязкости не приводит к существенному изменению прочности контакта, заполненного кварцевым песком – τ_s варьируется в пределах 35–45 кПа (при нормальной нагрузке 83 кПа), т.е. вариация составляют около 20 %.

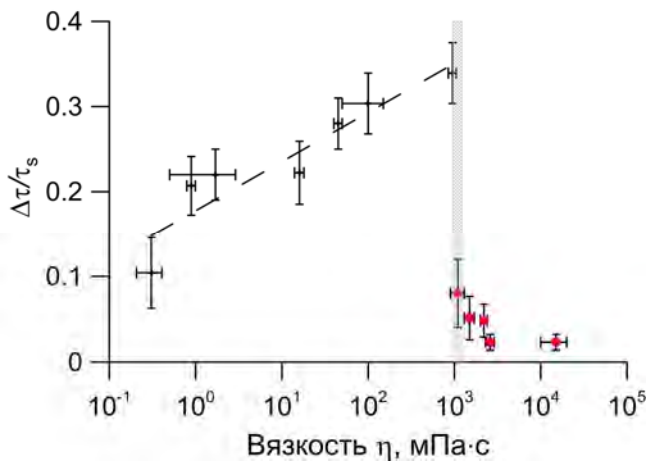


Рис. 7. Зависимость изменения скачка сдвиговых напряжений от вязкости увлажняющей жидкости в заполнителе, состоящем из кварцевого песка. Содержание флюида составляло 0,5 % по массе.

Значительно сильнее, в 15 раз, изменялась в экспериментах относительная амплитуда сброса напряжений ($\Delta\tau/\tau_s$). Из приведенного графика видно, что зависимость $\frac{\Delta\tau}{\tau_s}(\eta)$ оказывается не монотонной, а носит выраженный пороговый характер. Постепенно возрастая с увеличением вязкости флюида вплоть до величины $\eta \approx 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$, значение $\Delta\tau/\tau_s$ затем резко падает почти на порядок с

дальнейшим постепенным снижением. При вязкости флюида выше определенного предела режим деформирования контакта становится квазистабильным – реализуются регулярно повторяющиеся медленные срывы со скоростью $V_M < 50 u_s$.

В специальной серии экспериментов были исследованы закономерности деформирования межблокового контакта с пространственно неоднородной структурой. Было показано, что при равномерном распределении приложенных нормальных и сдвиговых напряжений, величина скачка напряжений $\Delta\tau$ определяется не количеством и размером отдельных подобластей, а суммарной площадью подобластей межблокового контакта, характеризующихся одним и тем же режимом скольжения.

В отдельной серии исследовалось влияние триггерного (вибрационного) воздействия на закономерности режима скольжения модельной трещины. Установлено, что эффект внешнего низкоамплитудного воздействия на напряженный межблоковый контакт в значительной степени определяется фоновым режимом деформирования последнего. Наиболее эффективным воздействие вибраций оказывается для перевода низкоамплитудных подвижек в режим стабильного скольжения. В случае квазистабильного скольжения с небольшим количеством низкоамплитудных подвижек, кумулятивный сейсмический момент, реализованный через динамические события, уменьшается многократно. При развитии стик-слипе, внешнее воздействие способно снизить амплитуды отдельных динамических событий, хотя кумулятивная величина излученной энергии остается неизменной. В условиях переходных режимов скольжения внешнее воздействие может даже увеличить среднюю амплитуду динамических событий.

В качестве характеристики, применяемой для сопоставления сейсмических событий различного масштаба, часто используется такой параметр, как отношение сейсмической энергии к сейсмическому моменту или приведенная сейсмическая энергия:

$$e = \frac{E_s}{M_0}, \quad (2)$$

При анализе энергетических характеристик динамических событий в лабораторном эксперименте определенным аналогом сейсмического момента можно считать произведение $M_{lab} = K \cdot A \cdot l$, где A и l – амплитуда смещения во время динамического события и длина блока соответственно. Доля энергии деформации пружины, перешедшую в кинетическую энергию движения блока (аналог излученной сейсмической энергии при землетрясении) удобно оценить, используя экспериментальную зависимость измеренного сдвигового напряжения от межблокового перемещения. Излученная энергия E_s определялась путем интегрирования разности экспериментальных зависимостей приложенной нагрузки $\sigma_s(x)$ и сопротивления сдвигу $\tau_{fr}(x)$:

$$E_s = \int_0^{D_0} [\sigma_s(\zeta) - \tau_{fr}(\zeta)] \cdot l^2 \cdot d\zeta, \quad (3)$$

где D_0 – перемещение, при котором $\sigma_s(D_0) - \tau_{fr}(D_0) = 0$.

На диаграмме, представленной на рис.8, излученная энергия (кинетическая энергия движения блока в лабораторных экспериментах) пропорциональна площади заштрихованной

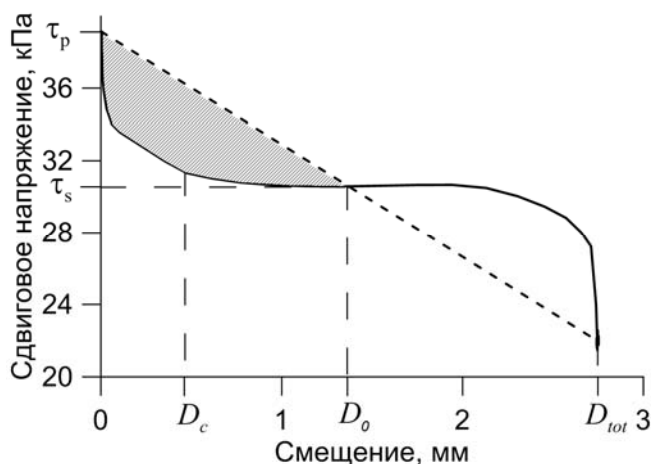


Рис. 8. Пример диаграммы сдвиговое напряжение–перемещение, построенной по результатам лабораторных измерений. Сплошная линия – фрикционное сопротивление $\tau_{fr}(x)$, штриховая – усилие пружинного элемента $\sigma_s(x)$.

Режим скольжения – динамический срыв; заполнитель – увлажненный (1 % по массе) флюидом с вязкостью $\eta = 0,9$ Па·с кварцевый песок.

области, заключенной между кривой изменения фрикционного сопротивления сдвигу по контакту и линией разгрузки массива (в эксперименте – снижение усилия пружины).

Результаты экспериментов показали, что при минимальном изменении прочностных характеристик для событий с одинаковым реализованным сейсмическим моментом M_{lab} величина приведенной излученной энергии $\left(e_{lab} = \frac{E_s}{M_{lab}} \right)$ может отличаться на 3–5 порядков. Детальный анализ процесса деформирования на стадии разупрочнения межблокового контакта

показал, что величина приведенной излученной энергии определяется отношением максимальной сдвиговой жесткости контакта на стадии разгрузки $\kappa_f \left(\kappa_f = \max_{v(t) > u_s} \left| \frac{d\tau_{fr}}{dx} \right| \right)$ и жесткости пружины K (рис.9).

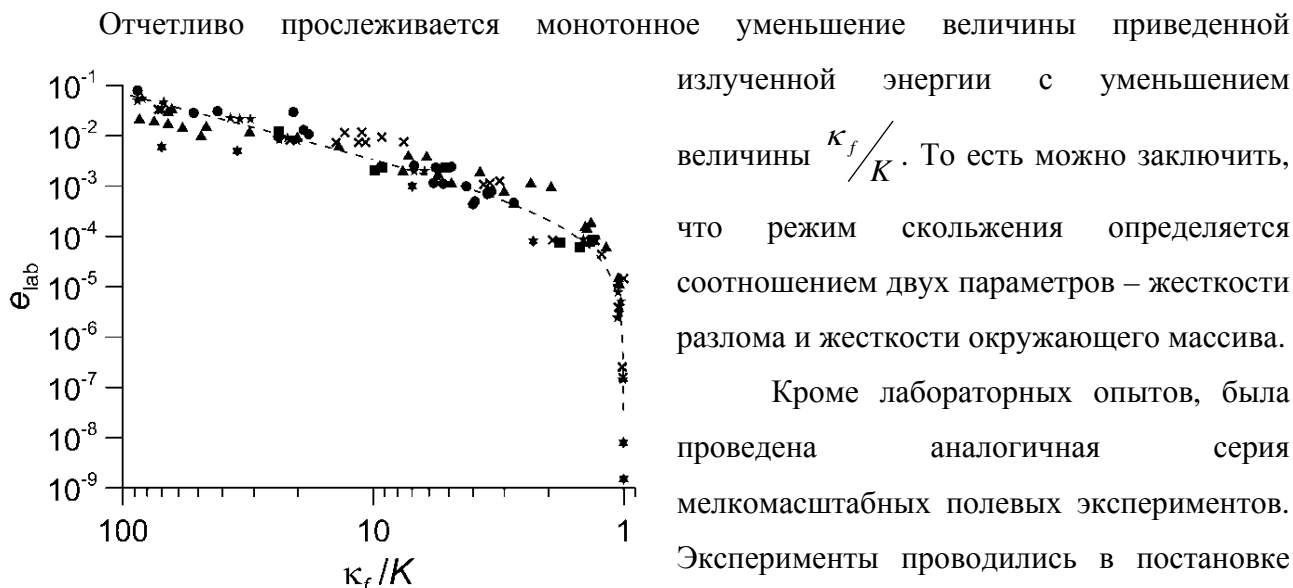


Рис. 9. Зависимость величины приведенной энергии (e_{lab}) от отношения жесткости контакта на стадии разгрузки и жесткости пружины (κ_f / K).

Разные значки – эксперименты с различными заполнителями и пружинами разной жесткости.

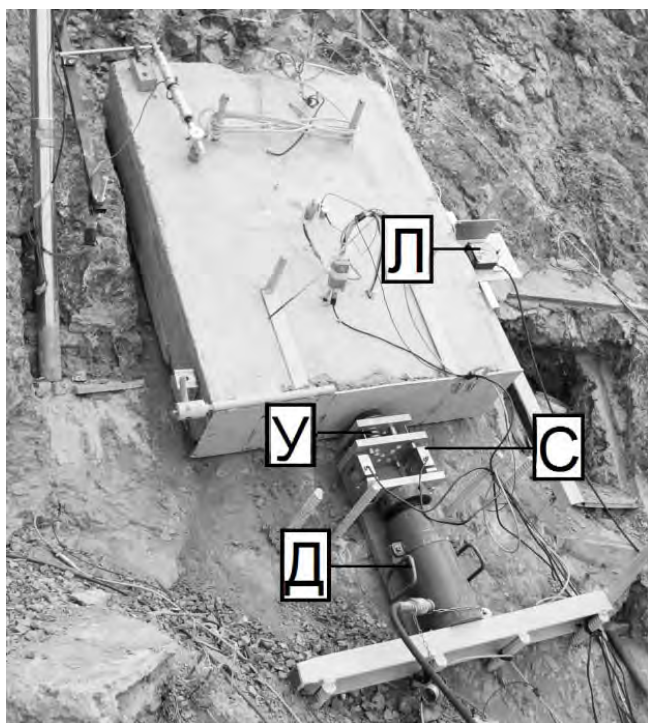


Рис. 10. Общий вид экспериментальной установки «Трибо».

Л – лазерный датчик перемещения, У – упругий элемент, Д – гидравлический домкрат, С – датчик силы.

Бетонный блок размещался на обнажении одной из плоскостей скольжения участка Ангарского сейсмоактивного разлома с углом падения 43° – 45° на юго-запад. Породный массив сложен в основном сильно трещиноватыми и брекчированными гранитогнейсами и диоритами позднего протерозоя. Коэффициент шероховатости плоскости скольжения, по нашим оценкам, составляет $JRC = 5$ – 8 . Размер и масса блока составляли соответственно $110 \times 90 \times 25$ см и 525 кг. Контакт между поверхностью блока и плоскостью скольжения заполнялся слоем гранулированного материала. Вследствие сложного рельефа плоскостей скольжения толщина слоя в разных точках контакта

варьировалась от 1 до 5–7 см.

Использование в качестве заполнителя различных гранулированных материалов и их смесей позволило воспроизвести различные режимы межблокового скольжения, закономерности реализации которых оказались аналогичны тем, что были установлены в лабораторных условиях.

Большой размер и волнистость берегов нарушения сплошности обусловили более сильные вариации параметров в ходе одного эксперимента. Исследование упорядоченности процесса деформирования методом расчета корреляционной размерности (метод Грассбергера-Прокаччия) показало, что режим условно стабильного скольжения характеризуется максимальными значениями корреляционной размерности d_0 (низкая степень упорядоченности), а режим прерывистого скольжения – минимальными (высокая степень упорядоченности). При этом с ростом корреляционной размерности наблюдается уменьшение среднего по всем реализованным динамическим событиям значения скорости $\langle V_M \rangle$.

В полевых условиях при деформировании нарушения сплошности со сложной пространственно неоднородной структурой наблюдается не только изменение параметров, но и изменение самого режима скольжения в процессе деформирования. Реализация того или иного режима скольжения обусловлена свойствами, некоторой локальной области контакта, определяющей в конкретный интервал времени закономерности сопротивления сдвигу.

Результаты, содержащиеся во второй главе диссертации, обосновывают второе защищаемое положение.

В **третьей главе** представлен анализ результатов деформационного мониторинга природных нарушений сплошности.

Исследования включали кратковременный (2 сезона по 2–3 недели) деформационный мониторинг на дневной поверхности (разломы в зоне влияния Ангарского надвига и нарушенное скальное обнажение в зоне Приморского разлома), и долговременный (2 года) мониторинг в штольне сейсмотанции Талая (зона влияния Главного Саянского сейсмоактивного разлома).

Деформационный мониторинг проводился с помощью штанговых деформографов, представлявших собой стержни из кварцевого стекла диаметром 1 см и длиной от 30 до 60 см, пересекающие плоскости нарушений сплошности. Один конец стержня жестко закреплялся на одном из берегов с помощью стальной оснастки, второй свободно мог перемещаться относительно другого берега. Смещение свободного конца регистрировались

высокоточным датчиком перемещений типа LVDT. Измерялись, как правило, три компоненты относительного смещения берегов и деформация целика.

В результате измерений на дневной поверхности были зафиксированы межблоковые микроподвижки, которые характеризовались продолжительностью 2–1300 с в зоне влияния Ангарского надвига и 0,3–26 ч в приконтактной зоне Приморского разлома.

В ходе долговременного деформационного мониторинга нарушений сплошности в зоне влияния Главного Саянского разлома было зафиксировано большое количество как быстрых (продолжительностью 2–3 с), так и медленных (с продолжительностью до 7 дней) событий. Примеры изменения компонент смещения одного из нарушений сплошности представлены на рис.11.

Отчетливо прослеживаются сезонные вариации компоненты раскрытия трещины (S_{\perp}), а также большое количество медленных и быстрых подвижек, которые характеризуются стадиями нарастания скорости, торможения и дальнейшего относительного покоя. Кроме

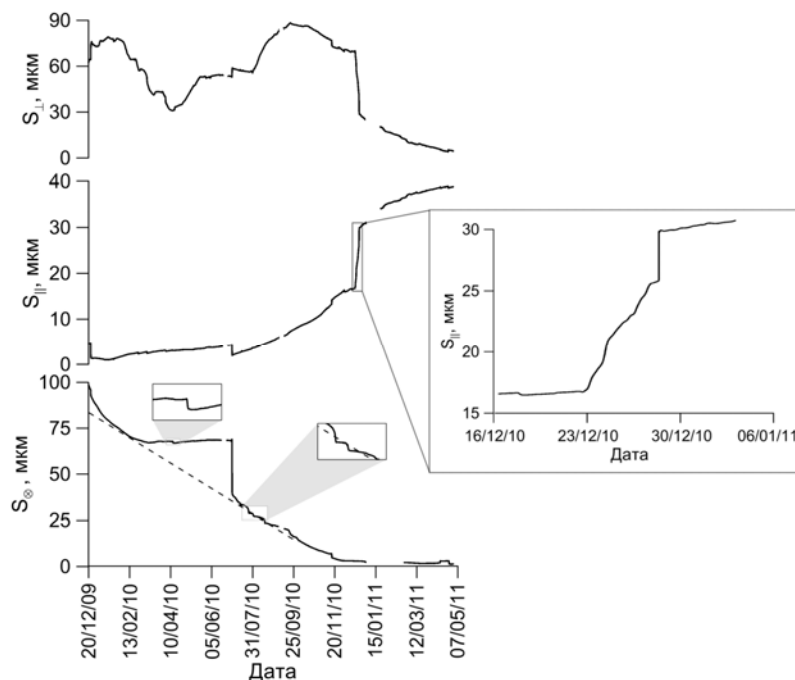


Рис. 11. Изменение во времени компонент относительного смещения берегов трещины по компонентам залегания в зоне влияния Главного Саянского разлома: S_{\perp} – раскрытие, S_{\parallel} – по падению, S_{\otimes} – по простиранию. Пунктирная линия – соответствует крипу со скоростью 90 мкм/год.

этого, происходят события-дуплеты, в процессе которых имеет место как быстрое, так и медленное движение (рис.11, врезка).

Анализ результатов деформационного мониторинга приводит к важному предположению, что в зависимости от напряженно-деформированного состояния и факторов, инициирующих межблоковые подвижки, интегральный режим деформирования определяется разными локальными областями нарушения сплошности, которые имеют различную жесткость.

Результаты, содержащиеся в третьей главе диссертации, обосновывают третье защищаемое положение.

В **четвертой главе** на основе обобщения результатов деформационного мониторинга, лабораторных и натуральных экспериментов предложена новая модель возникновения и трансформации режимов скольжения по разломам и трещинам, основные положения которой заключаются в следующем:

- Режим скольжения определяется мезоструктурой центральной части разлома и особенностями контактного взаимодействия геоматериала в областях концентрации напряжений.
- Макроскопическим параметром, интегрально учитывающим структуру и деформационные свойства нарушения сплошности, является его сдвиговая жесткость. Значение сдвиговой жесткости разлома весьма чувствительно к структуре и характеристикам геоматериала области локализации скольжения.
- В условиях скоростного разупрочнения закономерности скольжения по разлому определяются соотношением между сдвиговой жесткостью разлома (κ_f) и сдвиговой жесткостью вмещающего участка массива горных пород (K).
- Доля энергии, излучаемая в виде сейсмических волн, определяется соотношением κ_f/K и может изменяться в пределах нескольких порядков величины при одном и том же реализованном сейсмическом моменте.
- Динамические события с низкой скоростью распространения разрыва и малой энергией сейсмического излучения (в случае событий медленного скольжения $E_s \rightarrow 0$) могут быть реализованы не только в области Р-Т условий хрупко-пластического перехода, но также в условиях скоростного разупрочнения, при этом эти типы динамических событий происходят, когда значения отношения κ_f/K находятся в узком диапазоне вблизи единицы.

В основе модели лежит представление о том, что механические свойства межблокового контакта определяются процессами, происходящими в тонком слое магистральной части разлома или материала-заполнителя трещины. Возникновение динамических событий связано с формированием расположенных поперек простирания нарушения конгломератов нагруженных частиц. Данные, так называемые, цепочки в совокупности формируют силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. Разрушенные в процессе деформирования силовые цепочки способны полностью замещаться аналогичными структурными элементами под влиянием сил контактного взаимодействия, когда внешнее

воздействие будет полностью скомпенсировано. Пока цепочки разрушены не полностью, динамика деформационного процесса определяется реологией существующей области локализации силового скелета – контактного пятна.

В процессе деформирования структурных блоков эволюция силового скелета приводит к возникновению дополнительной силы сопротивления ΔR^κ , которую можно представить в виде:

$$\Delta R^\kappa = \kappa(W) \cdot W \cdot \chi(W_{cr} - W), \quad (4)$$

где W – абсолютная деформация структурных блоков, χ – функция Хевисайда, W_{cr} – критическое перемещение блока, соответствующее полному разрушению силового скелета. При этом жесткость межблокового контакта определяется как:

$$\kappa(W) = \kappa_0 \chi(W_{el} - W) + \frac{\kappa_0}{1 + (W - W_{el})^{4-2d}} \chi(W - W_{el}), \quad (5)$$

где κ_0 – начальная жесткость контактного пятна, W_{el} – предельное упругое смещение контактных пятен; d – фрактальная размерность пространственной самоподобной структуры силового скелета.

В процессе нагружения постепенное разрушение силового скелета приводит к увеличению площади неконсолидированной области межблокового контакта. В таких областях действие внешних сил, главным образом, проявляется в межзерновом проскальзывании разгруженных гранул, что приводит к возникновению дополнительного сопротивления сдвигу ΔR^W , которое определяется реологией контактных пятен и может быть записано в виде:

$$\Delta R^W = \xi \cdot \dot{W}^\alpha \cdot \chi(W - W_{el}), \quad (6)$$

где ξ – коэффициент пропорциональности, α – показатель степени, который может изменяться в диапазоне от 0 до 1.

В общем случае сила сопротивления межблокового контакта R в процессе деформирования имеет вид:

$$R = R_0 + \Delta R = R_0 + \kappa(W) \cdot W \cdot \chi(W_{cr} - W) + \xi \cdot \dot{W}^\alpha \cdot \chi(W - W_{el}). \quad (7)$$

где R_0 – меняющаяся в процессе сдвига остаточная сила сопротивления, ΔR – вариация силы сопротивления, связанная с образованием и разрушением силового скелета. Величина R_0 определяется усредненными прочностными параметрами всего межблокового контакта, шероховатостью берегов и особенностями нагружения. Эта компонента соответствует среднему уровню напряжений на макромасштабе. Компонента ΔR , в свою очередь, зависит от структурных характеристик межблоковой области и особенностей взаимодействия

структурных элементов. В отличие от величины R_0 , компонента ΔR характеризуется сильными временными вариациями в процессе нагружения и обуславливает вариации уровня локальных напряжений.

Анализ закономерностей движения блока под действием внешней силы и силы сопротивления, описываемой соотношением (7), показал, что наибольшее влияние на режим деформирования оказывают жесткость контактных пятен k_0 и максимальная упругая деформация W_{el} . При этом если величина W_{el} влияет только на скорость на стадии разгрузки, то величина k_0 определяет скорость движения и на стадии нагружения.

Закономерности релаксации напряжений определяются также параметром структурированности $\beta = 4 - 2d$ (см. соотношение (5)) и величиной $D_c = W_{cr} - E_{el}$. Рассмотрение условий реализации различных режимов скольжения в координатной плоскости $\beta - D_c$ показало, что события медленного скольжения могут существовать только в определенной параметрической области («купол медленных событий»), которая качественно соответствует сегментам разломных зон с максимальными значениями фрактальной размерности (окончания разломов, зоны их ветвления и взаимного пересечения).

Действие силы ΔR^w приводит к изменению как формы, так и размера купола медленных событий. Это означает, что в природе при определенных физико-химических параметрах геоматериала медленные события могут иметь место и на центральных сегментах разломов.

Показано, что макроскопическим параметром, определяющим закономерности релаксации накопленных напряжений, является жесткость межблокового контакта на стадии разгрузки. Так, например, рассмотрение баланса энергий в простом случае постоянства жесткости разгрузки трещины позволяет получить выражение для приведенной сейсмической энергии:

$$e = \frac{E_s}{M_0} = \frac{\Delta\tau}{2\mu} \left(1 - \frac{K}{|\kappa_f|} \right), \quad (8)$$

где μ – модуль сдвига массива в окрестности трещины, $\Delta\tau$ – скачок напряжений на разрыве.

Если жесткость массива $K \approx \mu/L$ величина примерно постоянная для событий с одним и тем же характерным размером (L – длина разрыва), то жесткость разлома, как отмечалось выше, чрезвычайно чувствительна к таким факторам, как материальный состав заполнителя, напряженное состояние, поровое давление, температура и т.д. Незначительные

вариации этих характеристик могут приводить к значительному изменению величины жесткости, а, следовательно, и трансформации режима межблокового скольжения.

Уменьшение величины излучаемой энергии определяется снижением сдвиговой жесткости разлома. Снижение величины энергии, излучаемой при подвижке, сопровождается и кинематическими признаками трансформации динамических срывов в события медленного события – радикальным снижением скорости распространения и увеличением длительности события.

Результаты, содержащиеся в четвертой главе диссертации, обосновывают четвертое и пятое защищаемые положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации детально исследованы закономерности формирования и трансформации различных режимов скольжения по нарушениям сплошности массива горных пород. В рамках работы был проанализирован большой объем результатов натурных наблюдений, лабораторных и полевых экспериментов.

Основные полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

- Показано, что активные деформационные процессы в разломных зонах, сопровождающиеся сейсмичностью, локализуются в узких областях, ширина которых в диапазоне длин разломов $L = 10 - 100$ км составляет величину порядка $(10^{-3} - 10^{-2}) \cdot L$. Для зон ветвления разломов степень локализации деформаций существенно ниже. Как правило, меньшая сейсмогенная ширина разломной зоны свидетельствует о более высокой интенсивности деформационных процессов.
- Сдвиговая жесткость разлома является макроскопическим параметром, интегрально учитывающим структуру и деформационные свойства нарушения сплошности, и является весьма чувствительным к изменению этих свойств. Показано, что снижение сдвиговой жесткости является надежным индикатором перехода контакта в метастабильное состояние.
- По результатам проведенного деформационного мониторинга и анализа опубликованных результатов сейсмологических и геодезических наблюдений показано, что эпизоды деформации нарушений сплошности массива горных пород, имеющие продолжительность от нескольких секунд до многих суток и обладающие фазами нарастания скорости, торможения и покоя, являются типичным явлением в широком диапазоне глубин, включая нарушения сплошности вблизи поверхности.

- На основе обобщения результатов экспериментов, выполненных в работе, предложена новая модель, описывающая процессы формирования и эволюции различных режимов межблокового скольжения в рамках единого подхода. Согласно модели режим скольжения определяется структурой и деформационными свойствами нарушения сплошности. Макроскопическим параметром, ответственным за реализацию режима скольжения является сдвиговая жесткость разлома.
- Показано, что одним из вероятных механизмов, который в широких пределах регулирует долю энергии, излучаемой в результате подвижки по нарушению сплошности земной коры, является вариация сдвиговой жесткости отдельных участков разломной зоны в результате иного, по сравнению с соседними участками или другими разломами, вещественного состава зоны магистрального сместителя, сублитостатического уровня порового давления флюида, ряда других механических, геологических и геохимических процессов.
- В контексте постановки инженерных задач о переводе напряженного участка разлома в режим скольжения с низкой интенсивностью излучения сейсмической энергии, установлено, что в зависимости от фонового режима деформирования, внешнее воздействие на напряженный межблоковый контакт может иметь различный эффект – от перевода в режим стабильного скольжения, до увеличения амплитуды динамических срывов. Для достижения позитивного результата необходимо не столько снятие избыточных напряжений, сколько снижение сдвиговой жесткости нарушения сплошности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А.* О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // Доклады академии наук. 2016. Т.467. №1. С.86-90.
2. *Будков А.М., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В.* Влияние жесткости нарушений сплошности породного массива на излучательную эффективность очагов индуцированной сейсмичности. Ч.II: лабораторные и численные эксперименты // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. 2015. №6. С.28-34.
3. *Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Санина И.А., Остапчук А.А., Шаумян А.В.* Использование локальных сейсмических сетей для определения сейсмогенной структуры разломов // Физика Земли. 2012. №3. С.22-33.
4. *Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А.* Сейсмогенная ширина разломной зоны // Доклады академии наук. 2011. Т.437. №2. С.254-257.
5. *Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В.* Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. №5. С.5-15.
6. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А.* Изменение жесткости разломной зоны в ходе сейсмического цикла // Доклады академии наук. 2011. Т.441. №3. С.384-387.
7. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А.* Влияние вязкости тонких пленок флюида на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // Доклады академии наук. 2015. Т.463. №3. С.343-346.
8. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Марков В.К., Павлов Д.В.* Некоторые вопросы геомеханики разломов континентальной коры // Физика Земли. 2014. №3. С.51-64.
9. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В., Виноградов Е.А., Камай А.М., Марков В.К.,* Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 2. Полевые эксперименты и феноменологическая модель явления // Физическая мезомеханика. 2015. Т.18. №6. С.75-85.

Публикации в других рецензируемых изданиях

10. *Батухтин И.В., Остапчук А.А., Павлов Д.В.* Управление режимом деформирования трещины в лабораторном эксперименте. 2015. №7. С.15-22.
11. *Будков А.М., Остапчук А.А.* Численное моделирование процесса прерывистого скольжения // Динамические процессы в геосферах. 2013. №4. С.103-110.
12. *Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А.* Сейсмический портрет разломных зон. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т.1. №4. С.419-440.

13. *Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А.* Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т.5. №4. С.863-891.
14. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Марков В.К.* Изменение жесткости контакта между блоками горной породы в ходе прерывистого скольжения // Динамические процессы в геосферах. 2011. №2. С.40-49.
15. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В.* Режим деформирования разломных зон и инициирующий потенциал сейсмических колебаний // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 18-21 июня 2013г.): материалы второго Всероссийского семинара-совещания / Ин-т динамики геосфер РАН; под ред. В.В.Адушкина, Г.Г.Кочаряна. М.: ГЕОС. 2013. С.34-45.
16. *Остапчук А.А., Кочарян Г.Г., Марков В.К., Павлов Д.В.* Влияние структурных свойств нарушения сплошности на характер сдвигового деформирования нарушения сплошности // Динамические процессы в геосферах. 2012. №3. С.65-73.
17. *Остапчук А.А., Кочарян Г.Г., Марков В.К., Павлов Д.В., Салтыков Н.В.* Влияние структурных свойств нарушения сплошности на режим сдвигового деформирования // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 18-21 июня 2013г.): материалы второго Всероссийского семинара-совещания / Ин-т динамики геосфер РАН; под ред. В.В.Адушкина, Г.Г.Кочаряна. М.: ГЕОС. 2013. С.134-145.
18. *Остапчук А.А.* Влияние сейсмогенной ширины разлома на уровень сейсмической активности // Динамические процессы в геосферах. 2013. №4. С.88-96.
19. *Остапчук А.А.* Формирование «силовых мезоструктур» как возможный механизм генерации сейсмических событий // Молодежь в науке – 2013: приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». 2014. Выпуск 5. Ч. Ч.1. Серия химических наук. С.75-79.
20. *Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В., Виноградов Е.А.* Реализация различных типов деформирования при гравитационном соскальзывании блока гонной породы // Динамические процессы в геосферах. 2014. №6. С.70-77.
21. *Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В. и др.* Трансформация деформационного режима нарушения сплошности в натуральных экспериментах // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16-19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС. 2015. С.86-91.
22. *Остапчук А.А.* Геомеханическая модель формирования землетрясений в зоне сдвига // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ. 2015. Т1. С.231-237.
23. *В.В. Ружич, Е.Н. Черных, В.Б. Савельева и др.* Изучение процессов контактного скольжения в зоне приморского разлома // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16-19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС. 2015. С.78-86.
24. *Ostapchuk A.A., D.V. Pavlov.* Investigation of self-organization processes of thin granular layers under shear // AIP Conference Proceedings. 2015. V.1683. 020169.

