

УДК 551.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОДГОТОВКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПОДВИЖКИ ПО МОДЕЛЬНОМУ РАЗЛОМУ В УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИТОСФЕРЫ

© 2023 г. И. А. Пантелеев¹*, С. А. Борняков², А. Н. Вшивков¹, А. А. Каримова²¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: pia@icmm.ru

В статье приведены результаты экспериментов по воспроизведению процесса прерывистого скольжения по готовому разрыву «*stick-slip*» в упруговязкопластичной модели. Известны многочисленные примеры экспериментального воспроизведения этого процесса для поиска признаков подготовки импульсного смещения по разрыву, которые могли бы интерпретироваться как предвестники готовящегося землетрясения в природе. В этих экспериментах в качестве моделей использовались горные породы и другие материалы, обладающие высокой степенью упругости и склонные к хрупкому разрушению. Представленные в настоящей статье результаты получены на упруговязкопластичных моделях. Использование таких моделей в описываемых экспериментах авторам не известны. Модельными материалами служили водная паста монтмориллонитовой глины и влажный речной песок. В результате проведенных экспериментов установлены характерные стадии деформирования околоразломной зоны, одна из которых соответствует медленному скольжению материала с аperiodическими флуктуациями смещения. На основе анализа цифровых изображений определены как области избытка, так и области дефицита смещения по простиранию модельного разлома.

Ключевые слова: физическое моделирование, модельный разлом, дефицит сдвига, корреляция цифровых изображений, акустическая эмиссия.

Для цитирования: Пантелеев И.А., Борняков С.А., Вшивков А.Н., Каримова А.А. Экспериментальное исследование особенностей подготовки и реализации подвижки по модельному разлому в упруговязкопластичной модели литосферы // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 23–37. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_23

Введение

Закономерности формирования и развития разломных зон в осадочном чехле и кристаллическом фундаменте, стадийность подготовки и реализации подвижки по магистральному сместителю, причины и условия пространственной миграции геодинамических процессов внутри разломных зон и между ними являются актуальными задачами современной тектонофизики и механики разломных зон [Быков, 2005; Семинский, 2008; Шерман, 2013; 2014; Кочарян и др., 2014]. Широкое распространение для изучения данного класса объектов и явлений получили методы физического моделирования, базирующиеся на теории подобия [Гзовский, 1975; Шеменда, 1983; Шерман, 1984; Ramberg, 1981]. При исследовании базовых закономерностей формирования крупных разломов литосферы методами физического моделирования акцент чаще всего делается на изучение сдвиговых зон. Их распространенность в природе и относительная простота воспроизведения в физическом эксперименте делают сдвиговые зоны своеобразным структурным эталоном для моделирования. Все выявленные для них закономерности в большей части будут правомерны и для других морфолого-генетических типов разломных зон.

Все лабораторные исследования закономерностей эволюции сдвиговых зон можно разделить на два класса:

- изучение деформационной активности на сформированном нарушении сплошности геосреды, которым является модельный разлом. Наличие локальной ослабленной зоны, содержащей контактную поверхность, определяет единственно возможный механизм деформирования такой системы в поле приложенных напряжений – смещение по контакту. При этом жесткость ослабленной зоны и свойства заполнителя контакта определяют возможные режимы скольжения по контакту: скольжение с постоянной скоростью, регулярное прерывистое скольжение, аperiodические акты медленного проскальзывания [Кочарян, Павлов, 2007; Кочарян и др., 2013; 2014; Ben-David et al., 2010; Marone, 1998];

- изучение структурно-динамических закономерностей формирования и развития сдвиговых зон с учетом сопутствующих деформационных волновых процессов [Шерман, 1977; Шерман и др., 1983; Борняков и др., 2016а; 2016б; Борняков, Пантелеев, 2018; Cheremnykh, 2005; Sherman et al., 2005].

Существенным отличием этих двух классов, помимо различия в объекте исследования, является используемые модельные материалы. В первом случае модельный разлом является контактом двух блоков хрупкой кристаллической породы (гранита, габбро, гранодиорита и т.д.), во втором – в качестве модельного материала выбираются упругие прозрачные оптически-активные и непрозрачные упруговязкопластические материалы. Различие в выборе материалов определяется целями и физическими механизмами, лежащими в основе изучаемых процессов.

Необходимо отметить, что, несмотря на большое количество работ, посвященных лабораторному исследованию особенностей формирования и эволюции сдвиговых зон, изучению формирования подвижки по магистральному сместителю в пластичной среде уделено мало внимания. В настоящей работе представлены первые результаты лабораторных экспериментов, посвященных изучению подготовки и реализации подвижки по модельному разлому в упруговязкопластической среде с использованием современных методов регистрации и неразрушающего контроля, восполняющие этот пробел. Весь комплекс экспериментальных исследований выполнен на базе лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН (г. Иркутск) при непосредственном участии сотрудников лаборатории термомеханики твердых тел и лаборатории цифровизации горнотехнических процессов ИМСС УрО РАН (г. Пермь).

Методика физического моделирования и методы обработки

Для реализации различных условий формирования и развития магистрального разрывного разрушения был разработан специализированный стенд, схема которого представлена на рисунке 1. Основу стенда составляют две кюветы, размещенные на подвижных независимых платформах, свободно перемещающихся по направляющим. Размеры кювет (длина, ширина и высота) составляют

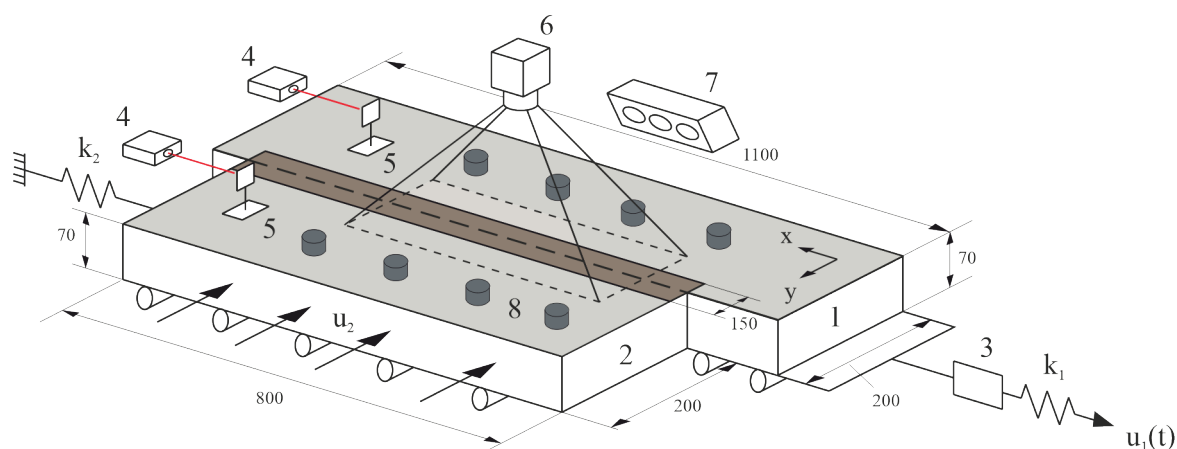


Рис. 1. Схема стенда для изучения динамики подвижки по модельному разлому в составной упруговязкопластической среде: 1 – активная кювета, 2 – пассивная кювета, 3 – динамометр, 4 – лазерный дальномер, 5 – площадка-мишень, 6 – цифровая камера, 7 – светодиодная лампа, 8 – датчики акустической эмиссии

1.1 × 0.2 × 0.07 м и 0.8 × 0.2 × 0.07 м соответственно. Кюветы предназначены для размещения модельного материала, имитирующего геологическую среду, а вертикальный контакт между кюветами представляет собой модельный разлом (пунктирная линия, рис. 1).

В качестве модельного материала была использована водная паста монтмориллонитовой глины, правомерность использования которой обоснована специально проведенным исследованием [Семинский, 1986]. Она представляет собой малопрочную твердообразную структурированную систему, которой присущи следующие реологические свойства: предел текучести; частично обратимые и необратимые деформации, обусловленные одновременно упругим и вязким механизмами деформирования; ступенчатый вид снижения эффективной вязкости с возрастанием напряжения, что свидетельствует о характерных значениях вязкости, остающихся постоянными в определенных интервалах значений напряжения и соответствующих разной степени нарушенности структуры; уменьшение значений основных количественных параметров по мере увеличения нарушенности структуры материала; наличие релаксации напряжений [Борняков и др., 2014].

Выбор граничных условий эксперимента осуществлялся в соответствии с критерием подобия [Борняков и др., 2014]

$$C_{\eta} = C_{\rho} C_g C_L C_T, \quad (1)$$

где η – вязкость среды, ρ – плотность среды, g – ускорение свободного падения, L – линейные размеры, T – время, C_{η} – коэффициент подобия вязкости, C_{ρ} – коэффициент подобия плотности, C_g – коэффициент подобия ускорения свободного падения, C_L – коэффициент подобия линейных размеров, C_T – коэффициент подобия времени. Коэффициенты подобия представляют собой отношения параметров модели и натурного объекта. В данном исследовании коэффициенты подобия составляли: для вязкости – $C_{\eta} \sim 10^{15}$, плотности – $C_{\rho} \sim 1.8$, ускорения свободного падения $C_g \sim 1$, линейных размеров – $C_L \sim 10^5$ и для времени $C_T \sim 5 \cdot 10^9$. При таких значениях коэффициентов подобия 1 миллиметр в модели соответствует 0.1 километра в ее природном аналоге, а 1 секунда эксперимента эквивалента 16–17 годам природного процесса.

Наблюдения за развитием процессов разломообразования в модельных материалах привели к введению понятия «области активного динамического влияния разлома» (ОАДВР) [Борняков и др., 2014]. Под ним понимается окружающее разлом в трех измерениях пространство, в котором проявляются пластические и разрывные деформации, вызванные формированием разлома и последующими подвижками по нему. Ширина «области активного динамического влияния» главным образом определяется толщиной разрушаемого слоя и связана с ней прямой зависимостью. Для учета «области активного динамического влияния» на границе кювет размещался слой менее вязкого материала, в центре которого закладывалась модельная разломная зона. В качестве такого материала был использован речной песок влажностью 12% с размерами частиц от 0.15 до 0.55 мм. Заложение разломной зоны до начала эксперимента осуществлялось путем размещения на границе кювет перегородки из плексигласа и ее выемки после размещения в кюветах модельной среды. Для обеспечения удовлетворительного контакта берегов модельного разлома после удаления перегородки проводилось поджатие материала в меньшей кювете путем смещения одной из стенок на величину u_2 , равную 15 мм (рис. 1). Итоговая толщина слоя влажного песка составила 15 см (рис. 1). На рисунке 2 представлена фотография специализированного стенда перед началом эксперимента по деформированию модельной среды с заложенной разломной зоной.

Кювета большей длины (активная кювета) через пружину заданной жесткости k_1 соединялась металлическим тросом последовательно с редуктором и шаговым мотором, обеспечивающими заданную скорость перемещения троса $u_1(t)$ в 2 мм/мин. Для измерения усилия использовался тензодатчик (модель CZL 302), с диапазоном измерения 0–30 кг и погрешностью 0.01 кг, размещенный между активной кюветой и пружиной. Вторая кювета (пассивная кювета) также через пружину заданной жесткости k_2 , крепилась к неподвижной опоре. Таким образом, заданная конфигурация креплений

кювет обеспечивала возможность поступательного смещения обоих берегов модельного разлома до некоторой критической величины, определяемой жесткостью второй пружины и свойствами модельного материала, с последующим смещением берегов относительно друг друга – динамической подвижкой.

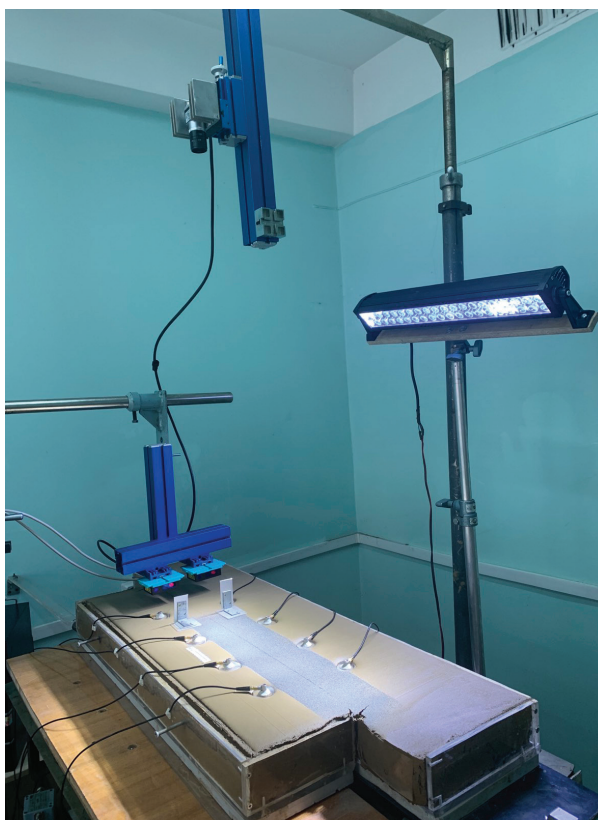


Рис. 2. Фотография модельного материала с заложенной разломной зоной перед началом эксперимента

Для изучения процесса подготовки и реализации подвижки по модельному разлому в упруговязкопластической среде были использованы три различных метода неразрушающего контроля. Для регистрации интегрального смещения каждой из кювет использовались лазерные дальномеры Riftek RF603 с диапазоном измерения 60–160 мм и точностью 10 мкм, установленные с одной из сторон стенда. Площадки-мишени для лазерных дальномеров изготавливались из плексигласа и размещались на поверхности модельного материала с незначительным заглублением (рис. 1). Запись смещения площадок-мишеней осуществлялась с частотой 5 кГц, перед анализом исходные данные подвергались равномерному прореживанию с уменьшением частоты дискретизации до 200 Гц.

Для фотофиксации свободной поверхности модельной среды в процессе ее деформирования была использована цифровая камера Basler acA2440-75uc с объективом SV-2514H, имеющая максимальную частоту съемки 70 Гц и разрешение 5 Мпикс. Съемка осуществлялась со скоростью 1 кадр в две секунды. Для получения высококонтрастного изображения свободной поверхности модельной среды на ее свободную поверхность насыпался тонкий слой речного песка мелкой фракции, который непрерывно освещался светодиодной лампой. Характерное изображение поверхности модельной среды представлено на рисунке 3.

Для анализа локальных полей перемещений на свободной поверхности модельной среды в процессе ее деформирования был использован метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC) [Chao, Sutton, 1988; Lyons et al., 1996; Choi, Shah, 1997]. Этот метод позволяет с высокой точностью восстанавливать эволюцию перемещений и деформаций на поверхности образцов

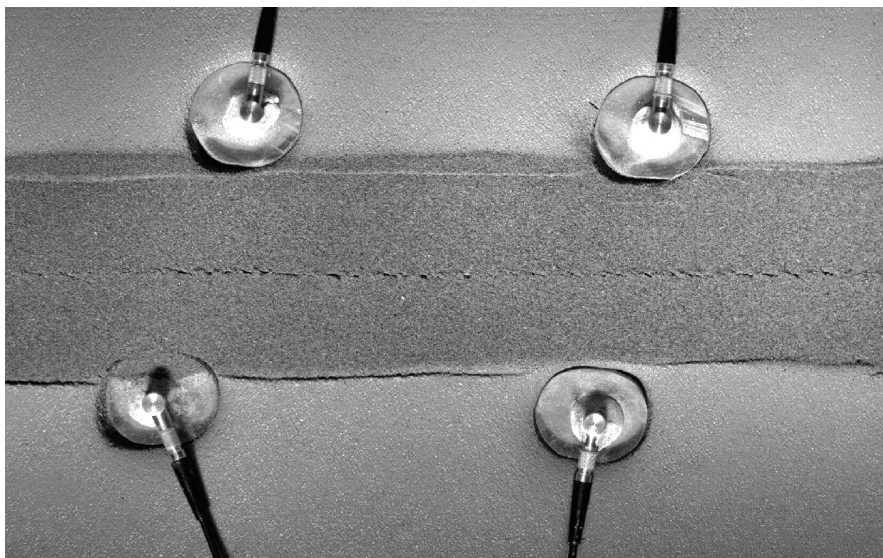


Рис. 3. Фотография свободной поверхности модельного материала после окончания эксперимента

из различных материалов при различных видах нагружения и является в настоящее время наиболее широко используемым оптическим методом неразрушающего контроля [Борняков и др., 2016а; 2016б; Борняков, Пантелеев, 2018; Еремин и др., 2019; Любутин и др., 2019]. Математический аппарат метода DIC изложен, например, в [Sutton et al., 2009].

Предварительная обработка и непосредственно анализ оптических изображений методов корреляции цифровых изображений осуществлялись в специализированном ПО StrainMaster LaVision. Расчет полей компонент вектора перемещений осуществлялся в пределах прямоугольной области размером 295.00×50.00 мм. Для достаточного уровня детализации деформационных полей, реализация метода корреляции цифровых изображений осуществлялась для размера подобласти 5×5 мм и шага 1.4 мм. Для выбранных параметров обработки точность определения смещений составила 0.05 мм.

Регистрация акустической эмиссии, генерируемой в области модельного разлома, осуществлялась с помощью восьмиканальной системы Amsy-6 (Vallen, Germany) с предусилителями АЕР4Н (усиление 34 дБ) и пьезокерамическими датчиками АЕ104 (рабочий частотный диапазон 100–400 кГц). Датчики акустической эмиссии крепились к площадкам из ПММА посредством цианакрилатного клея, в свою очередь, восемь площадок с датчиками располагались по обе стороны модельного разлома на удалении не более 60 мм. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась в непрерывном беспороговом режиме.

Подготовка и реализация подвижки в составной упруговязкопластической среде

Эволюция смещений блоков модельного материала по данным лазерных дальнометров

На рисунке 4 представлены зависимости смещения блоков модельного материала, расположенных в активной и пассивной кюветах соответственно. Смещение модельного материала в активной кювете позволяет выделить две характерных стадии. Первая стадия соответствует процессу установления равномерного движения материала в активной кювете (от 0 до 650 секунды), связанному с деформированием пружины k_1 , вторая – непосредственно равномерному смещению материала со скоростью 0.62 мм/мин.

Зависимость смещения материала в пассивной кювете от времени имеет более сложную форму и позволяет выделить четыре характерных стадии (рис. 4, красная линия). Многостадийный характер изменения смещения материала в пассивной кювете связан с увлечением его в движение материалом активной кюветы через модельную разломную зону в условиях сопротивления, вызванного растяжением пружины k_2 . На первой стадии происходит установление движения материала в пассивной кювете, вторая стадия характеризуется квазиравномерным смещением материала со скоростью 0.49 мм/мин (рис. 5а).

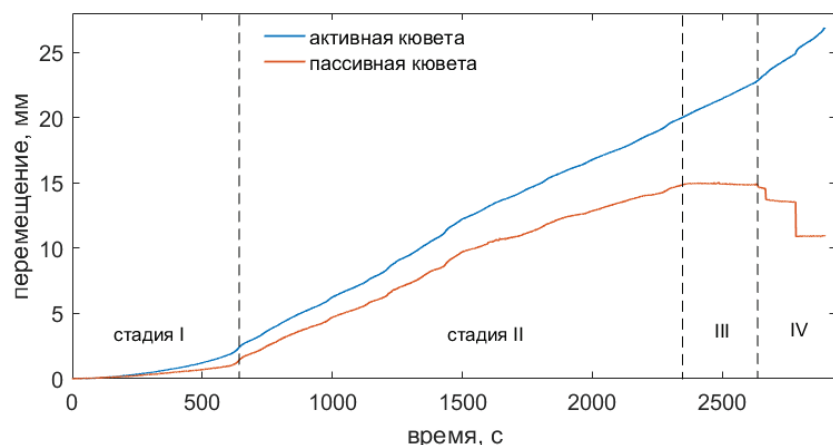


Рис. 4. Смещение блоков модельного материала

Отличие скоростей движения активной и пассивной кювет (блоков материала) вызвано деформированием материала в окрестности границы контакта – заложенной разломной зоны. Начиная с 2390 секунды, равномерное смещение материала в пассивной кювете прекращается и в течение 240 секунд материал медленно скользит (третья стадия). При этом на зависимости смещения от времени наблюдаются аperiodические флуктуации (рис. 5б), по-видимому, связанные с процессами деформирования отдельных зон модельной разломной зоны. Четвертая стадия характеризуется ступенчатым смещением материала в пассивной кювете в противоположном направлении, вызванным вспарыванием разломной зоны и смещением по ней. Всего зарегистрировано три скачка смещения (рис. 5в) пассивной кюветы.

Найденные четыре стадии перемещения пассивного блока с течением времени также отчетливо выделяются на зависимости смещения двух блоков материала относительно друг друга (рис. 6). Вторая

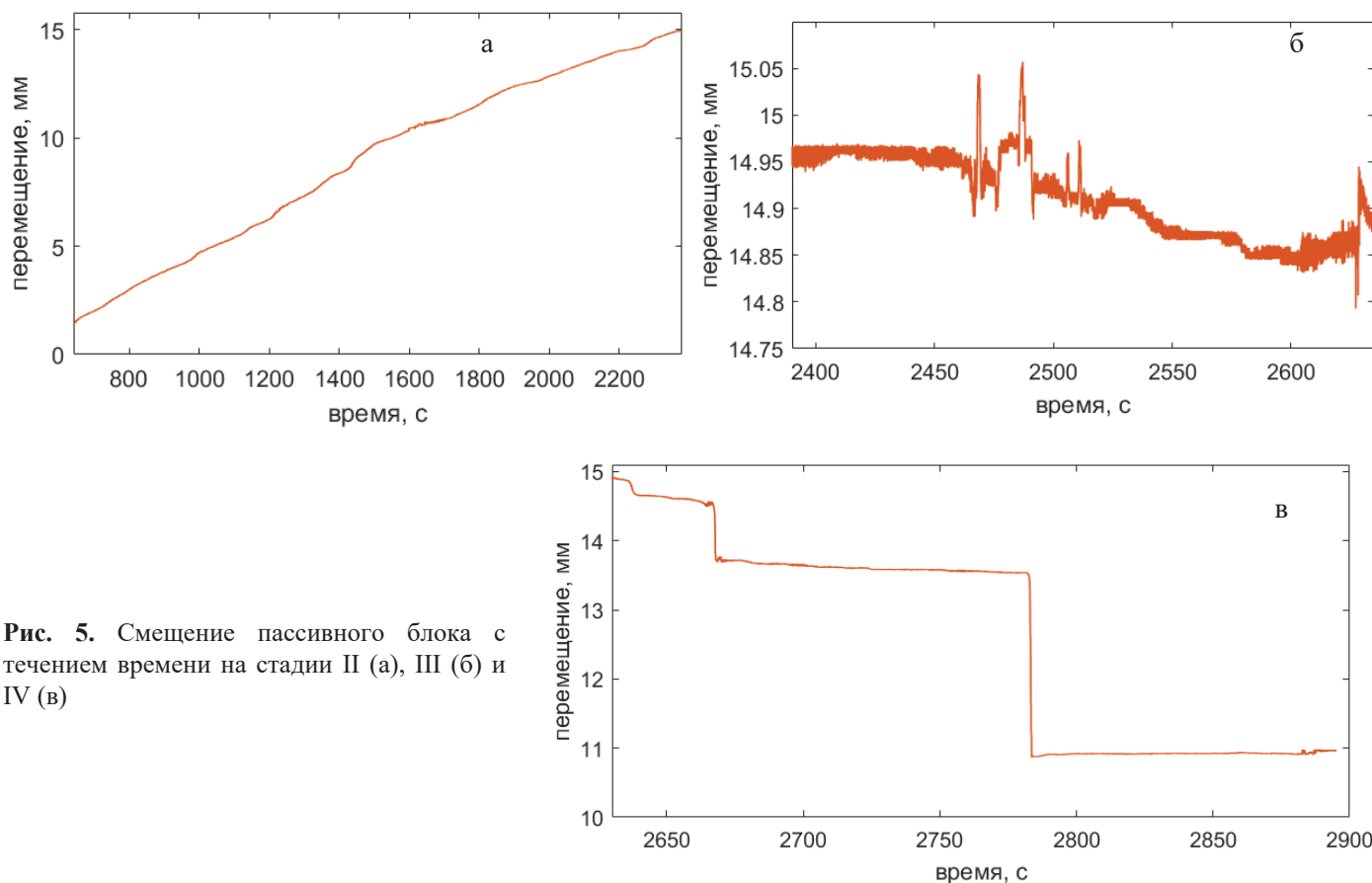


Рис. 5. Смещение пассивного блока с течением времени на стадии II (а), III (б) и IV (в)

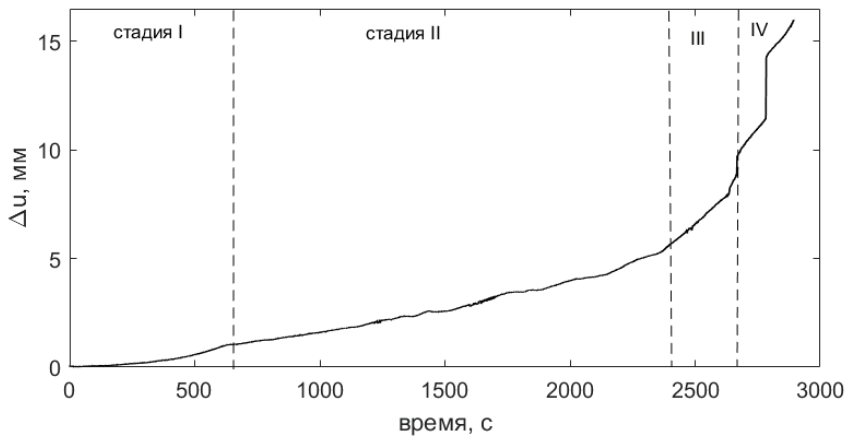
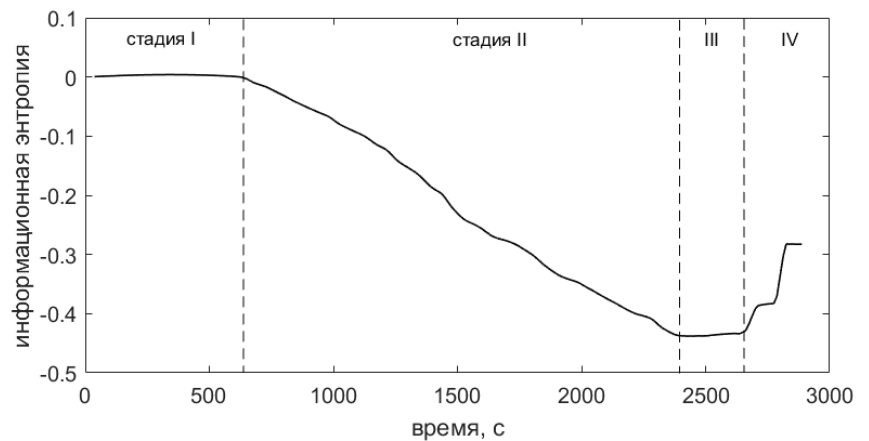


Рис. 6. Относительное смещение блоков модельного материала с течением времени

Рис. 7. Вариации информационной энтропии, рассчитанной для смещения пассивного блока



стадия характеризуется равномерным ростом смещения материала в активной кювете относительно материала в пассивной кювете, третья стадия характеризуется нелинейным ростом относительного смещения с переходом к скачкообразному изменению относительного смещения блоков на четвертой стадии.

Найденные стадии развития разломной зоны в упруговязкопластической среде также отражаются в последовательном изменении информационной энтропии [Борняков и др., 2021] от времени (рис. 7), характеризующей степень неопределенности текущего состояния системы. Величина информационной энтропии вычислялась в окне 37.5 секунд с шагом 12.5 секунд. Согласно приведенному графику, резкое снижение энтропии началось с 650 секунды, что указывает на изменение динамического состояния системы сопряженных блоков и ее переход в новое устойчивое состояние к 2390 секунде. Третья стадия развития деформационного процесса в окрестности модельной разломной зоны помимо медленного характера изменения смещения материала с аperiодическими флуктуациями в пассивной кювете характеризуется минимумом информационной энтропии.

Эволюция поля перемещений на свободной поверхности модельного материала

Для изучения локальных особенностей деформирования материала в окрестности модельной разломной зоны был проведен анализ оптических изображений свободной поверхности деформируемого материала методом корреляции цифровых изображений. Для восстановления поля перемещений на свободной поверхности модельного материала был использован интегральный подход, т.е. оценивались компоненты смещения точек поверхности в текущем кадре относительно первого кадра, соответствующего недеформированному состоянию материала. В связи с тем, что третья стадия развития деформационного процесса сопровождается появлением на поверхности материала отдельных разрывных структур, оценка поля перемещений с использованием интегрального подхода осуществлялась до начала этой стадии.

На рисунке 8 представлены поля продольных (x -компонента) и поперечных (y -компонента) смещений свободной поверхности материала на момент окончания второй стадии деформирования. Видно, что на обоих полях четко выделяется заложенная до начала эксперимента разломная зона. В случае продольной компоненты вектора перемещения она разделяет два блока, имеющих различную скорость смещения. При этом накопленное смещение активного блока более чем на 2 мм превышает смещение пассивного блока. В случае поперечной компоненты вектора перемещений разломная зона является границей, разделяющей отдельные зоны в каждом из блоков, испытывающих различное направление поперечного смещения.

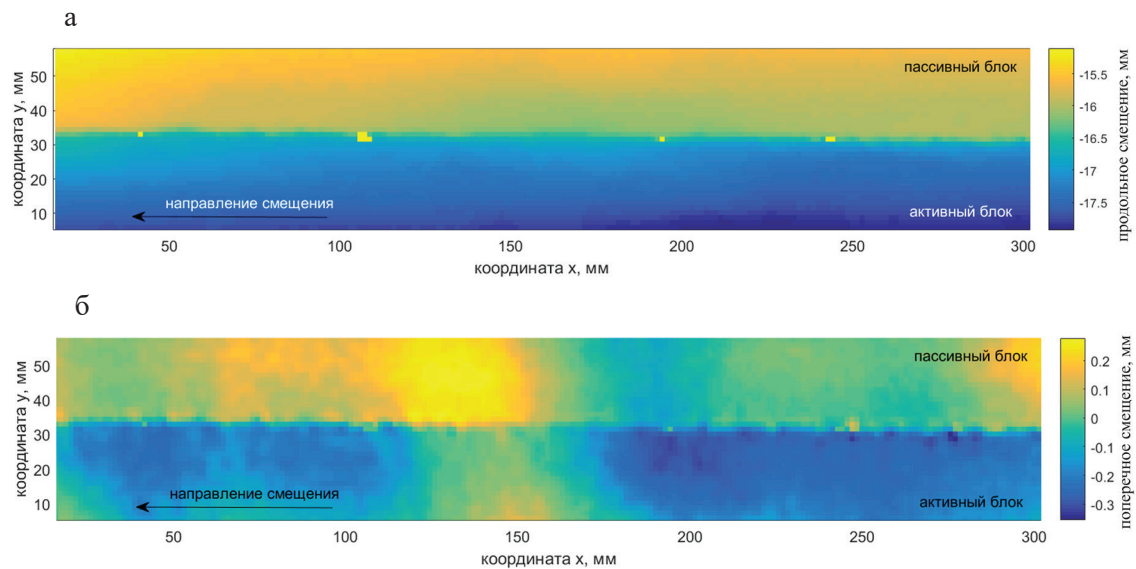


Рис. 8. Поле продольных (а) и поперечных (б) смещений на свободной поверхности модельного материала

Поле продольных смещений на поверхности деформируемого материала в окрестности границы двух блоков позволяет выявить запертые участки границы или, другими словами, участки дефицита смещения, являющиеся индикатором «асперити» в плоскости контакта. Для определения таких участков были выбраны два горизонтальных профиля $y = 22.3$ и $y = 39.45$ мм, расположенные по обе стороны от границы раздела блоков. Для каждого из профилей были построены вариации продольного смещения от времени, определяемые следующим соотношением

$$\Delta u_x^i(x) = u_x^i(x) - \langle u_x \rangle,$$

где $u_x^i(x)$ – продольное смещение в i -ой точке профиля, $\langle u_x \rangle$ – среднее продольное смещение по всему профилю. Вычисленные временные вариации продольного смещения для каждого из профилей представлены на рисунке 9.

Для активного блока с течением времени выделяются три локальных зоны с отличным от среднего продольным перемещением (рис. 9а). В связи с тем, что среднее смещение в каждом из профилей отрицательное, положительная величина соответствует случаю дефицита смещения. Первая зона (от 30 до 90 мм) – зона с дефицитом смещения, максимальное значение которого равно 0.27 мм и достигается к концу второй стадии. Остальные зоны (в интервалах 130–142 и 205–280 мм) являются зонами избытка смещения, т.е. смещения в этих зонах превышают среднее по профилю. Максимальное отличие от среднего смещения достигается также к концу второй стадии в третьей зоне и по амплитуде составляет 0.2 мм.

В случае пассивного блока выделяются две локальных зоны (рис. 9б). Первая зона – зона дефицита смещения по размерам близка к аналогичной зоне в активном блоке, при этом абсолютная величина

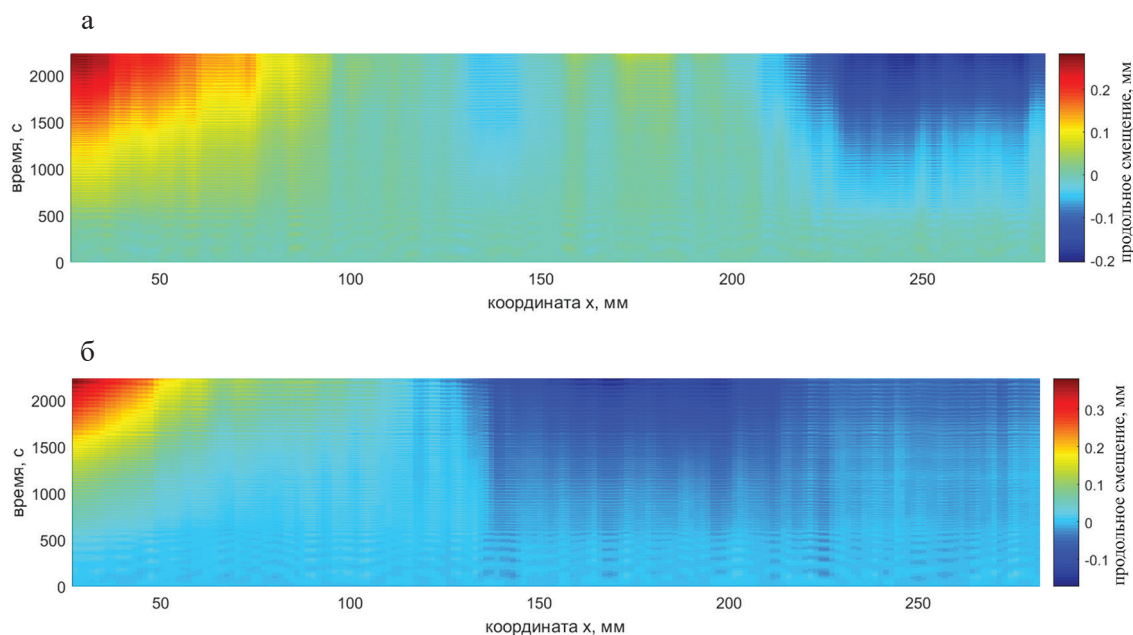


Рис. 9. Временные вариации продольного смещения по профилю $y = 22.3$ мм – активный блок (а) и $y = 39.45$ мм – пассивный блок (б)

дефицита смещения составляет 0.35 мм. Вторая – зона избытка смещения, выражена слабее, располагается в интервале 130–230 мм, а величина избытка не превышает 0.15 мм. Таким образом, видно, что продольное смещение активного блока за счет равномерного подтягивания кюветы через трос шаговым двигателем вызывает неравномерное продольное смещение в районе границы двух блоков (модельного разлома). При этом наблюдаются как зоны дефицита смещения, так и избыточного смещения, являющиеся проекцией зон зацепления и зон облегченного скольжения в плоскости разлома.

Аналогичная процедура для выбранных профилей была реализована для поперечной компоненты вектора перемещения свободной поверхности материала. Полученные временные вариации поперечного смещения представлены на рисунке 10.

Из рисунка видно, что полученные поля вариаций поперечного смещения для обоих профилей

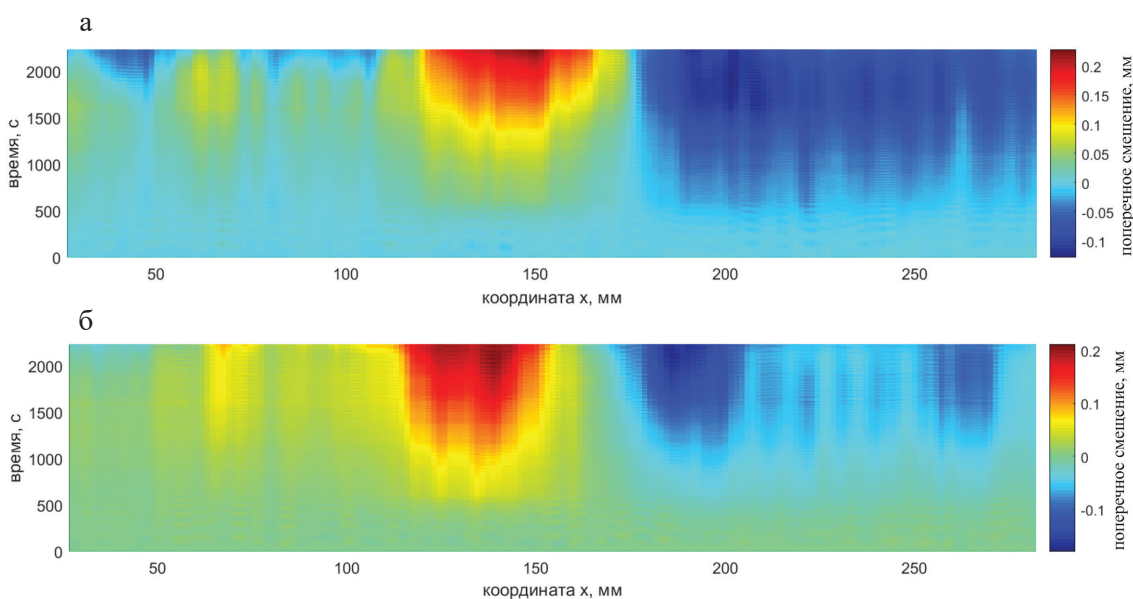


Рис. 10. Временные вариации поперечного смещения материала по профилю $y = 22.3$ мм – активный блок (а) и $y = 39.45$ мм – пассивный блок (б)

имеют схожее строение. Так, в середине профилей выделяется зона, соответствующая смещению материала вглубь пассивного блока (положительная величина вариации). В правой части профиля (интервал 165–280 мм) выделяется зона, соответствующая смещению материала вглубь активного блока. Максимальное по модулю смещение для обоих профилей не превышает 0.24 мм.

Относительное поперечное смещение по обоим горизонтальным профилям в момент времени, соответствующий окончанию второй стадии деформирования, отражает геометрию приповерхностной части заложённой разломной зоны перед началом активного формирования разрывных сегментов. Относительные поперечные смещения по профилям в активном и пассивном блоках представлены на рисунке 11. Видно, что в правой части профилей смещение отрицательное (внедрение вглубь активного блока) и в целом слабо меняется в интервале от 200 до 280 мм. Этот факт определяет наличие зоны облегченного смещения материала в обоих блоках. В средней части выделяется выступ вглубь пассивного блока, по-видимому, определяющий заклинивание (дефицит продольного смещения) зоны в интервале от 0 до 100 мм.

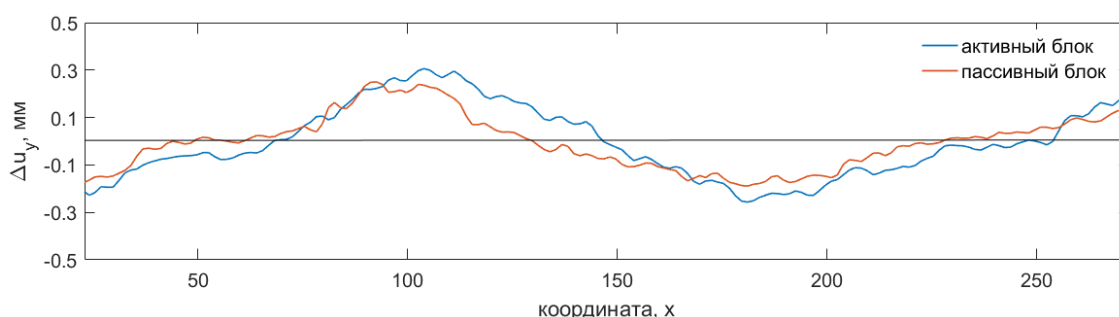


Рис. 11. Относительное поперечное смещение по двум горизонтальным профилям на момент окончания второй стадии деформирования

Для исследования динамики локального деформирования модельного материала в окрестности разломной зоны были построены зависимости разности продольной и поперечной компонент вектора смещения между несколькими парами точек, расположенными как вдоль линии разлома, так и поперек нее. Расположение рассмотренных пар точек представлено на рисунке 12.

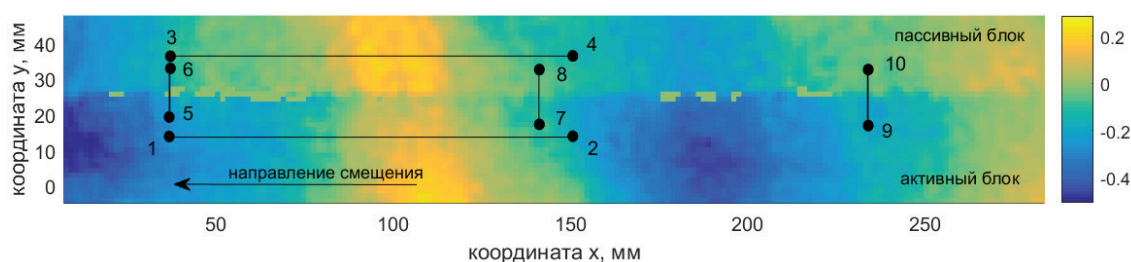


Рис. 12. Расположение реперных пар точек вдоль (пары 1–2, 3–4) и поперек (пары 5–6, 7–8, 9–10) разломной зоны

В начале рассмотрим динамику деформационного процесса для пар точек, расположенных вдоль разлома в активном (пара 1–2) и пассивном (3–4) блоках. На рисунке 13 представлены временные зависимости разности продольного (рис. 13а) и поперечного (рис. 13б) смещений для каждой из пар.

Начиная с 650 секунды (вторая стадия) разность продольного смещения в точках 1–2, расположенных в активном блоке, линейно растет с течением времени. При этом на линейный рост накладывается периодическая составляющая (средний период 48 секунд) неизменной амплитуды, вызванная, по-видимому, колебаниями в системе шаговый двигатель с редуктором: пружина – кюветы – пружина.

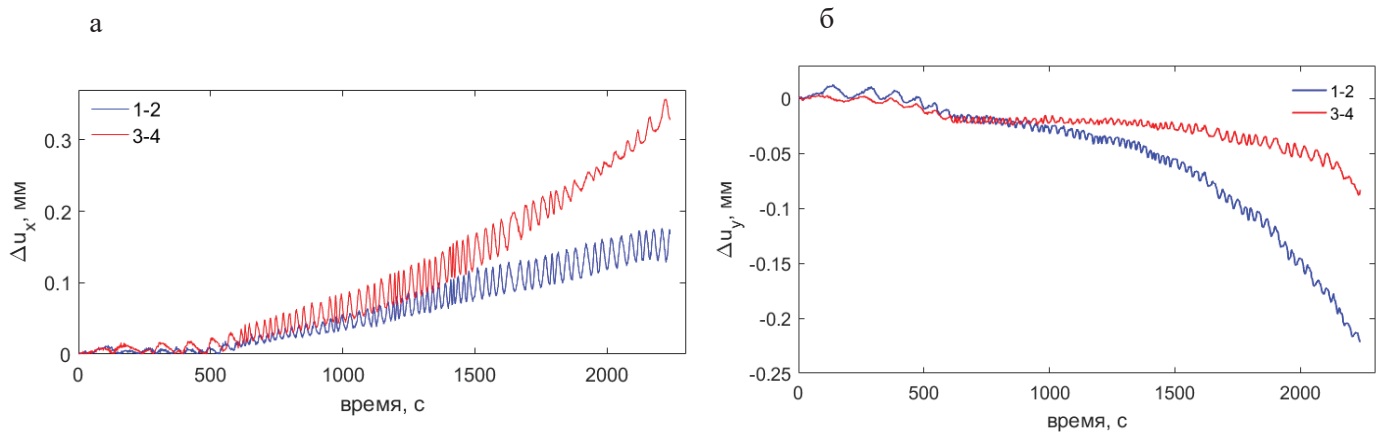


Рис. 13. Разность продольных (а) и поперечных (б) смещений между парами точек, расположенных вдоль разлома

Для пары 3–4, расположенной в пассивном блоке, линейный рост наблюдается до 1420 секунды, после которой следует второй линейный участок с большей скоростью роста разности продольных смещений.

В случае разности поперечных смещений в данных парах точек наблюдается отличная от продольных смещений динамика (рис. 13б). Характер изменения разности поперечных смещений является нелинейным и определяется процессами неравномерного по длине разломной зоны деформирования модельного материала, приводящими к искривлению линии заложенного разлома (см. рис. 11).

Для анализа относительной деформационной динамики в активном и пассивном блоках были построены зависимости разности продольных и поперечных смещений в трех парах реперных точек, расположенных поперек модельной разломной зоны (рис. 14). В случае продольных смещений видно, что для всех трех пар с начала второй стадии имеет место одинаковый и линейный рост разности

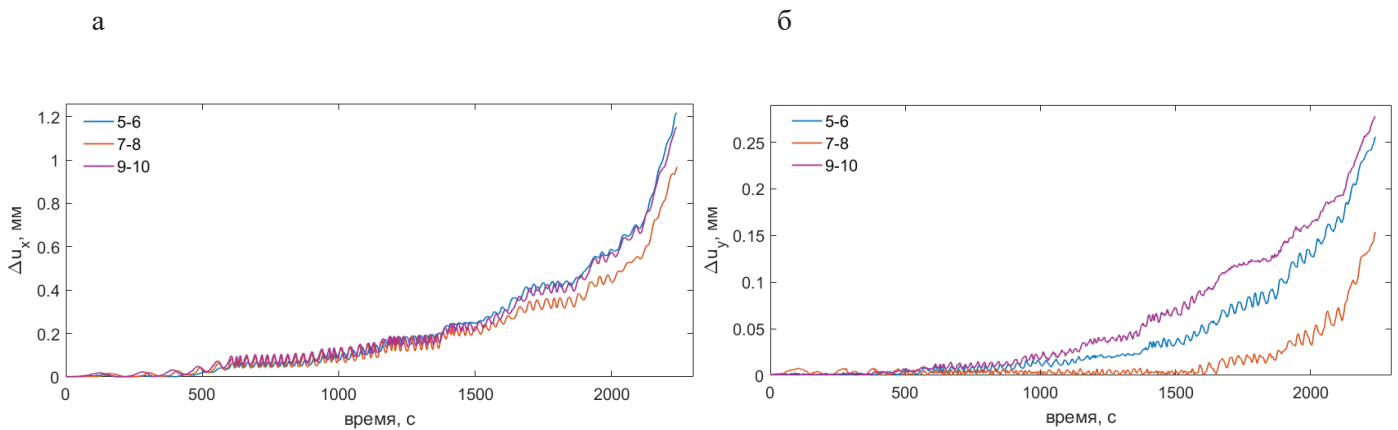


Рис. 14. Разность продольных (а) и поперечных (б) смещений между парами точек, расположенных поперек разлома

продольных смещений. Это указывает на деформирование обоих блоков как единого целого. Далее, с течением времени, зависимости разности продольных смещений между точками в каждой паре от времени приобретают нелинейный характер, вызванный деформированием самой разломной зоны.

Аналогичные особенности имеют место для разности поперечных смещений между парами точек (рис. 14б). Временные зависимости имеют нелинейный характер с наложенной периодической составляющей, которая деградирует к окончанию второй стадии деформирования. При этом по абсолютному значению различия между парами реперных точек определяются величиной и знаком поперечных смещений соответствующих зон пассивного и активного блоков (см. рис. 12).

Активность акустической эмиссии при деформировании составной упруговязкопластической среды

Несмотря на высокие демпфирующие свойства водной пасты монтмориллонитовой глины, в процессе подготовки и реализации подвижки по модельной разломной зоне, в составной упруговязкопластической среде, удалось зарегистрировать более 250 импульсов акустической эмиссии, связанных с процессами деформирования полосы менее вязкого влажного песка. Особенности акустико-эмиссионного процесса представлены на рисунке 15.

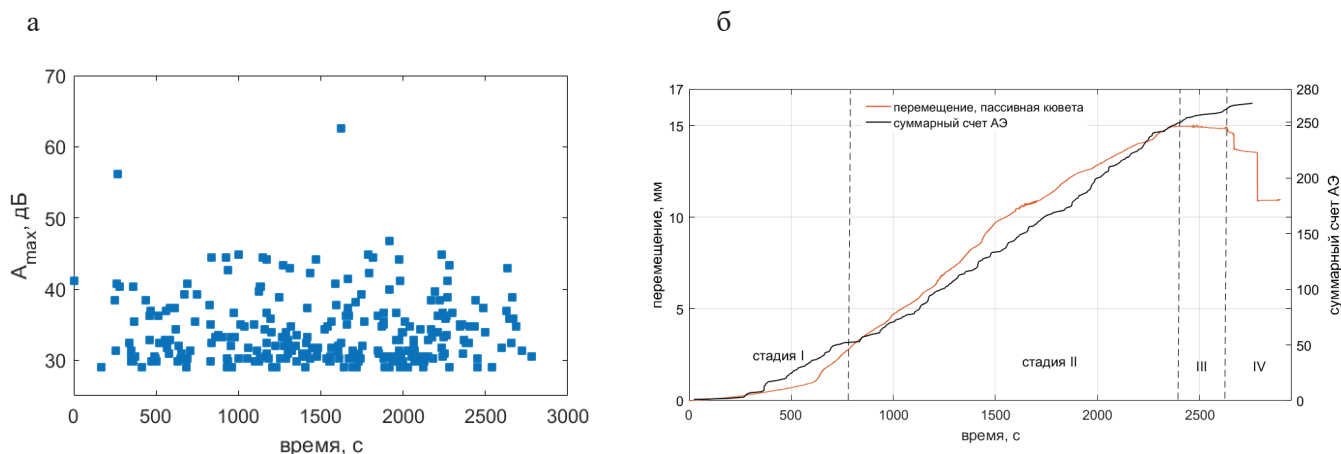


Рис. 15. Максимальные амплитуды зарегистрированных сигналов АЭ (а), совмещенные временная зависимость перемещения пассивного блока (по данным лазерного дальномера) и суммарный счет акустической эмиссии

Ввиду того, что регистрация акустической эмиссии проводилась в беспороговом режиме, после окончания эксперимента была реализована процедура выделения отдельных импульсов АЭ, амплитуда которых превышала фоновый уровень. Из рисунка 15а видно, что зарегистрированные преобразователями акустической эмиссии импульсы имеют максимальную амплитуду, не превышающую 50 дБ (за исключением двух импульсов). Характерная волновая форма зарегистрированных импульсов акустической эмиссии представлена на рисунке 16 и имеет традиционный релаксационный вид.

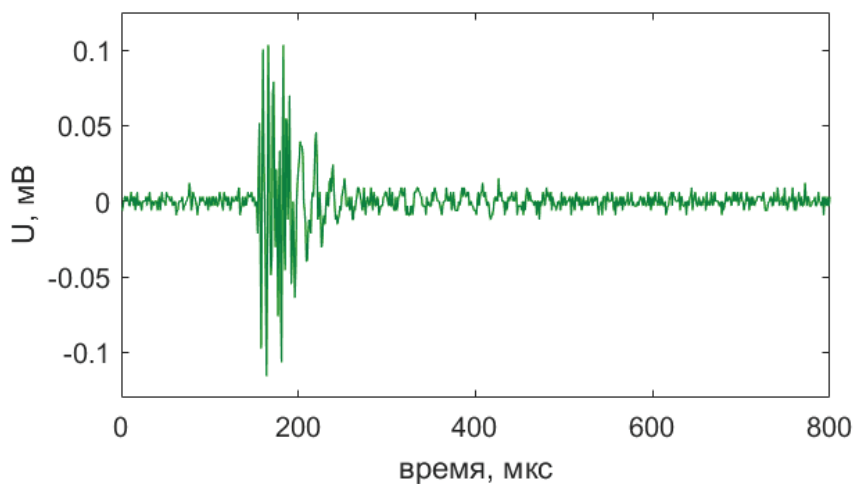


Рис. 16. Волновая форма характерного импульса акустической эмиссии

Суммарный счет акустической эмиссии коррелирует со смещением материала пассивного блока, оцененного по данным лазерного дальномера (рис. 15б). Так, вторая стадия развития разломной зоны характеризуется постоянной скоростью роста акустической эмиссии (линейный характер изменения суммарного счета). Переход к третьей стадии сопровождается уменьшением акустико-эмиссионной активности, что отражается в уменьшении угла наклона зависимости суммарного счета от времени.

Корреляция акустико-эмиссионной активности и смещения пассивного блока указывают на то, что источником акустической эмиссии являются деформационные процессы, протекающие в окрестности разломной зоны.

Выводы

Получены результаты физического моделирования процесса подготовки и реализации подвижки по модельному разлому в упруговязкопластической модели литосферы. Анализ данных об интегральном смещении двух блоков модельного материала позволил выявить четыре характерных стадии процесса. Первая стадия связана с установлением равномерного взаимного движения блоков материала, вторая – непосредственно с квазиравномерно смещением блоков материала с постоянной скоростью. При этом отличие в скоростях движения блоков материала вызвано деформированием материала в окрестности границы контакта – заложенной разломной зоны. Третья стадия характеризуется фактической остановкой движения материала в пассивном блоке и появлением аperiodических флуктуаций на фоне его медленного скольжения. Четвертая стадия соответствует ступенчатому смещению материала в пассивном блоке в противоположном направлении – вспарыванию разломной зоны и смещению по ней.

В результате анализа оптических изображений свободной поверхности деформируемого модельного материала методом корреляции цифровых изображений выявлены пространственные особенности развития окрестности модельной разломной зоны на первых двух стадиях. Так, было установлено, что по простиранию модельного разлома выделяются как области избытка, так и области дефицита продольного смещения. Наличие этих областей вызвано деформацией контактной зоны модельного разлома, ее искривлением и формированием зоны внедрения материала одного блока в материал второго блока. Анализ динамики смещения между реперными точками, расположенными поперек разлома, показал, что в начале наблюдается равномерное смещение материала по обе стороны от разлома (деформирование блоков как единого целого) с последующим переходом к нелинейному характеру смещений, вызванному деформированием самой разломной зоны.

Финансирование

Экспериментальная часть работы выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-30008). Анализ полученных оптических и акустических данных выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (ИМСС УрО РАН – филиала ФИЦ УрО РАН, тема № АААА-А19-119013090021-5).

Список литературы

- Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // Доклады Российской Академии Наук: Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 1. С. 86–90. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(96\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00053-2)
- Борняков С.А., Пантелеев И.А. Сегментационный механизм периодической активизации разлома (по результатам физического моделирования) // Доклады академии наук. 2018. Т. 482. № 1. С. 1178–1181. <https://doi.org/10.31857/S086956520003226-1>
- Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2016а. Т. 7. № 2. С. 289–302. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0207>
- Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Динамика внутриразломных деформационных волн (по результатам физического моделирования) // Доклады Академии наук. 2016б. Т. 471. № 6. С. 722–724. <https://doi.org/10.7868/S0869565216360147>
- 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. 2014. Т. 5. № 4. С. 823–861.

Быков В.Г. Деформационные волны земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176–1190.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. : Наука, 1975. – 536 с.

Еремин А.В., Смирнова А.С., Панин С.В., Почивалов Ю.И. Применение метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов роста усталостной трещины в сварных соединениях титанового сплава ВТ23 // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 37–45. <https://doi.org/10.1134/S0130308219050051>

Кочарян Г.Г., Кишикина 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.

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.

Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Нарушение и залечивание зон локализации деформаций в массиве горных пород // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 1. С. 5–18.

Любушин П.С., Панин С.В., Титков В.В., Еремин А.В., Сундер Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 88–109. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.08>

Семинский К.Ж. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 10. С. 1018–1030.

Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск : ИЗК СО АН СССР, 1986. – 130 с.

Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. № 10. С. 10–19.

Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 83–117.

Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений. Тектонофизическая концепция. Новосибирск : «Гео», 2014. – 359 с.

Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск : Наука. Сиб. отделение, 1977. – 102 с.

Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8–18.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск : Наука, 1983. – 112 с.

Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J. Slip-stick and the evolution of frictional strength // Nature. 2010. Vol. 463. P. 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature08676>

Chao Y.J., Sutton M.A. Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation – part 1: data acquisition and image analysis system // Tappi J. 1988. Vol. 70 (3). P. 173–175.

Cheremnykh A.V. Active stress field in the Baikal rift zone: laboratory modeling // Russian Geology and Geophysics. 2005. Vol. 46 (10). P. 1071–1080.

Choi Choi S., Shah S.P. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. // ExpMech. 1997. Vol. 37 (3). P. 307–313. <https://doi.org/10.1007/BF02317423>

Lyons J.S., Liu J., Sutton M.A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation // ExpMech. 1996. Vol. 36 (1). P. 64–70. <https://doi.org/10.1007/BF02328699>

Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Vol. 26. P. 643–696. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.643>

Ramberg H. The role of gravity in orogenic belts. In: Thrust and Nappe Tectonics / K.R. McClay, N.J. Price (Eds.). Geological Society. London Special Publications. 1981. Vol. 9. P. 125–140. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1981.009.01.11>

Sherman S.I., Cheremnykh A.V., Miroshnichenko A.I. New data on stress field structure in the Baikal rift system: Modeling Results // Doklady Earth Sciences. 2005. Vol. 401 (2). P. 249–252.

Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer. 2009. – 316 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>

EXPERIMENTAL STUDY OF FEATURES OF PREPARATION AND MOVEMENT ON A MODEL FAULT IN AN ELASTOVISCOPLASTIC MODEL OF THE LITHOSPHERE

© 2023 I. A. Panteleev^{1, *}, S. A. Bornyakov², A. N. Vshivkov¹, A. A. Karimova²

¹*Institute of continuous media mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

²*Institute of Earth's Crust of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

**E-mail: pia@icmm.ru*

This paper presents the results of experiments to reproduce the process of stick-slip along a pre-existing stick-slip discontinuity in an elastoviscoplastic model. There are numerous examples of this process being reproduced experimentally to look for signs of the preparation of pulsed displacement along a fault, which could be interpreted as a harbinger of an impending earthquake in nature. In these experiments, rocks and other materials with high elasticity and susceptibility to brittle fracture were used as models. The results presented in this article were obtained using elastoviscoplastic models. The authors are not aware of the use of such models in the experiments described. The model materials were an aqueous paste of montmorillonite clay and wet river sand. As a result of the experiments, characteristic stages of deformation of the near fault zone were identified, one of which corresponds to slow sliding of the material with aperiodic displacement fluctuations. Digital image analysis was used to identify areas of both excess and deficient displacement along the strike of the model fault.

Keywords: physical modeling, model fault, shear deficit, digital image correlation, acoustic emission.