

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ СОСКАЛЬЗЫВАНИИ БЛОКА ГОРНОЙ ПОРОДЫ

***А.А. Остапчук¹, Д.В. Павлов¹, В.В. Ружич²,
И.В. Батухтин^{1,3}, Е.А. Виноградов¹***

¹Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

²Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

³Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

В настоящей статье представлены результаты натурных экспериментов по сдвиговому деформированию нарушения сплошности. В ходе экспериментов бетонная плита перемещалась с разными скоростями вдоль шероховатой плоскости

сегмента Ангарского разлома в Прибайкалье. Проведенное физическое моделирование позволило получить уникальные данные на реальном природном объекте, по масштабу превышающем лабораторные образцы на порядок, и в отличие от лабораторных экспериментов продемонстрировало более сложные картины фрикционного взаимодействия и наблюдаемого сейсмоакустического эффекта при различных режимах деформирования.

Введение

Тектонические коровые землетрясения в подавляющем большинстве случаев приурочены к разломам. Расположение гипоцентров именно в разломных зонах проявляется тем очевиднее, чем точнее определение положения гипоцентров событий [Schaff, Richards, 2004]. Долгое время предполагалось, что накопившиеся избыточные напряжения в тектонически-активных регионах снимаются посредством землетрясения при «мгновенном» срыве заблокированных участков разлома, либо через непрерывное асейсмическое скольжение по разломам. В последнее десятилетие увеличение количества поступающей геолого-геофизической информации и новые данные сейсмологических наблюдений привели к более четкой картине процессов, происходящих внутри разломных зон. Одним из важных достижений является обнаружение и доказательство существования различных режимов деформирования, посредством которых реализуется потенциальная энергия, накопленная в земной коре [Peng, Gombert, 2010; Кочарян и др., 2013a].

Изучение механики землетрясения предполагает два аспекта. С одной стороны, это исследование эволюции отдельного очага, с другой – изучение совокупности очагов или сейсмического режима.

Из-за невозможности прямыми наблюдениями и измерениями изучать механизмы возникновения очагов землетрясений многие вопросы остаются слабоизученными, например: «каковы условия возникновения и эволюции различных режимов деформирования?», «является ли режим скольжения характерным для некоторого участка, или он определяется факторами, инициирующими деформационный процесс всего разлома?».

Одним из путей исследования этого актуального вопроса являются лабораторные эксперименты. Так, в лабораторных экспериментах установлено, что способ реализации накопленной упругой энергии определяется не столько прочностными макрохарактеристиками заполнителя, сколько его структурой на мезоуровне. Незначительное изменение структурных параметров может привести к радикальной смене реакции на увеличение внешней квазистатической или динамической нагрузки [Кочарян и др., 2013].

Однако из-за малых масштабов и сильных упрощений, применяемых в лабораторных экспериментах, для более глубокого понимания вопросов, связанных с зарождением и эволюцией очага землетрясения, необходимо применение новых способов натурных испытаний, физического и численного моделирования. Одним из наиболее эффективных методов может быть применение способов физического моделирования в условиях более приближенных к естественным (геологическим) с большим масштабным и геомеханическим подобием.

В настоящей статье представлены результаты физического моделирования различных режимов деформирования нарушения сплошности горного массива на сегменте Ангарского разлома в Прибайкалье.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты по изучению различных режимов сдвигового деформирования нарушения сплошности проводились на геодинамическом полигоне в п. Листвянка Иркутской области на экспериментальной установке, показанной на рис. 1. Бетонный блок размещался на обнажении, представляющем собой одну из плоскостей скольжения Ангарского разлома с углом падения $43\text{--}45^\circ$ на ЮЗ. Размер и масса плиты составляли соответственно $110\times 90\times 25\text{ см}^3$ и 525 кг. Контакт между поверхностями выполнялся слоем гранулированного материала, имитирующего заполнитель магистрального разрыва. Скорость сползания U задавалась системой нагружения, которая состояла из гидравлического домкрата (Д) и упругого элемента (У), с жесткостью $490\pm 5\text{ Н/мм}$. Перемещение плиты контролировалось лазерным датчиком (Л) ILD2220-10 (рабочая полоса частот $0\text{--}5\text{ кГц}$, точность измерения 0.1 мкм), а возникающие при деформировании сдвиговые усилия определялись с точностью 30 Н и регистрировались тензорезистивными силоизмерительными датчиками (С) DACELL UU.

Излучаемый в процессе сдвига сейсмоакустический сигнал регистрировался несколькими группами датчиков (рис. 2), расположенных на плите (Г1) и поверхно-

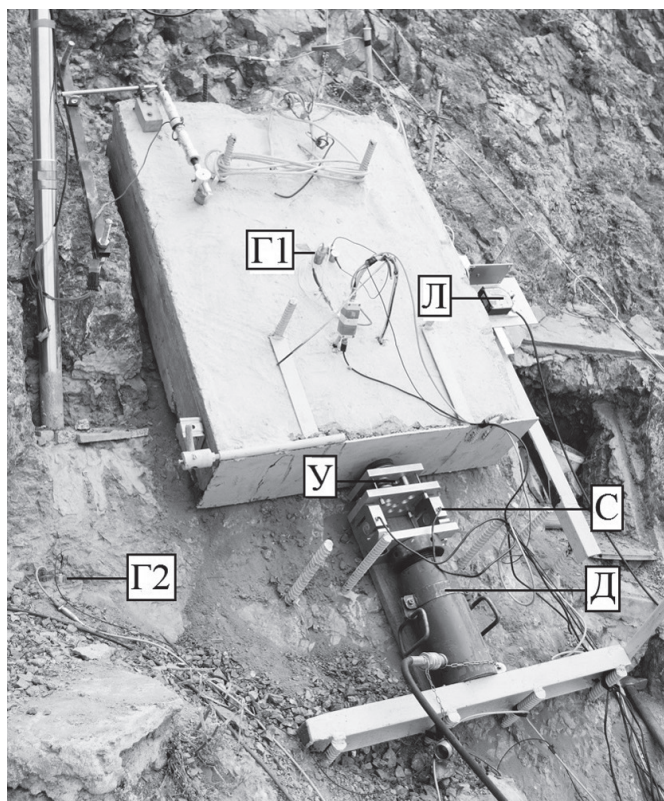


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда «Трибо». Л – лазерный датчик перемещения, У – упругий элемент, Д – гидравлический домкрат, С – датчик силы, Г1, Г2 – измерительные группы сейсмических датчиков

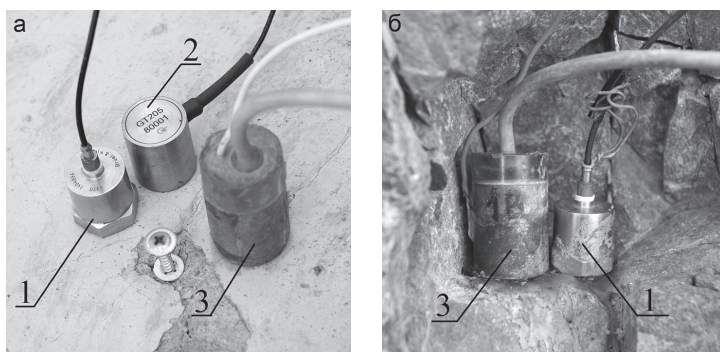


Рис. 2. Группы сейсмических датчиков. (а) – группа Г1, (б) – группа Г2.
1 – акселерометр Bruel&Kjaer 4370, 2 – датчик акустической эмиссии GT205, 3 – геофон GS-20DX

сти массива (Г2). В измерительную группу входили датчик акустической эмиссии GT205, акселерометр Bruel&Kjaer 4370 и геофон GS-20DX, которые регистрировали сигнал в разных частотных областях. Показания всех датчиков записывались двумя цифровыми регистраторами с частотой дискретизации 1 МГц/канал для точки Г1 и 50 кГц/канал для точки Г2.

Результаты моделирования различных режимов деформирования

Для реализации различных режимов деформирования был использован результат, полученный в лабораторных опытах: спектр деформационных событий, которые могут произойти на нарушении сплошности, определяется свойствами и структурой материала-заполнителя. В лабораторных экспериментах использование различных материалов в качестве заполнителя трещины позволяет реализовать весь спектр деформационных режимов – от динамического срыва до стабильного скольжения [Кочарян и др., 2013]. В качестве ключевого параметра, характеризующего режим сдвигового деформирования, удобно использовать максимальную скорость скольжения.

В процессе физического моделирования был реализован полный спектр деформационных режимов – прерывистое скольжение, условно стабильное и стабильное скольжение. Примеры этих режимов показаны на рис. 3. Главным параметром, влияющим на изменение режима деформирования, была структура материала-заполнителя: заполнитель из натрия хлорида демонстрировал режим прерывистого скольжения, из сухого горного песка – условно стабильное, из увлажненного горного песка с крошкой диорита – нестабильное скольжение.

Прецизионные измерения демонстрируют, что для режима условно стабильного скольжения максимальная скорость подвижек, как правило, превосходит скорость сползания не более чем в 7–10 раз, при этом наблюдаются редкие одиночные спонтанные динамические срывы малой амплитуды. Для нестабильного скольжения характерно наличие регулярных актов динамической неустойчивости продолжительностью 0.2 с, при которых максимальная скорость скольжения составляет 0.5–2.0 мм/с, что превышает скорость сползания U в 7–25 раз. Стоит отметить, что основным отличием от режима условно стабильного скольжения являлась максимальная скорость подвижки. В процессе регулярного прерывистого скольжения

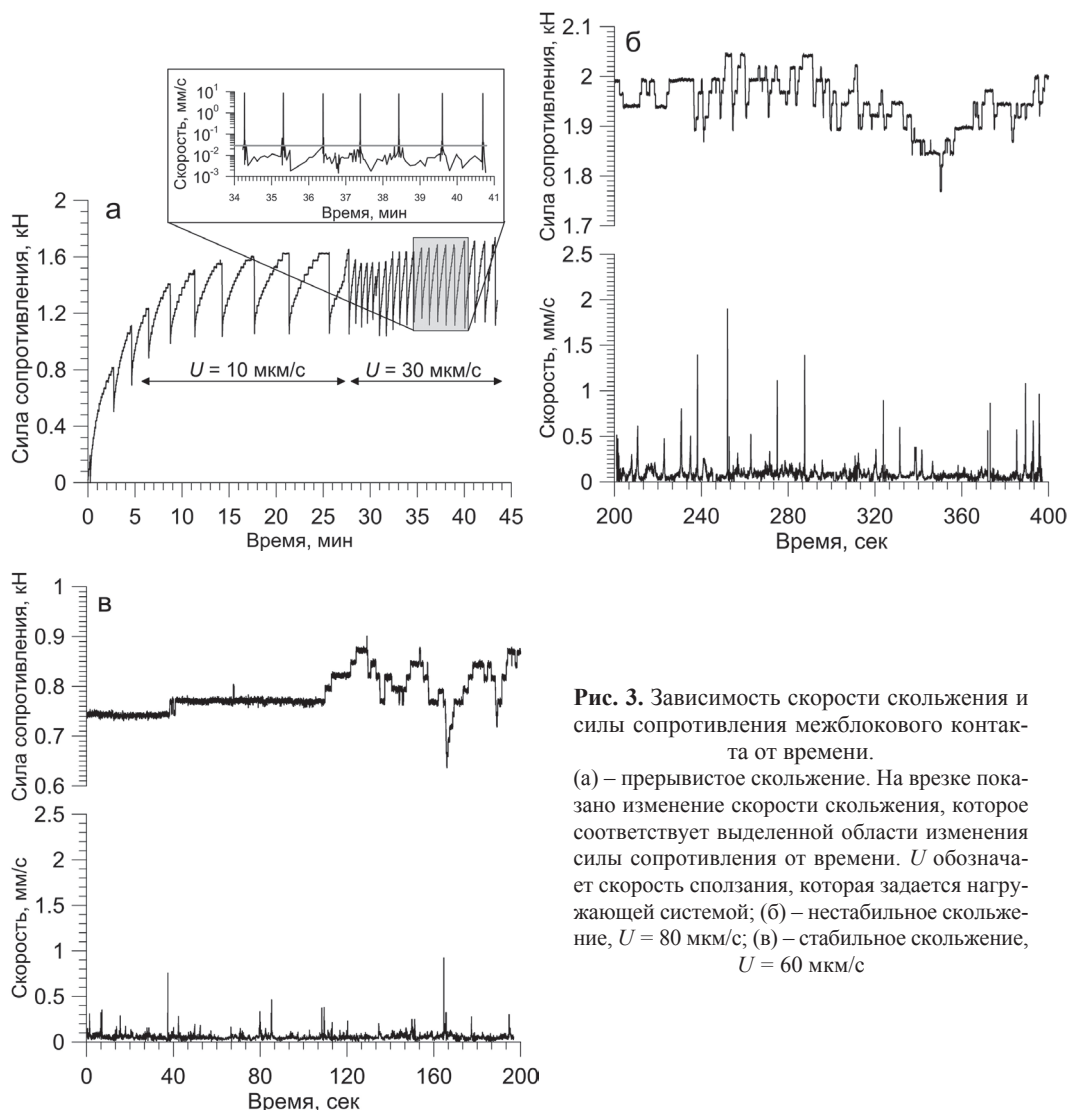


Рис. 3. Зависимость скорости скольжения и силы сопротивления межблокового контакта от времени.

(а) – прерывистое скольжение. На врезке показано изменение скорости скольжения, которое соответствует выделенной области изменения силы сопротивления от времени. U обозначает скорость сползания, которая задается нагружающей системой; (б) – нестабильное скольжение, $U = 80$ мкм/с; (в) – стабильное скольжение, $U = 60$ мкм/с

можно выделить участок относительной стабильности с постоянной скоростью скольжения 4–8 мкм/с (в 5–7 раз меньше скорости сползания U , задаваемой системой нагружения), короткий участок нарастания скорости, который заканчивается моментом потери устойчивости. При этом максимальная скорость смещения блока в процессе динамического срыва достигает 1 см/с. Проведенные натурные эксперименты показали более сложную картину изменения параметров в ходе одного цикла деформирования по сравнению с лабораторными опытами. При деформировании крупного объекта наиболее интенсивное контактное механическое взаимодействие осуществляется на крупных неровностях, площадь которых составляет несколько процентов от полной площади контакта. В процессе деформирования, при котором кумулятивная величина перемещения составляет 10–20 см, относительное местоположение контактных пятен изменяется. Вследствие неоднородности состава материала-заполнителя изменяется и морфология отдельного контактного пятна,

Рис. 4. Трансформация режима нестабильного скольжения. Зависимость изменения относительного перемещения и скорости скольжения со временем. Пунктирной линией обозначена $5U = 1.1$ мм/с. На выносках показаны участки кривой смещения длительно 25 сек в увеличенном масштабе

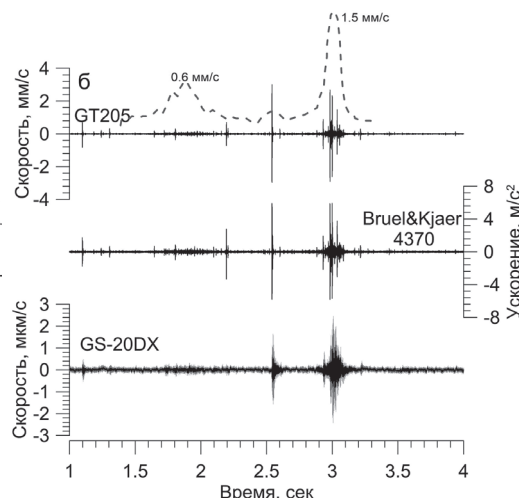
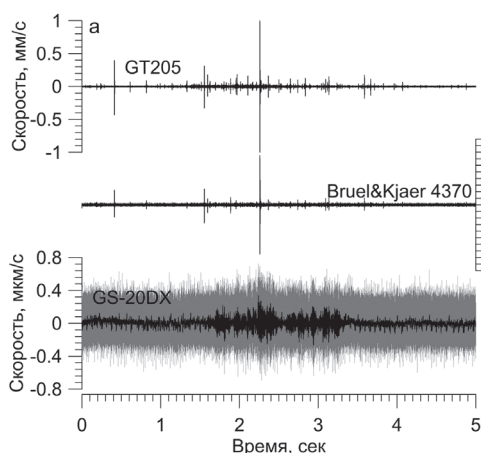
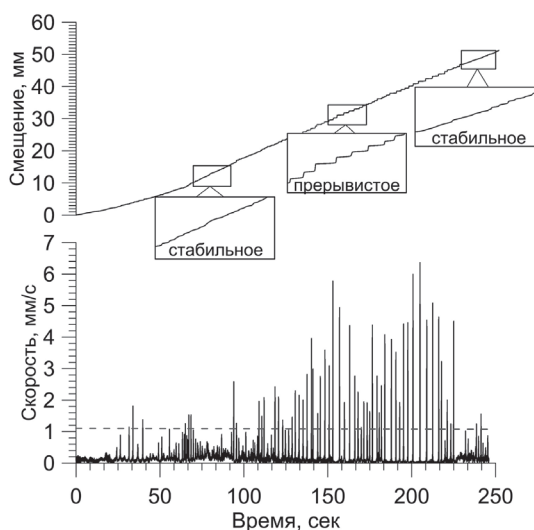
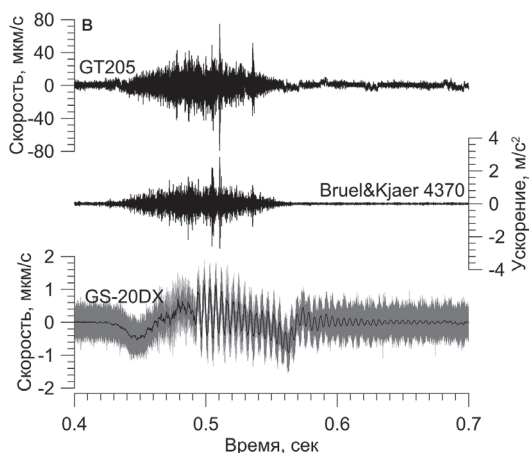


Рис. 5. Примеры зарегистрированных сейсмоакустических сигналов датчиками, расположенными на плите: (а) – стабильное скольжение, (б) – медленные подвижки, (в) – динамический срыв. Черным цветом показаны фильтрованные сигналы в полосе частот 1–100 кГц (GT205), 1–20 кГц (Bruel&Kjaer 4370), 0–1 кГц (GS-20DX); серым – нефильтрованные сигналы. Пунктирной линией (пункт б) показано изменение скорости смещения с характерными максимумами 0.6 и 1.5 мм/с.



что приводит к изменению параметров режима сдвигового деформирования. Изменение внутренних свойств контактных пятен может привести не только к сильному изменению уровня сдвиговых напряжений (рис. 3, в), но и привести к трансформации одного режима в другой. Так, для заполнителя, состоящего из увлажненного горного песка, режим стабильного скольжения мог смениться прерывистым, при этом максимальная скорость подвижек возрастала многократно и кривая смещения приобретала характерный вид «ступенек» (рис. 4).

В ходе экспериментов были зарегистрированы сейсмоакустические сигналы, характерные для различных мод высвобождения накопленной упругой энергии. Примеры сигналов, зарегистрированные расположенными на плите датчиками, представлены на рис. 5.

При стабильном скольжении излучение состоит из высокочастотных сигналов двух типов. Во-первых, это акустический шум со среднеквадратичной амплитудой 3–5 мкм/с, зарегистрированный датчиком акустической эмиссии. Во-вторых, это «отдельные» высокочастотные импульсы – короткие пакеты с резким вступлением, характерные для динамических событий, связанных с образованием дефектов или короткие импульсы с плавным вступлением, характерные для фреттинг износа. Амплитуда данных импульсов, как правило, варьируется в диапазоне от 50 до 200 мкм/с, причем сами импульсы отчетливо регистрируются только датчиком акустической эмиссии.

При медленных подвижках зарегистрированный высокочастотный сейсмоакустический сигнал имеет характерную форму с плавным возрастанием среднеквадратичной амплитуды примерно от 30 до 100 мкм/с и последующим плавным убыванием до фонового уровня ~10 мкм/с. При этом, низкочастотная часть, регистрируемая геофоном GS-20DX, излучается только при скоростях скольжения больше 0.5 мм/с.

Во время динамического срыва излучается высокочастотный сейсмоакустический сигнал продолжительностью 150 мс и среднеквадратичной амплитудой превышающей уровень шума в 30–50 раз. Низкочастотный сигнал, зарегистрированный геофоном GS-20DX, имеет вид импульса с выраженной частотной модуляцией «на хвосте» и характеризуется амплитудой, превышающей уровень шума в 1.5–2 раза.

Амплитудные спектры всех зарегистрированных сигналов характеризуются в высокочастотной области одним максимумом в полосе частот 9–11 кГц, что соответствует длинам волн в 20–30 см. В низкочастотной области спектры динамических подвижек характеризуются одним максимумом в частотной области 220–240 Гц.

Заключение

В статье приведены предварительные результаты натурных экспериментов, проведенных на обнажении Ангарского разлома в Прибайкалье. Результаты экспериментов подтвердили тот факт, что одним из ключевых параметров, определяющих режим деформирования разлома, является структура материала-заполнителя. При этом неоднородность состава заполнителя, приводящая к изменению структурных свойств локальных участков разлома, приводит к изменению способа реализации накопленной упругой энергии в процессе скольжения. Вероятнее всего, данные локальные участки играют роль «контактных пятен», которые в природе определяют закономерности концентрации напряжений в окрестности поверхности раздела [Кочарян, Спивак, 2003].

Характеристики сейсмоакустических сигналов, которые излучаются в процессе скольжения, существенно изменяются при различных режимах деформирования. Представленный метод физического моделирования позволяет однозначно установить связь между наблюдаемым сейсмоакустическим эффектом и изменением геомеханических параметров нарушения сплошности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00719).

Литература

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., 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. 2013а. С. 34–45.

Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ «Академкнига». 2003. 423 с.

Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature geosciences. 2010. 3. 599–607.

Sibson R.S. Thickness of the Seismic Slip Zone // BSSA. 2003. Vol. 93. № 3. P. 1169–1178.

Schaff D.P., Richards P.G. Repeating seismic events in China // Science. 2004. 303. 1176–1178.