

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕР СДВИГОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ

А.А. Остапчук, Г.Г. Кочарян, В.К. Марков, Д.В. Павлов

Экспериментально установлено, что механические свойства и структурные характеристики материалов-заполнителей трещин определяют характер фрикционного взаимодействия блоков горной породы. При незначительном изменении таких характеристик, как влажность, грансостав и форма зерен, стабильное скольжение может смениться динамической неустойчивостью. Показано, что определяющую роль играет именно структура заполнителя, а влияние таких механических характеристик, как сцепление и угол внутреннего трения, вторично.

Введение

Если в горном массиве сформировалось нарушение сплошности – трещина или разлом, – то в дальнейшем большая часть деформации локализуется в этой области, а процесс деформирования будет контролироваться фрикционным взаимодействием между бортами разрыва. По геологическим данным главная зона сместителя состоит, как правило, из нескольких тонких разрывов шириной менее 10 см. Разрыв, как правило, заполнен изношенным гранулированным материалом (gouge), который имеет более или менее угловатую форму [Sibson, 2003; Chester & Chester, 1998] и широкий грансостав [Кочарян и др., 2011]. Структура и свой-

ства материала заполнителя значительно влияют на механическую прочность, характер фрикционного взаимодействия и потенциал для возникновения динамической неустойчивости.

Одним из наиболее интригующих вопросов механики разломообразования и сейсмологии является вопрос о том, что определяет реализацию того или иного режима деформирования разломной зоны? Какие микро- и макро-характеристики разломов влияют на реализацию того или иного режима деформирования (динамический – «обычные» землетрясения, стабильное скольжение – крип, низкочастотные и медленные события) [Peng, Gomberg, 2010].

Численные расчеты и эксперименты с некоторыми материалами [Morgan, 1999] показали, что важную роль в формировании режима деформирования может играть структура заполнителя. В настоящей работе мы описываем некоторые результаты экспериментов, основное внимание в которых уделялось поиску факторов, определяющих формирование стабильного скольжения, стик-слипа или некоторого переходного режима.

Постановка экспериментов

Лабораторное исследование процесса прерывистого скольжения проводилось на установке, показанной на рис. 1. Гранитный блок 8×8 см с шероховатой нижней поверхностью (1) устанавливался на шероховатой гранитной подложке (2), контакт между которыми заполнялся различными зернистыми материалами. Толщина межблочного контакта составляла 2,5 мм.

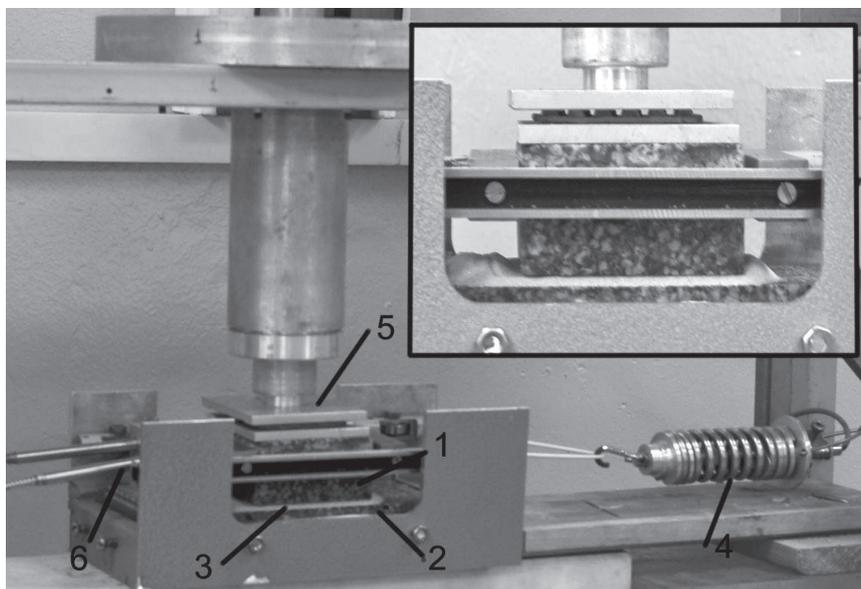


Рис. 1. Установка для исследования явления прерывистого скольжения.

1 – гранитный блок с шероховатой нижней поверхностью; 2 – шероховатая гранитная подложка; 3 – гранулированный заполнитель; 4 – пружина с датчиком силы; 5 – система подачи нормальной нагрузки; 6 – датчики смещения.

Анализ результатов геолого-геофизических обследований зон сейсмогенных разломов, проведенных в последние годы, позволяет предположить, что при землетрясении динамические деформации локализуются в чрезвычайно узкой области центральной части разломной зоны [Chester & Chester, 1998]. Материал в центральной части разломной зоны имеет тонкодисперсную структуру, широкое распределение частиц по размеру и, вероятно, достаточно высокую пористость [Jeppson et al., 2010]. Взаимодействие отдельных квазилинейных сегментов разломных зон происходит через зоны распределенных катакластических деформаций. При этом «длинноволновая» кривизна границ структурных блоков слабо сказывается на закономерностях динамического сдвига по разлому, в отличие от шероховатости контактирующих поверхностей [Кочарян и др., 2010]. В этой связи, используемая лабораторная модель, оказывается, по нашему мнению, пригодной для исследования особенностей динамики формирования межблоковых подвижек.

В ходе эксперимента гранитный блок нагружался постоянной нормальной нагрузкой, и максимальное давление, оказываемое на межблоковую границу, составляло примерно 1,5 атмосферы. Специальное устройство передачи нагрузки (5) позволяло избежать неконтролируемых касательных усилий. Спереди к гранитному блоку крепилась пружина с жесткостью $61,1 \pm 0,7$ Н/мм, которая деформировалась с постоянной скоростью. Создаваемые усилия контролировались датчиками силы. Перемещения блока относительно подложки измерялись датчиками LVDT с точностью 1 мкм и лазерными датчиками ILD2220-10. Последние позволяли измерять динамические перемещения в полосе частот 0–4 кГц с точностью 0,15 мкм.

В качестве заполнителя трещин использовались различные материалы – кварцевый песок Люберецкого карьера, стеклянные шарики, искусственные грунты. Для характеристики структуры заполнителя мы использовали постоянные из распределения Розина–Раммлера:

$$R(\delta) = \exp(-(\delta/\delta_0)^n) \quad (1)$$

где δ_0 и n – постоянные для данного материала средний размер зерна и ширина распределения.

Искусственные грунты создавались следующим образом. В качестве исходного материала была взята крошка, полученная дроблением гранита. С помощью набора сит крошку сепарировали на 7–9 фракций в диапазоне размеров от менее 0,05 до 1,6 мм. Образцы составляли путем тщательного перемешивания порошков, взятых в соответствующих весовых долях от каждой фракции. К тонким фракциям (<50 мкм) добавляли стандартные абразивные порошки (корунд и карбид кремния). При определении весовой доли последних учитывалась разница их плотности и плотности гранита. Средний размер зёрен искусственных грунтов составлял 337 мкм при вариации размеров отдельных зерен от 28 до 1600 мкм. Ширина распределения n варьировалась от 0,5 до 3,5.

На рис. 2 показаны фотографии некоторых заполнителей: рис. 2,а – искусственный грунт, рис. 2,б – песок, с диапазоном размеров зёрен 250–315 мкм, рис. 2, в – стеклянные шарики размером от 250 до 400 мкм.

Из приведенных фотографий можно видеть, что форма зёрен сильно отличается для различных материалов-заполнителей. Так искусственные грунты имеют зёрна угловатой формы с заострёнными краями, песок имеет существенно более округлые зерна, а стеклянные шарики имеют правильную круглую форму.

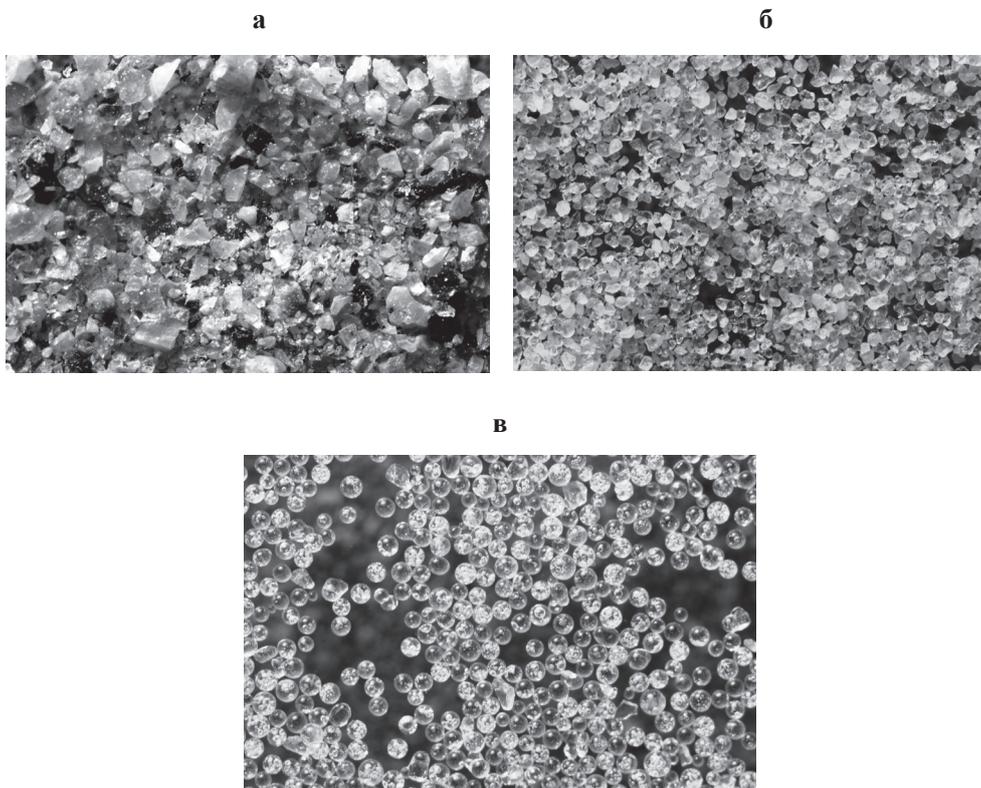


Рис. 2. Микрофотографии некоторых материалов-заполнителей.
 (а) – искусственный грунт с шириной распределения $n = 2$; (б) – кварцевый песок, с диапазоном размеров зёрен 200–315 мкм; (в) – стеклянные шарики размером от 250 до 400 мкм.

Прочностные характеристики материалов-заполнителей

Материалы характеризовались предельным законом сухого трения Кулона

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C_r \quad (2)$$

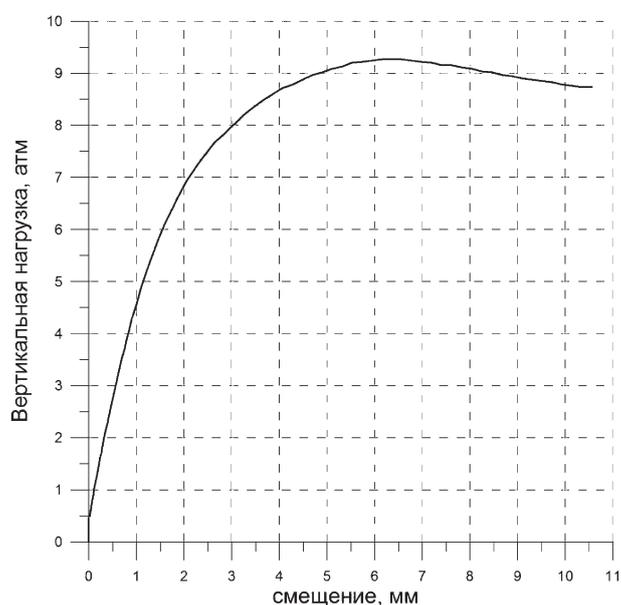
здесь τ – касательное, σ_n – нормальное напряжение на площадке сдвига, φ – угол внутреннего трения, C_r – сцепление.

Исследование прочностных характеристик материалов проводилось на установке трехосного сжатия ГТ 0.3.1. (ГЕОТЕК). Исследуемый образец имел диаметр 35 и высоту 85 мм. Прибор был снабжен датчиками силы и перемещения, которые измеряли сжимающее давление и деформацию образца.

На рис. 3 представлен типичный вид кривой нагружения. Видно, что разрушение образца произошло при смещении около 6 мм.

Исследования материалов проводились при различных значениях всестороннего гидростатического давления в диапазоне от 0,2 до 4,2 МПа. По результатам измерений строились огибающие кругов Мора и определялись параметры закона Кулона (2), которые приведены в Таблице.

Рис. 3. Кривая нагружения для искусственного грунта. $n = 1,5$ при постоянном всестороннем давлении 1,6 атм.



Эти же параметры оценивались по результатам измерений величин предельного и остаточного сопротивления сдвигу в опытах с нагружением тонкого слоя грунта на установке, показанной выше на рис. 1. Эти данные приведены в Таблице в скобках.

Таблица

**Прочностные параметры материалов,
полученные в экспериментах по трехосному сжатию**

Тип грунта	Сцепление C_r , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
Стеклянные шарики	0 (0–2)	32 (19)
Сухой Песок	2–10 (3–5)	37 (27)
Искусственный грунт, $n = 0,5$	25–30 (10–20)	43 (31)
Искусственный грунт, $n = 1,0$	1–100 (10–20)	44 (31)
Искусственный грунт, $n = 1,5$	20–100 (10–20)	46 (31)
Искусственный грунт, $n = 2,0$	10–100 (10–20)	44 (31)
Искусственный грунт, $n = 3,5$	10–100 (10–20)	44 (31)
Искусственный грунт, $n = 2,0$ с 20%-ным содержанием стеклянных шариков	– (10–20)	– (29)
Искусственный грунт, $n = 2,0$ с 30%-ным содержанием стеклянных шариков	– (5–20)	– (28)
Искусственный грунт, $n = 2,0$ с 50%-ным содержанием стеклянных шариков	– (5–20)	– (23)

Параметры уравнения Кулона для разных грунтов в значительной степени зависят от формы зёрен и ширины распределения. При этом при сдвиге по трещине значения углов внутреннего трения существенно меньше значений, полученных при трехосном нагружении. Это связано, вероятно, с возможностью вращения зёрен при сдвиге по трещине. При этом характер нагружения для разных грунтов может оказаться существенно разным при близких значениях сцепления и угла внутреннего трения (рисунки 4 и 5).

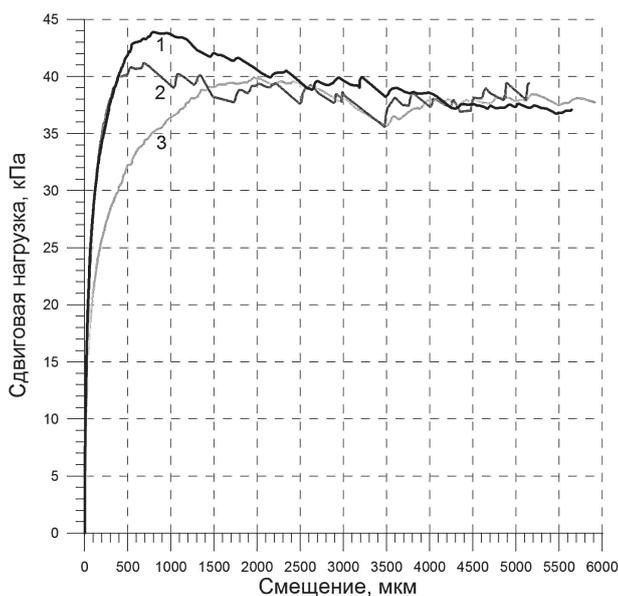


Рис. 4. Кривые нагружения для грунтов с разным грансоставом при нормальной нагрузке 61 кПа.

Кривая 1 – ширина распределения ($n = 2,0$), кривая 2 – ширина распределения ($n = 1,0$), кривая 3 – ширина распределения ($n = 0,5$).

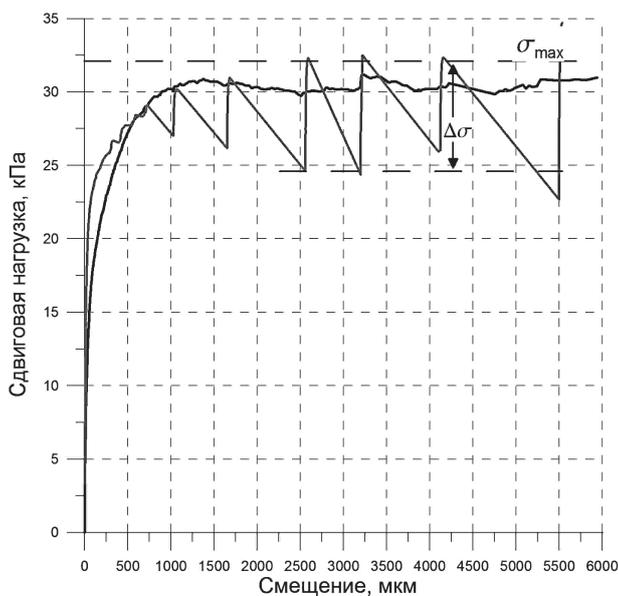


Рис. 5. Зависимость сдвиговой нагрузки от смещения для сухого песка – тёмная кривая и увлажненного глицерином (1%) песка – светлая кривая.

Нормальная нагрузка составляет 61 кПа.

Влияние характеристик материалов-заполнителей на режим деформирования

Результаты экспериментов показали, что структурные и механические характеристики материала, заполняющего трещину, оказывает радикальное влияние на режим деформирования.

На рис. 5 для примера показаны реологические кривые для сухого песка и песка, содержащего 1% глицерина. Можно видеть, что если для контакта, заполненного сухим песком, скольжение стабильно, то для слегка увлажненного песка реализуется режим прерывистого скольжения. При этом во время динамического срыва скорость движения блока достигает значений сотни мкм/с.

Добавление к сухому песку глицерина приводит к резкому изменению режима скольжения (рис. 6). При увеличении содержания глицерина от 0 до 0,2% происходит постепенное увеличение амплитуда изменения сдвиговой нагрузки ($\Delta\sigma$) до ~7% относительно максимального значения (σ_{\max}) сдвиговой прочности контакта. Дальнейшее увеличение доли глицерина приводит к резкому изменению амплитуды изменения сдвиговой нагрузки до ~25%, после чего добавление глицерина не вносит заметных изменений в характер деформирования.

Решающее влияние на закономерность формирования сопротивления сдвигу оказывает структура материала-заполнителя. В одной из серий опытов в искусственный грунт с шириной распределения $n = 2,0$ и средним размером зерна 340 мкм добавлялись стеклянные шарики того же размера. На рис. 7 представлена зависимость смещения блока от времени в зависимости от массовой доли стеклянных шариков в материале-заполнителе. Можно видеть, что по мере увеличения массовой доли округлых частиц движение эволюционирует от почти стабильного скольжения к прерывистому. При содержании стеклянных шариков 0% реализуется режим стабильного скольжения. Начальное увеличение массовой доли приводит к появлению отдельных циклов прерывистого скольжения с незначительным увеличением вариации сдвиговой нагрузки. Дальнейшее увеличение содержания

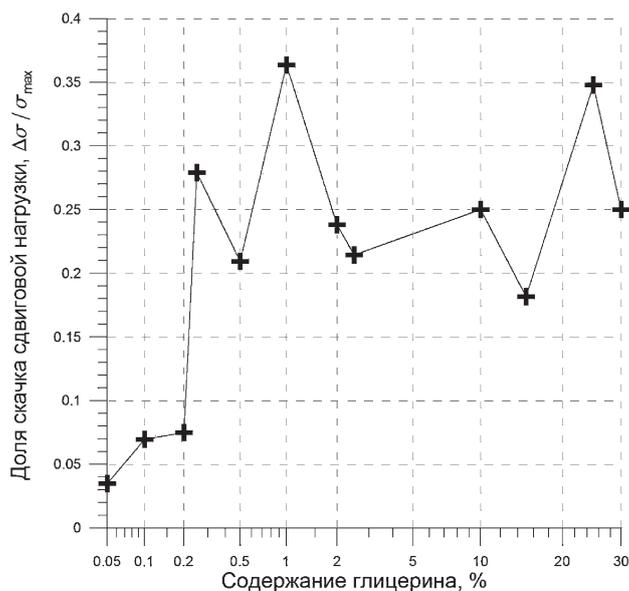


Рис. 6. Зависимость амплитуды скачка сдвиговой силы от содержания глицерина в песке.

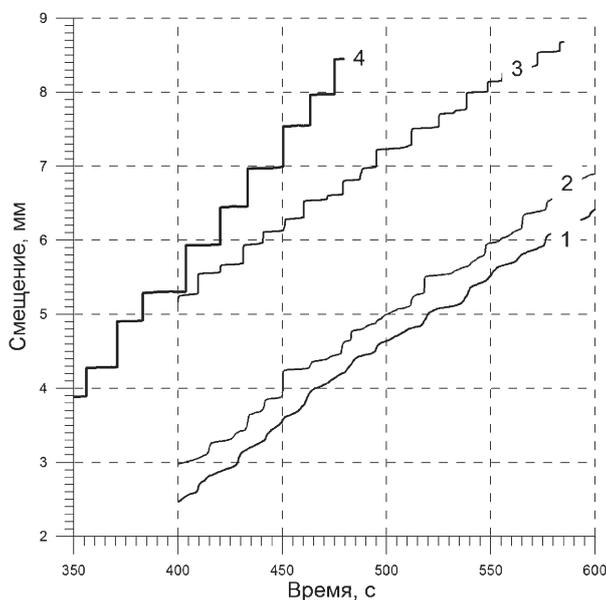


Рис. 7. Изменение характера движения блока при добавлении в искусственный грунт ($n = 2,0$ – материал-заполнитель) стеклянных шариков.

Кривая 1 соответствует искусственному грунту с массовым содержанием шариков 0%, кривая 2 – 20%, кривая 3 – 50%, кривая 4 – чистые стеклянные шары (100%).

стеклянных шариков приводит к увеличению числа циклов прерывистого скольжения и при массовой доле стеклянных шариков порядка 40% характер движения представляет собой режим прерывистого скольжения. Дальнейшее увеличение содержания шариков влияет только на амплитуду скачка сдвиговой нагрузки.

При деформировании грунтов, состоящих из «свежих», угловатых обломков гранита (рис. 2, а) наблюдается некий промежуточный характер деформирования. Вид кривых нагружения для этих грунтов показан на рис. 4. Амплитуды вариаций сопротивления сдвигу и скорости динамических подвижек значительно меньше, чем при выраженном стик-слипе, однако значительно выше, чем при стабильном скольжении (сравним рисунки 5 и 4).

Обсуждение и выводы

Выполненные опыты продемонстрировали, что на режим движения блока влияют как прочностные, так и структурные параметры материала заполнителя трещины. При незначительном изменении таких характеристик, как влажность, грансостав и форма зерен, стабильное скольжение может смениться динамической неустойчивостью. Важно подчеркнуть, что определяющую роль играет именно структура запол-

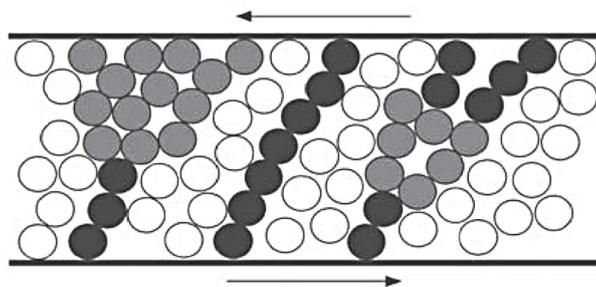


Рис. 8. Схема формирования силовых цепочек поперек слоя.

нителя. При близких прочностных параметрах поведение грунтов с разной структурой иногда радикально различается. Присутствие угловатых, «необработанных» частиц обеспечивает стабильное скольжение, в то время как гладкие частицы провоцируют эффект динамического срыва. Добавление небольшого количества вязкого флюида также провоцирует динамическую неустойчивость. Увеличение сцепления, которое характерно для увлажненного песка, практически не играет роли при тех значениях нормального давления, которые реализуются в экспериментах.

Скорее всего, возникновение динамических срывов связано с возможностью формирования расположенных поперек слоя силовых цепочек из нагруженных гладких частиц. Одновременный разрыв нескольких таких цепочек приводит к резкому снижению сопротивления сдвигу и возникновению динамической неустойчивости [Mair et al., 2002]. Наличие же угловатых частиц и увеличение ширины гранстова заполнителя затрудняет формирование таких структурных образований.

Аналогичный эффект имеет, по-видимому, и добавление глицерина. Оценки показывают, что одного процента глицерина достаточно, чтобы создать достаточно толстую молекулярную пленку на поверхности частиц и обеспечить лучшее контактное взаимодействие шероховатых частиц.

Таким образом, выполненные эксперименты показывают, что структура заполнителя магистральной части разломных зон имеет существенное значение при формировании динамической неустойчивости. Это означает, что инициирование землетрясений более вероятно на сформировавшихся участках разломной зоны, испытавших значительные перемещения в геологической истории.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 10-05-01064 и Программы № 6 ОНЗ).

Литература

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 419–440.

Кочарян Г.Г., Макров В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования малопрочных тонких слоев геоматериалов // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 6. С. 63–70.

Chester F.M., Chester J.S. Ultracataclasite structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California // Tectonophysics. 1998. V. 295. P. 199–221.

Jeppson T.N., K.K. Bradbury, J.P. Evans. Geophysical properties within the San Andreas Fault Zone at the San Andreas Fault Observatory at Depth and their relationships to rock properties and fault zone structure. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. B12423. doi:10.1029/2010JB007563.

Mair K., K.M. Frye, C. Marone. Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. B 10. P. 2219. doi:10.1029/2001JB000516.

Morgan J.K., M.S. Boettcher. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method 1. Shear zone kinematics and the micromechanics of localization // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. B 2. P. 2703–2719. doi:10.1029/1998JB900056.2719.

Peng Z., J. Gomberg. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // 2010. Nat. Geosci. V. 3. P. 599–607. doi:10.1038/ngeo940.

Sibson R. S. Thickness of seismic slip zone // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.