

Bommer J.J., Oates S.J., Cepeda M., Lindholm C., Bird J., Torres R., Marroquín G., Rivas J. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project // *Engineering Geology*, 2006. 83, 287–306.

Budkov, A. M., Kocharyan, G.G. Experimental Study of Different Modes of Block Sliding along Interface. Part 3. Numerical Modeling Physical Mesomechanics 2017. V. 20, № 2, p. 203–208. DOI: 10.1134/S1029959917020102.

Dieterich, J.H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive // *J. Geophys. Res.*, 1979, 84(B5), 2161–2168.

Ellsworth W., Llenos A., McGarr A., Michael A., Rubinstein J., Mueller C., Petersen M., Calais E. Increasing seismicity in the U.S. midcontinent: Implications for earthquake hazard // *The Leading Edge*, 2015, 34(6), 618–626, doi:10.1190/tle34060618.1.

Gu J.C., Rice J.R., Tse S.T. Slip motion and stability of a single degree of freedom elastic system with rate and state dependent friction // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1984, 32(3), 167–196.

Häring M.O., Schanz U., Ladner F. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal // *Geothermics*, 2008, Volume 37, Issue 5, 469–495.

Kato N., Tullis T.E. A composite rate-and state dependent law for rock friction // *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(6), 1103–1106.

Kocharyan G.G., Markov V.K., Ostapchuk A.A. et al. Mesomechanics of shear Resistance along a Filled Crack // *Phys Mesomech*, 2014, 17(2), 123–133.

McGarr A., D. Simpson, L. Seeber. Case histories of induced and triggered seismicity // W.H.K. Lee and H. Kanamori, eds., *International handbook of earthquake and engineering seismology*: Academic Press, 2002, 81A, 647–660.

Rice J.R., Ruina A.L. Stability of steady frictional slipping // *J. Appl. Mech.*, 1983, 50(2), 343–439.

Ruina A. Slip instability and state variable friction laws // *J. Geophys. Res.*, 1983, 88 (B12), 10359–10370.

Sergey B Turuntaev, Vasily Y Riga. Non-linear effects of pore pressure increase on seismic event generation in a multi-degree-of-freedom rate-and-state model of tectonic fault sliding. // *Nonlin. Processes Geophys.*, 2017, 24, 215–225, doi:10.5194/npg-24-215-2017.

УДК 550.34.016.

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТРЕЩИНЫ НА ИНИЦИАЦИЮ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗРЫВА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

И.В. Батухтин, Д.В. Павлов, В.К. Марков, А.В. Варыпаев

ИДГ РАН

В серии лабораторных экспериментов с упругим блоком исследовалось влияние пространственной неоднородности заполнителя модельной трещины на про-

цесс зарождения разрыва при сдвиговом деформировании. Неоднородность заполнителя достигалась использованием двух компонент — сухого крахмала и глины, где первый обеспечивал регулярное прерывистое скольжение (стик-слип), а второй — непрерывное скольжение (крип). Показано, что зарождение разрыва локализовалось в области, соответствующей стик-слипу. Смещение этой области по площади контакта приводило к соответствующему смещению точки зарождения разрыва.

Введение

Процесс образования разрыва в очаге землетрясения остается в центре внимания исследований, посвященных физике и механике землетрясений. Широко распространенным инструментом в подобных исследованиях является лабораторное моделирование.

С признанием прерывистого скольжения (стик-слип) хорошим аналогом механизма большинства землетрясений, происходящих в земной коре [Brace and Byerlee, 1966], процессы в очаге стали с успехом моделироваться смещением блоков из того или иного материала друг относительно друга, причем граница раздела играла роль сейсмогенного разлома. В последние десятилетия ряд деформационных событий, которые могут происходить на границах раздела между блоками земной коры (кроме известных уже давно землетрясений и асейсмического крипа), пополнился «медленными» событиями, такими как «медленное землетрясение» [Kanamori and Hauksson, 1992], «низкочастотное событие», «сверхнизкочастотное событие», «событие медленного скольжения», [Peng and Gombert, 2010; Кочарян и др., 2014]. Все эти явления теперь регистрируются инструментально. Это дало новый импульс и лабораторному моделированию. Приведем несколько примеров. Так, в [Rubinstein et al., 2004] процесс образования разрыва моделировался на плексигласовых блоках (площадь контакта, имитирующего разлом, $150 \cdot 6 \text{ мм}^2$). Прозрачный материал дал возможность с помощью оптической регистрации зафиксировать четыре волновых фронта, сопровождающих образование разрыва, причем два из них, «медленные», соответствовали собственно разрыву и началу относительного движения блоков.

Эксперименты на блоках из такого же материала (плексиглас, площадь контакта $400 \cdot 80 \text{ мм}^2$) были использованы [Selvadurai and Glaser, 2015] для построения численной модели, имитирующей процесс образования разрыва на границе раздела блоков, основанной на взаимодействии «шероховатостей» (asperities). В другой серии экспериментов этими же авторами было симитировано реальное событие медленного скольжения, произошедшее в Японии (2013–2014 гг.) [Selvadurai et al., 2017].

Для моделирования процессов образования разрыва применяются и природные скальные материалы. Например, [Yamashita et al., 2018] использовали блоки метагаббро (площадь контакта $1500 \cdot 100 \text{ мм}^2$) для исследования влияния шероховатости блоков на процесс подготовки разрыва, который соответствовал медленному проскальзыванию перед событием стик-слипа. Шероховатость интерфейса увеличивалась с ростом числа проведенных экспериментов (числа сдвигов блоков друг по другу). Увеличение шероховатости привело к смещению точки инициации медленного сдвига от одного из краёв модели к её центру.

Гранитные блоки ($762 \cdot 203 \text{ мм}^2$) использовались [McLaskey and Yamashita, 2017] для демонстрации того, как прерывистое скольжение может меняться на медленное «тихое» скольжение без излучения сейсмических сигналов в результате изменения условий нагружения, а не фрикционных свойств или жесткости нагружающего устройства. Медленные события происходили, когда разрыв не успевал полностью

сформироваться, не достигнув краев модели. Динамические события происходили после длительных периодов «залечивания» межблокового контакта или внезапного увеличения скорости нагружения.

Отметим, что все упомянутые здесь эксперименты проводились на контактах блоков из одинакового материала без заполнителя. Параметры трения задавались шероховатостью контактирующих поверхностей. Однако и в такой постановке, как уже было сказано выше, изменение шероховатости интерфейса во время экспериментов привело к перераспределению начальных напряжений и смещению точки инициации разрыва [Yamashita et al., 2018]. Вероятно, пространственная неоднородность структуры контакта играет существенную роль в процессе образования разрыва.

Было бы интересно посмотреть за эволюцией процесса инициации разрыва, меняя именно структуру контакта. Представляется, что проще всего это можно сделать на модели трещины с заполнителем — действительно, поменять заполнитель трещины легче, чем, например, изменить шероховатость её берегов. Принципиальная возможность управления режимом деформации трещины с заполнителем уже была продемонстрирована экспериментально [Батухтин и др., 2015], и, в частности, для трещин с пространственно неоднородным заполнителем [Мартынов и др., 2016].

Цель настоящей работы – проанализировать, как пространственная неоднородность заполнителя влияет на процесс образования разрыва модельной трещины при сдвиговом деформировании.

Описание экспериментальной установки

Для исследования процесса образования разрыва модельной трещины при сдвиговом деформировании была создана новая экспериментальная установка. Эксперименты проводились по следующей схеме: по нижнему неподвижному резиновому блоку 2 размером 200·100·50 мм движется подвижная дюралевая плита 4 (рис. 1). Нижний блок является упруго деформируемым ($C_p = 1300$ м/с,

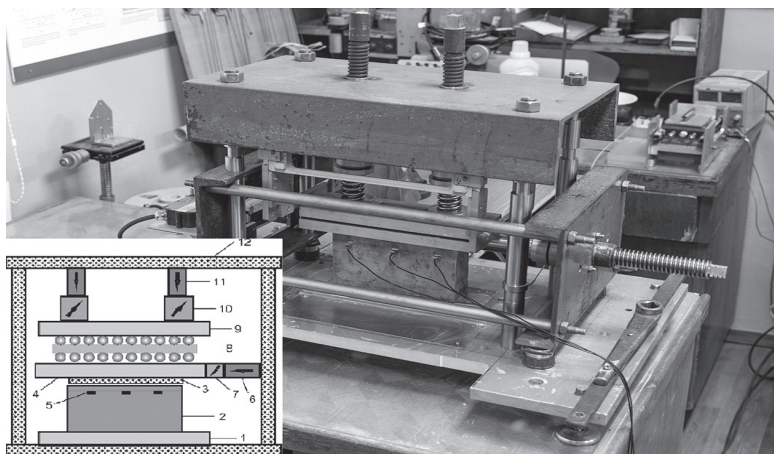


Рис. 1. Экспериментальная установка. На врезке её схема: 1 – нижняя опорная пластина, 2 – резиновый блок, 3 – межблоковая прослойка, 4 – подвижная опорная пластина, 5 – акселерометр, 6 – элемент сдвигового нагружения, 7 – измерительные датчики сдвиговой нагрузки, 8 – обойма с роликами, 9 – верхняя опорная пластина, 10 – измерительные датчики нормальной нагрузки, 11 – элементы нормальной нагружения, 12 – корпус установки

$C_s = 1000$ м/с, $\rho = 1500$ кг/м³). Сдвиговое усилие передаётся вращением вручную винта 6 и регистрируется датчиком силы 7 CFT/5kN. Нормальная нагрузка на неподвижную плиту 9 регулируется винтами 11 через пружины 10. Величина нагрузки – 1600 Н. Для исключения дополнительной сдвиговой нагрузки от устройства нормального нагружения между плитами 4 и 9 расположена обойма с роликами 8. На резиновый блок нанесена искусственная шероховатость – борозды глубиной 3 мм. Площадь контактной поверхности 200·50 мм².

Для регистрации волн, излучаемых в резиновый блок при образовании разрыва, к одной из его боковых сторон с шагом 5 см были прикреплены три акселерометра 5 Brüel&Kjær 4344. Перемещение верхней плиты 4 и деформация резинового блока 2 регистрировались лазерными датчиками перемещения ILD2220-10 в частотном диапазоне 0–5 кГц.

Методика проведения экспериментов

Для проведения экспериментов были подобраны два принципиально различных заполнителя, один из которых обеспечивал стабильное скольжение (крип), а второй – прерывистое скольжение (стик-слип). Чтобы исключить инициацию разрыва, связанную с разными прочностными свойствами компонент заполнителя, важно, чтобы оба материала имели одинаковый предел прочности. Выбор пал на глину как заполнитель, обеспечивающий стабильное скольжение, и крахмал как заполнитель, обеспечивающий прерывистое скольжение. Предел прочности для обоих материалов составляет 2100 Н при нормальной нагрузке 1600 Н. Контакт между резиновым блоком и подвижной плитой заполнялся этими двумя компонентами в различных комбинациях.

Была поставлена задача исследовать сдвиговое деформирование контакта, изменяя распределение материалов-заполнителей по его площади.

В начале серии были проведены эксперименты с контактом, заполненным крахмалом и глиной по отдельности. Затем слой заполнялся крахмалом и глиной по следующим схемам: в первом опыте были выделены две равные по длине зоны для каждого заполнителя (рис. 2, а); со второго по четвёртый опыты зона с крахмалом

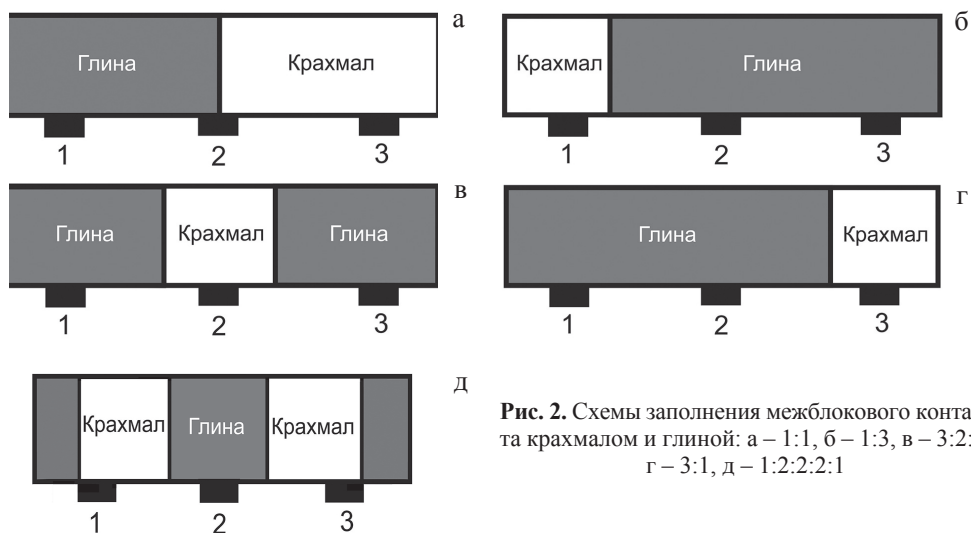


Рис. 2. Схемы заполнения межблокового контакта крахмалом и глиной: а – 1:1, б – 1:3, в – 3:2:3, г – 3:1, д – 1:2:2:1

была уменьшена до 25% и располагалась последовательно у каждого из трёх акселерометров (рис. 2, б-г). В пятом эксперименте зона с крахмалом была разделена на две по 25% от общей длины слоя, остальная область контакта заполнялась глиной (рис. 2, д), далее – многозональное заполнение. В заключение был выполнен эксперимент с контактом, заполненным равномерно перемешанной смесью глины и крахмала.

Результаты экспериментов

Каждый эксперимент проводился следующим образом. После приложения сдвиговой нагрузки контакт начинал деформироваться и по достижению предельной прочности выходил на «запредельную» ветвь. На этой ветви затем для всех экспериментов, указанных выше, выбирались участки одинаковой длины, на которых реализовывался либо регулярный стик-слип, либо равномерный крип, либо режим деформирования с «медленными» событиями. Основные усреднённые характеристики срывов, наблюдаемых на этих участках «запредельной» ветви сдвигового деформирования контакта, приведены на рис. 3: длительность срыва Δt , относительное смещение резинового блока Δu , максимальная скорость относительного смещения резинового блока V_m , величина сброса силы ΔF . Кружочки отмечены значения величин, полученных в опытах при зональном заполнении с единственной зоной, заполненной крахмалом. Содержание 50% глины соответствует схеме заполнения на рис. 2, а. Содержание 75% глины — на рис. 2, в.

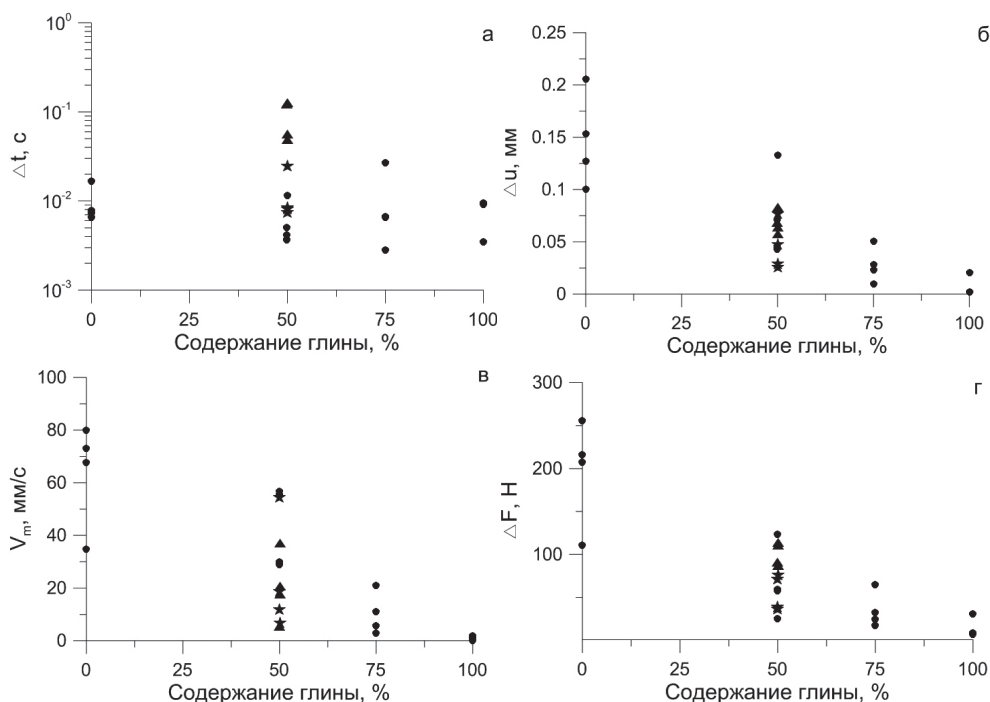


Рис. 3. Графики зависимости параметров срывов от содержания глины в слое: а – длительность события Δt , б – относительное смещение резинового блока Δu , в – максимальная скорость смещения V_m , г – сброс силы ΔF . Кружочки – зональное заполнение с единственной зоной из крахмала; треугольники – равномерная смесь; звездочки – многозональное заполнение

При заполнении крахмала и глины в соотношении 1:1 (рис. 2, а) наблюдается снижение сброса силы и относительного смещения резинового блока примерно в 2 раза. При этом максимальная скорость и длительность относительного смещения блока практически не изменяются. Но стоит разделить участок, заполненный крахмалом, участком, заполненным глиной (рис. 2, д), и уже наблюдается резкое снижение практически всех параметров наблюдаемых срывов; кроме длительности, которая увеличивается. Увеличение содержания глины до 75% (рис. 2, в) уменьшает значения параметров срывов в среднем на 30%. Заполнение слоя смесью крахмала и глины на порядок увеличивает длительность срывов. Остальные параметры срывов не изменяются по сравнению с зональным заполнением в той же пропорции между двумя материалами-заполнителями. Опыты с контактом, заполненным глиной, демонстрируют преимущественно крип с медленными событиями. Однако в этих опытах можно было периодически наблюдать временные интервалы с короткими срывами, имеющими низкие сброс силы и относительное смещение.

Для определения момента вступления фронта разрыва в работу применяется алгоритм, математической основой которого является модель разладки гауссовского процесса авторегрессии (АР-процесса) [Percival and Walden, 1993]:

$$x_t = \begin{cases} \xi_t, & 1 \leq t \leq \tau \\ \xi_t + y_t, & \tau < t \leq N \end{cases} \quad (1)$$

где $x_N = (x_t, t \in \overline{1, N})$ – участок регистрируемых наблюдений на одном из датчиков. Как видно из модели (1), в отсутствие полезного сигнала наши наблюдения представлены помехой ξ_t , создаваемой внешними источниками. Начиная с некоторого момента τ , на фоне помехи ξ_t наблюдается процесс y_t (полезный сигнал), генерируемый срывом. В предположении, что ξ_t и $\xi_t + y_t$ являются АР-процессами p с

параметрами $(\phi_1^j, \phi_2^j, \dots, \phi_p^j, \sigma_j^2)$, $j = \overline{1, 2}$, можно построить оценку максимального правдоподобия для момента разладки τ :

$$\tau = \arg \max \left(-\frac{\tau}{2} \ln \hat{\sigma}_1^2(\tau) - \frac{N-\tau}{2} \ln \hat{\sigma}_2^2(\tau) \right), \quad (2)$$

где $\hat{\sigma}_1^2(\tau)$ и $\hat{\sigma}_2^2(\tau)$ — оценки параметров σ_1^2 и σ_2^2 , которые являются дисперсиями так называемых порождающих шумов для АР-процессов ξ_t и $\xi_t + y_t$. Вычисление оценок и производится одновременно с вычислением оценок коэффициентов АР-модели согласно следующим формулам:

$$\hat{\sigma}_j^2(\tau) = \hat{C}_0^j(\tau) - \sum_{i=1}^p \hat{\phi}_i^j \hat{C}_i^j(\tau), \quad \hat{C}_u^1(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau-u} x_t x_{t+u}, \quad \hat{C}_u^2(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{t=\tau+1}^{N-u} x_t x_{t+u} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^p \hat{\phi}_l^j \hat{C}_{k-l}^j(\tau) = \hat{C}_l^j(\tau), \quad l \in \overline{1, p} \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой известную систему из уравнений Юла-Уокера

[Yule, 1927; Walker, 1931] для оценок коэффициентов $(\phi_1^j, \phi_2^j, \dots, \phi_p^j)$ АР-процессов. Подробный вывод оценки момента разладки (2), а также формул (3) и (4) можно

найти в [Kushnir, 2012]. Порядок АР-процесса в данной задаче также является неизвестным параметром, который оценивается по наблюдениям с помощью информационного критерия Акаике [Akaike, 1974]. В настоящей работе было использовано значение $p = 5$. Таким образом, оценка момента вступления полезного сигнала может быть найдена с помощью выражения (2).

Благодаря вышеописанному методу, удалось с высокой точностью определить время прихода фронта разрыва, распространяющегося по контакту. Оказалось, что в подавляющем большинстве случаев датчик, располагающийся около зоны контакта, заполненной крахмалом, регистрирует начало распространения разрыва первым (рис. 4). Всего было отобрано по 10 срывов для каждой схемы заполнения по достижении контакта предела прочности. Оказалось, что при перемещении зоны, заполненной крахмалом, по площади контакта точка инициации разрыва также перемещается за ней. В случае контакта, заполненного равномерно перемешанной смесью, точка инициации определяется особенностями начального распределения напряжений на экспериментальной установке.

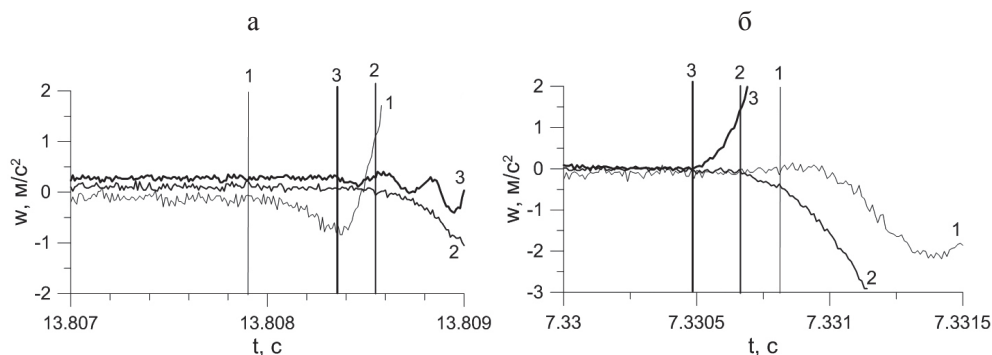


Рис. 4. Примеры акселерограмм для двух схем зонального заполнения глиной и крахмалом меж-блокового контакта: а – 1:3, б – 3:1. Вертикальными линиями показаны моменты вступления акселерометров. Цифры соответствуют их порядковым номерам

Заключение

Вновь созданная экспериментальная установка дала возможность исследовать влияние структуры модельной трещины на особенности образования разрыва при её сдвиговом деформировании. Деформируемый блок из вакуумной резины с относительно низкими значениями скорости распространения продольных и поперечных волн позволил ограничиться сравнительно небольшим масштабом экспериментальной установки. Использование заполнителя трещины, составленного из двух принципиально разных, с точки зрения деформационных свойств, компонент (крахмал обеспечивал стик-слип, глина — крип) упростило процесс смены структуры контакта. Меняя взаимное расположение областей, заполненных разными компонентами, по площади контакта, удалось показать, что инициация разрыва происходит в области, соответствующей стик-слипу (крахмал). При перемещении этой области по площади контакта соответственно перемещалась и точка инициации разрыва.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00694).

Литература

Батухтин И.В., А.А. Остапчук, Д.В. Павлов Управление режимом деформирования трещины в лабораторном эксперименте // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН, Вып. 7. М. : ГЕОС. 2015. С. 15–22

Кочарян Г.Г., Кушкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. (2014) Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. Т. 5. № 4. С. 863–891.

Мартынов В.С., Остапчук А.А. Влияние пространственной гетерогенности свойств межблокового контакта на режим его деформирования // Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. Вып. 8. М. : ГЕОС. 2016. С. 21–28.

Akaike H. (1974). A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, 19 (6): 716–723.

Brace W.F. and J.D. Byerlee (1966) Stick-slip as a mechanism for earthquakes // Science. Vol. 153. No. 3739. P. 990–992.

Kanamori H. and Hauksson E. (1992) A slow earthquake in the Santa Maria Basin, California // BSSA. Vol. 82. No. 5. P. 2087–2096.

Kushnir A. (2012). Statistical and computational methods of seismic monitoring. URSS, Moscow. Chapter 8.

Mcliskey G.C. and Yamashita F. (2017) Slow and fast ruptures on a laboratory fault controlled by loading characteristics // J. Geophys. Res. Solid Earth. Vol.122. P. 3719–3738. DOI: 10.1002/2016JB013681.

Peng Z. and Gomberd J. (2010) An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geoscience. Vol. 3 (9). P. 599–607.

Percival D., Walden A. (1993). Spectral Analysis for Physical Applications. Cambridge University Press.

Rubinstein S.M., Cohen G. and Fineberg J. (2004) Detachment fronts and the onset of dynamic friction // Nature. Vol.430. P. 1005–1009.

Selvadurai P.A. and Glaser S.D. (2015) Laboratory-developed contact models controlling instability on frictional faults // J. Geophys. Res. Solid Earth. Vol. 120. P. 4208–4236. DOI:10.1002/2014JB011690.

Selvadurai P.A., Glaser S.D. and Parker J.M. (2017) On factors controlling precursor slip fronts in the laboratory and their relation to slow slip events in nature // Geophys. Res. Lett. Vol. 44. DOI:10.1002/2017GL072538.

Walker G. (1931). On Periodicity in Series of Related Terms, Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A, Vol. 131, 518–532.

Yamashita F., Fukuyama E., Xu Sh., Mizoguchi K., Kawakata H. and Takizawa Sh. (2018) Rupture preparation process controlled by surface roughness on meter-scale laboratory fault // Tectonophysics. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.01.034.

Yule U. (1927). On a Method of Investigating Periodicities in Disturbed Series, with Special Reference to Wolfer's Sunspot Numbers, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. A, Vol. 226, P. 267–298.