

05

## Влияние вибрационного воздействия на статистику „землетрясений“ в лабораторной модели

© В.Л. Попов, Я. Старчевич

Берлинский технический университет, Германия

Поступило в Редакцию 1 февраля 2006 г.

Известно, что землетрясения представляют собой результат динамической неустойчивости типа „stick-slip“ в системе разломов земной коры, при которой упругая энергия, накопленная при длительном плавном движении фрагментов, быстро релаксирует при достижении напряжениями критического значения. Экспериментально исследована статистика динамических неустойчивостей в модельной трибологической системе, проявляющей аналогичное поведение. Функция распределения величины ускорения, возникающего при проскальзывании образца, моделирующего один из фрагментов земной коры, охватывает несколько порядков величины, как это имеет место и в случае статистики реальных землетрясений (закон Гутенберга–Рихтера). Исследована возможность изменения статистики „землетрясений“ путем вибрационного воздействия на систему таким образом, чтобы вероятность скачков большой силы существенно уменьшилась за счет слабых скачков. Тем самым динамика системы переводилась бы в режим ползучести. Показано, что в большинстве исследованных трибологических пар статистика „землетрясений“ действительно изменяется под действием вибраций желаемым образом.

PACS: 91.30.-f; 91.30.Bi.

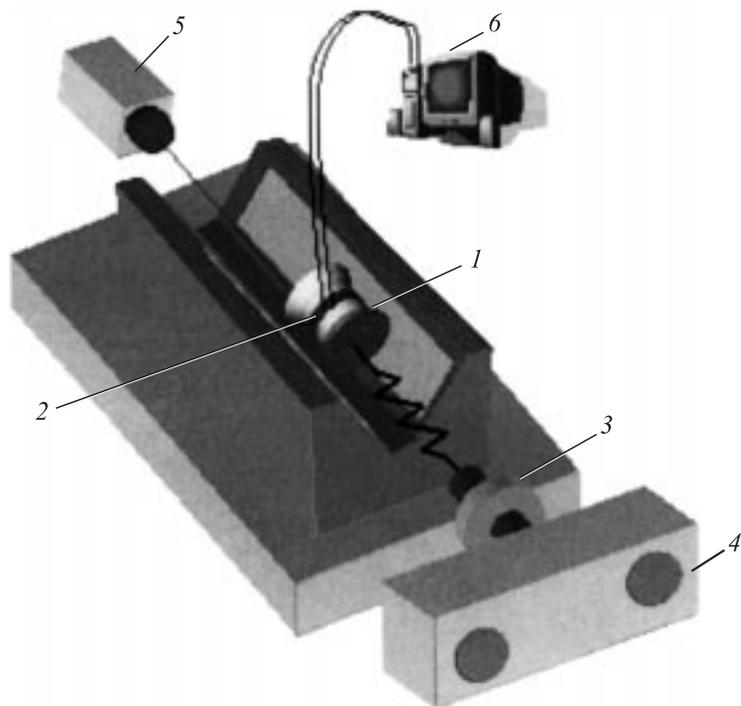
**1. Введение.** Общеизвестно, что причиной землетрясений является динамическая неустойчивость (stick-slip) тектонических плит [1–3]. В результате стесненного движения фрагментов земной коры в области их контакта возникают высокие механические напряжения, которые при достижении критического уровня скачкообразно релаксируют, приводя к колебаниям тектонических плит (землетрясениям). Развитие методов предсказания землетрясений и оказания воздействия на их протекание является одной из важнейших общечеловеческих проблем.

Одной из основных трудностей, возникающих при исследовании динамики и разработке способов предсказания и предпочтения земле-

трясений, является сложность проведения экспериментов по направленному влиянию на динамику земной коры. Вместе с тем имеется ряд физических систем, проявляющих аналогичное поведение. Физический феномен, лежащий в основе землетрясений, широко распространен не только в динамике земной коры, но и в разнообразнейших трибологических системах и при деформации твердых тел [4–6]. Stick-slip, или „скачкообразное скольжение“, является хорошо известным в трибологии явлением: в технических системах он приводит к колебаниям механизмов, которые зачастую связаны с возникновением шума или повреждениями. Представляется естественным использовать названную аналогию с целью исследования динамики и статистики „землетрясений“, а также возможностей искусственного воздействия на них в упрощенных лабораторных моделях.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности изменения статистики „землетрясений“ путем вибрационного воздействия на систему таким образом, чтобы вероятность скачков большой силы существенно уменьшилась за счет слабых скачков. Принципиальная возможность такого влияния исследовалась ранее теоретически [4] и экспериментально на примере деформации блочных сред под воздействием вибраций — систем, динамика которых очень близка к системам с трением. В [4] было показано, что высокочастотные вибрационные воздействия с частотами, значительно превосходящими собственные частоты системы, могут значительно повышать деформационную способность материалов с большой долей границ раздела. В [5] было экспериментально выявлено иницирующее воздействие слабых низкочастотных вибраций на процесс упругого энерговыделения в нагруженных геоматериалах. В настоящей работе мы экспериментально исследовали простейшую модель, состоящую из стального образца, скользящего по твердой пластине из такого же или другого материала. Система проявляет ярко выраженное скачкообразное движение, аналогичное „землетрясениям“. Мы предприняли попытку количественно охарактеризовать физическую аналогию между процессом неустойчивого скольжения и землетрясениями и использовать ее для исследования вопроса о возможности искусственного воздействия на систему с целью предотвращения сильных землетрясений.

**2. Экспериментальная установка и результаты.** Основным элементом экспериментальной установки являлся образец, контактирующий на концах с опорной пластиной (рис. 1). Образец и пластина моделируют контакт между тектоническими плитами или фрагментами



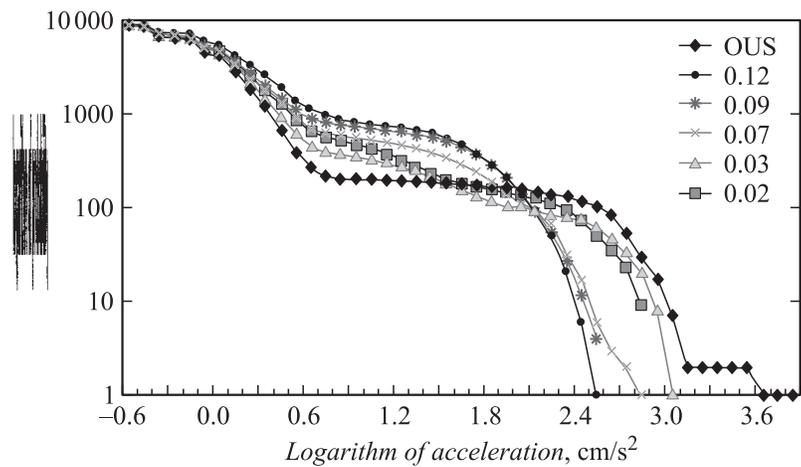
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — образец; 2 — пьезоэлементы; 3 — силовой сенсор; 4 — ползунок, соединенный с шаговым двигателем; 5 — лазерный виброметр; 6 — измерительная система.

разлома. Образец перемещался вдоль опорной пластины с помощью мягкой пружины, моделирующей упругость тектонической плиты. Вторым концом пружины был соединен с шаговым мотором; индуцируемое им движение моделирует магматические течения, приводящие к относительному движению фрагментов земной коры. В случае достаточно мягкой пружины движение образца всегда имело ярко выраженный неустойчивый характер и представляло собой чередующиеся периоды покоя или медленной ползучести и быстрых скачков („землетрясений“). Как периоды накопления упругих напряжений, так и длительность и величина скачков были случайными величинами, так что можно

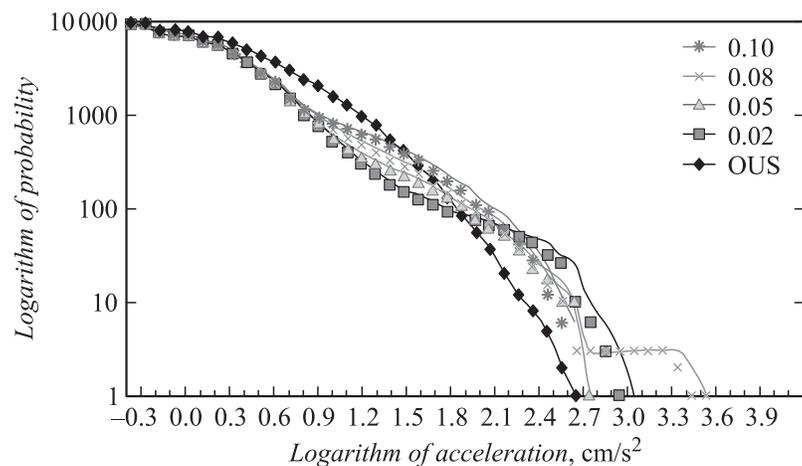
было говорить о статистике скачков. Величиной, наилучшим образом характеризующей силу землетрясения, является ускорение континентальной плиты, поскольку силы инерции, приводящие к разрушениям, пропорциональны ускорению. По этой причине мы и в лабораторной модели определяли статистику ускорений образца. Ускорения вычислялись на основании данных о скорости, измеряемой лазерным виброметром, работающим на основе эффекта Доплера; частота считывания информации была равна 1 МГц. По скорости вычислялось ускорение образца и строилась статистика ускорений. С точки зрения описанной выше аналогии наибольший интерес представляло не среднее значение ускорения, а вероятность и величина его пиковых значений.

Для исследования возможности искусственного воздействия на статистику „землетрясений“ путем вибрационного воздействия, в середине образца были встроены пьезоэлементы, позволяющие изменять его длину путем приложения переменного напряжения с частотой 60–70 кГц. Точное значение частоты соответствовало собственной частоте образца; это позволяло достигать амплитуд колебаний порядка 1  $\mu$ . Используемый контроллер автоматически подстраивал частоту к резонансной. Отдельный эксперимент состоял в протягивании образца на расстояние порядка 10 см и измерении его ускорения как функции времени, на основе которой строилась статистика ускорений. Как это принято в сейсмологии, использовалась „кумулятивная статистика“, т.е. находилась вероятность движения с ускорением большим данного. В случае реальных землетрясений такая статистика удовлетворяет закону Гутенберга–Рихтера [7].

Типичные распределения ускорений при движении образца без осцилляций (кривые, помеченные буквами OUS) и при различных амплитудах колебаний показаны на рис. 2, на котором представлены результаты для трибологической пары „сталь–высокомарганцевая сталь“. Аналогичные результаты имеют место для пар сталь–медь, сталь–титан, сталь–алюминий и др. Области быстрого изменения вероятности соответствуют областям высокой плотности вероятности обнаружить событие с заданной величиной ускорения. В отсутствие осцилляций наибольшая плотность вероятности соответствует ускорениям, лежащим в интервалах 1–4  $\text{cm/s}^2$  и 50–2000  $\text{cm/s}^2$ . Первый из этих интервалов соответствует медленной „ползучести“, почти не регистрируемой глазом, но легко регистрируемой лазерным виброметром. Вторая область соответствует наблюдаемому невооруженным глазом быстрому, скачкообразному движению.



**Рис. 2.** Функции распределения ускорений (вероятность обнаружить ускорение больше заданного) в системе „сталь–высокомарганцевая сталь“ в двойном логарифмическом масштабе (по оси абсцисс  $\log a[\text{cm/s}^2]$ , по оси ординат десятичный логарифм вероятности (в а.е.) обнаружить ускорение больше заданного). Различные кривые соответствуют различной амплитуде колебаний образца; кривые, соответствующие отсутствию осцилляций, помечены OUS.



**Рис. 3.** То же, что и на рис. 2, для системы „сталь–стекло“.

Включение ультразвука существенно изменяет статистику ускорений. Основной эффект состоит в резком уменьшении вероятности больших ускорений („больших землетрясений“). Из результатов, представленных на рис. 2, видно, что вибрационным воздействием с амплитудой  $0.12\mu$  удастся уменьшить максимально регистрируемые в эксперименте ускорения в 10 раз! При наблюдении невооруженным глазом это изменение проявляется в практически полном исчезновении „заметных“ скачков; образец начинает двигаться плавно.

Описанный эффект исчезновения скачкообразного скольжения путем вибрационного воздействия наблюдается во всех случаях, когда обоими трибологическими партнерами являются металлы. При контакте „сталь–стекло“ наблюдается обратный эффект; плавное движение, наблюдающееся без вибраций, становится скачкообразным при включении ультразвука. В статистике ускорений это проявляется в увеличении на порядок максимальных наблюдаемых ускорений (рис. 3). Отметим, что в случае контакта „сталь–стекло“ статистика „силы землетрясений“ без вибрационного воздействия более близка к степенной зависимости, даваемой законом „Гутенберга–Рихтера“.

**Заключение.** В настоящей работе мы исследовали статистику „землетрясений“ в простой лабораторной модели. Феномен скачкообразного скольжения широко распространен в технических системах и хорошо известен. Однако статистические свойства скачкообразного скольжения, существенные при взгляде на данную систему как модель землетрясений, приведены нами впервые. Найдено, что при контакте пластичных материалов (два металла) распределение силы „встряхиваний“ (характеризуемых величиной ускорения) имеет два максимума, что отличается от лишнего внутреннего масштаба распределения, даваемого законом Гутенберга–Рихтера для естественных землетрясений. При контакте с хрупким материалом наблюдается степенное распределение ускорений, типичное для землетрясений. Изучено влияние вибраций на статистику ускорений. В случае вязких систем удастся перевести систему из режима скачкообразного скольжения в режим равномерной ползучести. В случае контакта с хрупким партнером, наоборот, вибрационное воздействие приводит к интенсификации скачкообразного движения. Таким образом, нами продемонстрирована принципиальная возможность оказания существенного влияния на статистику силы „толчков“ путем сравнительно низкоэнергетического вибрационного воздействия на систему. Результат, однако, может оказаться как желательным

(уменьшение вероятности сильных толчков), так и нежелательным (усиление неустойчивости). Детальный механизм перевода неустойчивого, скачкообразного скольжения в режим стационарной ползучести пока что остается невыясненным. Для возможности практического управления сейсмической активностью требуется дальнейшее развитие предложенного экспериментального подхода, построение более сложных и реалистичных экспериментальных моделей, исследование построения теоретических моделей, позволяющих описать наблюдаемую статистику, а также проведение сравнительных натурных экспериментов для „калибровки“ лабораторных моделей.

Авторы благодарны Deutsche Forschungsgemeinschaft за финансовую поддержку.

## Список литературы

- [1] Scholz C.H. // Nature. 1998. V. 391. P. 37–42.
- [2] Erismann T.N., Abele G. Dynamics of rockslides and rockfalls. Berlin: Springer, 2001.
- [3] Persson B.N.J. Sliding Friction. Heidelberg: Springer, 1998. P. 387.
- [4] Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 30. В. 6. С. 45–51.
- [5] Куксенко В.С., Манжиров Б.Ц., Тилегенов К. и др. // ФТТ. 2003. Т. 45. В. 12. С. 2182–2186.
- [6] Завьялов А.Д. // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 6. С. 1000–1008.
- [7] Gutenberg B., Richter C.F. // Ann. Geofis. 1956. V. 9. P. 1.