

УДК 550.34

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕЩЕНИЙ СКАЛЬНЫХ ОТДЕЛЬНОСТЕЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2023 г. М. В. Родкин<sup>1,2,\*</sup>, З. З. Шарафиев<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия<sup>3</sup>Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

\*E-mail: rodkin@mitp.ru

Получение точной оценки сейсмической опасности затруднено краткостью интервалов времени, за которые имеются сейсмические данные, по сравнению с периодом повторяемости сильных землетрясений. Решение проблемы дают методы палеосейсмологии. Одним из них, возможно наиболее экономичным является метод оценки максимальных скоростей смещения грунта при сильных палеоземлетрясениях (*PGVEM*). Метод основан на интерпретации полевых наблюдений о предположительно сейсмогенных смещениях скальных отдельностей. Для уточнения метода *PGVEM* проведена серия экспериментов. Для ряда типичных грунтовых условий получен разброс ожидаемых величин смещений и показана возможность возникновения эмпирически наблюдаемых случаев аномально больших смещений блоков в случае замены режима трения скольжения на смещение блоков за счет их опрокидывания и переворачивания. Проведенные эксперименты позволяют предложить ряд рекомендаций по уточнению применения метода *PGVEM*.

**Ключевые слова:** метод *PGVEM*, эксперимент, оценка максимальных палеосейсмических воздействий, аномальные эффекты, переход от трения скольжения к качению.

**Для цитирования:** Родкин М.В., Шарафиев З.З. Лабораторное моделирование смещений скальных отдельностей при землетрясениях // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 4. С. 60–71. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_4\\_60](http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_4_60)

### Введение

Как известно, задача получения точных оценок сейсмической опасности далека от своего разрешения. При недавних сильных (часто и разрушительных) землетрясениях довольно часто наблюдались воздействия (интенсивности, балльность), существенно превышающие ожидаемые значения [Кособоков, Некрасова, 2011]. С другой стороны, площадь, реально охватываемая сотрясениями интенсивностью  $I = 6$  и выше, примерно на порядок меньше площади такой интенсивности, ожидаемой по карте Общего сейсмического районирования России (ОСР-97) и последующих карт, отличающихся от нее в этом смысле не столь сильно [Шебалин и др., 2022]. Отсюда видно, что существующие методики расчета сейсмической опасности нередко допускают серьезные систематические ошибки как переоценки, так и недооценки сейсмической опасности.

Принято полагать, что причиной таких погрешностей является малая длительность наблюдений сейсмического режима (менее сотни лет по инструментальным данным и более 300–500 лет (редко) по историческим) по сравнению с периодом повторяемости наиболее сильных для данного региона землетрясений (предположительно, несколько тысяч лет и более). Решение проблемы дают методы палеосейсмологии [Солоненко, 1977; Никонов, 1995; Палеосейсмология, 2011; и многие др.], позволяющие оценить характеристики и места возникновения сильных землетрясений за намного более длительные интервалы времени.

Однако обычно применяемые методы палеосейсмологии весьма трудоемки и часто требуют (как, например, метод траншейных исследований) удачное попадание траншеи именно на сейсмогенный

разлом, причем в области, близкой к зоне максимальной подвижки при землетрясении. Такими исследованиями трудно покрыть большие территории. Зачастую такие работы проводятся уже после неожиданно произошедшего сильного землетрясения, и тогда часто выявляется, что аналогичные по силе события происходили здесь и ранее, и, соответственно, ожидаемая сейсмическая опасность в данном районе должна была быть существенно выше. Именно такой случай имел место с самым разрушительным в России за последние десятилетия – Нефтегорским землетрясением [Рогожин, 1996].

Одним из возможных вариантов относительно менее трудоемкого обследования больших территорий является, предложенный в [Родкин и др., 2012], метод оценки величин максимальных скоростей смещения грунта (*peak ground velocities, PGV*) по методу *PGVEM* (*PGV estimation method*), в дальнейшем довольно широко использовавшийся в [Никонов и др., 2014; Родкин и др., 2015; Николаева и др., 2018; Корженков и др., 2019; Shvarev et al., 2018; Rodkin, Korzhenkov, 2019; и др.]. Данным методом по полевым наблюдениям определяют характер и величины предположительно инерционных смещений скальных отдельностей при сильных палеоземлетрясениях, а по этим смещениям рассчитывают, способные вызвать эти смещения, максимальные скорости смещения грунта, *PGVs*. Подчеркнем важный момент применения метода *PGVEM* – каждое отдельное смещение скальной отдельности может быть порождено разными причинами, далеко не только сейсмическими воздействиями. Оценка величин *PGVs* получается в результате статистического и сеймотектонического анализов; для расчета величин *PGVs* используются статистически повторяющиеся пары значений «смещения и направления», дополнительно учитываются характер сеймотектоники региона, а иногда и геологическая история, например, направление движения горных ледников.

Наиболее часто встречающимся на практике является случай смещений скальных отдельностей по инерции по субгоризонтальным основаниям. При этом наблюдается значительный разброс получаемых оценок, а изредка – аномально большие, отскакивающие и требующие специальной интерпретации значения.

Ниже обсуждаются результаты серии экспериментов по лабораторному моделированию субгоризонтальных смещений горных отдельностей по инерции. Но вначале кратко представлены описание метода *PGVEM* и возникшие при его использовании проблемы.

### Метод *PGVEM*

В методе *PGVEM* предполагается, что максимальная скорость смещения грунта при землетрясении (*PGV-value*) может быть охарактеризована скоростью, с которой скальная отдельность, оторвавшись от массива, смещается по инерции. Обоснование этого предположения и набор типовых моделей для различных видов смещений (смещения, перевороты, отбрасывания и другие) даны в [Родкин и др., 2012]. В полевых условиях наиболее часто наблюдается случай смещения по субгоризонтальному основанию. Этот случай и наиболее прост в применении, он описывается соотношением:

$$\frac{mV^2}{2} = mgKL, \quad (1)$$

где  $m$  – масса скальной отдельности,  $V$  – скорость ее движения сразу после отрыва (полагаемая равной *PGV*),  $g$  – ускорение свободного падения,  $K$  – коэффициент трения,  $L$  – величина смещения скальной отдельности относительно ее исходного положения.

Соотношение (1) использовалось во многих работах [Никонов и др., 2014; Родкин и др., 2015; Николаева и др., 2018; Корженков и др., 2019; Shvarev et al., 2018; Rodkin, Korzhenkov, 2019], при этом были получены данные, позволяющие уточнить оценки долгосрочной сейсмической опасности. Опыт полевых работ поставил, однако, и ряд вопросов. Каков ожидаемый разброс получаемых оценок? Насколько точны средние значения? И еще более важный вопрос, а как трактовать изредка, но вполне

систематически наблюдаемые экстремально большие величины смещения скальных отдельностей? Здесь уместно некоторое отступление: публикация метода *PGVEM* [Родкин и др., 2012] длительно откладывалась в связи с тем, что общепринятые на тот момент соотношения практически не допускали возможности возникновения при землетрясениях величин *PGV* в несколько м/с. А именно такие значения систематически получались в рамках метода *PGVEM*. Ситуация изменилась в связи с быстрым ростом объема наблюдений сильных движений и пересмотра на этой основе шкал соотношения балльности и величин скоростей смещения грунтов до значений *PGV* ~ 1 м/с, с максимумами до 4–5 м/с [Аптикаев, 2012; McGarr, Fletcher, 2007; Anderson, 2010; и др.]. Таким образом, возникла возможность непротиворечивой интерпретации типично получаемых этим методом значений *PGV* в несколько м/с.

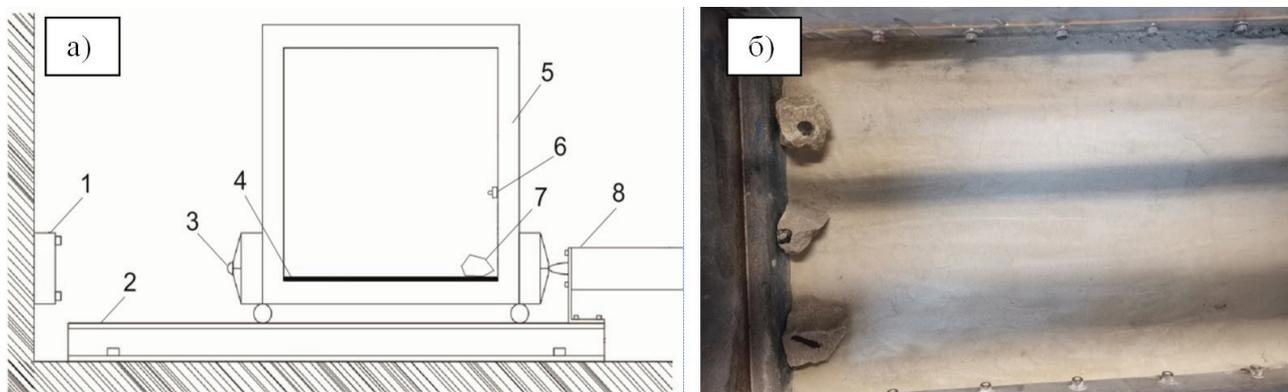
С ростом объема работ методом *PGVEM* вопрос об интерпретации аномально больших величин смещений скальных отдельностей, пусть изредка, но вполне систематически выявляемых при полевых работах, возник заново и уже более предметно. При этом, в ряде случаев, размер смещенных скальных блоков весьма велик (первые метры), и такие смещения трудно приписать несейсмическому фактору (кроме сильного техногенного воздействия, легко идентифицируемого сползания по склону или давлению ледника). Традиционная интерпретация таких смещений предполагает аномально низкие значения коэффициента трения, возникающие, например, при обледенении поверхности скольжения. Приводимые ниже результаты экспериментов показали, что возможен и другой механизм возникновения экстремально больших смещений.

### Методика исследования смещений каменных блоков при импульсном горизонтальном воздействии

Целью экспериментального исследования являлась проверка эффективности метода *PGVEM*, оценка минимально ожидаемых величин разброса (естественно, что в природе разнообразие условий больше, чем в эксперименте, соответственно и разброс будет большим), а также моделирование и интерпретация изредка наблюдаемых в природных условиях аномально больших смещений. Для экспериментального исследования смещений по методу *PGVEM* была использована горизонтальная ударная установка (ГУУ), схема которой представлена на рис. 1а. Исследования прочностных характеристик грунтов и контактов образца и поверхности образца проводились на установках, включающих:

- установку прямого среза (УПС) – для определения прочностных свойств геоматериалов;
- установку «слайдер-модели» (СЛД) – для определения прочностных свойств на контакте между образцом и грунтом.

Определение сопротивления грунтов сдвигу методом одноплоскостного среза проводилось по консолидированно-недренированной схеме на УПС. Сдвиговая прочность  $\tau_{\max}$  определялась из условия разрушения Кулона–Мора. Основу модельного грунта составлял кварцевый песок из Люберецких



**Рис. 1.** Схема горизонтальной ударной установки (а) и фото исследуемых горных пород на песчано-цементном слое (б): 1 – стальная мишень, 2 – швеллер, 3 – ударник, 4 – грунт, 5 – ящик с прозрачными стенками, 6 – акселерометр, 7 – образец горной породы, 8 – пневмоцилиндр

карьеров Московской области (основная фракция 0.3 мм). В экспериментах использовались следующие грунты: кварцевый песок, кварцевый песок + 5% шамотной глины, водонасыщенный песок. Прочностные характеристики грунтов даны в табл. 1.

Таблица 1.

**Прочностные свойства используемых грунтов**

№ п/п	Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения
1	Кварцевый песок	1.63	0.7 ± 0.2	32 ± 2
2	Кварцевый песок + 5% шамотной глины	1.83	1.0 ± 0.2	36 ± 1
3	Водонасыщенный кварцевый песок	1.6	0.8 ± 0.5	31 ± 2

Прочностные свойства контакта между образцом и грунтом основания определялись при условиях прямого сдвига. Эксперименты проводились на установке СЛД, где образец по инерции смещается вдоль по поверхности раздела. Прочностные характеристики контакта между смещаемым образцом и грунтом представлены в табл. 2.

Таблица 2.

**Прочностные свойства контакта образца и поверхности грунта**

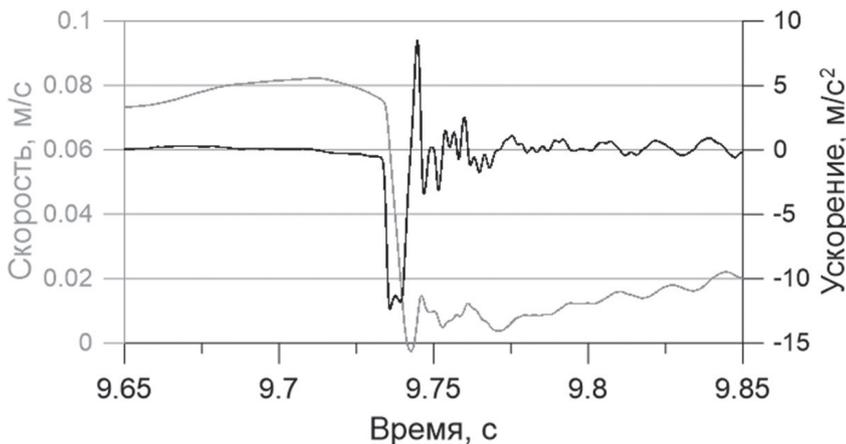
№ п/п	Вид контакта	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения на контакте между образцом и поверхностью грунта
1	Сухой контакт	0.1 ± 0.1	34 ± 2
2	Обводненный контакт	0.1 ± 0.1	26 ± 1

Общий вид и схема экспериментальной установки представлены на рис. 1. В совокупности установка позволяет смоделировать смещение скальных отдельностей по инерции по основанию, представленному модельными грунтами. Смещаемые скальные образцы являются естественными отдельностями горной породы (известняк) разной, но характерной геометрической формы. Основание представлено описанными выше грунтами. Во всех случаях грунт послойно утрамбовывался. Подробное описание ГУУ можно найти в работе [Павлов, Шарафиев, 2020]. На высоте около 30 см от дна ГУУ устанавливался акселерометр для измерения горизонтальной компоненты движения основания (грунта). Сигналы с акселерометра регистрировались модулем АЦП Е14-440 (L-Card, Россия) с последующим вводом данных в компьютер. Постановка эксперимента обеспечивала придание несущей установке и образцу некоторой скорости и измерение смещения образца по инерции после резкого торможения основания.

Грунт слоями по 2 мм насыпался в рабочий объем внутри ящика, каждый слой тщательно утрамбовывался. Толщина слоя грунта составляла до 1 см. На грунт, на некотором расстоянии друг от друга, чтобы избежать столкновений при смещении, ставились три образца горной породы (рис. 1б). Образцы отбирались как типичные из большой совокупности естественных каменных отдельностей. Для пары опытов, поставленных специально с целью исследования условий перекачивания образцов, были отобраны относительно более плоский, относительно изотропный по размерам (приближающийся к кубу), и относительно изотропный образец, но с большим числом граней, что облегчало его

перекачивание. После каждого динамического воздействия определялись величины смещения образцов с точностью 0.5 см (выше точность достичь сложнее, ввиду поворотов смещающихся образцов). Разнообразие грунтов основания, формы образцов, длительности торможения и исходной скорости  $V$  позволило исследовать зависимость величин смещения образцов  $L$  от этих характеристик. Максимальная измеренная скорость смещения установки трактовалась как аналог максимальной скорости смещения грунта при землетрясениях (*peak ground velocity, PGV*).

Скорость  $V$  определялась интегрированием записи величин ускорения. На рис. 2 приведены примеры записи ускорения, зарегистрированного акселерометром при ударе контейнера о преграду, и скорости смещения грунта, полученной путем интегрирования акселерограмм. Диапазон изменения величин скорости  $V$  в экспериментах составлял от 0.003 до 1.3 м/с.



**Рис. 2.** Примеры ускорения и скорости движения установки (грунта). Время на графиках отсчитывается от момента начала перемещения ГУУ

В экспериментах нами определялись два параметра: максимальная скорость движения установки  $V$  и смещение образцов  $L$ . Максимальная скорость  $V$  смещения образцов по инерции после торможения установки в экспериментах варьировалась путем изменения разгона бокса. Величины смещения образцов по инерции после торможения установки ( $L$ ) зависели от исходной скорости установки  $V$ , характера торможения, геометрических характеристик образцов и параметров грунта и трения на границе образец-грунт. Согласно результатам экспериментов основную роль играет исходная скорость смещения  $V$  и форма образца; характеристики грунта и характер торможения играли второстепенную роль. Заметим, что во всех случаях грунт был достаточно жестким, и заметного эффекта зарывания образца при смещении не наблюдалось.

### Результаты лабораторных экспериментов

Результаты экспериментов представлены в виде совокупностей получаемых эмпирических зависимостей между параметрами  $V$ ,  $L$  и  $K$ , где  $V$  и  $L$  – начальная скорость смещения образцов и величина смещения, а  $K$  – рассчитываемый по (1) средний коэффициент трения. Было проведено 8 серий экспериментов с разными образцами. В разных сериях опытов ставилась цель промоделировать и получить ответы на разные вопросы. Результаты различных опытов качественно аналогичны. Ниже результаты экспериментов представлены выборочно – по данным 4-х серий экспериментов. В табл. 3 в качестве примера приведены результаты одной из серии экспериментов при относительно повышенных значениях  $V$ , когда в основании использовался увлажненный песчаный грунт. Виден довольно широкий диапазон получаемых значений коэффициента трения  $K$ ; по всей совокупности экспериментов этот диапазон еще шире.

Данные экспериментов представлены на рисунках 3–6. Разный цвет значков на рисунках отвечает разным грунтам: черные – увлажненному песчаному грунту толщиной 10 мм; красные – сухому песчаному грунту толщиной 10 мм; зеленые – песчано-глинистому грунту (5% глины от общей массы

Таблица 3.

Результаты типичной серии экспериментов

№ п/п	$V$ , м/с	$L$ , см	$K$
1	1.17	15	0.46
		11.5	0.60
		14.4	0.48
2	0.95	12	0.38
		10.7	0.42
		16	0.28
3	0.58	4	0.42
		4.8	0.35
		4.7	0.36
4	0.56	3	0.52
		3	0.52
		4	0.39
5	0.59	3	0.58
		3.4	0.51
		4.6	0.38

грунта) толщиной 10 мм; голубые – песчано-глинистому грунту (5% глины от общей массы грунта) и толщиной 3–4 мм. Явной зависимости от типа грунта и толщины слоя песка не наблюдается. Можно предположить только, что увлажненным грунтам при одинаковых значениях  $V$  отвечают, в среднем, несколько пониженные величины смещений  $L$ . Специальный интерес представляют вопросы разброса экспериментальных данных и соотношения результатов экспериментов с результатами применения метода *PGVEM* по данным полевых наблюдений. Эти вопросы и будут рассмотрены ниже.

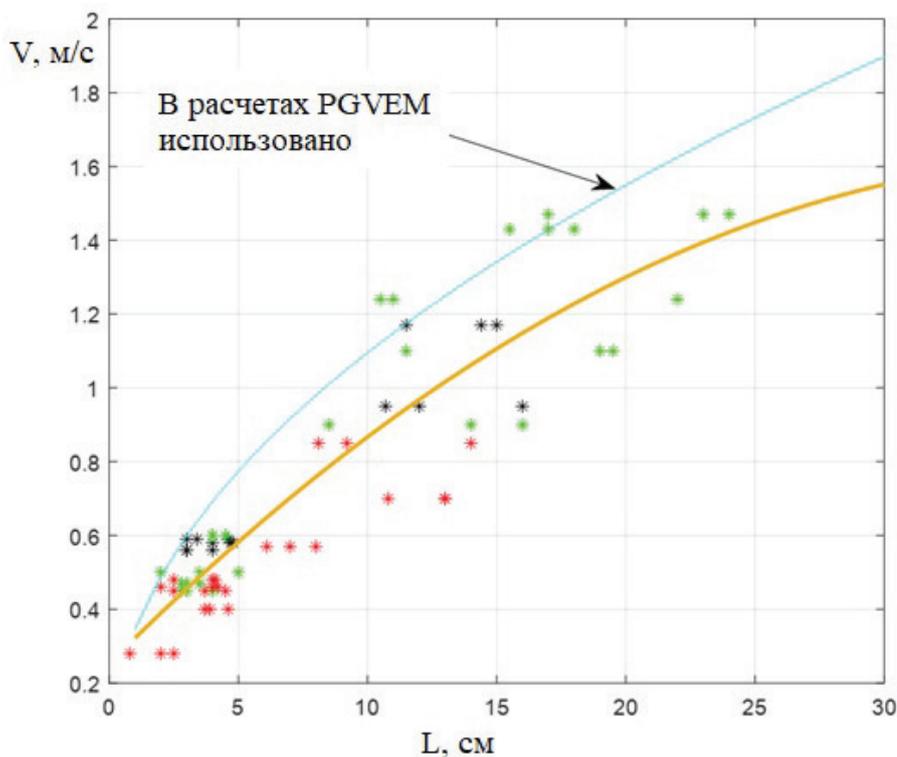
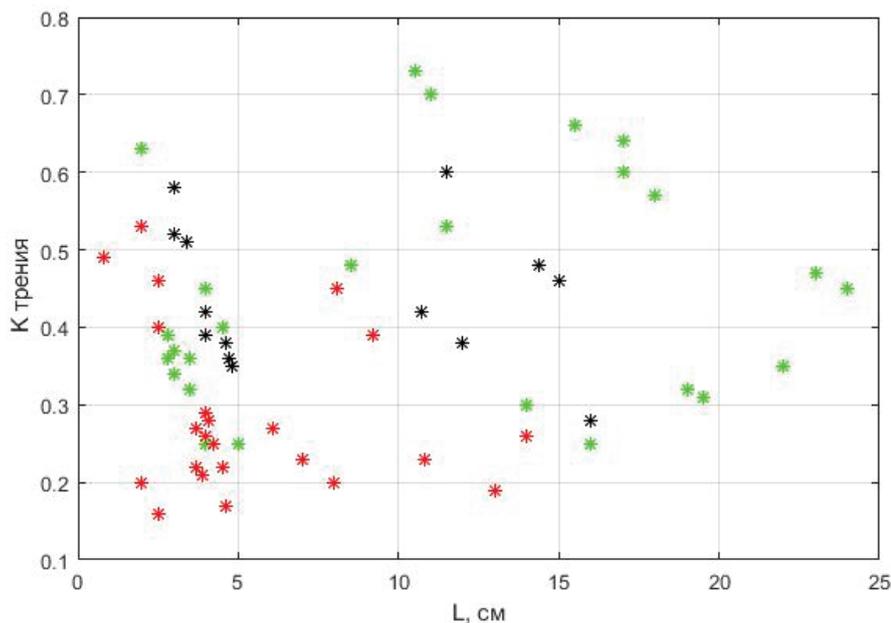


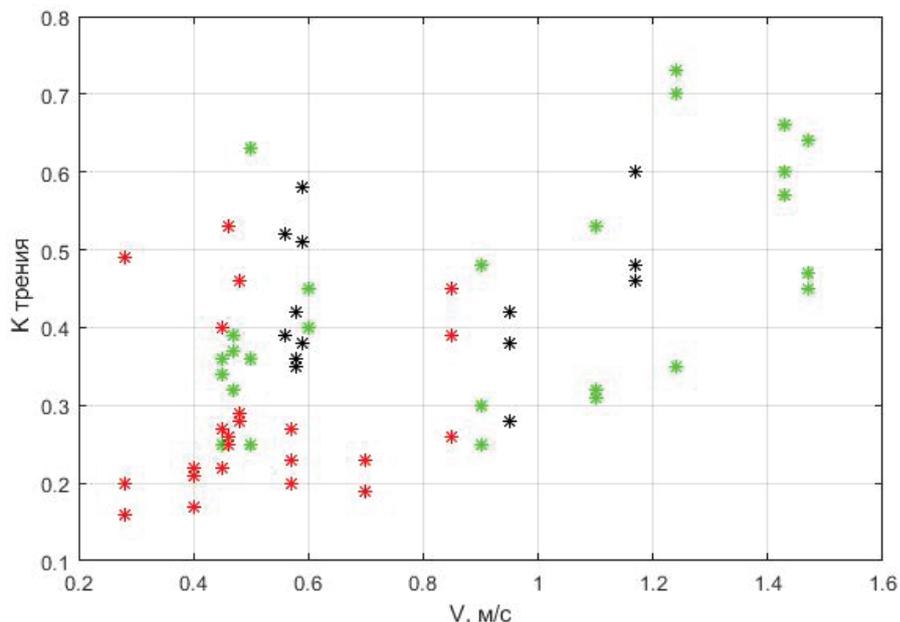
Рис. 3. Соотношение между максимальными скоростями основания  $V$  и величинами смещений образцов для трех серий экспериментов с разным грунтом: черные – перемещение образцов по увлажненному песчаному грунту, красные – по сухому песчаному грунту, зеленые – по песчано-глинистому грунту (5% доля глины); грунты толщиной 10 мм. Коричневая линия – аппроксимация экспериментальных данных квадратичной параболой, голубая линия – ранее использовавшееся соотношение при анализе полевых данных методом *PGVEM*

На рис. 3 представлены результаты экспериментов для образцов типичной формы, когда опрокидывания образцов происходят редко, а перекачивание образцов при исследуемых значениях скоростей  $V$  не происходит совсем. На рисунках 4 и 5 (по данным табл. 3) представлены расчетные значения коэффициентов трения  $K$  для полученных в эксперименте значений  $V$  и  $L$ . Сразу подчеркнем, что полученный в экспериментах разброс величин  $K$  оказался существенно бóльшим, чем предполагалось изначально, и что не все наблюдаемые в экспериментах тенденции получили объяснение. Общий диапазон изменения рассчитанных значений  $K$  составляет от 0.15 до 0.75; заметим, что при расчетах по методу *PGVEM* обычно используется фиксированное значение  $K = 0.6$ .



**Рис. 4.** Величины смещения  $L$  и расчетные значения коэффициента трения  $K$ . Описание обозначений как на рис. 3

**Рис. 5.** Значения максимальной скорости  $V$  и расчетные значения коэффициента трения  $K$ . Описание обозначений как на рис. 3



На рисунках 4 и 5 видно, что определенным образом обособляются две области, отвечающие относительно пониженным и повышенным значениям  $L$  и  $V$ . В первой области каких-либо эмпирических взаимосвязей величин  $L-K$  и  $V-K$  не просматривается. При этом почти весь этот разброс значений  $K$  имеет место уже при относительно малых значениях  $V$  и  $L$ . Отчасти такой разброс, видимо, можно объяснить погрешностями определения величин  $V$  и  $L$ . Действительно, при малых смещениях в 1–3 см неточность в 0.5 см дает уже высокую относительную погрешность. Но, возможно, что при малых

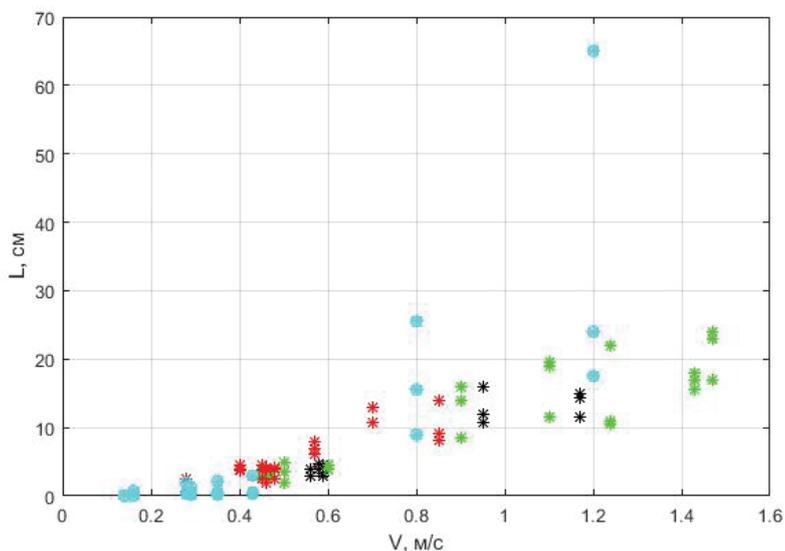
величинах смещений относительно большую роль играют также характеристики данного конкретного участка площадки, а при больших величинах смещения эти характеристики усредняются. В пользу этого предположения говорит и то, что при малых скоростях  $V$  в значительном числе случаев заметного смещения образцов не наблюдается вовсе, несмотря на то, что в среднем, можно было бы ожидать смещения в диапазоне 0.5–2 см. Последнее также может быть связано с локальными условиями площадки, различиями установки образца на грунт и с различиями формы нижней грани образца, в частности, образовывалась ли какая выемка под данным образцом. В этом случае, для начала смещения образцу надо иметь запас кинетической энергии достаточный, чтобы преодолеть потенциальную «яму» и еще потом сместиться.

Другой, плохо понятной на данный момент особенностью, является тенденция роста коэффициента трения  $K$  с ростом скорости  $V$  (рис. 5). Если рассчитать и вычесть линейную регрессию  $K$  от  $V$ , то разброс значений  $K$  существенно уменьшится, а среднее значение приблизится к обычно используемому в методе *PGVEM* значению  $K = 0.6$ . Мы затрудняемся проинтерпретировать такой эмпирический результат.

Отмеченные выше особенности, выявляемые при расчете коэффициентов  $K$ , слабо сказываются на выводах сопоставления результатов эксперимента с полевыми применениями метода *PGVEM*. При таком сравнении величины коэффициентов трения не рассчитываются, а конфигурация облака получаемых в эксперименте точек ( $V, L$ ) достаточно хорошо отвечает ожидаемой конфигурации; использовавшееся ранее в рамках применения метода *PGVEM* соотношение при  $K = 0.6$  показано на рис. 3 голубой линией.

Особый интерес вызывает случай изредка наблюдаемых при полевых работах аномально больших смещений скальных отдельностей. Иногда это блоки размером в несколько метров. При упоминании таких ситуаций обычно предполагается, что сдвиг скальных отдельностей происходил при аномально низком (в районе 0.1 и даже меньше) значении коэффициента трения  $K$ , в частности, по обледенелой поверхности. Но такие аномальные смещения, как показано далее в нашем эксперименте, могут наблюдаться и по другим причинам.

Нами было подмечено, что относительно большие смещения часто возникают, когда образцы падают на бок и переворачиваются. С целью проверки этой возможности был поставлен специальный эксперимент. Из набора природных образцов скальных отдельностей были отобраны три образца разной, но характерной формы. Первый был достаточно плоским и переворот такого образца весьма маловероятен. Два других – грубо изометричные по размерам, но первый наподобие куба, а второй с большим числом граней. Второй образец может упасть набок, а третий может и перевернуться несколько раз, при этом (в пределе) трение скольжения заменяется на трение качения. Легко представить, что шарик укатился бы весьма далеко.



**Рис. 6.** Зависимость величин смещения образцов  $L$  от максимальной скорости  $V$ . К данным рис. 3 добавлены образцы характерной, но относительно редкой формы. Описание обозначений как на рис. 3, добавлены голубые звездочки – песчано-глинистый грунт (5% глины), толщина слоя 3–4 мм

На рис. 6 данные рисунка 3 дополнены результатами, полученными для этих трех образцов. Видны несколько случаев аномально больших смещений  $L$ , при этом все они отвечают образцу 3. Таким образом, показано, что аномально большие смещения могут наблюдаться и без особых условий трения на поверхности смещения. Но такие случаи весьма редки, и неоднократные перевороты, даже для грубо изометричных и сложной формы образцов, реализуются редко, в зависимости от того, какими именно гранями будет происходить контакт перекатывающегося образца с основанием.

### Заключение

В работе ставилась задача экспериментального моделирования условий применения метода *PGVEM*. Моделировался простейший, но наиболее часто встречаемый в практике полевых работ случай, когда скальный блок, получивший при землетрясении скорость  $V$ , смещается по субгоризонтальной поверхности, возможно, по инерции в результате сейсмического воздействия. Скорость  $V$  ассоциируется с величиной максимальной скорости смещения грунта при землетрясении (*peak ground velocity, PGV*). Целью экспериментов являлась оценка разброса получаемых значений  $V = PGV$  в простейшем лабораторном случае, уточнение средних значений коэффициента трения  $K$  и выявление возможных механизмов реализации изредка наблюдаемых в природе аномально больших смещений скальных блоков. Различия характеристик поверхности скольжения в природных условиях моделировались тремя типами грунтов: песчаный, песчаный влажный и песчано-глинистый.

Результаты экспериментов показали бóльший разброс значений смещений, чем можно было исходно ожидать в задаваемых условиях опыта. При одинаковых значениях  $PGV$  значения разброса получаемых смещений лишь раза в полтора уступали их средним значениям. При этом оцениваемые по полевым данным (при значении коэффициента трения  $K = 0.6$ ) значения  $PGV$  для данных величин смещений превосходили значения, получаемые в эксперименте в среднем на 0.2 м/с, с тенденцией роста этого различия для больших величин смещений  $L$ .

Подчеркнем, что несмотря на значительный разброс полученных значений коэффициента трения, различия в получаемых средних значениях скорости  $V = PGV$  оказываются обычно в пределах 30% (при несколько бóльшем различии для ранних расчетов из-за принимавшихся тогда больших значений коэффициента трения  $K = 0.8$ ). Такие завышения не представляются чрезмерными, так как получаемая точность оценок пиковых сейсмогенных скоростей смещения грунта ( $PGV$ ) и соответствующих им погрешностей величин балльности (*intensity I*) получается в пределах полу-балла, что допустимо в практике оценок максимально возможных сейсмических воздействий. При этом погрешности из-за разброса в значительной степени снимаются при наборе при полевых наблюдениях необходимой статистики.

Чуть подробнее обсудим отмеченное выше возможное систематическое превышение методом *PGVEM* оценки сейсмической опасности. По опыту применения метода *PGVEM* в ряде случаев значения превышения максимальной интенсивности  $I$  этим методом превосходили оценки, полученные иными методами как раз в пределах полу-балла – балла [Родкин и др., 2015; Родкин, Орунбаев, 2022]. В свете вышесказанного, не исключено, что такое различие было связано с завышением вероятных значений  $PGV$  при принимавшихся в расчетах по методу *PGVEM* завышенных значениях коэффициента трения  $K$ . Заметим, что в природе, за счет растительного покрова, глинистой поверхности и иных факторов эффективные значения коэффициента трения  $K$  могут быть и еще ниже, что мы и получили в эксперименте.

Особый интерес представляют результаты моделирования возможности возникновения аномально больших величин смещения скальных отдельностей. Показано, что такой эффект может быть связан не только с кардинальным уменьшением коэффициента трения (например, при обледенении поверхности смещения), но и с перекатыванием скальных отдельностей. Эффективное трение резко уменьшается при частичном переходе из режима трения скольжения в режим качения. Естественно, это может наблюдаться только при удачном совпадении геометрической формы блока и направления смещения, что и поясняет редкость наблюдения таких смещений в полевых условиях.

Лабораторные сравнения показали, что различие свойств грунтов имеет второстепенное значение, при этом смачивание грунта, при одних и тех же скоростях, может приводить к увеличению смещений скальных блоков на 10–20%.

Естественно, результаты моделирования применимы не только к интерпретации величин  $PGV$  в целях оценки долгосрочной сейсмической опасности, но и во всех иных случаях, когда надо связать перемещение кусков скальной породы с приложенными воздействиями (взрывные работы в карьерах и другие подобные случаи).

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900172-5).

### Список литературы

- Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М. : ИФЗ РАН. 2012. –176 с.
- Корженков А.М., Абдиева С.В., Гладков А.С., Деев Е.В., Лю Ц., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Родкин М.В., Сорокин А.А., Турова И.В., Фортуна А.Б. Палеосейсмичность вдоль адырных разломов (на примере Коконадыр-Тегерекского разлома в Юго-Западном Прииссыккулье, Тянь-Шань) // Вулканология и сейсмология. 2019. № 5. С. 67–82. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019536-53>
- Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 1. С. 65–76.
- Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Детальные палеосейсмогеологические исследования в бортовой зоне впадины оз. Имандра (Кольский регион): новые подходы и результаты // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 6. С. 866–880. <https://doi.org/10.15372/GiG20180608>
- Никонов А.А. Палеосейсмологический подход при сейсмическом районировании и оценке сейсмической опасности // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М. : ОИФЗ РАН. 1995. Вып. 2–3. С. 46–62.
- Никонов А.А., Шварев С.В., СимЛ.А., Родкин М.В., Бискэ Ю.С., Маринин А.В. Скальные палеосейсмодеформации на Карельском перешейке (ключевой участок «пещеры Иностранцева», Ленинградская область) // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 5. С. 591–596. <http://dx.doi.org/10.7868/S0869565214230212>
- Павлов Д.В., Шарафиев З.З. Методика лабораторного исследования устойчивости склона при импульсном динамическом воздействии // Динамические процессы в геосферах: сб. научн тр. ИДГ РАН, вып. 12. М. : Графитекс. 2020. С. 53–62. <http://doi.org/10.26006/IDG.2020.97.15.010>
- Палеосейсмология : в 2 т. / под ред. Дж.П. Мак-Калпина. М. : Научный мир. 2011. Т. 1. – 560 с.; Т. 2. – 400 с.
- Рогожин Е.А. Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника. 1996. № 2. С. 45–53.
- Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика 2012. Т. 3. № 3. С. 293–237. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0072>
- Родкин М.В., Корженков А.М., Орунбаев С.Ж. Опыт оценки максимальных массовых скоростей в очаговых зонах сильных землетрясений по смещениям скальных отдельностей на примере некоторых районов Киргизии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 4. С. 25–36.
- Родкин М.В., Орунбаев С.Ж. Опыт оценки сейсмической опасности по данным о смещениях скальных отдельностей на примере Алайской долины (Киргизия) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 1. С. 73–88. <https://doi.org/10.31857/S0203030622010060>
- Солоненко В.П. Сейсмогенные деформации и палеосейсмологический метод // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск : Наука. 1977. С. 5–47.
- Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук: Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. <http://doi.org/10.31857/S2686739722601466>

*Anderson J.G.* Source and site characteristics of earthquakes that have caused exceptional ground accelerations and velocities // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. Vol. 100 (1). P. 1–36. <https://doi.org/10.1785/0120080375>

*McGarr A., Fletcher J.B.* Near-fault peak ground velocities from earthquake and laboratory data // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2007. Vol. 97 (5). P. 1502–1510. <http://doi.org/10.1785/0120060268>

*Rodkin M.V., Korzhenkov A.M.* Estimation of maximum mass velocity from macroseismic data: A new method and application to archeoseismological data // *Geodesy and Geodynamics*. 2019. Vol. 10. P. 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.06.010>

*Shvarev S.V., Nikonov A.A., Rodkin M.V., Poleshchuk A.V.* The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and soft sediment deformation features // Advance online publication of the INQUA special issue of the *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2018. P. 89–105. <https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.009>

## LABORATORY MODELING OF ROCK FRAGMENTS' DISPLACEMENTS DURING EARTHQUAKES

© 2023 M. V. Rodkin<sup>1, 2, \*</sup>, Z. Z. Sharafiev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*E-mail: rodkin@mitp.ru

Obtaining an accurate assessment of seismic hazard is complicated by the short time intervals for which seismic data are available, compared to the recurrence period of strong earthquakes. The problem can be solved by methods of paleoseismology. One of them, probably the most economical, is the method for estimating of peak ground velocities during strong paleo-earthquakes (*PGVEM*). The method is based on the interpretation of field observations of presumably seismogenic displacements of rock units. A series of laboratory modeling experiments were carried out to refine the error of the *PGVEM* method. For typical ground conditions the scatter of rock pieces displacements was examined, and the possibility of empirically observed cases of anomalously large displacements of rock blocks was indicated. Such cases can occur in the case of replacement of the sliding friction mode by displacement due to overturning of rock fragments. The conducted experiments allow us to propose a few recommendations to refine the application of the *PGVEM* method in field condition.

**Keywords:** *PGVEM* method, experiment, estimation of maximum paleoseismic impacts, anomalous effects, transition from sliding to rolling friction.