

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.271.3, 550.34.016 + 550.394

ЭФФЕКТ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ В ОСНОВАНИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОПОЛЗНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Г. Г. Кочарян¹, З. З. Шарафиев¹, С. Б. Кишкина¹, Ци Чен Чжи²

¹Институт динамики геосфер им. акад. М. А. Садовского РАН,

E-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru, Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

²Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры, 100044, г. Пекин, Китай

Приведены результаты лабораторных экспериментов по исследованию процесса развития динамической неустойчивости блока, расположенного на шероховатой поверхности склона, под действием вибрационного воздействия малой амплитуды. Показано, что макроскопически процесс эволюции скольжения хорошо описывается уравнениями ползучести при соответствующем подборе констант. Судя по результатам проведенных лабораторных экспериментов, необходимыми условиями возникновения динамического обрушения является достижение критического значения перемещения относительно склона и определенной средней скорости крипа. Критическое смещение оказывается существенно больше, чем характерный размер, при котором происходит переход поверхности скольжения к остаточному сопротивлению сдвигу. Выявлено, что развитие неустойчивости тела оползня на заключительной стадии связано с эффектом снижения трения при росте скорости скольжения.

Склоновые явления, оползни, накопление деформации, ползучесть, сейсмические колебания, землетрясения, взрывы

DOI: 10.15372/FTPRPI20220201

Многие исследователи занимались изучением закономерностей движения горной массы по склону [1–6], однако механика данного явления до конца не ясна. Это относится как к крупным дальнепробежным лавинам, для которых предполагается радикальное снижение эффективного трения в процессе движения, так и к оползням, иногда происходящим совершенно неожиданно при солидном запасе устойчивости. Такие явления не редкость и на горнодобывающих предприятиях. За последние 30 лет в результате нарушения устойчивости склона на отвалах Михайловского ГОКа дважды сходили оползни объемом ~20 млн м³ [7]. Широко извест-

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-53031) и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 1021052706247-7-1.5.4).

ны такие события, как оползень 01.04.2015 г. на внешнем отвале разреза Заречный Кемеровской области (объем сместившейся массы ~ 27.5 млн м^3 , экономический ущерб 1.2 млрд руб.), оползень 05.06.2019 г. на разрезе Кийзасский Кемеровской области (рекультивация земель обошлась в более 220 млн руб.), оползень 10.07.2021 г. на Солнцевском угольном разрезе Сахалинской области и т. д.

При описании движения гравитационного оползня главную роль играет корректный учет сил сопротивления сдвигу, действующих в области локализации деформаций. Следует подчеркнуть, во многих случаях, особенно у крупных оползней, область локализации довольно узкая, так что тело оползня движется как единое целое, а деформацией породы внутри сползающей массы можно пренебречь. В этом случае часто применяется достаточно простая модель, основой которой служит схема, где оползневое тело рассматривается в виде жесткого блока на наклонном основании, так называемая модель Ньюмарка [6]. Несмотря на простоту постановки, этот подход позволяет не только проанализировать статическую устойчивость оползней такого типа, но и построить модель динамики развития процесса скольжения.

Среди многих механизмов, определяющих действующие на поверхности скольжения силы, одним из главных является трение горных пород. Для медленных движений в породах применимо эмпирическое определение коэффициента трения Кулона как коэффициента пропорциональности между предельным сдвиговым напряжением и нормальным напряжением на площадке скольжения. В классических законах Амонтона не содержатся сведения о зависимости трения от размера тела, амплитуды перемещения и скорости скольжения. Известны примеры геологических событий, при которых ярко проявляются нарушения этих соотношений, например крупномасштабные движения с динамически уменьшающимся трением — дальнепробежные лавины, крупные сейсмогенные разломы, переходные полости крупных ударных кратеров [8 – 11].

В качестве основного триггера оползней обычно рассматривается влияние воды (сильные осадки, нарушение дренажной системы отвалов и др.), что приводит к обводнению тела оползня и снижению запаса устойчивости. Однако обводненность не единственная возможная причина нарушения устойчивости опасных склонов. Известно, что воздействие сейсмических колебаний также является причиной склоновых явлений [3, 5]. Эффекты радикального снижения трения отмечались при образовании лавин в совершенно сухих горных породах на Луне и Меркурии [12].

Согласно упомянутому подходу Ньюмарка, оползень не будет инициирован до тех пор, пока не наберется некоторое критическое значение перемещения потенциально неустойчивой массы относительно основания. Перемещения, до определенного момента дискретные, происходят, когда ускорение, вызванное сейсмическим воздействием, превышает критическое ускорение, рассчитанное исходя из условия статического равновесия [6].

В [13] исследованы закономерности разрушения склона многократным импульсным воздействием и показано, что если максимальное ускорение в импульсе ниже определенного значения, зависящего только от прочности грунта, то склон остается устойчивым даже при высоких скоростях смещения грунта. Однократное воздействие импульсом с большим ускорением, но низкой массовой скоростью также не инициирует оползень. Однако в этом случае возникают остаточные деформации, которые, накапливаясь, могут гипотетически перевести склон в неустойчивое состояние.

Эффект накопления слабых возмущений хорошо известен в геомеханике. Длительное низкоамплитудное циклическое воздействие на образцы горной породы существенно снижает их прочностные свойства за счет возникновения микропластических деформаций и других неупругих эффектов [14–16]. При постоянном вибрационном воздействии за счет перманентного накопления малых остаточных деформаций заметно изменяются и макроскопические характеристики контактов между блоками [10] или области локализации скольжения.

В настоящей статье исследован эффект потери устойчивости лежащего на склоне жесткого блока за счет накопления деформаций под действием низкоамплитудных сейсмических колебаний.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования закономерностей потери устойчивости блоком, лежащим на шероховатой наклонной плоскости, выбрана приведенная на рис. 1 схема экспериментов. Блок из песчано-цементной смеси размером $12 \times 8 \times 2$ см располагался на склоне, изготовленном из кварцевого песка, слегка увлажненного глицерином. Модель находилась в массивном стальном контейнере размером $40 \times 30 \times 30$ см. Плотность материала склона во всей серии опытов составляла 1.8 г/см^3 , а поверхность склона утрамбовывалась так, что “зарывание” закругленной передней кромки блока в песок было исключено.

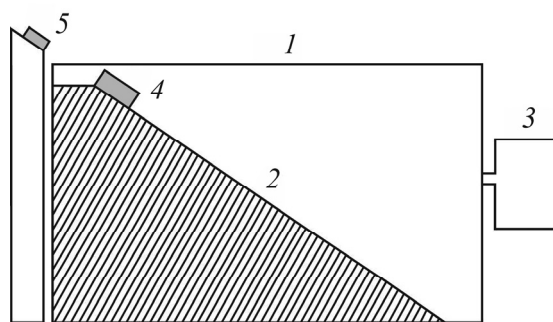


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — контейнер; 2 — поверхность склона; 3 — ударник, закрепленный на вибростенде; 4 — блок; 5 — датчик смещения

Степень статической устойчивости блока характеризуется коэффициентом FS (фактором устойчивости) — отношением суммы сил, удерживающих слой на склоне, к сумме сдвигающих сил. Из условия равновесия можно получить соотношение для его оценки:

$$FS = \frac{C}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}. \quad (1)$$

Здесь γ — удельный вес материала блока; z — вертикальный размер блока; α — угол склона; C — сцепление; φ — угол трения. Характеристики φ и C определялись в отдельной серии экспериментов и составляли: $\varphi \approx 34^\circ$, $C \approx 0.05 \text{ кПа}$.

Контейнер устанавливался на массивном основании. На его боковую стенку осуществлялось воздействие ударником, закрепленным на минивибростенде Bruel&Kjaer. Параметры вибрационного воздействия измерялись горизонтальным и вертикальным акселерометрами Bruel&Kjaer 4370, которые находились в песке на высоте 10 см от дна контейнера. Поскольку плотность датчиков существенно выше плотности песка, акселерометр закреплялся на специальной площадке, препятствовавшей движению корпуса датчика относительно грунта. С помощью специально проведенной серии экспериментов найден оптимальный диаметр площадки, не приводящий к существенным искажениям акселерограмм ($d = 6 \text{ см}$).

Смещение блока относительно склона контролировалось лазерным датчиком смещения ILD2220-10 (Micro-Epsilon, Германия) в диапазоне частот 0–5 кГц и точностью 0.1 мкм, который располагался так, что вибрации не воздействовали на измерительную систему.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов вибрационное воздействие осуществлялось в течение всего времени проведения опыта. Частота вибраций $f = 50$ Гц, угол склона изменялся с 37° до 27° , фактор устойчивости FS увеличивался с 1.08 (блок близок к состоянию предельного равновесия) до 1.56 (весьма устойчивое состояние). Максимальное значение горизонтальной компоненты ускорения на уровне расположения акселерометров PGA_x изменялось в диапазоне (0.065–0.200)g, вертикальной компоненты ускорения PGA_z — (0.04–0.12)g. Соответствующие значения для скорости смещения грунта PGV_x — 2–6 мм/с, PGV_z — 0.4–1.2 мм/с. После включения вибратора блок начинал перемещаться относительно склона. Фрагмент записи смещения блока по склону показан на рис. 2. Здесь выделяются две составляющие движения — колебательная с частотой и амплитудой, которые соответствуют параметрам волны, воздействующей на основание, и поступательная, как правило, направленная вниз по склону (иногда регистрируются локальные смещения и в обратном направлении).

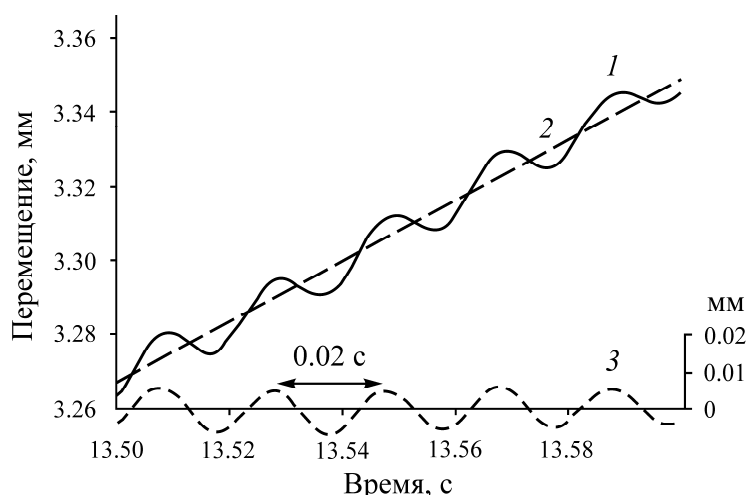


Рис. 2. Фрагмент записи смещения блока по склону $\alpha = 37^\circ$ при воздействии вибрации $PGA = 0.065g$; $f = 50$ Гц: 1 — запись датчика смещений; 2 — составляющая поступательного движения блока по склону; 3 — колебательное движение блока

Примеры зарегистрированных зависимостей перемещения блока вдоль склона от времени для разных углов наклона приведены на рис. 3. Параметры воздействия во всех случаях были одни и те же. Стадии поступательного перемещения, которые видны на зависимости перемещения от времени $D(t)$, типичны для любого процесса ползучести. Наблюдаются участки не установившейся ползучести (стадия 1 на рис. 3) и установившейся (стадия 2). Далее стадия 2 эволюционирует либо в стадию ускоряющейся ползучести 3, переходящую в динамическую стадию обрушения 4, либо в фазу замедления и остановки крипа 5. Начало стадии динамического скольжения безошибочно определялось по резкому увеличению $a = \partial^2 D / \partial t^2$.

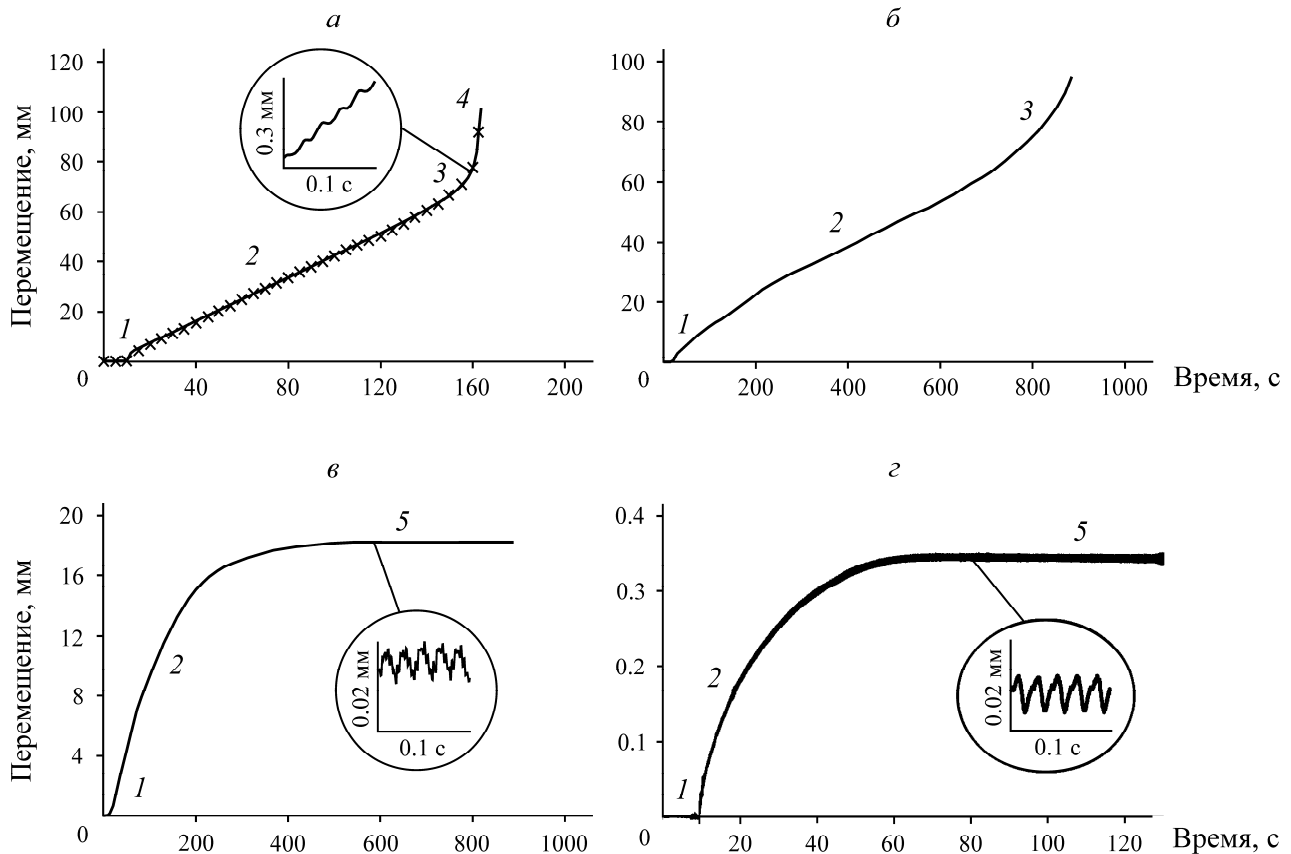


Рис. 3. Зависимость перемещения блока по склону от времени в результате воздействия вибраций с $PGA=0.065g$; $f=50$ Гц: а — угол склона $\alpha = 37^\circ$, $FS=1.10$, сплошная линия — соотношение (5); б — $\alpha = 33^\circ$, $FS=1.27$; в — $\alpha = 30^\circ$, $FS=1.42$; г — $\alpha = 27^\circ$, $FS=1.60$. Крестики — экспериментальные данные, 1–5 — стадии поступательного перемещения. Для читаемости рисунка показаны лишь отдельные точки. Запись выполнялась с частотой опроса 400 Гц

На рис. 4 приведены графики для скорости смещения блока.

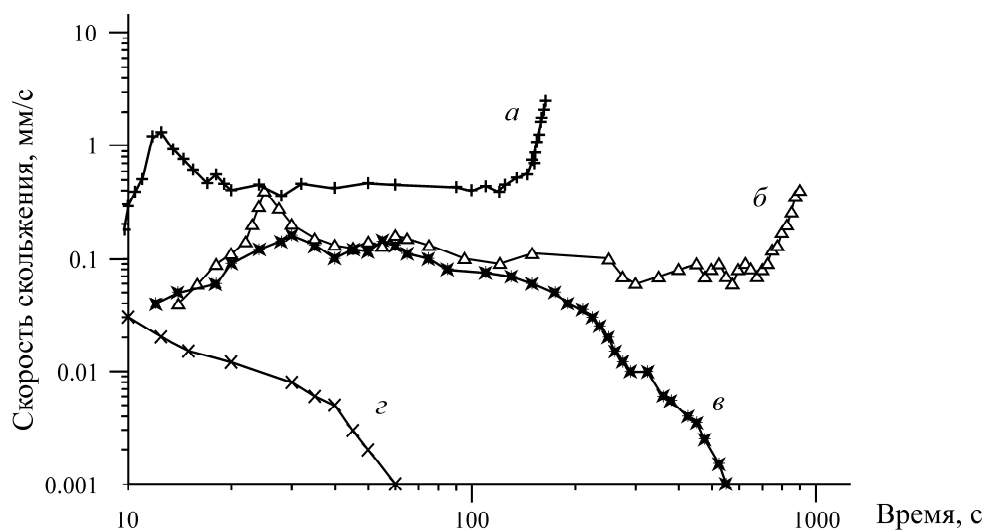


Рис. 4. Изменение скорости скольжения блока по склону во времени: а — $\alpha = 37^\circ$; б — $\alpha = 33^\circ$; в — $\alpha = 30^\circ$; г — $\alpha = 27^\circ$. Буквы а–г соответствуют рис. 3

Динамическое обрушение склона в этой серии произошло только в опыте с $\alpha = 37^\circ$ (рис. 3а), когда перемещение блока по склону превысило 80 мм. В опыте, где $\alpha = 33^\circ$, динамической стадии обрушения не зафиксировано, однако скольжение перешло в состояние ускорющейся ползучести 3, а перемещение достигло 100 мм. На этой стадии опыт остановили, поскольку достигнут верхний предел измерений лазерного датчика. Можно предположить, что при дальнейшем воздействии блок скорее всего сорвался бы. В остальных двух опытах этой серии (рис. 3в, г) после достижения средней скорости поступательного скольжения ~ 0.10 мм/с ($\alpha = 30^\circ$) и ~ 0.03 мм/с ($\alpha = 27^\circ$) блок замедлялся и постепенно останавливался. Дальнейшее вибрационное воздействие не приводило к значимому накоплению перемещений. Во второй серии экспериментов воздействие осуществлялось периодически. После 30 с вибрации вибростенд выключался на 10 мин, затем цикл возобновлялся, что позволило исследовать фазы разгона блока под действием колебаний и его торможения при выключении вибростенда. Изменение параметров движения блока в ходе одного из экспериментов показано на рис. 5.

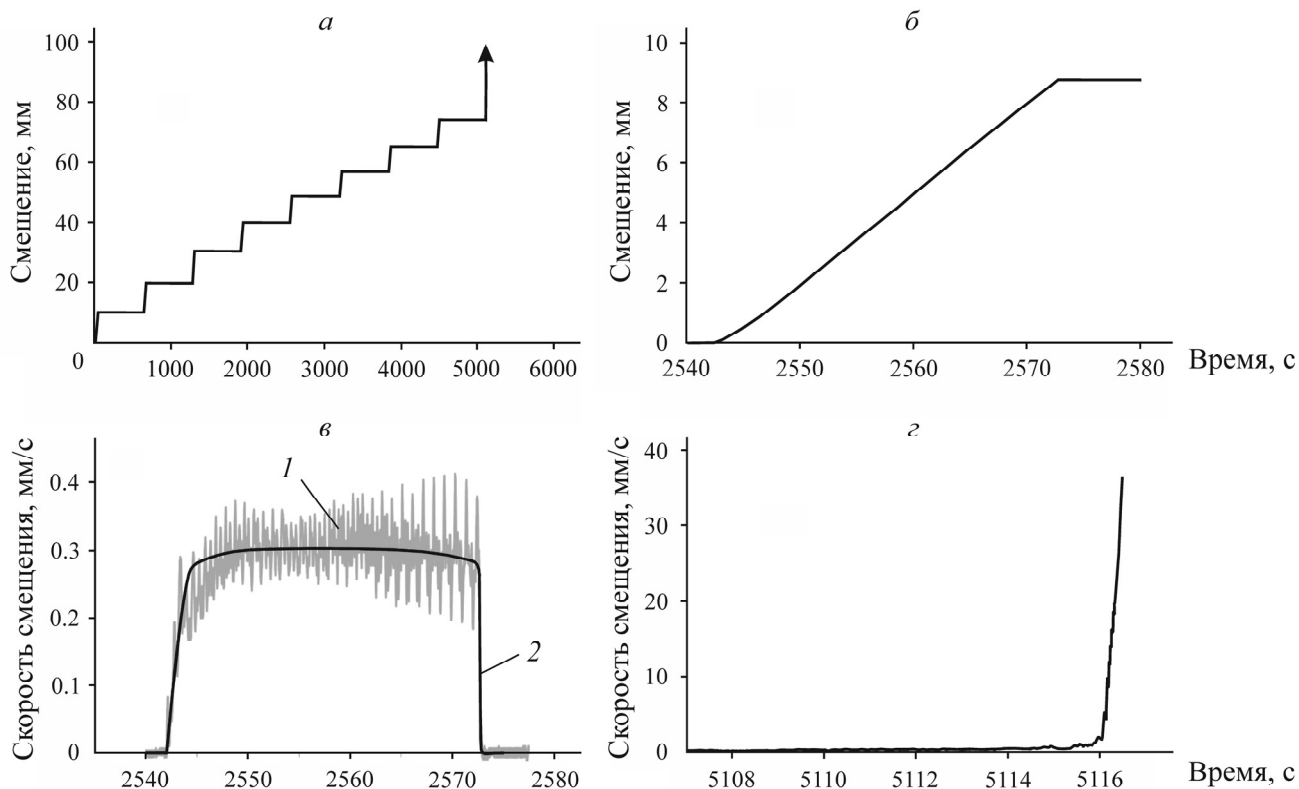


Рис. 5. Изменение параметров движения блока в ходе эксперимента: а — полная запись; б–г — фрагменты; 1 — исходная запись; 2 — результат сглаживания. Угол склона $\alpha = 35^\circ$, частота вибрации $f = 80$ Гц, $PGA_x = 0.2g$. На рис. б смещение отсчитывается от начала фрагмента

На рис. 5а, б приведены зависимости $D(t)$ для всего опыта и одного из циклов. Видно, что в первых циклах после выключения вибростенда блок останавливается, а в ходе 9-го цикла вибровоздействия он потерял устойчивость (отмечено стрелкой). На рис. 5в показана зависимость скорости смещения блока относительно склона $u(t) = dD(t)/dt$, где линия 1 — исходная запись, на которой наблюдается помеха, вызванная дрожанием крепления лазерного датчика. На записи отчетливо видны моменты включения и выключения вибратора. Сглаженная

запись показана линией 2. После включения вибратора блок медленно в течение нескольких секунд разгоняется, достигая скорости ~ 0.3 мм/с, затем движется с постоянной средней скоростью. На разных ступенях вибрационного воздействия скорость стабильного скольжения в эксперименте варьировала в пределах $0.3 - 0.7$ мм/с. После выключения вибрации происходило быстрое торможение блока в течение одинакового времени для всех ступеней в ходе эксперимента (~ 0.2 с). Это определяется, очевидно, соотношением между силой трения и составляющей силой тяжести, направленной вдоль склона.

На рис. 5г приведена величина $u(t) = dD(t)/dt$ для заключительного этапа эксперимента. Через ~ 11.5 с после начала 9-го цикла вибрации блок потерял устойчивость и, ускоряясь, сполз со склона. Аналогичные результаты получены и в экспериментах с другими углами склона. Параметры опытов представлены в таблице.

ТАБЛИЦА. Параметры опытов

Номер опыта	α , град	FS	Состояние	PGA , g	a_c , g	$D_{\max}$, мм	V_{st} , мм/с	$V_{\max}$, мм/с
Серия 1 (частота вибраций $f = 50$ Гц)								
11	37	1.08	Обрушение	0.065	0.040	82.0	0.40–0.50	1.50
16	27	1.56	Стабилизация	0.065	0.210	0.33	< 0.03	0.03
25	30	1.39	>>	0.065	0.160	18.0	0.10	0.12
29	33	1.24	Ускоряющееся скольжение	0.065	0.100	95.0	0.10	0.40
101	35	1.15	Обрушение	0.100	0.074	45.0	$\sim 0.70 - 0.80$	1.50
102	35	1.15	>>	0.200	0.074	37.5	$\sim 0.70 - 0.80$	1.49
105	32	1.29	>>	0.100	0.130	62.5	~ 0.75	1.61
106	30	1.39	>>	0.100	0.160	63.0	~ 0.80	1.46
Серия 2 ($f = 80$ Гц)								
201	33	1.24	Обрушение	0.200	0.100	40.0	~ 0.45	1.40
202	35	1.15		0.200	0.074	80.0	~ 0.30	—
203	35	1.15		0.200	0.074	46.0	~ 0.55	1.35
204	37	1.08		0.200	0.040	$< 10^{**}$	~ 0.55	1.20
205	38	1.03		0.200	—	< 10	~ 0.75	1.40

Примечание. α — угол склона; FS — фактор устойчивости; PGA — максимальные ускорения в волне; a_c — критическое ускорение по квазистатической схеме; $D_{\max}$ — максимальное перемещение блока относительно склона либо перемещение перед динамическим срывом; V_{st} — скорость скольжения блока на стадии установившейся ползучести; $V_{\max}$ — максимальная скорость скольжения блока относительно склона либо скорость скольжения перед динамическим срывом.

В проведенных экспериментах однозначной причиной возникновения неустойчивости являлись низкоамплитудные вибрации. В ряде опытов (11, 101, 102, серия 2) максимальная амплитуда ускорения PGA превышала расчетную величину a_c . Напомним, что, согласно квазистатическому подходу, смещение оползня относительно склона происходит в те моменты времени, когда выполняется условие:

$$PGA > a_c = (FS - 1) \sin \alpha, \quad (2)$$

т. е. максимальное ускорение в волне превышает критическое значение.

Однако в экспериментах относительное движение блока и даже обрушение наблюдались и в тех опытах (№ 16, 25, 29, 105, 106), в которых условие (2) не выполнялось. Это приводит к заключению, что возникновение скольжения под действием малых возмущений связано с нелинейностью реологической зависимости “напряжение – перемещение” для межблокового контакта. Подробно данный вопрос рассмотрен в [10, 14, 15].

Из результатов, полученных в описанной серии экспериментов, следует отметить довольно большое перемещение блока относительно склона, после которого скольжение переходит в динамическую фазу. Полученные значения $D_{\max}$ в десятки миллиметров многократно превышают смещение, при котором происходит переход поверхности скольжения к остаточному сопротивлению сдвигу (трению скольжения), также как и характерный размер перехода к остаточному трению в модели, описываемой в [10]. Следовательно, в критическом смещении заложен иной смысл, нежели переход от трения покоя к трению скольжения. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Опыты продемонстрировали существование некоторого значения средней скорости крипа $V_{\min}$, ниже которого начинается “упрочнение” контакта и блок постепенно останавливается. Судя по результатам (рис. 4), для испытываемой поверхности $V_{\min}$ составляет 0.1 мм/с. При такой скорости блок может скользить с постоянной скоростью весьма длительное время (опыт 29, рис. 3б). Сопоставление кривых б (опыт 29) и в (опыт 25) на рис. 4 демонстрирует одинаковые скорости скольжения и амплитуду перемещения вплоть до момента $t \sim 110$ с. Далее в одном случае началась стабилизация контакта и затухание скорости крипа, в другом — скольжение продолжалось с постоянной скоростью в течение длительного времени, затем перешло в фазу ускоряющегося крипа. Это свидетельствует о влиянии таких факторов, как небольшие вариации угла склона, локальные неоднородности контакта в тех случаях, когда оползень находится в метастабильном состоянии.

Таким образом, для перехода к динамическому ускоряющемуся скольжению необходимо обеспечить как достаточное перемещение, так и необходимую скорость скольжения. Если значение достигнутого перемещения заметно варьируется, то скорость скольжения, после которой начинается стадия динамического срыва, стабильна и составляет ~ 1.5 мм/с (опыты 11, 101 – 106). В то же время в опыте 29 при самом большом значении перемещения во всех экспериментах, скорости скольжения оказалось недостаточно для динамического срыва.

При исследовании процессов деформирования геоматериала с относительно высокими скоростями регулярно отмечается зависимость силы сопротивления сдвигу от скорости деформации. В этих случаях применяются модели динамического снижения трения без детального описания условий на площадке скольжения. Они помогают оценить эффективное сопротивление сдвигу либо через псевдовязкость, определяющую снижение сопротивления сдвигу в условиях сложного динамического процесса, либо через зависимость эффективного коэффициента трения от скорости.

В целом зарождение и эволюция оползня типичны для процессов, описываемых уравнениями теории ползучести. Используя метод разделения компонент деформаций ползучести, полное смещение грунта относительно основания можно представить в виде суммы деформации неустановившейся ползучести $\varphi(t)$, деформации установившейся ползучести $\kappa(t)$ и деформации ускоренной ползучести $w(t)$ [17]:

$$D(t) = \varphi(t) + \kappa(t) + w(t). \quad (3)$$

Хотя вклад слагаемого $\varphi(t)$ чаще всего малозначителен, он важен, например, с точки зрения мониторинга склоновых явлений. Параметры этой псевдовязкой стадии зависят от масштаба явления. Снижение эффективной вязкости с ростом скорости деформации отмечается для разных геологических объектов от образцов до континентов [18]. В [19, 20] демонстрируется, что при высоких скоростях деформации эффективная вязкость обратно пропорциональна скорости деформации и этот эффект связывается с наличием в геосреде неоднородностей разных иерархических уровней.

На второй стадии установившейся ползучести скорость деформации практически неизменна, т. е. амплитуда смещения пропорциональна времени. Длительность данной стадии зависит от уровня приложенных напряжений. Например, в опыте 29 при $FS=1.24$ (рис. 3б) длительность стадии установившейся ползучести в несколько раз выше, чем в опыте 11 ($FS=1.08$, рис. 3а). В механике грунтов эту стадию связывают с пластическим течением грунта [21]. В нашем случае правильнее говорить об установлении равновесия между силой сопротивления сдвигу (сухим трением) и составляющей силы тяжести. Равновесие формируется в результате снижения эффективного коэффициента трения при воздействии вибраций (рис. 5б). После выключения вибратора блок останавливается. Наклон заднего фронта ступеньки оказывается одним и тем же для всех циклов, поскольку определяется квазистатическим коэффициентом трения. В [22] отмечается, что микроподвижки при динамических воздействиях из-за нелинейности зависимости жесткости межблокового контакта от накопленной деформации приводят к изменению силы сопротивления сдвигу и, как следствие, к возникновению медленного движения. Подчеркнем, что сила трения возникает лишь при скольжении тела и “мобилизуется” до значения, достаточного для установления равновесия. Причем при малых перемещениях оно может быть меньше кулоновской прочности. Так, тело, помещенное на наклонную плоскость и лежащее на ней неподвижно, требует для своего равновесия включения сил трения. Однако сила трения возникает только в движении, а значит, тело на наклонной плоскости должно, хоть и медленно, но ползти. Динамика этого равновесия рассмотрена в [23].

Особый интерес представляет третий этап эволюции оползня — стадия ускоряющегося движения и динамический срыв. Согласно [24], аналогичный участок ускоряющейся ползучести предлагается описывать функцией:

$$D(t) = \frac{C}{(t_* - t)^k} + b, \quad (4)$$

где C , t_* , b — параметры, зависящие от материала и уровня нагрузки.

В настоящих экспериментах зависимости смещения блока под действием вибраций хорошо описываются соотношениями типа (3), (4). Например, для эксперимента 11 аппроксимация результатов измерений показана на рис. 3а сплошной линией, которая описывается уравнением:

$$D = 3 \left(1 - \exp \left(-\frac{t-10}{1} \right) \right) + 0.43(t-10) + \frac{50}{165-t}, \quad (5)$$

где время t измеряется в секундах, амплитуда смещения — в миллиметрах.

При описании ускоряющейся ползучести в механике материалов применяется кинетическая теория ползучести, развитая Л. М. Качановым и Ю. Н. Работновым [24, 25]. Вводимый в этих случаях параметр поврежденности определяется в ходе специальных исследований структуры материала.

В проведенных экспериментах (серия 2) прецизионные измерения перемещений в процессе старта, разгона и торможения блока позволили выявить один из возможных механизмов потери устойчивости гравитационным оползнем под воздействием низкоамплитудных сейсмических колебаний. Анализ показывает, что в условиях проведенных лабораторных экспериментов на этапе ускоряющейся ползучести важнейшим является эффект снижения трения с ростом скорости.

Аппроксимация зависимости скорости скольжения $u(t) = dD(t)/dt$ от времени на заключительной стадии (рис. 5з) отрезками кусочно-гладких линейных функций позволяет приближенно оценить среднее ускорение блока $\bar{a}_b(\Delta t)$ на каждом коротком интервале времени Δt . После начала безостановочного скольжения блока по склону в каждый момент времени выполняется соотношение

$$g \sin \alpha - g \cos \alpha [\mu - d\mu(v)] - \bar{a}_b = 0, \quad (6)$$

где μ — эффективный коэффициент трения при медленном скольжении блока; $d\mu$ — его вариация с изменением скорости скольжения.

При записи соотношения (6) мы в первом приближении пренебрегли сцеплением, значение которого мало по сравнению с силой трения между блоком и поверхностью склона. Соответственно, $\mu - d\mu = \tan \alpha - [\bar{a}_b / (g \cos \alpha)]$ и с точностью до константы $d\mu = \bar{a}_b / (g \cos \alpha)$.

Таким образом, рассчитывая по результатам измерений $D(t)$ величины $\bar{a}_b(t)$ и $u(t)$ можно, исключая время, построить зависимость вариации коэффициента трения от скорости скольжения $d\mu(u)$. На рис. 6 видно, что вариация коэффициента трения пропорциональна скорости скольжения и при $u \sim 0.1 - 0.2$ м/с достигает $d\mu \sim 0.020 - 0.045$.

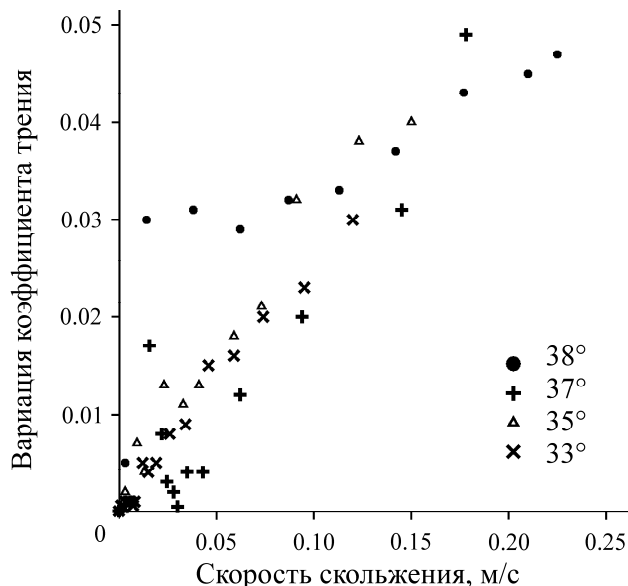


Рис. 6. Зависимость вариации коэффициента трения от скорости скольжения при безостановочном скольжении блока по поверхности склона

При рассмотрении медленных движений в массиве горных пород коэффициент трения принимается как коэффициент пропорциональности между предельным сдвиговым напряжением и нормальным напряжением на площадке скольжения. По результатам многих лабораторных исследований трения в интересах механики очага землетрясения снижение значений

сухого трения регистрируется уже при скоростях в несколько сантиметров на секунду, а в некоторых случаях на 1–2 порядка ниже [26]. Как правило, эти результаты получают в режиме прерывистого скольжения при резкой смене скорости нагружения, тогда как для склоновых явлений эффекты снижения трения до сих пор обсуждались лишь для крупных дальнепробежных лавин объемами свыше 10^6 м^3 [8]. Согласно полученным результатам, эффект снижения трения с ростом скорости скольжения может оказаться важным и для склоновых явлений меньшего объема. Установление причин и описание феноменологии этого интересного явления требует дальнейшего изучения.

ВЫВОДЫ

Для описания движения при высоких скоростях деформации предполагается, что сила сухого трения зависит от скорости и амплитуды сдвига. По результатам проведенных лабораторных экспериментов необходимыми условиями возникновения динамического обрушения являются превышение некоторого критического значения смещения относительно склона и достижение определенной средней скорости крипа, которая в модельных экспериментах составила $\sim 1.5 \text{ мм/с}$. Критическое смещение оказывается существенно больше, чем характерный размер, при котором происходит переход поверхности скольжения к остаточному сопротивлению сдвигу. При нахождении сползающей массы в метастабильном состоянии сценарий дальнейшего развития процесса может определяться локальными факторами — небольшими вариациями угла склона, неоднородностями контакта и т. д.

Один из возможных механизмов потери устойчивости гравитационным оползнем под воздействием низкоамплитудных сейсмических колебаний — снижение трения с ростом скорости скольжения на этапе ускоряющейся ползучести. Этот механизм может оказаться существенным, в том числе и для оползней относительно небольшого объема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М.: Недра, 1965. — 378 с.
2. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Лукичев С. В. Новая концепция разработки месторождений глубокими карьерами // Горн. журн. — 2009. — № 11. — С. 7–11.
3. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Зуев Б. Ю., Павлович А. А. Влияние землетрясений на устойчивость бортов карьеров // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 3–19.
4. Цирель С. В., Павлович А. А. Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горн. журн. — 2017. — № 7. — С. 39–45.
5. Keefer D. K. Landslides caused by earthquakes, GSA Bulletin, 1984, Vol. 95, No. 4. — P. 406–421.
6. Newmark N. M. Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique, 1965, Vol. 15, No. 2. — P. 139–160.
7. Храмцов Б. А., Бакарас М. В., Кравченко А. С., Корнейчук М. А. Управление устойчивостью отвалов рыхлой вскрыши железорудных карьеров КМА // ГИАБ. — 2018. — № 2. — С. 66–72.
8. Scheidegger A. E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides, J. Rock Mech., 1973, Vol. 5, No. 4. — P. 231–236.
9. Lucas A., Mangeney A., and Ampuero J. P. Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies, Nature Communications, 2014, Vol. 5, No. 3417. — P. 1–9.
10. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 423 с.

11. **Melosh H. J. and Ivanov B. A.** Impact crater collapse, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1999, Vol. 27, No. 1. — P. 385–415.
12. **Boyce J. M., Mougini-Mark P., and Robinson M.** The Tsiolkovskiy crater landslide, the moon: An LROC view, *Icarus*, 2020, Vol. 337, 113464. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.113464.
13. **Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Шарафиев З. З.** Лабораторное исследование устойчивости горных склонов при динамических воздействиях // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 95–109.
14. **Садовский М. А., Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х., Саломов И. Г.** Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // *Физика Земли*. — 1981. — № 5. — С. 32–42.
15. **Бобряков А. П., Косых П. В., Ревуженко А. Ф.** Об эволюции напряженного состояния сыпучей среды при многократных динамических воздействиях // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2016. — Т. 3. — № 1. — С. 18–22.
16. **Машинский Э. И.** Проявления динамической микропластичности при распространении продольной волны в горной породе // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 31–40.
17. **Самарин Ю. П.** Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами. — Куйбышев: КГУ, 1979. — 84 с.
18. **Христофоров Б. Д.** Исследование реологических характеристик твердых тел в широком диапазоне времен деформирования // *Физ. мезомеханика*. — 2010. — Т. 13. — № 3. — С. 111–115.
19. **Ци Ч. Ч., Ван М., Цянь Ц., Чень Ц.** Структурная иерархия и механические свойства горных пород. Ч. I. Структурная иерархия и вязкость // *Физ. мезомеханика*. — 2006. — Т. 9. — № 6. — С. 29–39.
20. **Qi C., Haoxiang C., Bai J., Qi J., and Li K.** Viscosity of rock mass at different structural levels, *Acta Geotechnica*, 2017, Vol. 12. — P. 305–320.
21. **Месчан С. Р.** Экспериментальная реология глинистых грунтов. — М.: Недра, 1985. — 342 с.
22. **Кочарян Г. Г., Костюченко В. Н., Павлов Д. В.** Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // *Физ. мезомеханика*. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 5–22.
23. **Садовский М. А., Родионов В. Н., Сизов И. А.** Критерии подобия и дезинтеграции медленно деформируемых твердых тел // *ДАН*. — 1995. — Т. 341. — № 5. — С. 686–688.
24. **Работнов Ю. Н.** Проблемы механики деформируемого твердого тела: избранные труды. — М.: Наука, 1991. — 196 с.
25. **Качанов Л. М.** Теория ползучести. — М.: Физматгиз, 1960. — 456 с.
26. **Кочарян Г. Г.** Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // *Физика Земли*. — 2021. — № 4. — С. 3–41.

Поступила в редакцию 01/III 2022

После доработки 10/III 2022

Принята к публикации 14/III 2022